



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НР

Ахметова И.Г.

23.09.2020г

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Диссертация «Метод автоматизированного многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей с применением градиентного алгоритма вычисления оценок параметров» выполнена на кафедре «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Малёв Николай Анатольевич работал в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» в должности доцента (с сентября 2013 – по настоящее время) кафедры «Приборостроение и мехатроника».

В 2003 г. Малёв Н.А. окончил ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет» с присуждением степени магистра техники и технологии по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», диплом АВМ 0041396 от 30 июня 2003 года.

С 2003 г. по 2006 г. Малёв Н.А. обучался в аспирантуре ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет».

Документ об обучении в аспирантуре и сданных кандидатских экзаменах выдан в 2020 г. в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель – Погодицкий Олег Владиславович, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника».

По итогам обсуждения диссертации «Метод автоматизированного многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей с применением градиентного алгоритма вычисления оценок параметров» принято следующее заключение.

## 1. Актуальность

К современным технологическим процессам, связанным с электромеханическим преобразованием энергии, предъявляются высокие требования по надежности и качеству функционирования электромеханических преобразователей (ЭМП), используемых в различных сферах промышленности. Необходимое качество функционирования ЭМП в составе рабочих комплексов обеспечивается за счет повышения требований к процессу их проектирования, а также текущего контроля и анализа нестабильных параметров данных устройств, которые могут существенно отличаться от паспортных или справочных данных. Эти отличия оказывают значительное влияние на статические и динамические режимы работы ЭМП, снижая показатели надежности и энергоэффективности рабочих комплексов. Реализация методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, контроль и диагностику функционирования электромеханических преобразователей невозможна без применения математических моделей объектов исследования. Под задачей анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей будем понимать определение параметров математических моделей с требуемой точностью в результате обработки экспериментальных данных. Погрешность, с которой определяются параметры, зависит от формы математической модели, точности проведенных экспериментов и особенностей алгоритма, с помощью которого по результатам измерений вычисляются оценки параметров электромеханических преобразователей. Для практических целей необходимо, чтобы погрешность вычисления оценок параметров была не ниже заданной точности измерений. Таким образом, актуальность диссертационного исследования обусловлена тем, что качество функционирования электромеханических преобразователей определяется,

главным образом, параметрами электрических машин, точные значения которых необходимы для формирования требуемых установившихся и переходных режимов в процессе эксплуатации ЭМП в составе рабочих комплексов.

Данному научному направлению посвятили ряд работ отечественные и зарубежные ученые: Копылов И.П., Вольдек А.И., Иванов-Смоленский А.В., Гольдберг О.Д., Башарин А.В., Соколовский Г.Г., Афанасьев А.Ю., Райбман Н.С., Цыпкин Я.З., Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М., Beckert U., Wolfgang A. H., Kertzsch J., Sage A.P., Melsa J.L., Graupe D., Ljung L., Eukhoff P.

Обеспечение необходимой точности оценок параметров при изменениях условий эксплуатации электромеханических преобразователей является одним из важнейших вопросов, направленных на формирование требуемого качества функционирования.

Данное обстоятельство приводит к решению комплекса задач по разработке научно-обоснованного инструментария, позволяющего осуществить анализ нестабильных параметров и контроль функционирования электромеханических преобразователей на этапе опытных испытаний и в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов.

## 2. Научная новизна результатов работы

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен и апробирован на математических моделях обобщенный интегральный критерий  $Q$ , позволяющий оценить степень различия динамических процессов, происходящих в ЭМП при номинальных значениях параметров, и динамических процессов при параметрических возмущениях, и *отличающийся тем*, что интеграл невязки, формируемый на основании данных о разности угловых скоростей вращения электромеханического преобразователя с флуктуацией параметров и эталонной модели ЭМП, дает возможность отображения функционала  $Q(\chi)$  в форме  $Q$ -таблиц и  $\chi$ -зависимостей с последующим получением оценок нестабильных параметров ЭМП.
2. Получены дифференциальные уравнения чувствительности электромеханических преобразователей различной конфигурации, *отличающиеся тем*, что на их основе сформированы векторно-матричные структурные схемы и оригинальные Simulink-модели вычисления функций

чувствительности, позволяющие выявить параметры, оказывающие максимальное воздействие на динамические свойства ЭМП, а также наиболее чувствительные к параметрическим возмущениям координаты.

3. Разработан и экспериментально проверен метод многопараметрического автоматизированного анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей на основе градиентного алгоритма вычисления оценок параметров с применением машины постоянного тока, *отличающийся тем*, что эталонная модель и модели чувствительности представлены в дискретной форме; применена цифровая фильтрация сигнала невязки, снижающая уровень шумов; оценки нестабильных параметров вычисляются на основе зависимости вектора нестабильных параметров от обобщённого интегрального критерия с приемлемой в инженерной практике точностью.

### **3. Теоретическая и практическая значимость результатов**

1. Разработаны технические решения по совершенствованию методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих контроль функционирования электромеханических преобразователей, которые позволяют обеспечить малую чувствительность предложенного метода многопараметрического анализа и контроля ЭМП к наличию шумов и импульсных помех в измерительном канале.

2. Разработанные алгоритмы и программы, составляющие основу метода многопараметрического анализа и контроля функционирования ЭМП с применением градиентного алгоритма вычисления оценок параметров, будут полезны на этапах опытных испытаний, контроля и диагностики электромеханических преобразователей в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов.

3. Полученные научные результаты позволяют расширить теоретическую базу в области разработки подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих анализ и контроль функционирования электромеханических преобразователей.

4. Сформулированы рекомендации по применению метода многопараметрического анализа и контроля функционирования ЭМП, позволяющие обеспечить требуемое качество функционирования ЭМП в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов.

#### 4. Личный вклад автора

Реализация задач исследования, формулировка научной новизны, практической ценности, теоретической значимости, а также научные положения, выносимые на защиту осуществлены самим автором или при его непосредственном участии. В целом общий авторский вклад в работах, выполненных в соавторстве, составляет не менее 70%.

#### 5. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием математического аппарата, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых при исследовании математических моделей, требуемым соответствием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

#### 6. Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты» по следующим положениям:

1. Экспериментально-аналитический алгоритм для анализа динамических свойств ЭМП с применением векторно-матричной модели чувствительности по нестабильным параметрам  $\chi$  объекта соответствует п. 3 паспорта специальности: «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии».
2. Метод получения компонентов функционала  $Q(\chi)$  в форме  $Q$ -таблиц и  $\chi$ -зависимостей на основе градиентного алгоритма для реализации многопараметрического контроля функционирования ЭМП с получением оценок нестабильных параметров соответствует п. 3 паспорта специальности: «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии» и п. 5 паспорта специальности: «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов».
3. Алгоритм для автоматизированного анализа нестабильных параметров и контроля функционирования ЭМП на основе  $z$ -формы и

векторно-матричных разностных уравнений эталонной модели объекта и моделей чувствительности соответствует п. 3 паспорта специальности: «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии» и п. 5 паспорта специальности: «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов».

4. Метод автоматизированного многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей на этапе эксплуатации в составе рабочих комплексов соответствует п. 3 паспорта специальности: «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии» и п. 5 паспорта специальности: «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов».

5. Результаты экспериментального исследования метода многопараметрического автоматизированного анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей соответствуют п. 3 паспорта специальности: «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии» и п. 5 паспорта специальности: «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов».

#### **7. Полнота изложения результатов диссертации в работах, опубликованных автором**

По результатам проведенных исследований опубликовано 22 печатных работы, которые включают в себя учебное пособие с грифом КГЭУ, 7 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты», 2 публикации, индексируемые в реферативной базе SCOPUS, 12 тезисов докладов в материалах конференций различного уровня

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых  
в международной базе данных SCOPUS / Web Of Science*

1. N.A. Malev, A.I. Mukhametshin, O.V. Pogoditsky and W.M. Mwaku. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), vol. 124. Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402005>.
2. N. A. Malev, A. I. Mukhametshin and O. V. Pogoditsky. Analysis and Study of the Dynamic Processes of a Permanent Magnet Synchronous Motor with a Wide Range of Parameter Variations Using the Reference Model, 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-6. Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934216>

*Статьи, опубликованные в журналах из Перечня ВАК  
Минобрнауки России*

3. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Андреев Н.К. Контроль качества функционирования электроприводов с цифро-аналоговым управлением. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. № 1-2. С. 60-64.
4. Малёв Н.А., Маямсина Д.Г. Синтез градиентной системы управления с настраиваемой моделью объекта. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 11-12. С. 84-90.
5. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Исследование и синтез модального регулятора двухмассовой электромеханической системы механизма подъема крана. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. № 20(7-8). С. 99-106.
6. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Статистический анализ динамических характеристик асинхронного электромеханического преобразователя с изменяющимися параметрами. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019, № 21(1-2). С. 120-130.
7. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Городнов А.Г. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019, № 21(4). С. 113-122.

8. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Цветкович А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019, № 21(6). С. 101-110.

9. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Малацион А.С. Метод формирования  $Q$ -таблиц для автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей с применением линейного интегрального критерия. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020, № 22(2). С. 86-97.

В диссертационной работе не выявлено использования материалов или отдельных результатов без ссылок на автора или источник заимствования, включая работы, выполненных соискателем лично и/или в соавторстве.

## 8. Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: XIX международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, МЭИ, 2013; VIII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г. Казань, КГЭУ, 2013; IX международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г. Казань, КГЭУ, 2014; X Открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», Казань, КГЭУ, 2015; I международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий», Белгород, 2015; IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, г. Пермь, 2016; III, IV, V Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ», г. Казань, 2017, 2018, 2019; Международной научной конференции «Информационные системы и технологии: достижения и перспективы», г. Сумгаит, СГУ, 2018; Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con 2019», г. Владивосток, 2019; Международной научно-технической конференции «Smart Energy Systems 2019» (SES-2019), г. Казань, 18 – 20 сентября, 2019.



## 9. Выводы

Диссертация Малёва Н.А. «Метод автоматизированного многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей с применением градиентного алгоритма вычисления оценок параметров» является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение задачи анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей, позволяющей производить оценку отклонений параметров электрических машин от требуемых значений на этапах опытно-конструкторских и послеремонтных испытаний.

Решение данной задачи имеет значение для развития области науки и техники, занимающейся исследованием по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых и информационных устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии.

Диссертация обобщает самостоятельные исследования автора, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. При выполнении диссертационной работы Малёв Н.А. проявил себя зрелым научным работником, способным ставить и решать сложные теоретические и практические задачи.

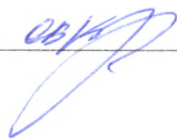
Работа соответствует критериям п. 9 – 14 Положения о присуждении ученых степеней, принятого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертационная работа «Метод автоматизированного многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей с применением градиентного алгоритма вычисления оценок параметров» Малёва Николая Анатольевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 «Электромеханика и электрические аппараты».

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Приборостроение и мехатроника» Федерального государственного


бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Присутствовало на заседании 13 чел. Результаты голосования: «за» – 13 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 9 от «18» сентября 2020 г.



---

Козелков Олег Владимирович,  
канд. техн. наук, доцент, кафедра  
«Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ  
ВО «КГЭУ», заведующий кафедрой



---

Корнилов Владимир Юрьевич,  
доктор техн. наук, профессор, кафедра  
«Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ  
ВО «КГЭУ», профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,  
420066. Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.  
Тел. (843)519-43-18, e-mail: epa\_kgeu@mail.ru

Сведения о лице, утвердившем заключение:

Ахметова Ирина Гареевна: доктор технических наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,  
проректор по научной работе,  
420066. Республика Татарстан. г. Казань, ул. Красносельская, 51.  
Тел. (843)519-43-55, e-mail: irina\_akhmetova@mail.ru



Козелкова О.В., Корнилова В.Ю.  
подпись уполномоченного  
Специалист УК Шайхих