

Романов В.С., Гольдштейн В.Г.

Самарский государственный технический университет

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕДОБЫЧИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕГО АВАРИЙНОСТИ

Состояние и уровень качества эксплуатации электротехнического комплекса погружного электрооборудования нефтяных месторождений напрямую зависит от безаварийной и надежной эксплуатации составляющих элементов оборудования скважины, в особенности погружных электродвигателей. Погружное электрооборудование (ПЭО) нефтедобычи, в том числе и погружные электродвигатели (ПЭД) при эксплуатации подвержены влиянию обширного количества внешних факторов и воздействий, их эксплуатация сопряжена с разнообразными режимами работы. Для получения сведений о их состоянии используют данные статистики отказов эксплуатации. Можно утверждать, что этот метод анализа состояния объекта является наиболее приемлемым (или даже единственным возможным) для получения, описания и выражения в количественном эквиваленте показателей надежности ПЭО. Для полного представления о текущем состоянии парка ПЭО, в том числе ПЭД, в статье приведены результаты его статистического анализа. На текущий момент произведен сбор и анализ данных по технологическим нарушениям на предприятиях нефтедобычи, сформирована информационная база актуальных (2013–2017 гг.) статистических данных эксплуатации парка погружного электрооборудования крупнейшего нефтедобывающего предприятия Поволжья АО «Самара-нефтегаз». На ее основе, как обобщение и уточнение накопленного ранее и на настоящий момент опыта эксплуатации, с помощью интеллектуального анализа и вероятностно-статистического моделирования произведены систематизация и оценка текущего состояния парка ПЭД, а также определены и ранжированы факторы, приводящие к технологическим нарушениям. Это позволило сформулировать комплекс технических и организационных мероприятий для их минимизации и повышения надежности и эксплуатационной готовности парка ЭПУ и ПЭД.

**Ключевые слова:** погружное электрооборудование, погружные электродвигатели, нефтедобыча, надежность, данные статистики отказов, показатели надежности, наработка на отказ, распределение Вейбула, логнормальное распределение, экспоненциальное распределение.

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экономически эффективной работы электротехнических комплексов (ЭТК) нефтедобычи является реализацией положений Федерального закона «Об электроэнергетике». Это полностью относится к погружным электродвигателям, которые широко используются для откачки нефти из пласта, как на новых месторождениях, так и интенсивно эксплуатируемых длительное время. Ограничения по финансированию, сложившиеся в современных экономических условиях, и недостатки организационно-финансовой системы управления в нефтяной отрасли привели к тому, что износ электропогружных установок (ЭПУ) и ПЭД достиг 70% и более [4, 12].

Это предопределяет необходимость разработки инновационных подходов к применению погружного электрооборудования (ПЭО) на всех этапах его жизненного цикла (ЖЦ) для сбалансированного решения при стратегическом выборе: замена старого ПЭО на новое или полномасштабный ремонт [14].

Решение ключевых задач, связанных с комплексным обеспечением надежности электроснабжения ЭПУ и ПЭД на экономически обоснованном уровне, производится с помощью современных методов и средств повышения надежности работы и совершенствования организации эксплуатации всей системы ПЭО [10]. Они в значительной мере используют известные подходы на основе математического моделирования.

Построение математических моделей в теории и приложениях анализа надежности ЭТК в электриче-

ских сетях и системах электроснабжения (ЭССЭ) производится с помощью вероятностных статистических описаний и распределений [3]. Надежность, как комплекс технических и технологических характеристик ЭССЭ, характеризуют следующие факторы: повреждаемость оборудования (поток отказов), продолжительность бесперебойной работы (наработка на отказ), длительность перерыва питания, ущерб от перерыва питания и др. [15]. Повреждаемость определяется выходом из строя составляющих основного электрооборудования (ЭО) из-за нарушений регламентов эксплуатации, некачественного и несвоевременного технического обслуживания и ремонта (ТОиР), а также профилактики, некорректных и ошибочных действий обслуживающего персонала («человеческий фактор»), опасных внешних и внутренних физических воздействий и пр. [5, 7].

Получение и обработка статистической информации на НГДП необходимы для следующих целей: во-первых, для установления причины технологического нарушения или отказа, устранения этой причины и недопущения схожей неисправности при дальнейшей эксплуатации; во-вторых, для оценки причиненного ущерба, связанного с простоем оборудования и затратами на восстановление и ремонт [13]; в-третьих, для внесения корректив в программы технического обслуживания и ремонта с целью исключения часто выявляемых отказов и нарушений; в-четвертых, для определения наиболее слабых элементов конструкции, снижающих ее надежность и наиболее неблагоприятных режимов работы оборудования; в-пятых, для установления научных и практических требований к уровню надежности НПУ и ПЭД [7], разработанных

на основании статистики нарушений и отказов эксплуатируемого оборудования с целью определения степени риска для действующих установок.

#### АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ НА НГДП

В данной работе информационной базой проведенного исследования является выборка технологических нарушений, связанных с выходом из строя основных узлов ЭПУ на нефтяных месторождениях АО «Самаранефтегаз» за период наблюдений в 2013–2017 гг. Нарушения систематизированы по группам, в зависимости от отказавшего элемента ЭПУ, произведен анализ и построены диаграммы отказов.

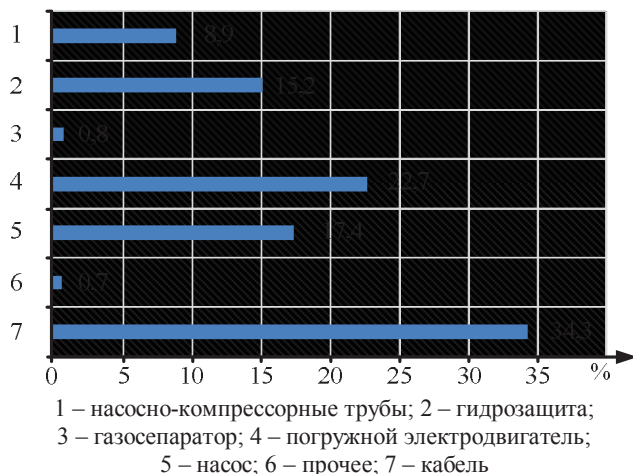
Конкретный пример диаграммы, представленный на **рис. 1**, наглядно иллюстрирует количественное соотношение отказов основных конструктивных элементов ЭПУ. Наибольшее количество отказов приходится на электрическую часть ЭПУ – более 50%. Данная статистика подтверждает информацию из технических литературных источников, что наиболее слабыми элементами системы ЭПУ – скважина являются погружной электродвигатель (22,70% отказов) и погружной кабель (34,30% отказов) [2, 3, 10].

Названные диаграммы позволяют связать временные характеристики отказов и детализацию характера повреждения и вызвавших его факторов, полученные по информационной базе, с типом, причинами и обстоятельствами возникновения отказов для каждого из элементов ЭПУ.

Из-за большого объема фактического материала в данной работе подробно проанализированы отказы, связанные с ПЭД. Для более информативного представления статистических данных и детального анализа отказов целесообразно ввести понятие средней наработки на отказ ( $T$ , измеряемая в сутках), которая определяется как среднее время наработки или, другими словами, продолжительность работы элемента между отказами [5]. Средняя наработка на отказ рассмотрена за 2013–2017 гг.

$$T = \frac{\sum t_{\text{отр}}}{\sum n_{\text{отк}}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{отр}}$  – наработка объекта;  $n_{\text{отк}}$  – число отказов.



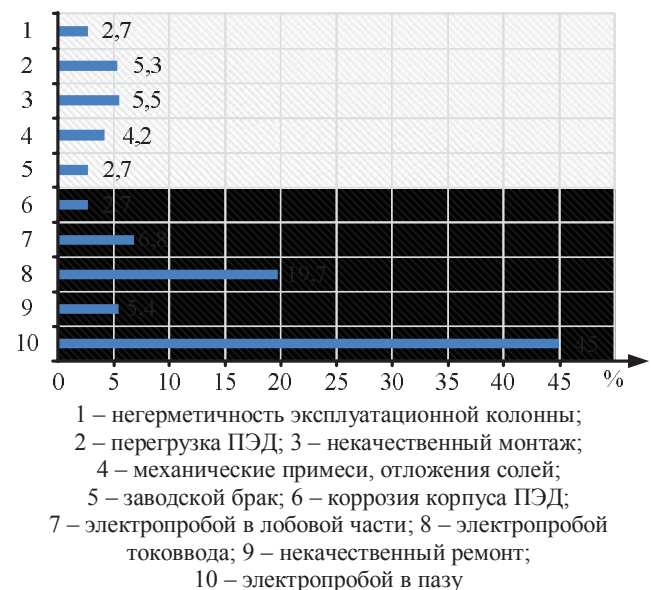
**Рис. 1.** Диаграмма количества отказов с распределением по элементам конструкции ЭПУ (все значения в %)

На **рис. 2** представлена диаграмма характера повреждений ПЭД. Причинами и сопутствующими обстоятельствами выделенных технологических нарушений ПЭД являлись:

- сложные условия эксплуатации при наличии разнородных осложняющих факторов – неоднородный состав и свойства пластовой жидкости в сочетании с разнообразными примесями, кривизна ствола, солеотложения [2] и т.п., которые приводят к засорению УЭЦН, перегрузке ПЭД и отказу;
- значительные размеры конструкции в сочетании с малым поперечным сечением, что приводит к снижению ее жесткости;
- большая глубина спуска УЭЦН по вертикали, высокая температура пластовой жидкости (более 90 град), работа ПЭД с нагрузками близкими или превышающими номинальные [6] приводят к перегреву и отказу;
- нарушение герметичности системы «кабель-ПЭД-гидрозащита»;
- коррозия составных элементов УЭЦН и ПЭД [3];
- недостаточный приток по причине заведомого спуска ЭПУ большего типоразмера, чем производительность скважины;
- несоответствие параметров ПЭД и насоса.

Из **рис. 2** видно, что основную долю технологических нарушений составляют: электропробой обмотки в пазу статора – 45% (у некоторых типоразмеров до 61%) [5], электропробой токоввода – 19,7%. Невозможно не отметить тот факт, что на долю некачественного ремонта (5,4%) и некачественного монтажа (5,5%) ПЭД приходится порядка 11% от общего количества повреждений.

В результате длительной эксплуатации наибольшее количество повреждений диагностировано в лобовых частях, в токовводе или в пазу обмотки ПЭД. Повреждения в лобовых частях, как правило, возникают в результате механических повреждений изоляции при намотке или сборке электродвигателя [7, 16]. Также к пробоем могут привести механические включения в самой изоляции, что является следствием заводского брака или низкого качества материалов.



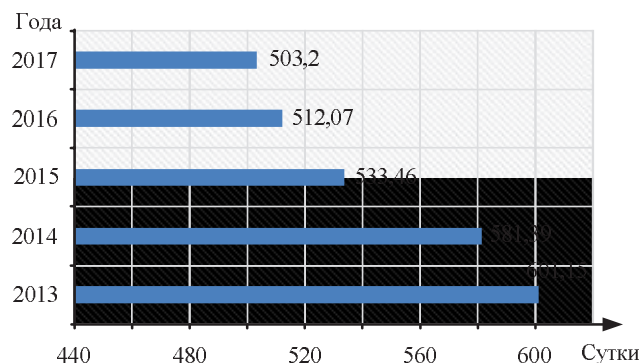
**Рис. 2.** Диаграмма характера повреждений погружных электродвигателей (все значения в %)

Пробой в пазу в большей степени обусловлен перегрузками ПЭД, так как изоляция в пазу подвержена резкому перегреву выше предельных температур во время недопустимых перегрузок. Значительно распространены отказы в результате коррозии, к ним следует отнести разрушение пакета ротора и статора, крепежа, «закипание» муфты на валу ПЭД и т.п. [8]. В результате коррозии увеличивается зазор между пакетом ротора и статора, уменьшается  $\cos \phi$ , однако при этом сокращаются механические потери на трение ротора и ток при нагрузке может не измениться.

На основании данных наработки на отказ ПЭД на предприятиях АО «Самаранефтегаз» за 2013–2017 гг., представленной на **рис. 3** наблюдается отчетливая тенденция постепенного снижения величины наработки на отказ с 601 до 503 сут. Данный факт напрямую свидетельствует об значительном износе парка ПЭД и уменьшении их остаточного ресурса, что приводит к более частым капитальным ремонтам оборудования, сокращению сроков межремонтных промежутков.

#### СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Практика эксплуатации показывает, что ликвидация и устранение технологических нарушений в процессе эксплуатации представляет собой дорогую и сложную процедуру [1, 15], связанную в первую очередь с простым рентабельной скважины по причине неготовности технологически связанного оборудования и влечет за собой дополнительные экономические убытки компании. В рамках представленного исследования автором предложен к рассмотрению один из путей повышения надежности ЭПУ и ПЭД – исследование его индивидуального ресурса. Данное понятие имеет множество трактовок, однако в работе определено как остаточный эксплуатационный ресурс совокупности группы оборудования (условных группы ПЭД) – длительность эксплуатации, начиная от рассматриваемого момента времени до достижения оборудованием предельного состояния [3]. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования занимает важную роль и служит одной из ключевых задач эксплуатации. Для определения вероятностных законов распределения наработки на отказ, а следовательно, нахождения ресурса ПЭД использовались вероятностно-статистические методы анализа отказов погружного электрооборудования.

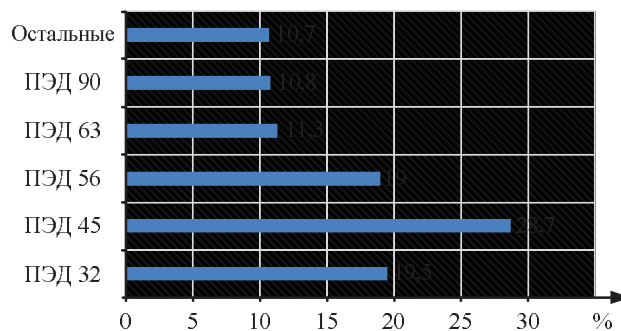


**Рис. 3.** Наработка на отказ погружных электродвигателей в АО «Самаранефтегаз» за 2013–2017 гг. (все значения в сутках)

Исходными данными о технологических нарушениях ПЭД нефтедобычи является статистика, составленная из базы данных «Актос расследования технологических нарушений», а также ведомостей дефектов отказавшего оборудования предприятий АО «Самаранефтегаз» за период с 2013 по 2017 год. С целью структурирования обработанной статистики произведена выборка и объединение всего парка ПЭД, охваченных статистикой, в общие группы. Ключевым параметром при формировании групп служила мощность ПЭД. На **рис. 4** представлена диаграмма отказов парка ПЭД по типоразмерам на предприятиях АО «Самаранефтегаз». Из данных рисунка видно, что на ПЭД-32 и ПЭД-45 приходится наибольшее количество отказов. Эти типы двигателей наиболее распространены в структуре нефтедобычи Поволжья, остальные типоразмеры ПЭД не рассматривались ввиду их незначительной выборки по данным статистики.

Обработка статистических данных производилась с использованием программных пакетов Microsoft Excel, MathCAD, Statistica 7.0 в несколько этапов [5, 9]. С целью отыскания путей решения проблемы надежности ЭПУ нефтедобычи был произведен вероятностно-статистический анализ технологических нарушений на оборудование нефтедобычи. В результате установлены вероятностные законы распределений для временных интервалов – от ввода оборудования в промышленную эксплуатацию до момента отказа.

Выполнен расчет следующих величин: математическое ожидание –  $M(t)$ , дисперсия –  $D(t)$ , среднее квадратичное отклонение (СКО) –  $\sigma(t)$ , коэффициент вариации –  $V(t)$ , коэффициент асимметрии –  $A(t)$ , эксцесс –  $E(t)$  [4]. При выборе вида теоретических вероятностных законов распределения используются: распределение Вейбулла, распределение Рэлея, нормальное, логнормальное и экспоненциальное распределения [1, 3, 8]. Проверка теоретического и эмпирического распределений на предмет согласования производится по  $\lambda$  – критерию Колмогорова и  $\chi^2$  – Пирсона. Полученные результаты в графической форме представлены на **рис. 5, 6** для наиболее многочисленной выборки отказов 2178 условной группы «ПЭД-45».



**Рис. 4.** Диаграмма отказов основных типоразмеров ПЭД (все значения в %)



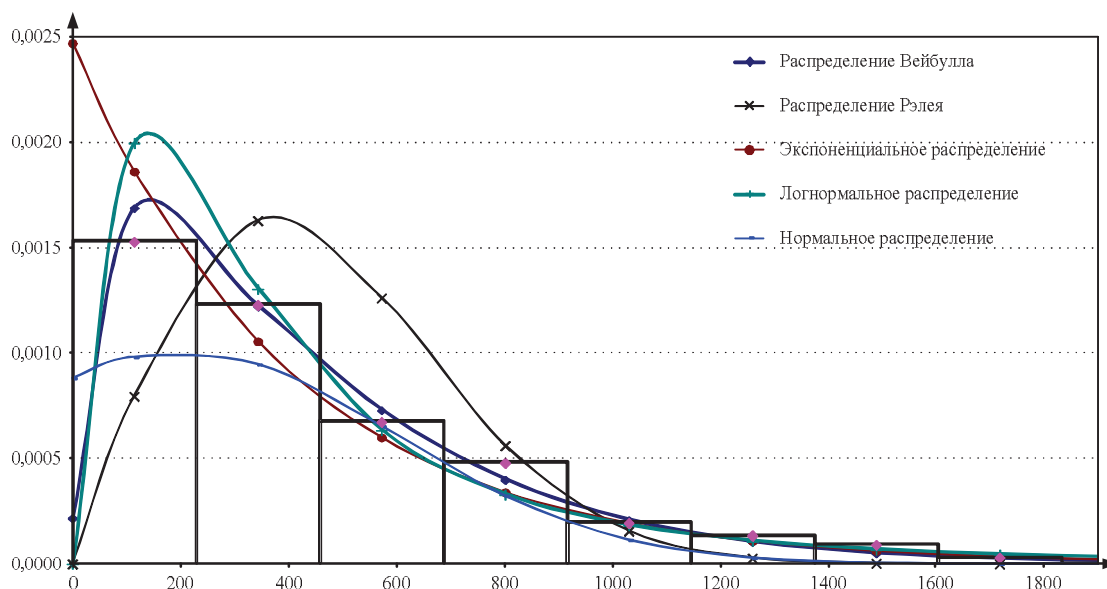


Рис. 5. Гистограмма с плотностями распределения вероятностей на отказ «ПЭД-45»

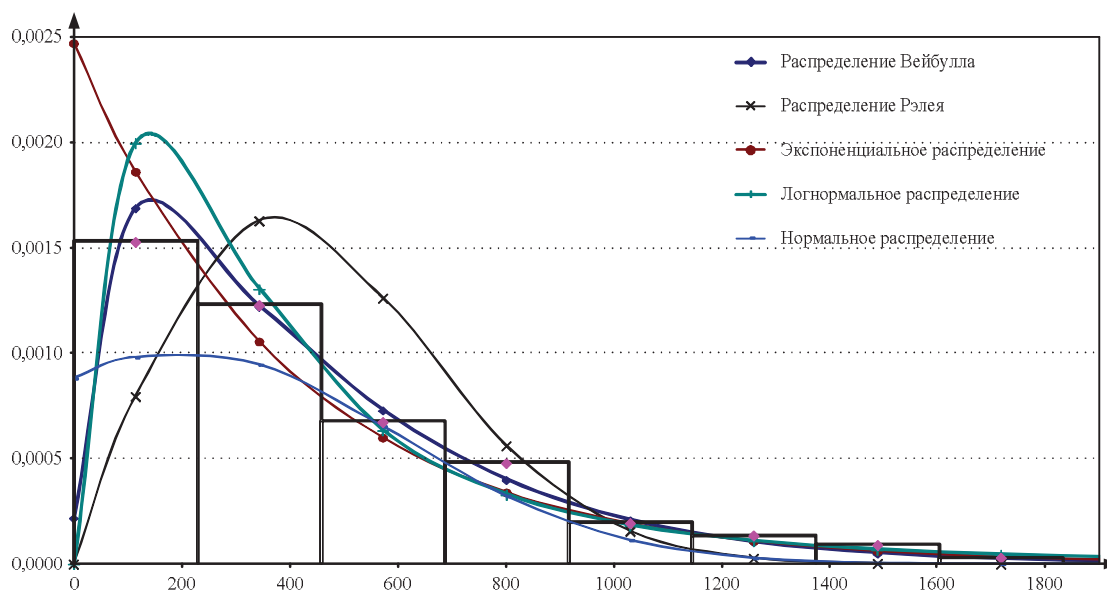


Рис. 6. Функция распределения вероятностей на отказ «ПЭД-45»

Результаты выполненных расчетов представлены ниже:

– для условной группы ПЭД-32. Установлено, что наработка на отказ распределена по логнормальному закону распределения с функцией плотности

$$f(t) = \frac{0,533}{t} \cdot e^{-0,894 \cdot (\ln(t) - 5,7456)^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma = 0,834$ ,  $\mu = 5,9$ ; значимость по критерий  $\chi^2 p = 0,32$ , по критерию  $\chi p = 0,57$ ;

– для условной группы ПЭД-45. Установлено, что наработка на отказ распределена по логнормальному закону распределения с функцией плотности

$$f(t) = \frac{0,478}{t} \cdot e^{-0,719 \cdot (\ln(t) - 5,9)^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma = 0,748$ ,  $\mu = 5,746$ ; значимость по критерий  $\chi^2 p = 0,96$ , по критерию  $\chi p = 0,97$ ;

– для условной группы ПЭД-56. Установлено, что наработка на отказ распределена по закону Вейбула с функцией плотности

$$f(t) = 0,0253 \cdot t^{-0,4046} \cdot e^{-0,0427 \cdot t^{0,5954}}, \quad (4)$$

где  $b = 0,748$ ,  $c = 5,746$ ; значимость по критерий  $\chi^2 p = 0,78$ , по критерию  $\chi p = 0,99$ ;

– для условной группы ПЭД-63. Установлено, что наработка на отказ распределена по экспоненциальному закону распределения с функцией плотности

$$f(t) = 0,0035 \cdot e^{-0,0035 \cdot t}, \quad (5)$$

где  $\lambda = 0,0035$ ; значимость по критерий  $\chi^2 p = 0,29$ , по критерию  $\chi p = 0,97$ .

Анализ произведенных расчетов надежности ПЭД с использованием выбранных законов распределений отказов показывает, что «наработка на отказ для рассматриваемых групп ПЭД распределена по различным законам» [10]. Кроме того, кривые плотности распределения отказов ПЭД наглядно указывают на факт совпадения нескольких законов распределений. В связи с вышеизложенным следует отметить, что к вопросу рассмотрения наработки на отказ следует подходить

дифференцированно в каждом конкретном случае и использовать несколько законов распределения отказов. На данный момент в отрасли используется отраслевой стандарт ОСТ 160.800.735-80, в котором по умолчанию используется закон распределения Вейбулла-Гнеденко [7].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Используя накопленный опыт эксплуатации, статистический материал по отказам ЭПУ и ПЭД в АО «Самаранефтегаз», обзор и анализ технической литературы, можно выделить основные тенденции по повышению надежности погружных электродвигателей:

– применение деталей и узлов ПЭД с равномерным (оптимальным) распределением нагрузок (тепловой, механической и электрической), применение композитных материалов, обладающих повышенной прочностью с улучшенными свойствами;

– защита от коррозии, применение коррозионно-стойких материалов, антикоррозийных покрытий в элементах конструкции ПЭД, использование ингибиторов коррозии и материалов с низкой электропроводностью;

– для ПЭД, как для электрических машин, насущной задачей является разработка изоляции для обмоточных проводов с улучшенными свойствами, способными выдерживать повышенные значения температур в совокупности с допустимыми перегрузками оборудования и компактными размерами. Кардинально инновационными изменениями в данном направлении считаем применение эффекта высокотемпературной сверхпроводимости, что позволит получить совершенно новые свойства оборудования в комплексе с компактными размерами;

– инновационные изменения конструкции ПЭД: использование вентильного привода, повышение частоты вращения 3000-6000 об/мин и номинального напряжения, схемные и параметрические изменения конструкций и др. Все они стратегически направлены на повышение энергоэффективности, энергосбережения и увеличения межремонтных промежутков.

2. Сформирована информационная база актуальных (2013–2017 гг.) статистических данных эксплуатации погружного электрооборудования АО «Самаранефтегаз». На ее основе, как обобщения и уточнения накопленного ранее и на настоящий момент опыта эксплуатации, с помощью интеллектуального анализа и вероятностного моделирования произведены систематизация и оценка текущего состояния парка ПЭД, а также определены и ранжированы факторы, приводящие к технологическим нарушениям. Это позволило сформулировать комплекс технических и организационных мероприятий для их минимизации.

3. Сформулирован подход для принятия обоснованных решений в организации эксплуатации ЭПУ на основе статистической информации об аварийности.

4. Построены уточненные вероятностно-статистические модели отказов ПЭД по данным эксплуатации АО «Самаранефтегаз» за 5-летний период наблюдений с 2013 по 2017 гг. Произведены объединение информации по всему парку ПЭД, охваченному статистикой, с дальнейшей выборкой в основные группы. Ключе-

вым параметром при формировании групп служила мощность ПЭД. Установлены законы распределения наработки на отказ для условных групп ПЭД.

5. Принятие стратегического решения о продолжении дальнейшей эксплуатации работающей ЭПУ, модернизации или замене должно производится по результатам оценки состояния текущих ресурсов и технико-экономического сопоставления вариантов на основе статистической информации об аварийности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алекперов В.Ю., Кершенбаум В.Я. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти. М.: Наука и техника, 1998. 611 с.
2. Алиев И.М. Диагностирование работы нефтяных скважин, эксплуатируемых погружными центробежными насосами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.06. Москва: ВНИИ им. академика А.П. Крылова, 1988. 25 с.
3. Бабаев С.Г., Габибов И.А., Меликов Р.Х. Основы теории надежности нефтепромыслового оборудования. – Баку: АГНА, 2015. 400 с.
4. Байков И.Р., Смородов Е.А., Деев В.Г. Анализ временных рядов как метод прогнозирования и диагностики в нефтедобыче // Нефтяное хозяйство. 2002. №2. С. 71–74.
5. Гирфанов А.А., Гольдштейн В.Г., Дадонов Д.Н. Анализ эксплуатационной надежности ЭПУ // Сбор. докл. IX Росс. науч.-техн. конф. по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности ЭМС-2006. Санкт-Петербург, 2006. С. 173–176.
6. Замиховский Л.М., Калявин В.П. Техническая диагностика погружных электроустановок для добычи. – Снятын: Прут Принт, 1999. 234 с.
7. Мамедов О.Г. Научные основы повышения эксплуатационной надежности погружных электродвигателей: монография. Баку: Элм, 2010. 183 с.
8. Методика определения надежности погружного оборудования и опыт ее применения / О.М. Перельман, С.Н. Пещеренко, А.И. Рябинович, С.Д. Слепченко // Технологии ТЭК. 2005. №3. С. 66–73.
9. Портнягин А.Л., Соловьев И.Г. Модель оценки остаточного ресурса погружного оборудования // Вестник кибернетики. 2002. № 1. С. 103–108.
10. Романов В.С., Гольдштейн В.Г. Методы динамического совершенствования повышения энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи // Динамика систем, механизмов и машин. Динамика электротехнических комплексов и систем. 2017. Т. 5. №3. С. 96–100.
11. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений / Сушков В.В., Тимошкин В.В., Сухачев И.С., Сидоров С.В. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 10. С. 74–80.
12. Bauer H., Langer G. Modelle und Strategien für Prüfungen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Elektrik. 1988. №11. P. 409–415.
13. Brinner T.R., Bulmer J., Kellg. Lighting protection for submersible oilwell pumps // 32-nd Annu. Petrol. and Chem. Ind. Conf., Houston tex., sept. 9–11, 1985. Rec. Conf. Pap. New York. 1985.
14. Romanov V.S., Goldstein V.G. The dynamic improvement methods of energy efficiency and reliability of oil production submersible electric motors // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. Vol. 944, №012099, conference 1, 2018.

15. Sukhachev I.S., Gladkikh T.D., Sushkov V.V. An algorithm of the loss risk assessment in the oil production in case of electric submersible motor failure // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, 2016. №7819089. DOI:10.1109/Dynamics.2016.7819089.
16. Sushkov V.V., Martianov A.S. Specific of Ride Through Solutions for Electric Submersible Pumps with Adjustable Speed Drive // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk: IEEE. 2014. P. 1-4. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005681.

Поступила в редакцию 26 апреля 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### IMPROVING THE RELIABILITY OF ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEX OF SUBMERSIBLE ELECTRIC EQUIPMENT OF OIL PRODUCTION BASED ON THE ANALYSIS OF ITS EMERGENCY

Vladimir S. Romanov

Postgraduate student, Department of Automatic Electric Power Systems, Samara State Technical University, Russia. E-mail: Romanov\_V.S@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9838-4932>.

Valery G. Goldstein

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic Electric Power Systems, Samara State Technical University, Samara, Russia. E-mail: vgg41@yandex.ru.

The condition and the quality level of operation of the electrical complex of submersible electrical equipment of oil fields depend directly on the accident-free and reliable operation of the constituent elements of the well equipment, in particular, submersible motors. Submerged electrical equipment (SEE) for oil production including submersible electric motors (SEM) during operation are subject to the influence of a large number of external factors and impacts, their operation is associated with a variety of operating modes. To obtain information about their state, it is necessary to use the data of statistics of failure of operation. It can be argued that this method of analyzing the state of the object is the most acceptable (or even the only possible) for obtaining, describing and expressing, in quantitative terms, the SEE reliability indicators. To fully understand the current state of the SEEpark, including the SEM, the article presents the results of its statistical analysis. At the current moment, data on technological violations at oil production enterprises have been collected and analyzed with the development of recommendations for improving the reliability of SEM.

**Keywords:** submersible electric equipment, submersible electric motors, oil production, reliability, failure statistics, reliability indicators, time between failures, Weibul distribution, lognormal distribution, exponential distribution.

#### REFERENCES

1. Alekperov V.Yu., Kershenbaum V.Ya. *Ustanovki pogruzhnykh tsentrobezhnykh nasosov dlya dobychi nefi* [Installations of submersible centrifugal pumps for oil production]. Moscow: Science and Technology, 1998. 611 p. (In Russian)
2. Aliev I.M. *Diagnostirovanie raboty nefyanykh skvazhin, ekspluatiruemyykh pogruzhnyimi tsentrobezhnyimi nasosami* [Diagnostics of oil wells operated by submersible centrifugal pumps]; Abstract of the Ph.D. dissertation. Moscow, 1988. 25 p. (In Russian)
3. Babaev S.G., Gabibov I.A., Melikov R.Kh. *Osnovy teorii nadyezhnosti neftepromyslovogo oborudovaniya* [Fundamentals of the theory of reliability of oilfield equipment]. Baku: AGNA, 2015. 400 p. (In Russian)
4. Baikov I.R., Smorodov E.A., Deev V.G. Analysis of time series as a method of forecasting and diagnostics in oil production. *Nefyanoe khozyaystvo* [Oil Industry]. 2002, no. 2, pp. 71-74. (In Russian)
5. Girfanov A.A., Goldstein V.G., Dadonov D.N. Analysis of the operational reliability of the EPU. *Sbor. Dokl. IX Ross. Nauchn-tekhn. Konf. Po elektromagnitnoy sovместимости tekhnicheskikh sredstv i elektromagnitnoy bezopasnosti EMS-2006* [Collection of scientific papers of IX Russian scientific conference on electromagnetic compatibility of technical means and electromagnetic safety of EMC-2006]. St. Petersburg, 2006, pp. 173-176. (In Russian)
6. Zamirovsky L.M., Kalyavin V.P. *Tekhnicheskaya diagnostika pogruzhnykh elektroustanovok dlya dobychi* [Technical diagnostics of submersible electrical installations for mining]. Snyatyn: Prut Print, 1999. 234 p. (In Russian)
7. Mamedov O. *Nauchnye osnovy povysheniya ekspluatatsionnoy nadyezhnosti pogruzhnykh elektrodvigately* [Scientific basis for increasing the operational reliability of submersible motors]: Monograph. Baku: publishing house "Elm", 2010. 183 p. (In Russian)
8. Perelman O.M., Peshchenko S.N., Ryabinovich A.I., Slepchenko S.D. Methods for determining the reliability of the equipment and the experience of its application. *Tekhnologii TEK* [Technologies of the fuel and energy sector]. 2005, no. 3, pp. 66-73. (In Russian)
9. Portnyagin A.L., Soloviyov I.G. Model of the residual resource estimate for load equipment. *Vestn. Kibernetiki* [Proceedings of cybernetics]. 2002, no. 1, pp. 103-108. (In Russian)
10. Romanov V.S., Goldstein V.G. Methods for dynamically improving the energy efficiency and reliability of submerged electric motors for oil production. *Zhurnal Dinamika system, mekhanizmov i mashin. Dinamika elektrotekhnicheskikh kompleksov i system* [Journal of Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Dynamics of electrotechnical complexes and systems]. 2017, vol. 5, no. 3, pp. 96-100. (In Russian)
11. Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V. Evaluation of the residual life of the submersible motor insulation of electric centrifugal oil pump installations under the influence of impulse overvoltages. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering georesources]. 2017, vol. 328, no. 10, pp. 74-80. (In Russian)
12. Bauer H., Langer G. Modelle und Strategien für Prüfungen der elektromagnetischen Vertraglichkeit (EMV). *Elektric.* 1988, no. 11, pp. 409-415.
13. Brinner T.R., Bulmer J., Kellg. Lighting protection for submersible oilwell pumps. 32-nd Annu. Petrol. and Chem. Ind. Conf., Houston tex., sept. 9 – 11, 1985. Rec. Conf. Pap. New York. 1985.

14. Romanov V.S., Goldstein V.G. The dynamic improvement methods of energy efficiency and reliability of oil production submersible electric motors. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. Vol. 944, no. 012099, conference 1, 2018.
  15. Sukhachev I.S., Gladkikh T.D., Sushkov V.V. An algorithm of the loss risk assessment in the oil production in case of electric submersible motor failure. IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, 2016, no. 7819089. DOI:10.1109/Dynamics.2016.7819089.
  16. Sushkov V.V., Martianov A.S. Specific of Ride Through Solutions for Electric Submersible Pumps with Adjustable Speed Drive. *Dynamics of Systems. Mechanisms and Machines (Dynamics)*. Omsk: IEEE. 2014, pp. 1-4. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005681.
- 

Романов В.С., Гольдштейн В.Г. Повышение надежности электротехнического комплекса погружного электрооборудования нефтедобычи на основе анализа его аварийности // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3(40). С. 20-26. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-20-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-20-26)

Romanov V.S., Goldstein V.G. Improving the Reliability of Electrical Engineering Complex of Submersible Electric Equipment of Oil Production Based on the Analysis of its Emergency. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 20-26. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-20-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-20-26)

---