

На правах рукописи

Романов Владимир Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НЕФТЕДОБЫЧИ С
ПОГРУЖНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2018

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Гольдштейн Валерий Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, кафедра «Автоматизированные электроэнергетические системы», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Официальные оппоненты: **Нурбосынов Дуйсен Нурмухамедович**, доктор технических наук, профессор, кафедра «Электро- и теплоэнергетика», ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт», г. Альметьевск.
Доманов Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»**, г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится 26 февраля 2019 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 при ФГБОУ ВО «СамГТУ» по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, корпус №1, ауд. №4а.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, 18, корпус №1, а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <http://d21221704.samgtu.ru>

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; тел.: (846)278-44-96, факс: (846)278-44-00, e - mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.04



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Традиционно в экономике Российской Федерации нефтедобывающая отрасль является стратегически важной частью. В последние десятилетия происходит интенсивное освоение новых и эксплуатация действующего фонда месторождений. В существующих экономических и хозяйственных условиях функционирования оборудования нефтедобывающей отрасли можно выделить ряд особенностей: – в большинстве регионов России более 80% добычи нефти производится с помощью ЭКПЭД – электротехнических комплексов с погружными электродвигателями (ПЭД), которые являются их основной технологической составляющей; – увеличилась трудоемкость процесса извлечения углеводородов из недр; – многолетняя эксплуатация нефтяных месторождений привела к увеличению обводненности скважинной продукции; – по данным эксплуатации отмечается очевидный рост рисков технологических нарушений в составляющих ЭКПЭД и др.

В настоящее время в российских предприятиях нефтедобычи (ПН) отрасли еще во многом сохранились исторически сложившиеся ранее отношения финансово-хозяйственного механизма, которые не отвечают современным экономическим условиям. Это, с одной стороны, является основной причиной дисбаланса в формировании, эффективном использовании и развитии производственных активов, а, с другой, – приводит к росту, до критических значений (более 60÷70%), износа оборудования ЭКПЭД и, в частности, ПЭД. Названный дисбаланс находит отражение в уменьшении межремонтного периода, повышении количества преждевременных отказов составляющих ЭКПЭД, сокращении их индивидуальных ресурсов, способности выполнения регламентированных эксплуатационных функций.

Для решения этих вопросов необходим полномасштабный анализ действующих условий эксплуатации и причин технологических отказов с целью установления обоснованных требований к надежности и экономичности функционирования как погружного скважинного оборудования, так и наземной инфраструктуры. При этом необходимо учитывать режимы работы и условия эксплуатации ЭКПЭД, работающие в экстремальных условиях под влиянием разнообразных внутренних и внешних эксплуатационных физических воздействий (ЭФВ).

Сказанное выше позволяет констатировать *актуальность проблемы повышения эффективности эксплуатации*, как снижения затрат на корректное с технико-экономической точки зрения функционирование ЭКПЭД и улучшения его технологических показателей.

Фундаментальный вклад в решение проблемы исследования режимов работы, оптимизации технического обслуживания, ремонта и диагностики электрооборудования нефтяных месторождений внесли следующие известные ученые и исследователи: Абдулаев Р.К., Арбузов В.Н., Ахмадуллин К.Р., Бабаев С.Г., Байков И.Р., Белоусенко И.В., Богданов Е.А., Гафаров А.Р., Гирфанов А.А., Гольдштейн В.Г., Ершов М.С., Идиятуллин Р.Г., Ковалев А.Ю., Ковалев Ю.З., Мамедов О.Г., Меньшов Б.Г., Нурбосынов Д.Н., Полищук В.И., Пухаль-

ский А.А., Салахов А.Х., Смородов Е.А., Стариков А.В., Сушков В.В., Табачникова Т.В., Фролов В.П., Халилов Ф.Х., Яризов А.Д.

Объектом исследования являются действующие электротехнические комплексы нефтедобычи с погружными электродвигателями.

Предметом исследования являются теоретические и практические аспекты жизненного цикла ЭКПЭД, оценка их эксплуатационного состояния и минимизации рисков технологических нарушений (отказов).

Методы научных исследований. Для решения задач работы использовались методы математического анализа, математической статистики, теорий вероятностей, надежности, рисков, экономического менеджмента качества математического и статистического моделирования.

Цель диссертационной работы. Повышение эффективности эксплуатации электротехнических комплексов нефтедобычи с ПЭД.

Для реализации обозначенной цели исследования были поставлены следующие **задачи исследования**.

1. Обоснование процесса и модели накопления повреждений ЭКПЭД от внутренних и внешних ЭФВ, анализ условий эксплуатации и технического состояния ЭКПЭД.
2. Статистическое моделирование отказов и уровней эксплуатационной эффективности ПЭД.
3. Разработка и исследование математической модели эксплуатационной эффективности ПЭД на основе структурно-функционального моделирования и прогнозирования остаточного ресурса ПЭД.
4. Разработка методики управления рисками технологических нарушений ЭКПЭД ПН на основе инженерных методик менеджмента качества.
5. Анализ рентабельности и экономической эффективности от внедрения разработанных методов повышения эксплуатационной эффективности ЭКПЭД ПН.

Научная новизна.

1. Математические модели накопления повреждений, старения и отказов ПЭД от различных ЭФВ по актуальным данным эксплуатации ПН.
2. Вероятностно-статистические модели оценки ресурсов ПЭД.
3. Математическая модель вероятности возникновения отказа ПЭД и его элементов, полученная на основании структурно-функционального моделирования и разработанной методики оценки индивидуального остаточного ресурса.
4. Методика оценки эффективности эксплуатации и управления рисками технологических нарушений на ПН, основанная на использовании теории менеджмента качества.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Вероятностные модели отказов ПЭД по актуальным статистическим данным эксплуатации ПН.
2. Статистическая эмпирическая оценка остаточного ресурса ПЭД.
3. Математическая модель вероятности отказа ПЭД и его элементов, полученные на основании структурно-функционального моделирования.
4. Оценка производственных рисков ПН в части ПЭД и в целом ЭКПЭД.

5. Анализ повышения эффективности эксплуатации ЭКПЭД в результате применения предложенных мероприятий на примере АО «Самаранефтегаз».

Практическую значимость работы определяют следующие положения.

1. Локализация «узких мест» в эксплуатации ПЭД по результатам анализа и обработки статистических данных ПН в части ЭКПЭД для улучшения организации и планирования ремонтов, технического обслуживания, комплексной модернизации устаревшего оборудования и комплектования аварийного резерва.

2. Коррекция и оптимизация системы ТОиР и руководящих документов о порядке продления срока эксплуатации ЭКПЭД и ПЭД сверх амортизационного ресурса на основе уточненных законов распределений, плотностей и функций распределений наработки на отказ, полученных на основе результатов обработки актуального статистического материала по отказам ЭКПЭД ПН для наиболее распространенных типов ПЭД (ПЭД-32, ПЭД-45, ПЭД-56, ПЭД-63) различных модификаций.

3. Определение влияния дефектов на эффективность эксплуатации, прогнозирование потенциально возможных отказов, их причин и последствий, а также состава мероприятий для уменьшения вероятности их появления и устранения.

Соответствие работы разделам паспорта специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» (далее выдержки из паспорта специальности). «...Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем (п. 1); «...исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях» (п. 4); «...разработка безопасной и эффективной эксплуатации, утилизации и ликвидации электротехнических комплексов и систем после выработки ими положенного ресурса» (п. 5).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы переданы для внедрения в АО «Самаранефтегаз», ОАО «Удмуртнефть» и используются в учебном процессе в вузах. Документы представлены в приложениях.

Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «АЭЭС» СамГТУ; на XIII Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» (Самара, 2016г.); на VIII Международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Самара, 2017г.); на XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (Казань, 2017г.); на XI Международной IOP научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2017г.); на XIII Молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2018г.).

Личный вклад автора заключается в формулировке и выполнении основных задач исследования, сборе и анализе статистических данных эксплуатации, определение основных положений научной новизны и практической значимо-

сти, разработке модели, выполнении расчетов, создании и описании методики оценки рисков технологических нарушений на ЭКПЭД ПН.

Достоверность полученных результатов работы подтверждается корректным использованием соответствующего математического аппарата, вычислительных программных комплексов, обоснованностью принятых допущений и подтверждается удовлетворительным совпадением результатов расчетов и экспериментальных данных.

Результаты исследования прошли рецензирование в составе публикаций в научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ. Статистический материал по нарушениям и отказам погружного оборудования получен из производственной базы данных АО «Самаранефтегаз».

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 12 печатных работах, из них 4 - статьи в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, 1 работа в издании, индексируемом в базе Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Основная часть исследования изложена на 146 страницах и содержит 40 рисунков, 20 таблиц и 5 приложений. Библиографический список состоит из 150 наименований на 17 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, посвященной повышение эксплуатационной эффективности электротехнических комплексов нефтедобычи с ПЭД. Сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость диссертации.

Первая глава содержит оценку актуальности задач исследования, обзор и анализ известных работ по данной проблеме, обработку и анализ статистической базы по технологическим нарушениям на ЭКПЭД ПН.

Рассмотрены технологии и технические средства подъема на поверхность нефтяной смеси, дана их краткая характеристика и сравнение. В результате критического анализа установлено, что на данный момент самым перспективным и получившим наибольшее распространение является насосный или механизированный способ добычи. Выполнена краткая характеристика видов, исполнения глубинно-насосных установок мехдобычи, получивших распространение в мировой практике нефтедобычи. Среди них наибольшее распространение, в том числе и в нашей стране, получили ЭКПЭД, основным элементом которых являются ПЭД. ЭКПЭД представляет собой комплекс технологически взаимосвязанного наземного и подземного оборудования. К наземному оборудованию относятся: комплектная трансформаторная подстанция 6(10)/0,4кВ; станция управления; повышающий трансформатор $0,4/U_{\text{раб.}}$ кВ; кабельная эстакада и др. Из основных узлов подземного оборудования можно выделить: ПЭД; гидрозащиту; электроцентробежный насос (ЭЦН); погружную кабельную линию (ПКЛ); насосно-компрессорные трубы (НКТ) и др.

При эксплуатации ЭКПЭД происходит снижение, либо полная потеря заложенных при проектировании свойств, характеристик и, как следствие, работоспособности. Это происходит под воздействием и влиянием энергии электромагнитных, термических, механических, гидродинамических и других эксплуатационных физических воздействий. В работе представлен математический аппарат и описаны законы износа и накопления повреждений в ЭКПЭД, а именно: линейное суммирование повреждений, в общем виде математическая модель (ММ) имеет вид:

$$D_n = \sum_{k=1}^n \Delta D_k, \quad (1)$$

где D_n – величина, характеризующая величину меры повреждения ЭКПЭД после окончания n -го цикла; ΔD_k – неисправность на k -м цикле. Рассмотрены случаи для дискретных и непрерывных ЭФВ.

Нелинейный процесс накопления повреждений, основанный на гипотезе об автомодельности события имеет ММ:

$$D(t) = g[\overset{\vee}{D}(t)], \quad (2)$$

где $D(t)$ – скалярная функция, описывающая повреждения, накопленные в элементах ЭКПЭД в процессе ЭФВ, $g(u)$ – непрерывная функция, которая удовлетворяет условиям $g(0)=0$, $g(1)=1$.

Для закона нелинейного суммирования повреждений ММ имеет вид:

$$D(t) = \{[D(t_{k-1})]^{\frac{1}{\gamma(e_k)}} + \Delta t_k / T_b(e_k)\}^{\gamma(e_k)}, \quad (3)$$

где e_k – ступенчатое изменение ЭФВ на элемент ЭКПЭД; Δt_k – продолжительность каждого ЭФВ, γ – положительный показатель степени; $T_b(e)$ – величина, равная ресурсу при стационарном режиме ЭФВ с заданным значением вектора e (причем $T_b(e) = 1/f(e)$).

Многостадийная модель накопления повреждений представлена в (4):

$$\begin{aligned} \frac{T_{b1}(e_2)}{T_{b2}(e_2)} \frac{\Delta t_1}{T_{b1}(e_1)} + \frac{\Delta t_2}{T_{b2}(e_2)} &= 1; \Delta t_1 < T_{b1}(e_1); \\ \frac{\Delta t_1}{T_{b2}(e_1)} + \frac{T_{b2}(e_1) - T_{b1}(e_1)}{T_{b2}(e_2) - T_{b1}(e_2)} \frac{\Delta t_2}{T_{b2}(e_1)} &= 1; \Delta t_1 \geq T_{b1}(e_1), \end{aligned} \quad (4)$$

где T_1 – продолжительность 1-го цикла, T – величина полного ресурса, выражения, связывающие продолжительность этапов ЭФВ Δt_1 и $\Delta t_2 = T - \Delta t_1$.

По результату изучения законов износа и накопления повреждений в ЭКПЭД сделан вывод, что адекватная аналитическая ММ может быть сформирована только с существенными допущениями и упрощениями. Поэтому названным практическим инструментом анализа работоспособности ЭКПЭД может служить статистическая модель, фактической базой которой является обобщенная статистическая информация об аварийности ЭКПЭД на определенном интервале эксплуатации и возможность дифференцированного разделения этой информации по элементам ЭКПЭД.

Для детального исследования, получения сведений о состоянии ЭКПЭД и его элементов были собраны, проанализированы, и верифицированы дефекты, возникающие в процессе эксплуатации и приводящие к останову процесса нефтедобычи. Исходной базой послужили акты расследования причин технологических нарушений на ПН Поволжья за период с 2013 по 2017 года. Обработка и визуализация статистического материала выполнялась с использованием инженерных методик и инструментов системы менеджмента качества основной из которых является практический метод анализа причинно-следственных связей или диаграмма К. Исикава, результат представлен на рисунке 1.

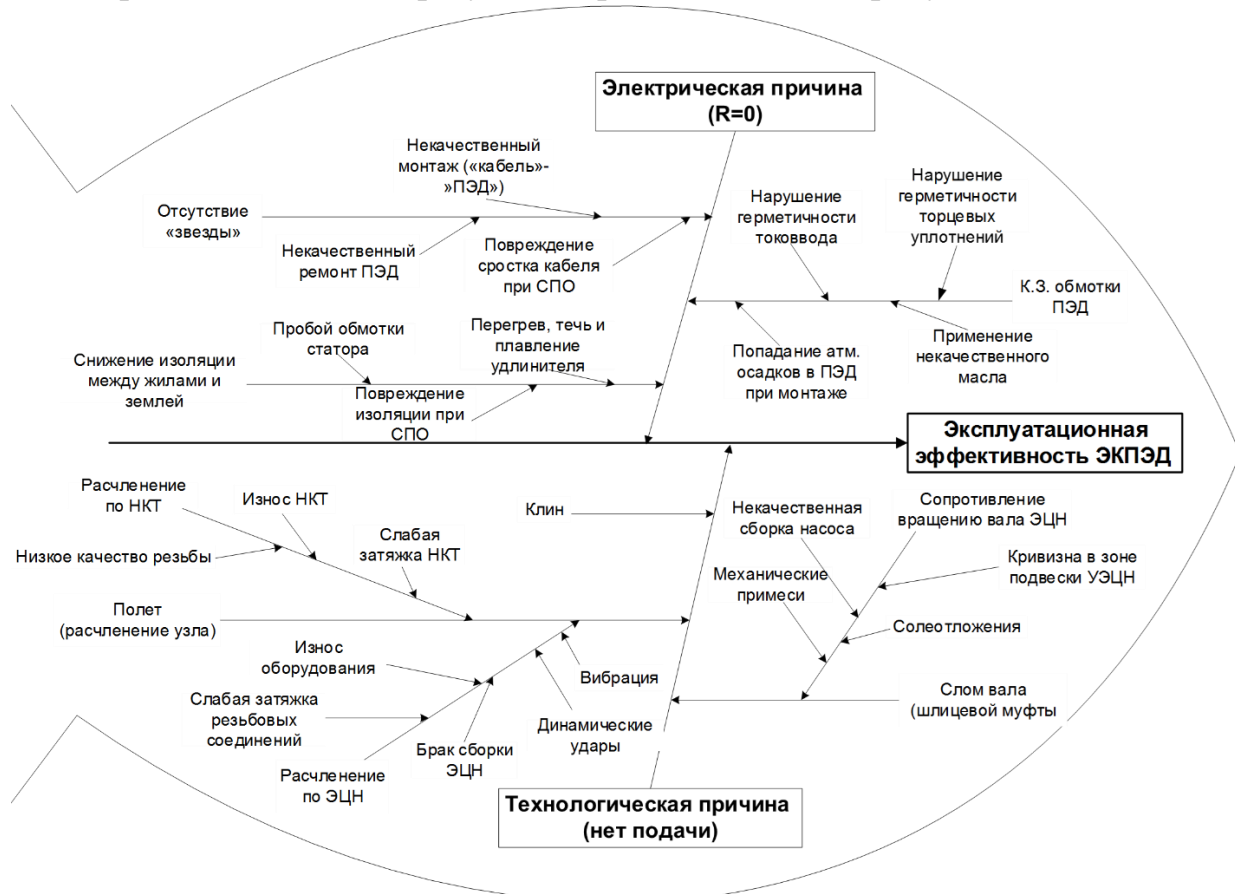


Рисунок 1 - Диаграмма причинно-следственной связи для оценки составляющих эксплуатационной эффективности ЭКПЭД

Анализ полученных результатов (рисунок 1), обзор известных исследований и опыта эксплуатации ЭКПЭД показывают, что на подземную часть приходится наибольшее количество отказов. Отказы в работе наземной части ЭКПЭД носят разовый характер и, как правило, связаны с отказами подземной части. Поэтому дальнейшее исследование будет направлено на обзор и анализ статистики отказов ЭКПЭД, а именно ПЭД, как наиболее ненадежных элементов системы, разработки методик и алгоритмов по повышению эффективности их эксплуатации.

Произведена выборка технологических нарушений по группам, в зависимости от отказавшего узла элементов конструкции ЭКПЭД за актуальный период наблюдений с 2013 по 2017 года и построена диаграмма количества отказов с распределением по элементам конструкции ЭКПЭД (рисунок 2). В тексте

диссертации детально рассмотрены отказы каждого из узлов ЭКПЭД, приведенных на рисунке 2, дано сравнение их наработки на отказ за рассматриваемый период до и после проведения ремонта.

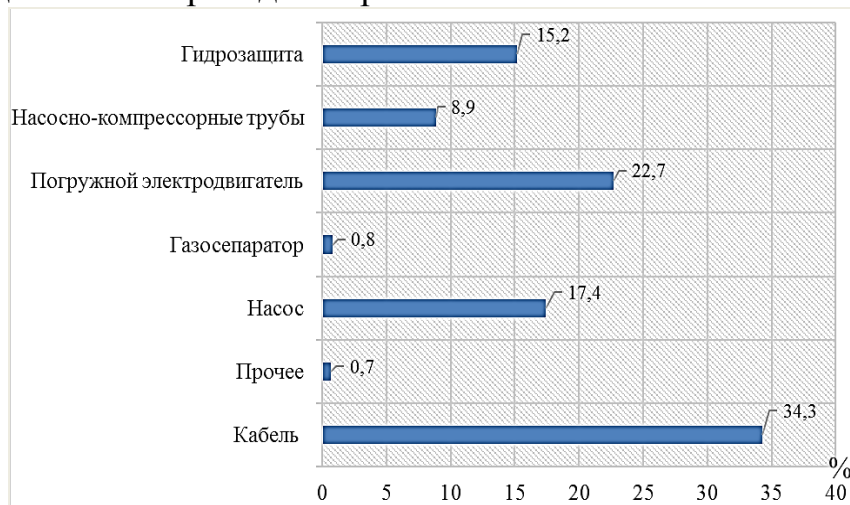


Рисунок 2 - Диаграмма количества отказов с распределением по элементам конструкции ЭКПЭД (все значения в %)

Результаты интеллектуального анализа статистического материала по отказам ЭКПЭД и ПЭД, в частности, приведенные на рисунках 1, 2 автореферата, позволили идентифицировать существующие проблемы в эксплуатации и послужили базой для проведения дальнейшего исследования.

Во второй главе выполнен стохастический анализ технологических нарушений, связанных с ПЭД, построены вероятностно-статистические модели наработки на отказ для принятых условных групп ПЭД, получено дифференциальное уравнение продолжительности жизненного цикла в зависимости от технического состояния ПЭД, построены кривые оценки остаточного ресурса ПЭД.

Для исследования были использованы данные по технологическим нарушениям, произошедшим на погружном электрооборудовании ПН Поволжья за 5-ти летний период с 2013 по 2017 года.

С целью структурирования обработанной статистической информации и установления общих параметров ПЭД при анализе данных по отказам, произведена выборка и объединение всего парка ПЭД, охваченных статистикой, в общие группы. Ключевым параметром при формировании групп служила мощность ПЭД. В результате установлено, что наибольшее количество отказов приходится на группу «ПЭД-45» - 28,7% (2520 отказов), для «ПЭД-32» - 19,5% (1859 отказов), «ПЭД-56» - 19% (1553 отказа), «ПЭД-63» - 11,3% (873 отказа). Данные типы двигателей наиболее распространены в структуре нефтедобычи Поволжья, остальные типоразмеры ПЭД ввиду незначительности объема выборки и возможными статистическими ошибками не рассматривались.

Обработка статистических данных производилась с использованием программных комплексов Microsoft Excel, MathCAD, Statistics 7.0. Задачей данного этапа исследования является анализ наиболее часто используемые законы распределения для нефтяной промышленности и определение какому из них наилучшим образом соответствуют наработки на отказ сформированных групп

ПЭД. Обзор известных исследований показал, что наработка на отказ ПЭД в основном подчиняется следующим законам распределения: Вейбулла, Рэлея, логнормального, нормального и экспоненциального. Можно использовать и другие вероятностные законы, но в этом нет необходимости, поскольку полученные показатели сходимости теоретических законов распределения с эмпирическими подтверждают высокую значимость подобранных вероятностных законов. В работе выполнено вероятностно-статистическое моделирование - построены гистограммы, а также плотности и функции распределения вероятностей отказов для условных групп ПЭД. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты расчетов выбранных законов распределения наработки на отказ ПЭД

Закон распределения	Группы ПЭД	Функция плотности $f(t)$	Значимость (p) по критериям	
			λ – критерий	χ^2 – критерий
Вейбулла	«ПЭД-56»	$f(t) = 0,02117 \cdot t^{-0,3915} \cdot e^{-0,0348t^{0,6085}}$	0,97	0,81
Экспоненциальный	«ПЭД-63»	$f(t) = 0,02877 \cdot e^{-0,02877t}$	0,90	0,32
Логнормальный	«ПЭД-32»	$f(t) = 0,149 \cdot e^{-0,693k} \cdot t^{-1}$ $k = (\ln(t) - 4,899)^2$	0,62	0,41
	«ПЭД-45»	$f(t) = 0,2249 \cdot e^{-0,635k} \cdot t^{-1}$ $k = (\ln(t) - 4,7716)^2$	0,96	0,95

В диссертационной работе понятие «ресурс оборудования» определено как длительность эксплуатации, начиная от рассматриваемого момента времени до достижения оборудованием предельного состояния, и использовано при решении одной из ключевых задач эксплуатации, которой является прогнозирование остаточного ресурса оборудования.

Результаты определения индивидуального остаточного ресурса до следующего ремонта (текущего или капитального) для каждой из условных групп ПЭД показаны на рисунке 3. По аналогии находятся индивидуальные сроки для других профилактических мероприятий. На практике представленные зависимости находят широкое применение, так как позволяют информативно определить качество эксплуатации ПЭД.

Во второй главе представлена схема решения задачи определения продолжительности жизненного цикла ПЭД. В результате комплекса математических преобразований получено дифференциальное уравнение для определения продолжительности жизненного цикла ПЭД в зависимости от его технического уровня.

$$T = T_0 \exp \left[0,5 + \frac{Q_0}{Q(0,5Q_0/Q - 1)} \right], \quad (5)$$

где Q – показатель технического уровня, Q_0 – показатель технического уровня установки прототипа, T_0 – продолжительность жизненного цикла установки прототипа (в данном случае ПЭД).

Используя выражение (5) определена величина индивидуального ресурса для условных групп ПЭД: для группы «ПЭД-32» значение $t = 188$ суток; для группы «ПЭД-45» значение $t = 161$ суток; для группы «ПЭД-56» значение $t = 39$ суток; для группы «ПЭД-63» значение $t = 67$ суток.

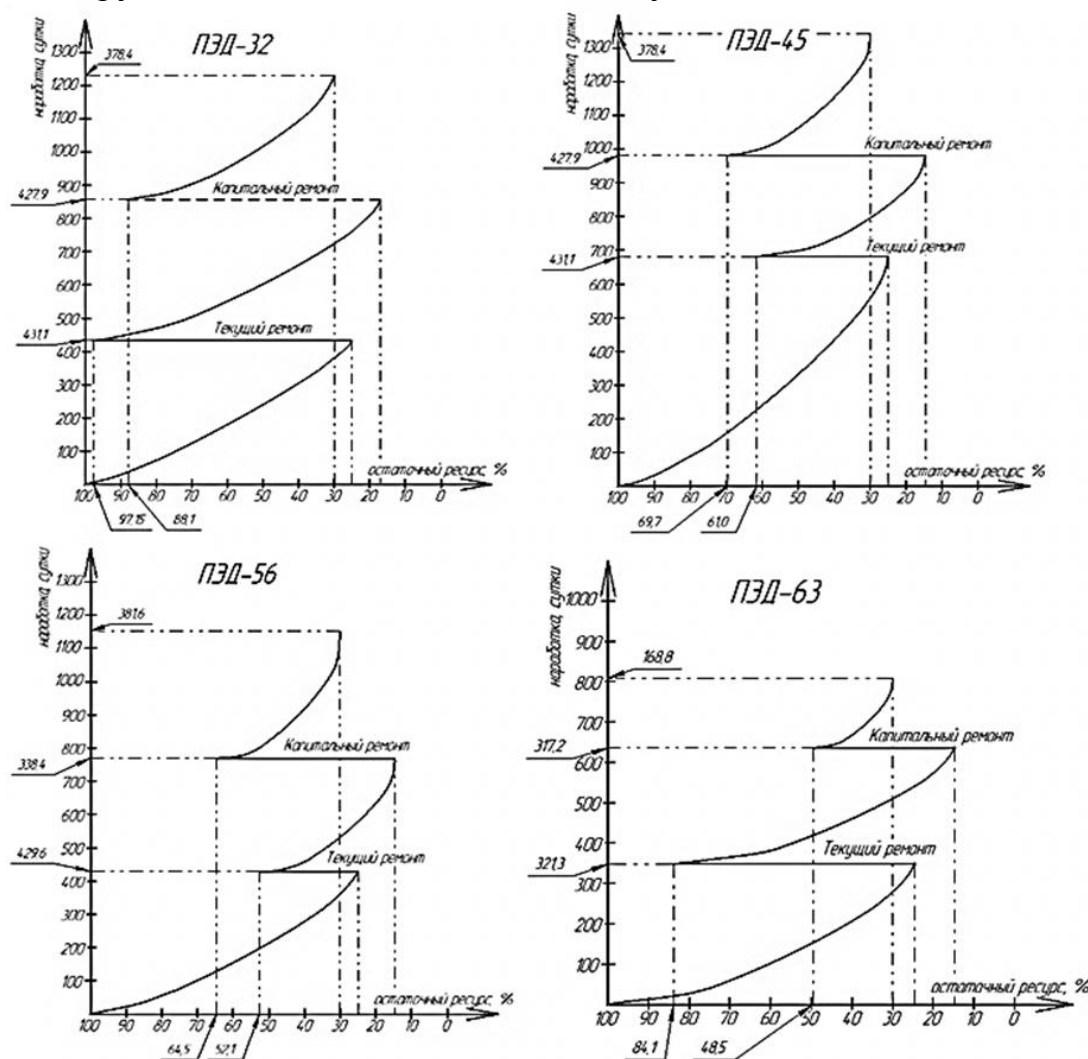


Рисунок 3 - Кривые оценки остаточного ресурса для условных групп ПЭД

В третьей главе выполнено составление и описание структурно-функциональных схем ПЭД на основе свойств их конструкции.

Действующие методы оценки эксплуатационной эффективности и технического состояния ПЭД, основанные на использовании физико-статистических, вероятностно-статистических и структурных характеристик несовершенны и не могут в полной мере удовлетворять предъявляемым к ним требованиям. Среди основных недостатков можно выделить высокий уровень погрешности, вызванный низкой репрезентативностью статистических данных. Поэтому возникает острая необходимость в создании методов оценки эксплуатационной эффективности и технического состояния ПЭД с более точными результатами расчетов, в основу которых положен структурный анализ. К ним можно отнести методологию, основанную на изучении свойств объекта на основе структурно-функционального моделирования.

Анализ конструкции ПЭД позволяет выделить три основные группы элементов с однородными свойствами – детали, соединения различного вида и установочные геометрические параметры, учитывающие взаимное соответствие узлов и деталей. Сущность методики заключается в представлении ПЭД в форме графа, ребра которого имеют не ориентированную форму построения и обозначают конструктивные связи между элементами, вершинами служат выделенные параметры – детали (D_i), соединения (C_j), геометрические установочные параметры (Γ_k). Данная методика позволяет учесть влияние деталей, видов связей между ними (магнитные, механические, все виды контактных соединений) и установленных геометрических параметров ПЭД на эксплуатационную эффективность всей системы.

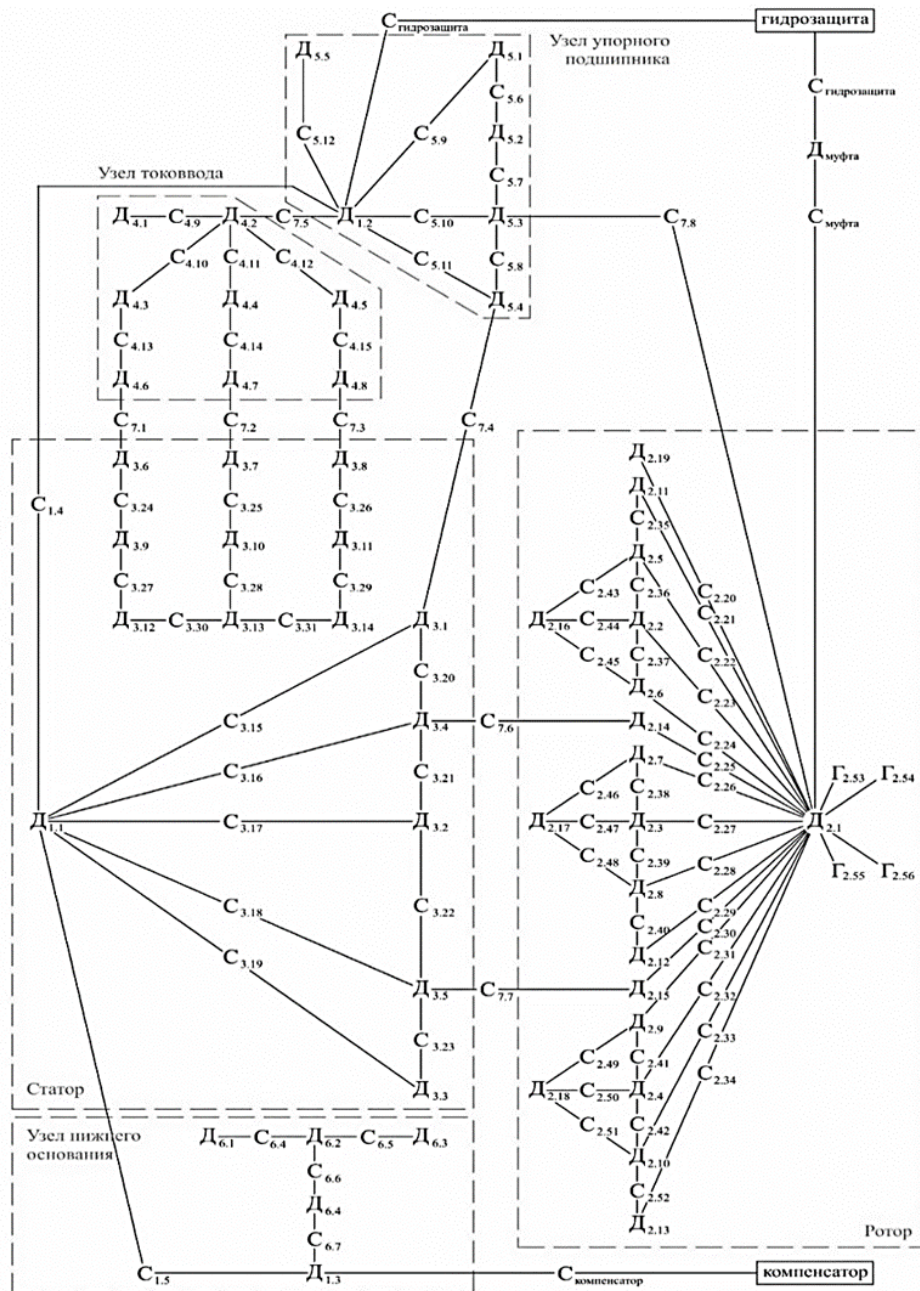


Рисунок 4 - Структурно-функциональная схема ПЭД

В работе приняты допущения: схема возникновения технологических нарушений последовательная; система имеет конечное число элементов; любой из элементов системы с пренебрежимо малой ошибкой может быть адекватно описан стандартной функцией распределения.

На рисунке 4 представлена структурно-функциональная схема ПЭД с повышенным напряжением как самого универсального варианта применения в условиях Поволжского региона, в которой представлены: узел токоввода, узел упорного подшипника, статор, ротор, узел нижнего основания. Эффективность эксплуатации любого узла определяется качеством и состоянием соединения элементов. Поэтому в подсистеме учтены параметры соединений, как важного фактора надежности. Для каждого из описанных элементов конструкции ПЭД составлена математическая модель, позволяющая оценить вероятность возникновения отказа в работе ПЭД с учетом его структурных и функциональных связей, а также конструктивных особенностей.

В результате комплекса преобразований математических моделей узлов ПЭД получено выражение для вероятности возникновения отказа погружного электродвигателя в общей форме:

$$Q(E) = K \cdot Q \left\{ E_1(T) + \sum_{i=2}^5 \prod_{j=1}^{n_i} [1 - Q_{i,j-1} \{E_j(T)\}] \cdot Q_{i,j} [E_j(T)] \right\}, \quad (6)$$

где слагаемое $Q[E_j(T)]$ представляет собой вероятность возникновения отказа для j -го узла, K - коэффициент, определяемый по кривым оценки остаточного ресурса ПЭД, разработанным и составленным во главе 2.

Предложенная методика дает возможность производить оценку эксплуатационной эффективности как ПЭД, так и элементов его конструкции с учетом их остаточного ресурса в процессе эксплуатации, что в корне меняет существующие подходы и делает возможным обнаружить «слабые» элементы конструкции и внести соответствующие коррективы на всех этапах жизненного цикла ПЭД.

В четвертой главе для оценки эксплуатационной эффективности и производственных рисков ПН разработана методика комплексной оценки деятельности ПН, включающая в себя алгоритм, состоящий из инструментов менеджмента качества, таких как диаграмма К. Исикава; метод анализа видов и последствий потенциальных отказов или FMEA анализ; диаграмма Парето, а также выполнен расчет экономической эффективности их внедрения.

На первом этапе исследования для конкретного технического объекта (в данном случае это ЭКПЭД и ПЭД) на основании опыта эксплуатации, предаварийной истории и статистики технологических нарушений в первой главе диссертации было выполнено построение диаграмма К. Исикава. Данная диаграмма позволяет графически установить причинно-следственную взаимосвязь между причинами возникновения отказа ЭКПЭД и ПЭД. В диссертационной работе каждая причина отказа рассмотрена отдельно и подробно описана.

После проведенного анализа и установления причинно-следственной связи между отказом в работе ЭКПЭД и основными дефектами, приводящими к отказу, выполнен мониторинг, позволяющий установить все недостатки эксплуата-

ции оборудования скважины, их причины. Разработаны процедуры в виде корректирующих действий с целью повышения эффективности эксплуатации системы ЭКПЭД и ПЭД. Подробная схема мониторинга приведена в тексте диссертации, в автореферате отсутствует по причине ограниченности объема.

На основании данных диаграммы К. Исикавы составлена и описана методика анализа видов и последствий потенциальных отказов или FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) анализ применительно к ПН.

По результатам FMEA анализа получены экспертные оценки и рассчитано приоритетное число риска (ПЧР) возникновения каждого отказа, позволяющие дать оценку степени влияния факторов на проблему эффективности функционирования ЭКПЭД, на основе следующих основных показателей: значимость причины, частота ее возникновения и вероятность обнаружения. Установлено, что наивысший риск для предприятия с $ПЧР \gg ПЧР_{\text{пр}}$ составляют отказы, связанные с снижением изоляции между жилами и землей ($ПЧР=648$ баллов), К.З. обмотки ПЭД ($ПЧР=576$ баллов) и клин УЭЦН ($ПЧР=336$ баллов).

На основании выполненного анализа и проведенных расчетов по методу FMEA анализа построена диаграмма Парето. Она является графическим отображением правила Парето и показывает, что значительное число несоответствий и дефектов возникает из-за ограниченного числа причин. Правило Парето в краткой форме формулируется как 80 на 20. Например, если применить это правило по отношению к дефектам, то окажется, что 80 процентов дефектов возникает из-за 20 процентов причин. На графике, представленном на рисунке 5 отражены основные причины ранжированные по значимости влияния на отказ в работе ЭКПЭД.

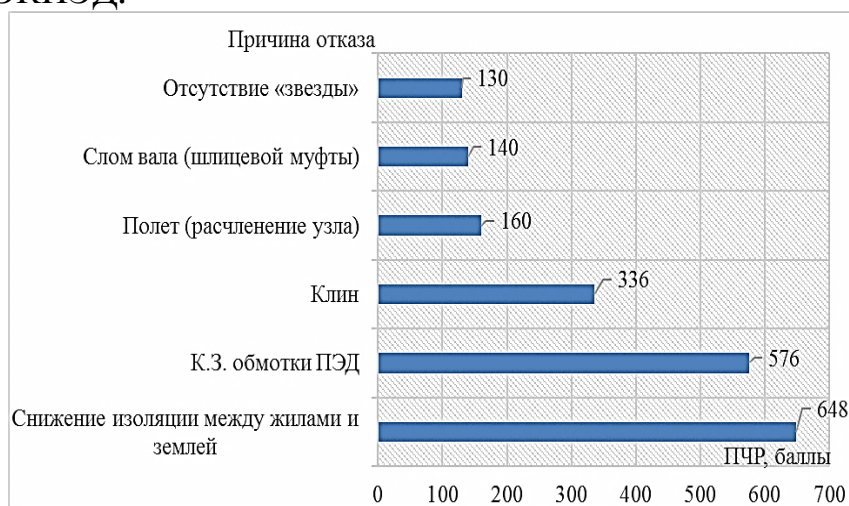


Рисунок 5 – Диаграмма Парето основных причин, влияющих на отказ в работе ЭКПЭД ПН

Примененные инструменты менеджмента качества стратегически направлены на идентификацию узких мест в эксплуатации ЭКПЭД и ПЭД ПН и принятию мер по их оперативному устранению. На основе технических механизмов повышения эффективности эксплуатации ПН, представленных в предыдущих главах, далее предлагаются оптимальные методики и алгоритмы, позволяющие обеспечить снижение аварийности ЭКПЭД и ПЭД.

В существующих экономических условиях сохранения информации и политики конфиденциальности компаний практически невозможно получить данные по экономическим ущербам ПН, вызванным высокими показателями аварийности. Поэтому автор выполняет экономический расчет от внедрения предложенных методик и алгоритмов, основываясь на данных внепланового простоя оборудования ЭКПЭД и известных открытых технико-экономических показателей деятельности конкретного предприятия - АО «Самаранефтегаз». На сегодняшний день 95% добычи нефти в АО «Самаранефтегаз» происходит с помощью ЭКПЭД, приводом которых служат ПЭД. Поэтому представленные показатели деятельности АО «Самаранефтегаз» полностью отражают динамику изменения состояния парка ЭКПЭД и ПЭД за рассмотренный интервал времени с 2015 по 2017 года.

Для отображения степени использования парка оборудования ЭКПЭД в АО «Самаранефтегаз» произведен расчет экстенсивных показателей использования или показателей фонда времени. Полученные значения позволяет охарактеризовать экстенсивность загрузки оборудования ЭКПЭД. Полученное значение коэффициента интенсивной работы ($k_{инт}=0,93$) близко к 100% загрузке оборудования. Однако, величина внеплановых простоев ЭКПЭД так же значительна и составляет, по данным предприятия, от 14-30% фактического времени работы (эффективный фонд времени). В таблице 2 приведены данные по величине внеплановых простоев оборудования ЭКПЭД в АО «Самаранефтегаз» за 2017 год. По представленным данным видно, что за 2017 года оборудование ЭКПЭД внепланово простаивало 2412 часов, что составляет 100 суток. Данная статистика подтверждает факт высокой аварийности, связанной с ЭКПЭД и прежде всего с ПЭД.

Таблица 2 - Данные внепланового простоя ЭКПЭД в АО «Самаранефтегаз» за 2017 год (все значения в часах)

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
148,8	141,2	178,6	172,8	193,4	194,4	208,3	215,7	216	238,1	244,8	260,4

По экономической статистике работы компании АО «Самаранефтегаз», используя метод экспертных оценок, экономического анализа и литературные источники, а также длительный опыт применения FMEA анализа в мировой практике можно утверждать, что в среднем, после проведенного исследования и реализации разработанных мероприятий, гарантируют снижение величины внеплановых простоев ЭКПЭД на 10-14%, что приведет к росту добычи скважинной продукции на 8-10%.

В составе названных мероприятий:

- разработка системы проведения ремонтов на ПН, основанной на объединение стратегий ТОиР по наработке и техническому состоянию;

- повышение эффективности проведения ТОиР с использованием технологий lean-менеджмента;
- разработка процедур корректирующих действий по результатам анализа причинно-следственной связи технологических нарушений с подробным описанием всех отказов;
- разработка схемы мониторинга, посредством которого выявлены все недостатки эксплуатации оборудования скважины и их причины;
- построение статистических моделей отказов ПЭД, позволяющих произвести оценку их технологического ресурса;
- разработка математической модели вероятности возникновения отказа для основных узлов ПЭД и другие, подробно описанные в тексте работы.

Выполнен расчет основных технико-экономических показателей деятельности компании в перспективе на 2018 год, представленный на рисунке 6. Отметим, снижение внеплановых простоев ЭКПЭД до значения 2094 часа или 87 суток. Более значительного снижения внеплановых простоев ЭКПЭД за первый год после оптимизации производства и повышения эффективности эксплуатации ЭКПЭД затруднительно, так как данный процесс требует времени, однако экономический эффект очевиден.

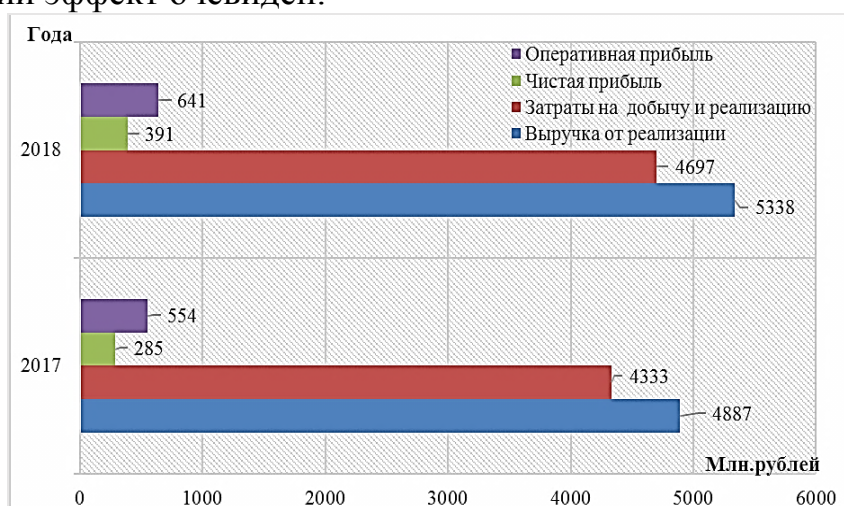


Рисунок 6 – Диаграмма основных технико-экономических показателей деятельности АО «Самаранефтегаз» на 2017-2018 года

Из рисунка 6 видно, что увеличение объемов добычи и реализации нефти на 10% повлекло увеличение размера выручки на 9,2%. Однако стоит отметить, что произошло увеличение затрат на 8,4%. Чистая прибыль выросла в 2018 году на 106 млн. руб., что на 37,1% выше, чем в 2017 году. Рентабельность возросла и составила 7,3%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Получено решение научно технических задач по повышению эффективности эксплуатации электротехнических комплексов нефтедобычи с погружными электродвигателями, заключающееся в следующих положениях:

1. Построены уточненные вероятностно-статистические модели отказов ПЭД по данным эксплуатации ПН Поволжья за 5-ти летний период наблюде-

ний с 2013 по 2017 г. Установлены законы распределения наработки на отказ ПЭД: - Вейбулла - «ПЭД-56» с функцией плотности $f(t) = 0,02117 \cdot t^{-0,3915} \cdot e^{-0,0348t^{0,6085}}$, - экспоненциальный - «ПЭД-63» с функцией плотности $f(t) = 0,02877 \cdot e^{-0,02877t}$, - логнормальный закон - «ПЭД-32» и «ПЭД-45» с функциями плотности $f(t) = 0,149 \cdot e^{-0,693k} \cdot t^{-1}$ и $f(t) = 0,2249 \cdot e^{-0,635k} \cdot t^{-1}$, соответственно.

2. Составлены кривые оценки остаточного ресурса и дифференциальное уравнение для определения продолжительности жизненного цикла ПЭД в зависимости от его технического уровня $T = T_0 \exp[Q - 0,5Q^2 + Q_0(0,5Q_0 - 1)]$. Установлены максимально допустимые величины нормы индивидуального ресурса: для группы «ПЭД-32» - 188 суток, «ПЭД-45» - 161 суток, «ПЭД-56» - 39 суток, «ПЭД-63» - 67 суток. Данные значения свидетельствуют о низкой надежности ПЭД и относят их к категории оборудования с преждевременными отказами (наработка менее 180 суток). Результаты расчетов позволяют уточнить регламенты эксплуатации ПЭД, пересмотреть существующие подходы организации ТОиР и, как следствие, повысить эффективность функционирования оборудования скважины.

3. Выполнено структурно-функциональное моделирование ПЭД, позволяющее оценить эффективность эксплуатации как всей системы, так и отдельных ее звеньев. Полученная структурно-функциональная схема ПЭД использована при построении математических моделей вероятности возникновения отказа для основных узлов ПЭД: нижнего основания, статора, ротора, токоввода, упорного подшипника. Получено выражение для вероятности возникновения отказа ПЭД в общей форме: $Q(E) = K \cdot Q \left\{ E_1(T) + \sum_{i=2}^5 \prod_{j=1}^{n_i} [1 - Q_{i,j-1} \{E_j(T)\}] \cdot Q_{i,j} [E_j(T)] \right\}$. Это дает воз-

можность производить оценку эффективности эксплуатации как ПЭД, так и элементов его конструкции с учетом структурных, функциональных связей, остаточного ресурса и конструкционных особенностей в процессе эксплуатации, что позволяет обнаружить «слабые» элементы конструкции и внести соответствующие коррективы на всех этапах жизненного цикла.

4. Составлена и описана методика анализа видов и последствий потенциальных отказов или FMEA анализ применительно к ПН. Получены экспертные оценки и рассчитано ПЧР возникновения каждого отказа, позволяющие дать оценку степени влияния факторов на проблему эффективности функционирования ЭКПЭД и ПЭД. Установлено, что наивысший риск для предприятия с $ПЧР \gg ПЧР_{\text{гр}}$ составляют отказы, связанные с снижением изоляции между жилами и землей ($ПЧР=648$ баллов), К.З. обмотки ПЭД ($ПЧР=576$ баллов) и клин УЭЦН ($ПЧР=336$ баллов). На основании данных FMEA анализа составлена диаграмма Парето основных причин, влияющих на отказ в работе ЭКПЭД ПН.

5. Достигнута поставленная цель исследования - повышение эффективности эксплуатации ЭКПЭД. В результате разработки методик и алгоритмов по повышению эксплуатационной эффективности ЭКПЭД и ПЭД выполнена их апробация и внедрение в практику эксплуатации предприятия АО «Самаранефтегаз». Предложенные мероприятия привели к сокращению времени внепланового про-

стоя оборудования ЭКПЭД с 2412 часов до 2094 часа в год при коэффициенте интенсивной загрузке 93%, что позволило выполнить расчёт экономической эффективности. Установлено, что чистая прибыль от реализации нефтепродуктов выросла в 2018 году на 106 млн. руб., что на 37,1% выше, чем в 2017 году. Рентабельность производства возросла и составила 7,3%. Таким образом можно сделать вывод, что разработанные и внедренные мероприятия являются эффективными и ведут к качественному и количественному улучшению основных экономических показателей деятельности предприятия.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

1. Романов В.С. Применение механизмов менеджмента качества для повышения надежности эксплуатации электротехнического комплекса погружных установок нефтедобычи / Романов В.С., Гольдштейн В.Г. // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – 2018. - №3 (59). – С.129-142.
2. Романов В.С. Повышение надежности электротехнического комплекса электрооборудования нефтедобычи на основе анализа его аварийности / Романов В.С., Гольдштейн В.Г. // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – 3(40). – С.7-12.
3. Романов В.С. Анализ технического состояния систем передачи и распределения электроэнергии электротехнического комплекса электропогружных установок нефтедобычи / Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Васильева Н.С. // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – 4(49). – С.70-76.
4. Романов В.С. Применение инновационных типов электрооборудования в системах электроснабжения современных мегаполисов / В.Г. Гольдштейн, Д.В. Кузнецов, В.С. Романов // Научн. – техн. журнал, Известия высших учебных заведений «Электромеханика», 2014. – №3. – С.23 – 25.

В издании, индексируемом в международной базе Web of Science.

5. Romanov V.S. The dynamic improvement methods of energy efficiency and reliability of oil production submersible electric motors / V.S. Romanov, V.G. Goldstein: IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. - Volume 944, №012099, conference 1, 2018.

Публикации в других научных изданиях.

6. Романов В.С. Интеллектуальный подход к построению электроснабжения нефтяной отрасли / В.Г. Гольдштейн, В.Д. Можаяев, В.С. Романов : XIII Международная научно-практическая конференция «АШИРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» – Самара: СамГТУ, 2016. – Т. 2 – С. 333-337.
7. Романов В.С. Повышение энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи / В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн : Электроэнергетика глазами молодежи: труды VIII международной молодежной научно-технической конференции. – Самара: СамГТУ, 2017. – Т. 3 – С. 332 –335.
8. Романов В.С. Обзор современного состояния погружных электродвигателей в нефтедобычи с выработкой рекомендаций по повышению энергоэффективности и надежности / В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн : XII Всероссийская откры-

тая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике». – Казань: КГЭУ, 2017. – С. 139 –145.

9. Романов В.С. Методы динамического совершенствования повышение энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи / В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн : Динамика систем, механизмов и машин: динамика электротехнических комплексов и систем. – Омск: ОмГТУ, 2017. – Т. 5, №3 – С.96 –100.

10. Романов В.С. Методология оценки надежности погружного электрооборудования нефтедобычи / В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн : XIII Молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ, 2018. – Т. 5 - С. 209 –212.

11. Романов В.С. Статистический анализ технологических нарушений в эксплуатации погружных электродвигателей нефтедобычи / В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн // «Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика». - 2018. – Выпуск 16. - С. 114-122.

12. Романов В.С. Методология интеллектуального анализа и оценки остаточного ресурса погружных электродвигателей нефтедобычи / Романов В.С., Гольдштейн В.Г. // Интеллектуальная Электротехника. – 2018. – №2(2). – С.15-26.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212. 217. 04

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол № 14 от «24» декабря 2018 г.)

Заказ № . Тираж 100 экз. Формат 60x84/20.

Отпечатано на ризографе.

Издательство Тольяттинского государственного университета

445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.