

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора, профессора кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» **Ганджи Сергея Анатольевича** на диссертационную работу **Мироненко Ярослава Владимировича** на тему «Система многопараметрического контроля и диагностики технического состояния компрессорных установок предприятий нефтегазоперерабатывающей промышленности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

На оппонирование представлены:

- диссертация, содержащая 194 страницы, из них 175 страниц основного текста;
- автореферат, изложенный на 25 страницах.

Актуальность темы диссертации. Надежность электроприводных компрессорных установок является одним из факторов, непосредственно определяющих устойчивость технологических процессов нефтегазоперерабатывающих предприятий. Существенная часть таких установок оснащена высоковольтными синхронными и асинхронными электрическими машинами, работающими в длительных режимах, при значительной механической и тепловой нагрузке. Для этих электромеханических комплексов характерна взаимосвязь электрических, тепловых и механических процессов: изменение режима нагружения отражается на температурном состоянии обмоток и подшипников, вибрации, состоянии изоляции, величине частичных разрядов и параметрах электропотребления. Поэтому диагностика только по одному виду сигнала неизбежно ограничивает полноту оценки состояния.

В диссертации обоснованно, что значительная часть парка электроприводов имеет длительный срок эксплуатации, а сами компрессорные установки уже оснащены большим числом средств измерения и локальных информационных систем. При этом накопленные данные во многих случаях используются преимущественно для сигнализации превышения отдельных уставок, а не для совместного анализа динамики взаимосвязанных параметров. С инженерной точки зрения такой разрыв между развитой измерительной инфраструктурой и ограниченными средствами интерпретации данных является существенным резервом повышения надежности оборудования.

Предложенная Я.В. Мироненко постановка задачи отвечает современной тенденции перехода от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию и к предиктивным стратегиям. Существенным достоинством выбранного направления следует считать ориентацию на повышение информативности уже доступных измерений за счет их согласованной обработки. Для предприятий такой подход имеет очевидное практическое значение, поскольку модернизация измерительного контура непосредственно на действующем агрегате часто связана с дополнительными затратами и технологическими ограничениями. Также

значимой представляется объединение сведений о собственно диагностических признаках электрической машины с параметрами технологической и электрической загрузки.

Таким образом, актуальность диссертационного исследования определяется необходимостью повышения достоверности оценки текущего и прогнозного технического состояния ответственных электромеханических комплексов, использованием накопленных данных онлайн-мониторинга без существенного усложнения измерительной инфраструктуры и потребностью предприятий в переходе к более обоснованным стратегиям технического обслуживания и ремонта.

Структура работы и основные результаты разделов.

Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы из 113 наименований, 3 приложения.

Во введении сформулированы объект и предмет исследования, цель и задачи работы, определены методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и внедрении результатов.

Первая глава посвящена вопросам управления жизненным циклом электроприводных компрессорных установок. Автор анализирует состояние парка электрооборудования, существующие стратегии обслуживания, методы технической диагностики и действующие информационно-диагностические системы. Важным результатом главы является постановка двух взаимосвязанных задач: определение текущего состояния компрессорной установки на основе разнородных данных и прогнозирование изменения состояния по данным онлайн-мониторинга. Отдельно показано, что электродвигатель является одним из наиболее ответственных и подверженных отказам элементов установки, а для его оценки существенны параметры состояния изоляции, подшипников, ротора и системы возбуждения.

Во второй главе проведен анализ параметров, потенциально пригодных для многопараметрического контроля. Рассмотрены параметры рабочей среды, энергоэффективности, ресурса, вибрационного и температурного контроля, частичных разрядов и спектрального анализа тока. Автором предложена методика отбора признаков, в которой параметр оценивается по степени влияния на техническое состояние и по распространенности соответствующих средств измерения, а на последующих этапах учитываются качество данных, влияние признака на модель, корреляция и дублирование. Достоинством данного раздела является попытка формализовать инженерный выбор диагностических признаков и увязать его с фактической оснащенностью действующего оборудования.

Третья глава содержит разработку архитектуры информационно-аналитической системы. Рассматриваются источники данных, интерфейсы измерительных систем, требования к проверке целостности и достоверности данных, а также структура расчетных и технических модулей. В состав системы включены модули сбора данных, производственного контроля, классификации состояния, прогнозирования, экспертной оценки и оптимизации моделей. Существенным практическим решением является интеграция с уже действующими АСУ ТП,

энергетическими и диагностическими системами через существующую информационную инфраструктуру, а не построение параллельного измерительного контура.

В четвертой главе разработано алгоритмическое обеспечение определения текущего и прогнозного состояния. Для мультиклассовой классификации автор исследует ряд подходов и в качестве основных рассматривает ансамблевые методы. Для прогнозирования диагностических временных рядов рассмотрены авторегрессионные и нейросетевые подходы; в реализации использована многослойная нейронная сеть с алгоритмами обратного распространения ошибки и Левенберга-Марквардта. По представленным результатам наилучшее значение F_1 -меры для классификации достигает 0,869, а относительная ошибка прогнозирования отдельных диагностических параметров находится в диапазоне 9–23 %.

Пятая глава посвящена апробации системы на действующих компрессорных установках. Показана интеграция информационно-аналитической системы в производственный контур, сформирован пользовательский интерфейс, приведены результаты текущей и прогнозной диагностики четырех установок на двух нефтегазовых объектах Ямало-Ненецкого автономного округа. Для текущего состояния результаты классификации были подтверждены эксплуатационными службами. Для прогнозного состояния приведены примеры выявления развивающегося дефекта подшипника и перехода установки в предельное состояние, а также сформированы рекомендации по изменению межремонтных интервалов, частоты диагностических обследований и дальнейшей эксплуатации.

В заключении обобщены основные результаты исследования, сформулированы рекомендации по применению разработанных алгоритмов и архитектуры в промышленных системах контроля и диагностики, а в качестве одного из направлений дальнейшей работы обозначено использование прогнозных моделей в составе цифровых двойников технологических объектов.

Научная новизна работы. К основным результатам, обладающим признаками научной новизны, следует отнести следующие.

1. Предложен подход к формированию информативного набора параметров многопараметрического контроля, учитывающий физическую связь признака с деградацией объекта, распространенность средств измерения, качество данных и влияние параметра на диагностическую модель с последующим контролем избыточности.
2. Разработан алгоритм определения текущего технического состояния электроприводных компрессорных установок, сочетающий нормативно обусловленный производственный контроль и ансамблевую модель машинного обучения.
3. Разработан алгоритм прогнозирования диагностических параметров состояния электроприводных компрессорных установок с учетом технологической загрузки, реализованный на основе многослойной нейронной сети.
4. Предложена архитектура информационно-аналитической системы, обеспечивающая интеграцию методов контроля, классификации, прогнозирования и экспертного формирования

рекомендаций с действующими средствами измерений и информационными системами предприятия.

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость работы связана с развитием подходов к многопараметрической диагностике электроприводных компрессорных установок, прежде всего в части совместного использования параметров различной физической природы, эксплуатационного контекста и метрологических характеристик измерительных каналов. Представленный подход позволяет рассматривать техническое состояние как характеристику сложного объекта контроля, наблюдаемого по совокупности взаимосвязанных признаков.

Практическая значимость определяется тем, что разработанная система ориентирована на использование существующей измерительной и информационной инфраструктуры. Это существенно для действующих предприятий, где внедрение дополнительных датчиков на высоковольтных электрических машинах и технологическом оборудовании может требовать остановки агрегата, изменения схем подключения и дополнительных процедур промышленной безопасности. В диссертации показана интеграция с распределенными базами данных и локальными системами, разработан программный интерфейс, сформированы рекомендации для эксплуатационного персонала.

Результаты работы внедрены в деятельность ООО «СтройЭнергоСистемы ДВ» и ООО «РСМ-системы», что подтверждается приложенными актами. По теме работы также представлены патент Российской Федерации на изобретение, связанное с диагностикой высоковольтного оборудования по параметрам частичных разрядов, и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Наличие промышленной апробации и программной реализации повышает практическую ценность исследования.

Степень обоснованности и достоверности результатов. Обоснованность основных положений обеспечивается сочетанием инженерного анализа физических диагностических признаков, статистической обработки эксплуатационных данных, сравнением нескольких алгоритмов классификации и прогнозирования, а также проверкой разработанных решений на действующем оборудовании. В работе используются данные диагностических, технологических и энергетических систем; для формирования классификационных моделей описана выборка по 29 объектам и 232 сценариям, а промышленная апробация проведена на четырех компрессорных установках. Для оценки качества классификации применяются F_1 -мера и матрицы ошибок, для прогнозирования – относительное среднеквадратическое отклонение.

Автор отдельно рассматривает метрологическую составляющую исходных измерений, характеристики измерительных трансформаторов, счетчиков, датчиков температуры, вибрации и частичных разрядов, а также использует интегральную оценку неопределенности результата. Такой подход принципиально важен для диагностических систем, поскольку качество алгоритма не может рассматриваться отдельно от качества первичных измерительных каналов.

Соответствие содержания диссертации научной специальности. Содержание диссертационной работы соответствует направленности научной специальности 2.2.8. Методы и

приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды. Представленные результаты непосредственно связаны с научным обоснованием и совершенствованием методов технической диагностики, разработкой математических моделей, алгоритмического и программного обеспечения обработки результатов измерений и автоматизацией контроля технического состояния. С учетом содержания работы обоснованным является ее отнесение к следующим пунктам паспорта специальности:

– п. 1. Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надежности изделий и экологической безопасности окружающей среды.

– п. 6. Разработка математических моделей, алгоритмического и программнотехнического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии.

– п. 7. Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоемкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата в полной мере соответствует тексту диссертационной работы и отражает все основные ее положения.

Публикация и апробация результатов. Основные результаты изложены в 13 научных статьях, из которых 4 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ; 2 публикации индексируются в международной базе данных Scopus.. По результатам исследований получены патент Российской Федерации на изобретение и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты работы обсуждались и докладывались на 5 всероссийских и международных конференциях.

Для уровня кандидатской диссертации этого вполне достаточно.

Замечания по диссертационной работе.

По представленной к оппонированию диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. В работе совместно рассматриваются компрессорные установки с высоковольтными синхронными и асинхронными электродвигателями различных мощностей и годов выпуска. Из текста автореферата и диссертации не понятно, каким образом учитываются различия диагностических признаков для различных типов электрических машин, например, различия в конструкциях роторов, системах охлаждения, типах подшипников, электромагнитных нагрузках. Какие признаки и модели являются универсальными для парка установок, а какие должны определяться отдельно для конкретного типа электрической машины?

2. Предложенная во второй главе методика выбора параметров опирается на трехбалльные экспертные оценки влияния и охвата и на экспертно назначаемые весовые коэффициенты. Недостатком метода весовых коэффициентов является субъективизм при их определении. Влияет ли этот субъективизм на качество экспертной оценки?

3. Температура обмотки непосредственно не влияет на надежность и долговечность электрической машины. Определяющим фактором, влияющим на старение изоляции является превышение этой температуры над классом нагревостойкости изоляции и длительность температурного воздействия. Это же относится и к температуре подшипников. Из предложенных математических моделей не понятно, каким образом учитывается фактор времени на формирование диагностических признаков.

4. Методика интегральной оценки неопределенности в разделах 4.6 и 5.4 нуждается в более строгом метрологическом обосновании. В одной формуле объединяются составляющие неопределенности измерительного канала, доля ошибок классификатора (1-A) и RRMSE прогноза. Эти величины имеют различную статистическую природу, и в тексте недостаточно подробно обоснованы их приведение к единой шкале, предположение о независимости и правило квадратичного суммирования.

5. В компрессорных установках с электроприводом имеется повышающий редуктор, который имеет свою вероятность отказов. В работе нет информации об оценке и прогнозе вероятности отказов этого компонента, который может повлиять на общий анализ технического состояния установки

6. В работе заявлено, что предлагаемые методики и алгоритмы могут обеспечить эффективную эксплуатацию компрессорной установки в рамках управления жизненным циклом. Не понятно, как работают алгоритмы на этапах проектно-конструкторских работ, производстве и монтаже оборудования комплекса, ликвидации установки?

7. Промышленная апробация прогнозной части системы проведена на четырех реальных компрессорных установках. Для подтверждения универсальности подхода было бы полезно расширить внешнюю валидацию на установки другого конструктивного исполнения, разных сроков эксплуатации и других предприятий.

8. В диссертации очень подробно описаны известные методы анализа и диагностики, при этом разработанным математическим моделям, выносимым на защиту, выделен недостаточный объем. Это осложнило анализ представленной к оппонированию работы.

Указанные замечания несколько снижают ценность диссертационной работы, но не влияют на общее положительное впечатление от проведенного исследования.

Соответствие диссертации критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация Я.В. Мироненко является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача повышения достоверности оценки технического состояния электроприводных компрессорных установок на основе многопараметрической обработки данных онлайн-мониторинга. Работа обладает внутренним единством: постановка задачи, выбор информативных параметров, архитектура системы,

алгоритмы классификации и прогнозирования, программная реализация и промышленная апробация образуют последовательную систему результатов.

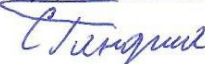
Полученные результаты имеют научную новизну и практическую значимость, основные положения представлены в публикациях, а работоспособность разработанных решений подтверждена на эксплуатационных данных и действующем оборудовании. Личный вклад соискателя прослеживается в разработке методики отбора параметров, алгоритмического обеспечения, архитектуры информационно-аналитической системы, программной реализации и проведении апробации.

Общее заключение. Диссертационная работа Мироненко Ярослава Владимировича «Система многопараметрического контроля и диагностики технического состояния компрессорных установок предприятий нефтегазоперерабатывающей промышленности» представляет собой завершённое исследование, содержащее решение актуальной задачи в области технической диагностики сложных электромеханических объектов. Предложенные автором методы позволяют совместно использовать данные различной физической природы, учитывать эксплуатационный режим оборудования и формировать оценку текущего и прогнозного состояния без обязательного расширения состава средств измерений.

По содержанию, уровню научной новизны, практической значимости, объёму выполненных исследований и степени апробации диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук и установленным пунктами 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (в действующей редакции), а ее автор, Мироненко Ярослав Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск,



Ганджа Сергей Анатольевич,
«07» сентября 2026 г.

Контактная информация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск,

Адрес: Россия, 454080 г. Челябинск, проспект Ленина, 76

Тел./факс: +7 (351) 267-99-00; +7 (912) 081-09-02?

E-mail: gandzhasa@susu.ru

Подпись Ганджи С.А. заверяю



ВЕРНО
Начальник службы
делопроизводства ЮУрГУ
Н.Е. Цибулина