

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента Левина Владимира Михайловича на диссертацию Жуковского Юрия Леонидовича «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

На рассмотрение представлены рукопись и автореферат диссертации. Диссертация состоит из двух томов, включающих введение, пять глав, заключение, библиографический список, список сокращений и условных обозначений, три приложения. Диссертация включает 526 страниц машинописного текста, 204 рисунка, 77 таблиц, список литературы из 341 наименования. Содержание автореферата изложено на 40 страницах машинописного текста, в составе которого 17 рисунков и 2 таблицы.

1. Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа посвящена вопросам обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий, которые, являясь ключевыми объектами энергетической инфраструктуры РФ, оказывают непосредственное влияние на её энергетическую безопасность.

Актуальность темы диссертационных исследований несомненна и обусловлена следующими важными аспектами:

1) нарастающими темпами физического износа электромеханического и технологического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий, вызванными многими факторами, включающими как специфические условия эксплуатации (повышенная запыленность, увлажненность, резкие перепады температур, вибрации и др.), так и нерациональной организацией технического обслуживания и ремонта (в особенности на труднодоступных территориях);

2) несовершенством системы технического диагностирования (мониторинга) отдельных функциональных узлов и структурных элементов автоматизированного электропривода, приводящим к несвоевременному выявлению и устранению неисправностей оборудования, вызывающему внезапные остановки и тяжелые аварии на производстве, значительные потери энергии и ресурсов;

3) угрозами нарушений безопасности персонала, экономической и экологической эффективности добычи полезных ископаемых, ростом ущербов, затрат и потерь от внезапных отказов, дорогостоящих ремонтов и простоев оборудования;

4) тенденцией развития интеллектуальных производственных систем, в том числе и в горнодобывающем и нефтегазовом секторе на основе передовых цифровых технологий, позволяющих перейти к качественно новым стандартам динамического управления жизненным циклом эксплуатации электромеханического оборудования.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна результатов выполненного диссертационного исследования состоит в следующем:

– выявлены факторы снижения наработки на отказ, а также закономерности изменения показателей эффективности работы ЭМО от вида и степени повреждения, установлено влияние роста потерь электрической энергии на сокращение срока службы, что требует обязательного учета при оценке влияния на безопасность и эффективность функционирования ЭМО в ЭТК ГиНГП;

– разработана методология выполнения диагностики и оценки остаточного ресурса без остановки и вывода из эксплуатации ЭМО на основе многофакторного анализа его эксплуатационных электрических параметров. В качестве показателя технического состояния используется коэффициент изменения потерь в элементах ЭТК, равный разнице относительных потребляемых ЭМО мощностей при определенной величине нагрузки, а также приведенная величина потерь в агрегате за время до перехода его в предельное состояние, в котором дальнейшая эксплуатация ЭМО невозможна;

– на основе интеграции информации об эталонных состояниях ЭМО и данных, извлекаемых из электрических сигналов без остановки технологического процесса, предложены комплексные диагностические признаки, позволяющие отслеживать и прогнозировать динамику изменения остаточного ресурса ЭМО при различных параметрах, переменных режимах работы и флуктуации внешних и эксплуатационных факторов ЭТК ГиНГП;

– на основе средств искусственного интеллекта разработан комплекс алгоритмов обработки эксплуатационных данных и диагностических признаков для определения вида повреждения и классификации режимов работы ЭМО в ЭТК, позволяющий перейти к предсказательной системе технического обслуживания и ремонта для повышения безопасности и эффективности эксплуатации ЭМО;

– обоснована структура и методология функционирования цифрового двойника

процесса управления техническими воздействиями на жизненном цикле эксплуатации ЭМО в составе ЭТК ГиНГП, отличающаяся учетом дополнительных потерь электроэнергии и воздействия на окружающую среду, обусловленных наличием дефектов ЭМО;

– обоснована комплексная взаимосвязанная структура программных модулей и разработаны алгоритмы их функционирования в составе распределенной системы управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО с учетом классификации первичной информации, ранжирования сценариев обмена данными, уровня тяжести последствий аварий и цифровизации ЭТК ГиНГП.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается следующим:

- применением фундаментальных классических теорий, таких как теория обобщенной электрической машины, теория электропривода, теория временных рядов, для описания разрабатываемых теоретических моделей и алгоритмов, объяснения взаимосвязей и динамики исследуемых физических процессов в ЭМО и системах их управления;
- применением современных статистических методов обработки данных, методов спектрального анализа сигналов, позволяющих устанавливать признаки неисправностей, выявлять по ним опасные дефекты оборудования на ранних стадиях развития, прогнозировать вероятности отказов и остаточный ресурс оборудования;
- применением передовых цифровых технологий, методов искусственного интеллекта и машинного обучения (идентификации, имитационного компьютерного моделирования, программирования, искусственных нейронных сетей) при разработке диагностических методов, моделей, алгоритмов и программных датчиков поиска дефектов;
- непротиворечивостью сформулированных автором теоретических утверждений и полученных по разработанным моделям и методикам количественных результатов и результатов независимых исследований, опубликованных в открытых рецензируемых научных источниках информации.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационного исследования обеспечивается совместным корректным применением общепризнанных научных теорий, методов и подходов, а также широким использованием результатов физического моделирования процессов в ЭМО для разработки и верификации полученных моделей и алгоритмов.

Вынесенные на защиту научные положения и основные выводы логически связаны с целью и идеей диссертации, а полученные в ней результаты, несомненно, обладают новизной в области обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации ЭМО в ЭТК ГиНГП на основе цифровых технологий

4. Научные результаты, их ценность

Научные результаты диссертационного исследования и их ценность заключаются:

- в формировании научных основ комплексной диагностики электромеханического оборудования в составе ЭТК ГиНГП по параметрам электрических сигналов, позволяющей повысить надежность и обеспечить переход к предсказательной системе технического обслуживания и ремонта на основе интеллектуальных алгоритмов и методов;
- в создании интеллектуальных алгоритмов, разработке методов и моделей, позволяющих производить оценку и прогнозирование технического состояния электромеханического оборудования по расчету вероятности возникновения дефектов на основе нейросетевого диагностирования;
- в разработке способов управления режимами и техническим состоянием электропривода с применением программного датчика для обнаружения повреждений в электромеханическом оборудовании;
- в разработке архитектуры и концептуальной модели цифрового двойника процесса управления техническим состоянием ЭМО, а также в определении сценарных условий изменения электропотребления от времени в изменяющихся условиях эксплуатации в ЭТК ГиНГП;
- в разработке и реализации комплекса взаимосвязанных программных сервисов управления жизненным циклом эксплуатации электромеханического оборудования с учетом оценки и прогнозирования его технического состояния и остаточного ресурса, позволяющего повысить надежность, экономическую, энергетическую и экологическую эффективность ЭТК.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 52 печатных работах, в том числе в 11 статьях в изданиях из Перечня ВАК, в 27 статьях в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus, в 8 патентах на изобретения, 4х свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что:

– Предложены технические и алгоритмические решения, повышающие достоверность выявления дефектов, что повышает эффективность процедуры технической диагностики применительно к ЭМО.

– Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для выявления вида и уровня дефектов, предназначенное именно для электромеханического оборудования ЭТК ГиНГП, с учетом специфики процессов в них происходящих.

– Разработана методика выбора структуры и архитектуры алгоритмов, применяемых для извлечения диагностической информации и прогнозирования развития уровней дефектов в системе управления жизненным циклом эксплуатации ЭМО.

– Разработаны архитектуры построения цифровых двойников для интеграции в интеллектуальные ЭТК с целью управления энергоэффективностью и экологичностью на протяжении жизненного цикла эксплуатации ЭМО.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что:

– Разработаны способы управления режимами и техническим состоянием электромеханического оборудования, их программно-алгоритмическая поддержка, которые внедрены в электротехнические комплексы ряда предприятий горной и нефтегазовой производственной сферы топливно-энергетического комплекса РФ (о чем свидетельствуют соответствующие акты внедрения).

– Созданы лабораторные стенды и программное обеспечение, используемые в учебном процессе в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» при обучении студентов и проведении курсов повышения квалификации.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы на действующих и вновь создаваемых предприятиях в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых производств для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования на основе развития цифровых технологий. Также результаты могут быть использованы в учебном процессе при подготовке студентов и повышении квалификации дипломированных специалистов в рамках своих компетенций.

7. Замечания по диссертационной работе

1. В первой главе диссертации автор приводит многоплановый обзор и детальный

анализ причин, последствий, факторов и тенденций в РФ и мире по всем направлениям собственных научных исследований, что необходимо для формулировки оригинальной цели и задач исследования. Однако ряд положений и выводов вызывают вопросы и замечания:

1) в таблице 1.1.2. приведены локальные и глобальные факторы, которые по утверждению автора влияют на переход к цифровой экономике. В отсутствии собственного видения автора целей и эффектов цифровизации это выглядит неубедительно;

2) при анализе причин и последствий отказов ЭМО отсутствует четкая оценка и ранжирование степени влияния внешних и внутренних факторов, таких как режим, конструкция, техническое состояние, условия эксплуатации, качество ТОиР, воздействия СЭС и пр., что было бы весьма уместно;

3) автором не сформулирована цель предсказательной стратегии ТОиР, без чего её преимущества в сравнении со стратегией ТОиР по фактическому техническому состоянию (табл. 1.9.1.) представляется необоснованными и противоречивыми.

2. По разделам 2-й главы имеется ряд замечаний:

1) большое значение для оценки влияния коэффициента несинусоидальности напряжения K_U на результаты диагностики и анализ остаточного ресурса при прогнозировании срока службы изоляции ЭМО, по мнению автора, играет зависимость (рис.2.2.5). Характеристики получены аппроксимацией опытных точек. Однако без внимания оставлена степень доверия полученной аппроксимации, что принципиально влияет на результаты оценки;

2) описанный на стр.139 метод реализуется в условиях ограничений (нормальное распределение, стационарный процесс изменения нагрузки горнотранспортных машин, др.), что существенно сужает область его практического применения. Кроме того, необходимость большого количества поправочных коэффициентов в выражениях (2.2.18) и (2.7.19) ограничивают область эффективного определения и достоверность оценки потерь мощности в сердечнике ЭМО;

3) при определении остаточного ресурса ЭМО выражение (2.7.44) предлагается получать подстановкой (2.7.43) в (2.7.40), что является некорректным, либо в конечном выражении (2.7.44) допущена ошибка;

4) не понятно, на каком основании в задаче распознавания технических состояний ЭМО метрическими методами при описании результатов комплексной диагностики по электрическим сигналам автор отдает предпочтение квадратическому расстоянию остаточного ресурса – формула (2.9.4).

5) коэффициенты вариации ресурсного и диагностического контролируемых параметров (v_j) при определении среднего остаточного ресурса T_{0cp} вычисляются по статистическим данным. Однако не сформулированы правила формирования статистических выборок данных и требования к их характеристикам (однородность, одномодальность, представительность, др.).

3. По разделам 3-й главы имеется ряд вопросов и замечаний:

1) из работы не ясно, в чем достижения предсказательной системы ТОиР, почему в контексте «Индустрии 4.0» такой переход необходим? В каких условиях указанный переход обоснован, каков допустимый начальный уровень существующей системы ТОиР? Для ответа на эти вопросы могут потребоваться технико-экономические оценки.

2) обнаружено некоторое противоречие между утверждением автора (стр.183-184) об отсутствии необходимости математического и физического описания дефектов при реализации ПСТОиР и необходимостью прогнозирования остаточного ресурса ЭМО или времени достижения предельных значений контролируемых параметров, что требует-таки специального математического описания;

3) сделанный автором анализ подходов к разработке моделей ПСТОиР выглядит весьма поверхностно и сумбурно (полезный выход не просматривается). Смешаны процессы деградации и процессы образования и развития дефектов в ЭМО, которые имеют в общем случае различные траектории и динамику и требуют разных подходов для надежного распознавания;

4) требует пояснений нормирование уровней оценки технического состояния ЭМО, приведенное в табл.3.3.1. Отсутствует информация о том, как получены границы интервалов для K_{TC} экспертно, статистически, другим образом. А от этого зависит обоснованность принятия решений о виде технического состояния и необходимых воздействиях на ЭМО;

5) что определяется выбором типа ИНС (количество слоев, количество нейронов, вид функции активации, алгоритм обучения, др.), как этот выбор производится? Оценка вероятности безотказной работы ЭМО осуществляется по электрическим, вибрационным и косвенным параметрам в сравнении с их эталонными значениями. Как предусмотрена установка этих параметров? Как часто в системе должно производиться формирование ИНС и её переобучение? Каков допустимый реальный уровень ошибок ИНС по прогнозу вероятности отказа ЭМО?

4. По разделам 4-й главы также имеются вопросы и замечания:

1) по каким показателям и на базе каких достоверных данных планируется проведение анализа надежности системы с применением цифрового двойника (ЦД) ЭМО на всех

этапах ее жизненного цикла? Утверждение (том 2, стр.28) о том, что ЦД способен оказывать положительное воздействие на все показатели требует доказательства на конкретном примере;

2) последнее предложение на стр. 29, том 2 лишено смысла, а формула (4.6.1) для K_T записана не корректно;

3) автором предложен сценарный подход к оценке уровней надежности и энергоэффективности эксплуатации ЭМО в ЭТК ГиНГП, который привязан к этапам жизненного цикла эксплуатации технической системы (приработка, нормальная эксплуатация, старение), однако на реальном предприятии ГиНГП установлены и одновременно работают ЭМО, относящиеся к разным периодам ЖЦ эксплуатации. Как в этом случае организовать сценарную оценку надежности / энергоэффективности?

4) при оценке рисков автором сделан акцент на рассмотрение в качестве нежелательных последствий избыточных потерь электроэнергии (то есть показателя энергоэффективности), в тоже время более опасные для системы последствия заключаются в катастрофических отказах, нарушениях электроснабжения, простоях производств, то есть в показателях безопасности и надежности. Возможно стоило это учитывать.

5. К общему замечанию по всему тексту диссертационной работы следует отнести многочисленные описки, опечатки, ошибки, несогласованность падежных окончаний и смыслов в отдельных предложениях.

8. Заключение

Диссертация **Жуковского Юрия Леонидовича** на тему «Теория, методы и средства обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в электротехнических комплексах горных и нефтегазовых предприятий на основе цифровых технологий» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная проблема разработки методологии обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации электромеханического оборудования в структуре электротехнических комплексов на основе применения цифровых технологий, что вносит значительный вклад в развитие горных и нефтегазовых предприятий и имеет высокую значимость для промышленности России.

Диссертация выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Цель и задачи исследования соответствуют уровню диссертации на соискание ученой степени доктора наук. Предложенные автором теоретические и практические решения достаточно аргументированы и полностью согласуются с другими известными в данной области

решениями. Полученные в работе результаты достоверны и обоснованы. Приведенные в настоящем отзыве замечания не снижают научной и практической ценности диссертации.

Представленная на рассмотрение диссертация соответствует требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», утвержденного приказом ректора Горного университета от 20.05.2021 № 953 адм., а её автор – **Жуковский Юрий Леонидович** – заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»



Левин
Владимир
Михайлович

Даю согласие на внесение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Левин Владимир Михайлович

Адрес: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20, корпус 2 Телефон: +7 (383) 346-13-34, e-mail: levin@corp.nstu.ru

Подпись официального оппонента, д.т.н., доцента, заведующего кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем Левина Дмитрия Владимира Михайловича заверяю

Учёный секретарь Ученого Совета
ФГБОУ ВО НГТУ,
д.т.н., профессор



Г.М. Шумский

« 11 » 03 2024 г