

На правах рукописи



Малёв Николай Анатольевич

**МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРАДИЕНТНОГО
АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Приборостроение и мехатроника»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Погодицкий Олег Владиславович

Официальные оппоненты:

Макаров Валерий Геннадьевич
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Электропривод и электротехника»,
ФГБОУ «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет» (г. Казань)

Саушев Александр Васильевич
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Электропривод и электрооборудование
береговых установок»,
ФГБОУ «Государственный университет
морского и речного флота им. адмирала
С.О. Макарова» (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация

ГБОУ ВО «Альметьевский
государственный нефтяной институт»
(г. Альметьевск)


Защита состоится 16 марта 2021 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д212.082, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ: <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=110>

Автореферат разослан " ____ " _____ " 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 качества, 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 существенно зависит от параметров 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., Eykhoff 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.

С учетом перечисленных выше факторов, влияющих на функционирование ЭМП, **объектом исследования** являются электрические машины, выполняющие электромеханическое преобразование энергии в составе рабочих комплексов, а **предметом исследования** – методы, алгоритмы и программы, позволяющие осуществить анализ нестабильных параметров и контроль функционирования ЭМП в процессе эксплуатации.

Целью диссертационной работы является разработка метода многопараметрического автоматизированного анализа и контроля электромеханических преобразователей на основе градиентного алгоритма вычисления обобщенного интегрального критерия Q , позволяющего оценить вектор нестабильных параметров χ ЭМП в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Определение выходных координат ЭМП с применением экспериментальной установки для исследования переходных режимов электромеханических преобразователей с

последующим сохранением и статистической обработкой полученных временных зависимостей.

2. Формирование математической модели электромеханического преобразователя на основе экспериментальных данных и оценка статической и динамической погрешностей полученной математической модели.

3. Формирование эталонной модели ЭМП и моделей чувствительности по контролируемым нестабильным параметрам.

4. Вычисление обобщённого интегрального критерия Q с применением градиентного алгоритма и формирование функционала $Q(\chi)$ в таблично-графическом виде.

5. Разработка и программная реализация метода многопараметрического анализа и контроля функционирования ЭМП.

6. Проверка работоспособности разработанного метода анализа нестабильных параметров и контроля функционирования ЭМП путем моделирования в среде MatLab Simulink, апробирование метода с применением экспериментальной установки, оценка полученных результатов и выработка рекомендаций по применению метода.

Методы исследований. В диссертационной работе применялись положения теории электрических машин, теории обобщённого электромеханического преобразователя, теории чувствительности, теории систем, теории дифференциальных и разностных уравнений, а также методы аппроксимации и сглаживания экспериментальных данных, численные методы решения систем дифференциальных уравнений, метод наименьших квадратов, метод пространства состояний.

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.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен и апробирован на математических моделях обобщённый 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 χ -зависимостей с последующим получением оценок нестабильных параметров ЭМП.

2. Получены дифференциальные уравнения чувствительности электромеханических преобразователей различных типов, *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 – активного сопротивления и индуктивности якорной цепи и момента инерции – вычисляются на основе зависимости вектора нестабильных параметров от обобщённого интегрального критерия с приемлемой в инженерной практике точностью.

Практическая ценность и теоретическая значимость работы:

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.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Экспериментально-аналитический алгоритм для анализа динамических свойств ЭМП с применением векторно-матричной модели чувствительности по нестабильным параметрам χ объекта (*п. 3 паспорта специальности*).
2. Метод получения компонентов функционала $Q(\chi)$ в форме Q -таблиц и χ -зависимостей на основе градиентного алгоритма для реализации многопараметрического контроля функционирования ЭМП с получением оценок нестабильных параметров (*п. 3, 5 паспорта специальности*).
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 (*п. 3, 5 паспорта специальности*).
4. Метод автоматизированного многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей на этапе эксплуатации в составе рабочих комплексов (*п. 3, 5 паспорта специальности*).
5. Результаты экспериментального исследования метода многопараметрического автоматизированного анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей с применением машины постоянного тока (*п. 3, 5 паспорта специальности*).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования используются в деятельности электрического цеха Казанской ТЭЦ-1 и ООО «Стэк Мастер» (г. Казань), а также в образовательном процессе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» при подготовке магистров по направлениям 12.04.01 «Приборостроение», магистерской программы «Микропроцессорная техника и программное обеспечение измерений» и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» магистерской программы «Электроприводы и системы управления электроприводов».

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.

Публикации. 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.

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%.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка используемой литературы, включающего 126 наименований. Диссертация изложена на 198 страницах основного текста, содержит 99 рисунков, 9 таблиц, 9 приложений на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, показаны научная новизна, практическая ценность и теоретическая значимость проведенных исследований, приведены сведения о реализации результатов и апробации работы, проведено структурирование публикаций.

В первой главе рассмотрена научная задача исследования установившихся и переходных режимов электромеханических преобразователей с нестабильными параметрами, произведен обзор способов анализа и контроля параметров ЭМП и проанализированы их особенности. Показаны перспективные пути решения поставленной задачи с применением аналитических методов на основе математических моделей электромеханического преобразования энергии в объектах исследования с использованием цифровых технологий.

Приведено математическое описание обобщенной электрической машины, показаны способы преобразования координат, позволяющие упростить уравнения электромеханического преобразования энергии. Приведены уравнения электрического и механического равновесия в неподвижной и вращающейся системах координат, которые позволяют получить уравнения различных типов электромеханических преобразователей с учетом их характерных особенностей. Показано, что при решении задачи многопараметрического анализа и контроля функционирования ЭМП различных типов наиболее удобную форму математического описания процесса электромеханического преобразования энергии представляют уравнения во вращающейся системе координат d, q .

На основании уравнений обобщенной электрической машины получены соотношения, характеризующие процесс электромеханического преобразования энергии в двигателе постоянного тока, асинхронном и вентильном двигателях. Приведенные соотношения позволяют получить соответствующие Simulink-модели и осуществить процесс анализа и контроля нестабильных параметров ЭМП с использованием доступных для измерения напряжения и угловой скорости вращения ротора, с применением аналитических методов на основе цифровых технологий, которые не требуют значительных

вычислительных мощностей, создания сложных алгоритмов и систем формирования прогностической информации и обеспечивают оценку нестабильных параметров в режиме реального времени с требуемыми значениями погрешностей.

Во второй главе показана взаимосвязь параметров ЭМП с такими важными показателями электрических машин, как масса, размеры, КПД, $\cos\varphi$, ударные токи короткого замыкания, надежность и стоимость, а также преимущества использования параметров ЭМП, отнесённых к фазе машины, за исключением момента инерции, что облегчает экспериментальное определение параметров и формирование уравнений преобразования энергии.

Проведен анализ влияния вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя (АЭМП) на динамические характеристики с применением обобщённого интегрального критерия $Q(\varepsilon)$, представляющего собой интеграл от невязки ε между угловыми скоростями вращения эталонной модели АЭМП $\omega_m(t)$ и модели АЭМП с нестабильными параметрами $\omega_{var}(t)$:

$$Q(\varepsilon) = \int_0^{\infty} [\omega_{var}(t) - \omega_m(t)] dt. \quad (1)$$

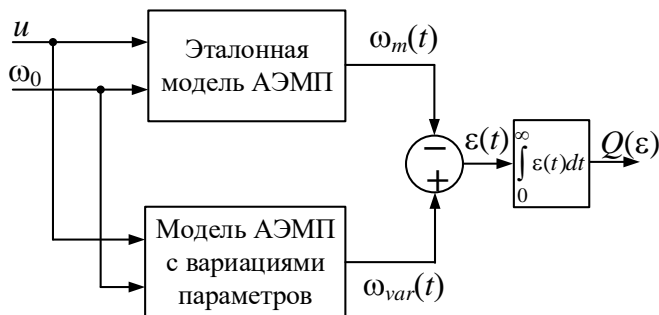


Рис. 1. Структурная схема вычисления $Q(\varepsilon)$ АЭМП

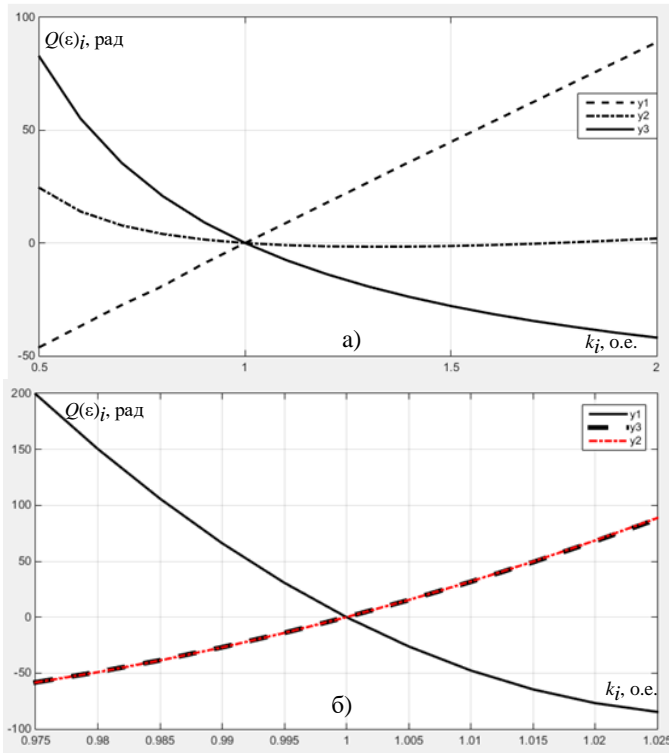


Рис. 2. Зависимости а) $y1: Q(\varepsilon)_J = f(J_{var}/J_m)$;

$y2: Q(\varepsilon)_{R1} = f(R_{1var}/R_{1m})$; $y3: Q(\varepsilon)_{R2} = f(R_{2var}/R_{2m})$

б) $y1: Q(\varepsilon)_{L12} = f(L_{12var}/L_{12m})$; $y2: Q(\varepsilon)_{L1} = f(L_{1var}/L_{1m})$;

$y3: Q(\varepsilon)_{L2} = f(L_{2var}/L_{2m})$

Обобщённый интегральный критерий позволяет определить не только величину, характеризующую невязку ε между объектом и моделью, но и её знак. Структурная схема вычисления $Q(\varepsilon)$ представлена на рис. 1. Анализ влияния вариаций параметров на динамические характеристики АЭМП, проведенный по графикам на рис. 2, показал следующие характерные особенности: интегральный критерий $Q(\varepsilon)_J$ связан с относительным изменением момента инерции линейной зависимостью и с увеличением отношения J_{var}/J_m величина $Q(\varepsilon)_J$ растет, что соответствует увеличению времени пуска и снижению быстродействия; значения $Q(\varepsilon)_{R1}$ несущественно изменяются при вариациях активного сопротивления статора на заданном интервале, что свидетельствует о малом влиянии R_1 на переходный процесс $\omega(t)$; с увеличением активного сопротивления ротора R_2 переходные процессы в АЭМП протекают с большими быстродействием и перерегулированием по сравнению с эталонным процессом; изменение индуктивностей статора L_1 и ротора L_2 оказывает тождественное влияние на характер переходных процессов АЭМП, которые становятся более инерционными по мере увеличения

указанных параметров; увеличение взаимной индуктивности L_{12} имеет противоположное воздействие и приводит к увеличению быстродействия и колебательности и снижению запасов устойчивости электромеханического преобразователя.

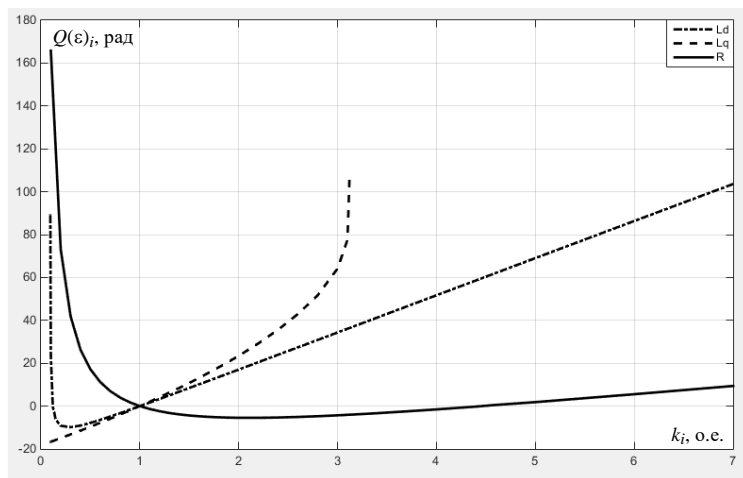


Рис. 3. Зависимости $Q(\epsilon)_{Ld} = f(L_{dvar}/L_{dm})$; $Q(\epsilon)_{Lq} = f(L_{qvar}/L_{qm})$;
 $Q(\epsilon)_R = f(L_{Rvar}/L_{Rm})$

активного сопротивления R критерий $Q(\epsilon)_R$ также возрастает, приобретая линейно нарастающий характер и свидетельствуя о снижении быстродействия.

Анализ ЭМП постоянного тока показал, что изменение индуктивности якоря в заданных пределах не оказало существенного влияния на величину интегрального критерия $Q(\epsilon)_{L_a}$ во всем диапазоне изменения L_a . Изменения момента инерции J и активного сопротивления якоря R_a вызывают одинаковые изменения выходной координаты $\omega(t)$ машины постоянного тока, указывая на преобладающее влияние электромеханических переходных процессов и сказываясь, в общем случае, на увеличении времени пуска, прямо пропорционального росту указанных параметров.

Разработанный метод анализа с применением эталонной модели и вычислением обобщенного интегрального критерия при решении инженерной задачи исследования влияния нестабильных параметров на динамические свойства ЭМП позволил получить хорошие результаты для нелинейных многомерных моделей асинхронного электромеханического преобразователя и вентильного двигателя. Однако при исследовании упрощенной линеаризованной модели машины постоянного тока метод показал малую информативность, что не позволило четко оценить реакцию выходной координаты ЭМП на вариации параметров.

Кроме того, проведенные для рассмотренных типов ЭМП исследования были получены при изменении одного параметра при фиксированных номинальных значениях остальных варьируемых параметров электрических машин. В этой связи интерес представляет анализ динамических процессов в электромеханических преобразователях при совместном изменении нестабильных параметров с вычислением градиента от невязки ϵ по варьируемым параметрам на основе методов теории чувствительности.

В третьей главе получены в общем виде уравнения функций чувствительности по вектору нестабильных параметров χ для квазистационарных линейных и нелинейных ЭМП. Уравнения являются линейными и могут быть представлены в векторно-матричной форме

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{\chi} &= \mathbf{A}_{\chi} \mathbf{x}_{\chi} + \mathbf{B}_{\chi} \mathbf{u}; \\ \mathbf{Y}_{\chi} &= \mathbf{C}_{\chi} \mathbf{x}_{\chi} + \mathbf{F}_{\chi}. \end{aligned} \quad (2)$$

Данная форма представления приводит к структурной схеме вычисления вектора чувствительности, показанной на рис. 4.

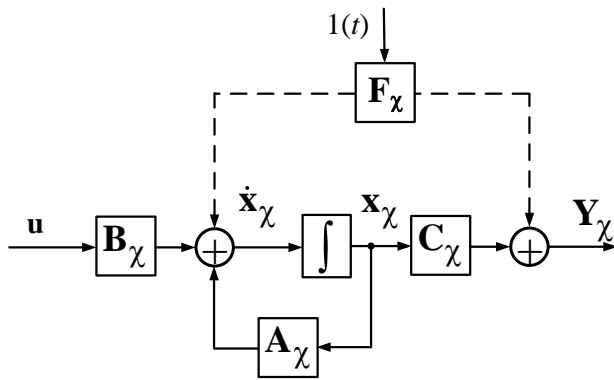


Рис. 4. Векторно-матричная структурная схема вычисления функций чувствительности

размерностью $(m \times m)$, где $m = r \cdot n$, n – порядок исходных дифференциальных уравнений, r – число нестабильных параметров. Все блоки матрицы A_χ являются нулевыми матрицами, за исключением блоков, расположенных на главной диагонали

$$A_\chi = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_r \end{bmatrix},$$

а каждый элемент A_i является ненулевой матрицей. Определитель квадратной блочно-диагональной матрицы будет равен произведению определителей диагональных блоков A_i . Матрица входа B_χ является блочной (клеточной) матрицей размерностью $(m \times l)$, где l – число входных координат, а матрица выхода C_χ – блочно-диагональной матрицей размерностью $(p \times m)$, где p – число выходных координат.

Так, система уравнений чувствительности для ЭМП постоянного тока

$$\dot{x}_\chi = A_\chi x_\chi + B_\chi u_0, \tag{3}$$

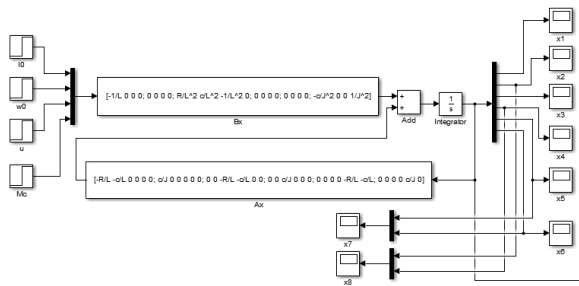


Рис. 5. Simulink-модель вычисления вектора чувствительности ЭМП постоянного тока

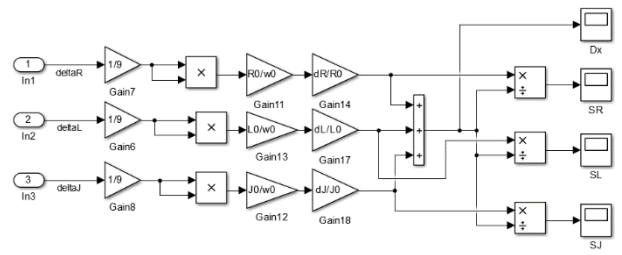


Рис. 6. Simulink-модель вычисления суммарной дисперсии и относительных оценок

позволяет получить оригинальные Simulink-модели вычисления вектора чувствительности (рис. 5), а также суммарной дисперсии и относительных оценок при случайных отклонениях нестабильных параметров (рис. 6). Показано, что наиболее чувствительной к параметрическим изменениям выходной координатой ЭМП является угловая скорость вращения ω .

В этой связи скорость ω является также и наиболее информативной координатой и представляет максимальный интерес при построении системы многопараметрического анализа и контроля функционирования ЭМП. Кроме того, анализ параметрических возмущений показал, что наибольшую погрешность в отклонения выходных координат

Особенностью модели чувствительности (2) является наличие матрицы свободных членов F_χ , зависящей от номинальных значений координат и параметров объекта исследования, которая может быть приведена ко входу или выходу схемы вычисления вектора чувствительности, а в некоторых случаях равна нулю.

Также следует отметить, что основная матрица уравнений чувствительности A_χ (матрица Якоби) является блочно-диагональной (квазидиагональной) матрицей

ЭМП постоянного тока вносит изменение момента инерции J , поскольку его влияние на скорость вращения примерно в 18 раз превышает влияние индуктивности и активного сопротивления якорной цепи и $\omega_J^{уст} = -466,8$ рад/с, тогда как $\omega_{Ra}^{уст} = -25,71$ рад/с, а $\omega_{La}^{уст} = -26,51$ рад/с (см. рис. 5).

В результате дифференцирования уравнений электромеханического преобразования энергии в асинхронном двигателе относительно вектора потокосцеплений Ψ по вектору нестабильных параметров χ , включающему в себя активное сопротивление и индуктивность статора R_1 и L_1 , активное сопротивление и индуктивность ротора R_2 и L_2 и взаимную индуктивность L_{12} , получена система уравнений чувствительности

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}_\chi &= \mathbf{A}_\chi \Psi_\chi + \mathbf{B}_\chi \Psi^0; \\ \mathbf{M}_\chi &= \mathbf{C}_\chi \Psi_\chi + \mathbf{F}_\chi. \end{aligned} \quad (4)$$

Соответствующая Simulink-модель векторно-матричной структурной схемы для исследования влияния перечисленных параметров показана на рис. 7. Как видно из системы (4), в качестве выходной координаты рассматривался электромагнитный момент M . Характерной особенностью векторно-матричной структурной схемы вычисления функций чувствительности АЭМП является наличие матрицы свободных членов \mathbf{F}_χ , приведенной к выходу схемы.

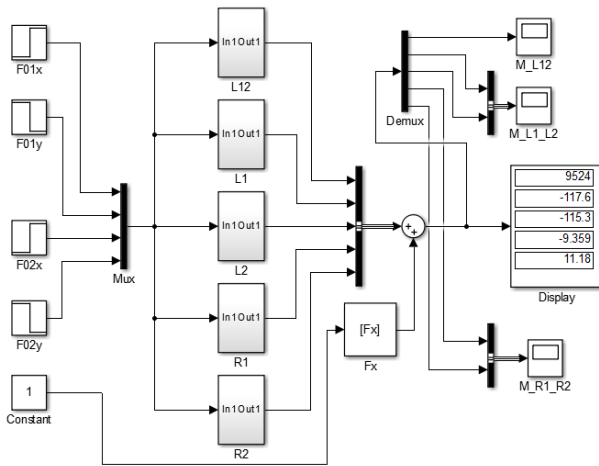


Рис. 7. Simulink-модель для вычисления вектора чувствительности АЭМП

чувствительности $M_{L_1}(t)$ и $M_{L_2}(t)$ устанавливаются около значений, равных $M_{L_1}^{уст} = -117,6$ Н·м и $M_{L_2}^{уст} = -115,3$ Н·м соответственно. В этой связи влиянием индуктивностей, а также активных сопротивлений статора и ротора на выходную координату АЭМП можно пренебречь.

Анализ влияния нестабильных параметров вентильного ЭМП на его динамические характеристики был произведен для момента M и угловой скорости вращения ω . Полученной системе уравнений чувствительности

$$\dot{\mathbf{x}}_\chi = \mathbf{A}_\chi \mathbf{x}_\chi + \mathbf{B}_\chi \mathbf{u}_0 + \mathbf{F}_\chi \quad (5)$$

соответствует Simulink-модель (рис. 8) вычисления функций чувствительности вентильного двигателя с матрицей свободных членов \mathbf{F}_χ , приведенной ко входу схемы (см. рис. 9).

Моделирование уравнений чувствительности на основе Simulink-моделей с подсистемами по нестабильным параметрам позволило сделать вывод о преобладающем влиянии проекции индуктивности статора L_q на поперечную координатную ось, вызывающей соответствующие изменения выходных координат вентильного ЭМП:

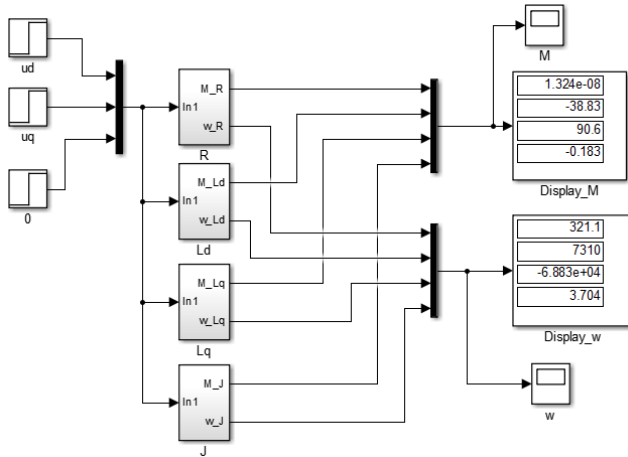


Рис. 8. Simulink-модель для вычисления вектора чувствительности вентильного двигателя

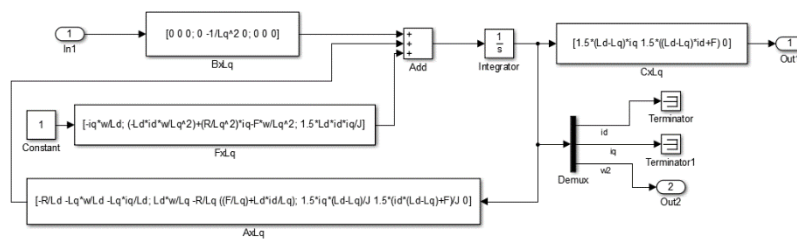


Рис. 9. Simulink-модель для вычисления функций чувствительности по индуктивности L_q

скорости вращения до значения $\omega_{Lq}^{уст} = -6,883 \cdot 10^4$ рад/с и момента до значения $M_{Lq}^{уст} = 90,6$ Н·м.

Графики функций чувствительности $M_{Ld}(t)$ и $\omega_{Ld}(t)$ при вариациях индуктивности L_d статора устанавливаются около значений, равных $\omega_{Ld}^{уст} = 7310$ рад/с и $M_{Lq}^{уст} = -38,83$ Н·м, а

при изменении активного сопротивления статора и момента инерции ротора установившиеся значения функций чувствительности составляют:

$$\omega_R^{уст} = 321,1 \text{ рад/с,}$$

$$\omega_J^{уст} = 3,704 \text{ рад/с, } M_R^{уст} \approx 0 \text{ Н·м, } M_J^{уст} = -0,183 \text{ Н·м.}$$

При этом, подобно ЭМП постоянного тока, наиболее чувствительной к вариациям параметров координатой является угловая скорость вращения ω .

Полученные для рассмотренных типов ЭМП уравнения чувствительности и оригинальные Simulink-модели будут применены далее для решения комплексной задачи многопараметрического автоматизированного анализа и контроля электромеханических преобразователей на этапах проектирования, испытаний опытных образцов, а также эксплуатации в процессе функционирования в составе рабочих комплексов.

В четвертой главе реализован метод многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей с применением машины постоянного тока. Метод включает два этапа: предварительно-экспериментальный и аналитико-экспериментальный.

На предварительно-экспериментальном этапе производятся:

- регистрация, сохранение и обработка выходных координат электромеханических преобразователей в динамических режимах;
- измерение и расчет нестабильных параметров объекта исследования;
- формирование математической модели ЭМП и обоснование возможности применения полученной математической модели электромеханического преобразователя для реализации метода.

На аналитико-экспериментальном этапе производятся:

- формирование эталонной модели ЭМП и моделей чувствительности по нестабильным параметрам;
- дискретная аппроксимация полученных математических моделей;
- вычисление обобщённого интегрального критерия $Q[\varepsilon(\chi)]$ на основе градиентного алгоритма $\hat{\chi} = -\Lambda_{\chi} \nabla_{\chi} Q[\varepsilon(\chi)]$ с применением векторно-матричной структурной схемы многопараметрического анализа и контроля электромеханических преобразователей различных типов, представленной на рис. 10.

На схеме приняты следующие обозначения: I – модель объекта исследования (ЭМП) с нестабильными параметрами; II – эталонная модель объекта исследования; III – модель

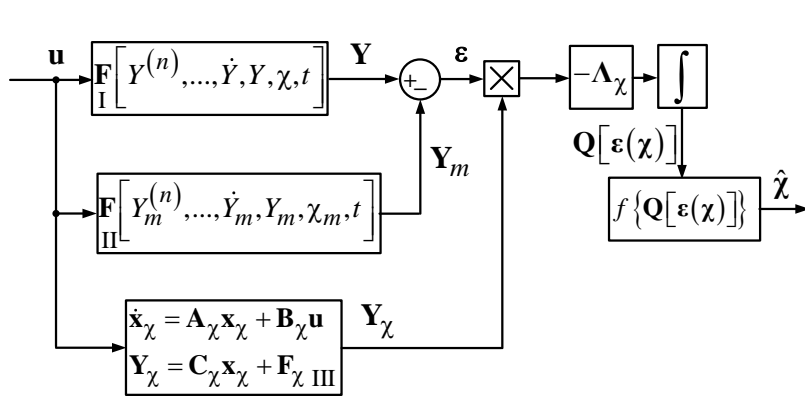


Рис. 10. Векторно-матричная структурная схема многопараметрического анализа и контроля электромеханических преобразователей

чувствительности по нестабильным параметрам; \mathbf{Y} – вектор выходных координат объекта исследования; \mathbf{Y}_m – вектор выходных координат эталонной модели; \mathbf{A}_χ , \mathbf{B}_χ , \mathbf{C}_χ , \mathbf{F}_χ – матрицы коэффициентов модели чувствительности; \mathbf{Y}_χ – вектор функций чувствительности; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор невязки между выходными координатами модели объекта исследования и эталонной модели; $\boldsymbol{\Lambda}_\chi = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r\}$ –

вектор коэффициентов нормирования; $\mathbf{Q}[\boldsymbol{\varepsilon}(\chi)]$ – вектор значений обобщённого интегрального критерия; $\hat{\chi}$ – вектор оценок нестабильных параметров;

- формирование компонентов $\mathbf{Q}[\boldsymbol{\varepsilon}(\chi)]$ в таблично-графической форме. Количество столбцов полученной Q -таблицы зависит от числа r контролируемых нестабильных параметров исследуемого объекта; количество строк таблицы k определяется диапазоном изменения нестабильных параметров, величиной отклонения параметра $\Delta\chi$, т.е. требуемой точностью оценки и вычисляется по следующему выражению:

$$k = \beta^r, \quad \beta = \frac{\chi_{i\max} - \chi_{i\min}}{\Delta\chi_i} + 1, \quad (6)$$

где $\chi_{i\max}$ – верхняя граница диапазона изменения i -го нестабильного параметра; $\chi_{i\min}$ – нижняя граница диапазона изменения i -го нестабильного параметра; $\Delta\chi_i$ – отклонение i -го параметра; β – коэффициент отклонения i -го параметра. Значения обобщённого интегрального критерия ранжированы по возрастанию параллельно с соответствующими значениями нестабильных параметров. Графические зависимости вида $\hat{\chi} = f\{\mathbf{Q}[\boldsymbol{\varepsilon}(\chi)]\}$ позволяют получить оценки нестабильных параметров. Проведена проверка работоспособности метода путем моделирования в среде MatLab Simulink и экспериментально с применением реального ЭМП и вычисление погрешностей оценок параметров.

На рис. 11 показаны функциональная схема и внешний вид экспериментальной установки, с помощью которой проводилась проверка работоспособности метода. В качестве объекта исследования рассматривался серводвигатель постоянного тока типа РИВТ-6-25/3А с возбуждением от постоянных магнитов и встроенным тахогенератором с крутизной выходного напряжения 3 мВ·мин. Двигатель получает питание от однофазного двухполупериодного мостового стабилизированного выпрямителя типа ВСА-5К. Объект исследования характеризуется следующими значениями параметров: номинальное сопротивление якоря $R_a = 5,15$ Ом, индуктивность якоря $L_a = 0,0103$ Гн, момент инерции $J = 2,516 \cdot 10^{-5}$ кг·м²; «нестабильные» сопротивление якоря $R_{a,\text{var}} = 6,025$ Ом, индуктивность якоря $L_a = 0,0122$ Гн, момент инерции $J_{\text{var}} = 2,893 \cdot 10^{-5}$ кг·м². Результаты проверки отражены на следующих зависимостях (рис. 12, 13, 14).

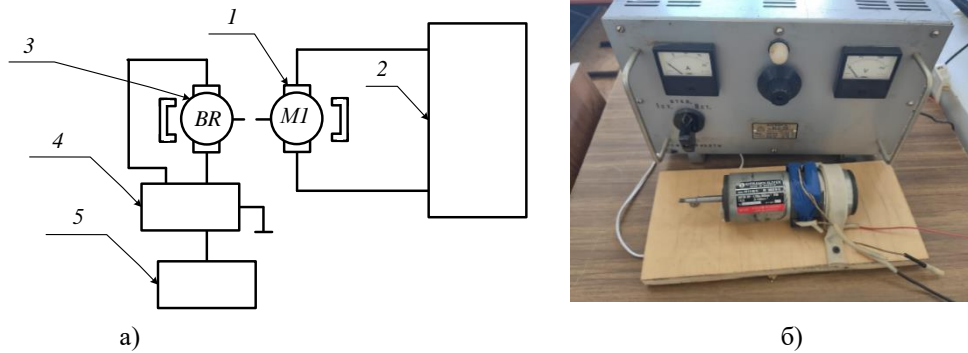


Рис. 11. Экспериментальная установка для исследования электрических машин с обработкой информации с помощью платформы Arduino Nano: а) функциональная схема: 1 – двигатель постоянного тока; 2 – станция управления ДПТ; 3 – тахогенератор; 4 – микроконтроллер; 5 – персональный компьютер; б) внешний вид

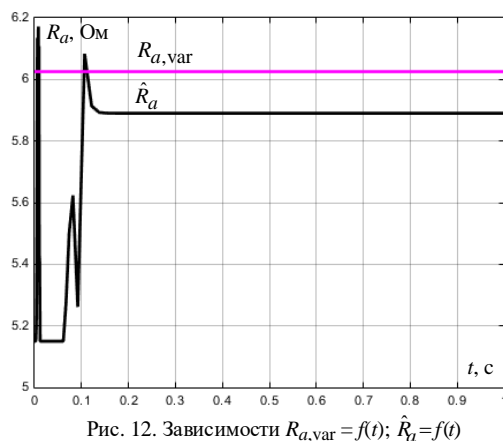


Рис. 12. Зависимости $R_{a,var} = f(t)$; $\hat{R}_a = f(t)$

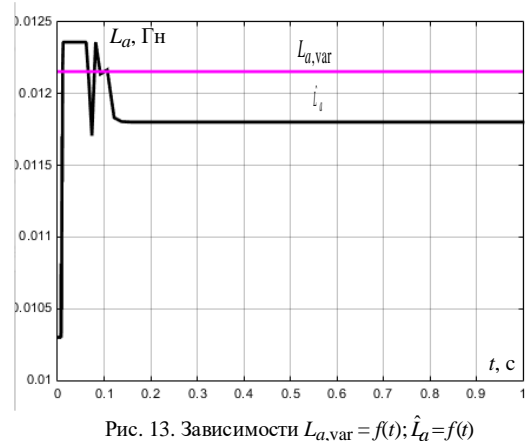


Рис. 13. Зависимости $L_{a,var} = f(t)$; $\hat{L}_a = f(t)$

Из анализа приведенных зависимостей следует, что процесс вычисления оценок параметров ЭМП постоянного тока не превышает 0,2 с. Установившиеся значения оценок

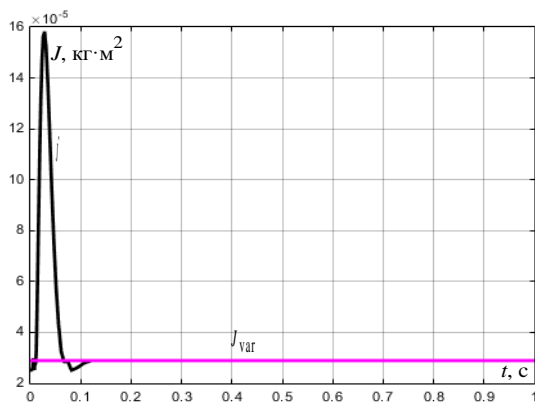


Рис. 14. Зависимости $J_{var} = f(t)$; $\hat{J} = f(t)$

при $\chi_{i\min} = 1$ о.е., $\chi_{i\max} = 1,2$ о.е., $\Delta\chi_i = 0,05$ о.е. и $\beta = 5$ составили, соответственно: $\hat{R}_a = 5,89$ Ом; $\hat{L}_a = 0,0118$ Гн; $\hat{J} = 2,888 \cdot 10^{-5}$ кг·м². Относительные погрешности вычисления нестабильных параметров составили $\delta_{R_a} = 2,24\%$;

$\delta_{L_a} = 3,28\%$; $\delta_J = 0,17\%$ и обусловлены тем, что моделирование проводилось не в «узловых» точках $\chi_{var} = f(\chi; 1,05\chi; 1,1\chi; 1,15\chi; 1,2\chi)$, а при изменениях сопротивления якоря в 1,17, индуктивности якоря в 1,18 и момента инерции в

1,15 раза от соответствующих номинальных значений. Величина погрешности оценки нестабильных параметров на требуемом интервале их изменения может быть снижена за счет уменьшения заданных отклонений параметров $\Delta\chi_i$ при вычислении обобщенного интегрального критерия. При этом в соответствии с выражением (6) увеличится количество строк Q -таблицы k и, соответственно, точность контроля параметров ЭМП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены научно-обоснованные инженерно-технические решения в виде метода многопараметрического автоматизированного анализа и контроля электромеханических преобразователей, позволяющего провести оценку

вектора нестабильных параметров объектов исследования в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов.

Выполненные в диссертации исследования представлены следующими результатами:

1. Разработана экспериментальная установка для исследования переходных режимов электромеханических преобразователей с применением машин постоянного тока, позволяющая регистрировать выходные координаты ЭМП с последующим сохранением и статистической обработкой полученных временных зависимостей.
2. На основе анализа математического описания электромеханических преобразователей различных типов получены и апробированы Simulink-модели ЭМП, отражающие динамические свойства объектов исследования с требуемой точностью и предоставляющие возможность контроля нестабильных параметров в процессе эксплуатации.
3. Разработаны алгоритмы получения эталонной модели и моделей чувствительности ЭМП различных типов по контролируемым нестабильным параметрам. Получены соответствующие Simulink-модели на основе z -формы и векторно-матричных разностных уравнений для ЭМП постоянного тока.
4. Разработана и автоматизирована процедура вычисления обобщённого интегрального критерия Q с применением градиентного алгоритма и получены компоненты функционала $Q(\chi)$ в таблично-графическом виде.
5. Разработан метод и программное обеспечение для реализации многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока на этапе эксплуатации в составе рабочих комплексов.
6. Проведено исследование с применением оригинальных Simulink-моделей и экспериментальное апробирование разработанного метода многопараметрического анализа и контроля функционирования ЭМП и показано на примере серводвигателя постоянного тока типа РИВТ-6-25/3А, что относительные погрешности вычисления оценок нестабильных параметров не превышают 5%. Сформулированы рекомендации по применению метода анализа и контроля функционирования ЭМП в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов.

Перспективы дальнейшего развития данного научного исследования:

- разработанный метод целесообразно использовать не только для анализа и контроля функционирования апробированных в работе электромеханических преобразователей постоянного тока, но и ЭМП других типов и конструктивных исполнений, что позволит утверждать об универсальности метода;
- дальнейшее применение градиентного алгоритма для построения инверсного идентификатора, что позволит решить задачу увеличения компонентов вектора нестабильных параметров для анализа и контроля функционирования ЭМП различных типов;
- дальнейшее использование данного метода предполагает обеспечение робастности ЭМП, функционирующих в составе рабочих комплексов за счет применения методов активной коррекции на основе обратных связей по контролируемым координатам.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Учебные пособия

1. Погодицкий О.В., Малёв Н.А. Проектирование мехатронных систем. В 2 ч. Ч. 1. Анализ и синтез: учебное пособие / О.В. Погодицкий, Н.А. Малёв. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – 312 с.

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

2. 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.

3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

Публикации, индексируемые в реферативной базе данных SCOPUS

9. 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>.
10. 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>

Публикации в трудах конференций

11. Малёв Н.А., Маямсина Д.Г. Стабилизация динамических свойств следящего электропривода с параметрической обратной связью / Тезисы докладов XIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2013). М.: Издательский дом МЭИ, 2013. Т.4. С. 132.
12. Маямсина Д.Г., Малёв Н.А. Анализ влияния параметров на динамические свойства следящего электропривода / Материалы докладов VIII Международной молодёжной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 4 т. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. Т. 3. С. 100.
13. Маямсина Д.Г., Малёв Н.А. Адаптивная система управления с беспойсковым алгоритмом вычисления градиента целевого функционала / Материалы докладов IX Международной молодёжной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 4 т. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. Т. 3. С. 88.
14. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Синтез цифрового регулятора в системе с последовательной коррекцией / Материалы докладов X Открытой молодёжной научно-

- практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» / редкол. Э.Ю. Абдуллазянов (отв. редактор) и др. – Казань: Казан гос. энерг. ун-т, 2015. С. 219.
15. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Львова Т.Н., Тукаева Е.П. Методика последовательной коррекции астатической малоколебательной системы управления электроприводом / Материалы I международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий». В 6 ч. – Белгород, 2016. Ч.1. С. 92-95.
16. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Цветков А.Н. Синтез и реализация цифрового регулятора высокого порядка на программируемом логическом контроллере / Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS'2016). Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. ун-та, 2016. С. 322-325.
17. Малёв Н.А., Кандыркин Е.Е. Анализ динамических свойств двухмассовой электромеханической системы механизма подъёма крана / Сб. материалов III Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ», Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 171 – 176.
18. Малёв Н.А., Малочкин Я.А. Особенности синтеза цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой / Сб. материалов Международной научной конференции «Информационные системы и технологии: достижения и перспективы», Сумгаит, СГУ, 2018. – С. 272.
19. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Синтез цифровых фильтров высоких порядков / Сб. материалов IV Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ», Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – С. 197 – 205.
20. Малёв Н.А., Рахимов Д.И. Особенности синтеза самонастраивающейся системы управления с эталонной моделью по градиентному алгоритму / Сб. материалов IV Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ», Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – С. 205 – 209.
21. Малёв Н.А., Харитонов А.А. Анализ влияния перекрестных связей в вентильном двигателе / Сб. материалов IV Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ», Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – С. 209 – 212.
22. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Метод многопараметрического анализа и контроля функционирования электромеханических преобразователей с применением Q -таблиц и χ -зависимостей / Сб. материалов V Поволжской научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ», Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – С. 72 – 75.

Малёв Николай Анатольевич

**Метод автоматизированного
многопараметрического анализа и контроля
функционирования электромеханических
преобразователей с применением градиентного
алгоритма вычисления оценок параметров**

Подписано к печати 11.01.2021. Формат 60x90/16.
Усл. печ. л. 1. Бесплатно. Зак. 2-21. Тираж 100.
Типография КВТККУ