

На правах рукописи

-n

# Буньков Дмитрий Сергеевич

# АЛГОРИТМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПО КРИВЫМ ЗАТУХАНИЯ ФАЗНЫХ ТОКОВ

# АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель:	Кладиев Сергей Николаевич				
	кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ, «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)				
Официальные оппоненты:	Зюзев Анатолий Михайлович				
	доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург)				
	Нос Олег Викторович				
	доктор технических наук, профессор кафедры проектирования технологических машин, «Новосибирский государственный технический				

Защита состоится 16 сентября 2022 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.10 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова 7, ауд. 217.

университет» (г. Новосибирск)

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ДС.ТПУ.10 кандидат технических наук

подпись

Кладиев Сергей Николаевич

ФИО

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день в силу общеизвестных и подтвержденных многими годами успешной эксплуатации положительных качеств асинхронные электрические машины нашли широкое применение в различных сферах промышленности. К основным достоинствам асинхронной машины (AM) относятся простота конструкции, относительно низкая себестоимость, возможность выдерживать кратковременные токовые перегрузки, отсутствие щёточно-коллекторного узла и дорогостоящих редкоземельных магнитов.

Развитие принципов теории управления асинхронными регулируемыми электроприводами (ЭП) привело к появлению различных методов управления, реализованных в программном обеспечении (ПО) современных микропроцессорных преобразователей частоты (ПЧ). К таким методам управления относятся скалярное, векторное и прямое управление моментом в различных модификациях и комбинациях. Перечисленные методы управления имеют свои области применения и в разной степени требовательны к наличию информации об электромагнитных параметрах математической модели АМ, применяемой в составе электропривода. Задание некорректных настроек системы управления, базирующихся в наибольшей степени именно на параметрах математической модели АМ, может приводить к ухудшению показателей качества регулирования, снижению энергоэффективности либо полной неработоспособности асинхронного ЭП.

Для математического описания процессов, происходящих в электрической подсистеме регулируемой AM, наибольшее распространение получила T-образная схема замещения без учета потерь в магнитопроводе. Для регулируемых AM необходимо определять оценки следующих параметров T-образной схемы замещения: активных сопротивлений статорной и роторной обмоток, индуктивностей рассеяния статорной и роторной обмоток, а также индуктивности главного контура намагничивания. На основе прямых измерений электрических величин в фазных обмотках AM возможно получить оценки следующих параметров T-образной схемы замещения: активного сопротивления статорной обмотки, а также активного го сопротивления статорной обмотки, а также активного сопротивления параметров T-образной схемы замещения АМ с фазным и короткозамкнутым ротором требует применения методов предварительной и динамической идентификации.

Большинство отечественных ПЧ не имеют встроенной универсальной опции по нахождению оценок параметров схемы замещения AM, что в свою очередь является стандартом для наиболее продвинутых зарубежных производителей, таких как Siemens, Danfoss, ABB, Schneider electric и др. Таким образом, развитие алгоритмов предварительной идентификации особенно актуально при разработке программного обеспечения для ПЧ отечественного производства.

Степень разработанности темы диссертации. Особенность методов предварительной идентификации заключается в определении параметров схемы замещения до ввода AM в эксплуатацию. Существенный вклад в создание и усовершенствование методов предварительной идентификации внесли многие российские и зарубежные ученые: Каширских В.Г., Ещин Е.К., Копылов И.П., Беспалов В.Я., Анучин А.С., Алямкин Д.И., Панкратов В.В., Нос О.В., Калачев Ю.Н., Шрейнер Р.Т., Зюзев А.М., Ковалев В.З., Глазырин А.С., Боловин Е.В., Виноградов А.Б., Макаров В.Г., Козярук А.Е., Сивокобыленко В.Ф., П. Эйкхофф, В.К. Bose, G. Girrincione, М. Cirincione и другие.

Не снижающаяся по настоящее время интенсивность публикаций по тематике предварительной идентификации параметров AM как в отечественных, так и в зарубежных изданиях, подтверждает актуальность выбранной тематики.

Объектом исследования является регулируемая асинхронная электрическая машина в составе рабочего комплекса.

Предметом исследования является математическое и алгоритмическое обеспечение микропроцессорных систем управления, которые осуществляют идентификацию, диагностику и управление асинхронными машинами.

**Идея работы** заключается в нахождении оценок параметров схемы замещения асинхронных машин в составе рабочих комплексов по кривым затухания фазных токов.

Целью диссертационной работы является разработка и апробирование алгоритмов предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронных машин в составе рабочих комплексов на основе настраиваемых регрессионных моделей с применением классических и метаэвристических методов оптимизации.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Получить настраиваемые регрессионные модели асинхронной машины с неподвижным фазным и короткозамкнутым ротором при учете ненулевых начальных условий, описывающие процессы затухания фазного тока, для их дальнейшего применения в алгоритмах предварительной идентификации параметров;

2. Разработать алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с фазным и короткозамкнутым ротором с применением классических и метаэвристических методов оптимизации при условии зашумленности исходных данных;

3. Численно проверить сходимость разработанных алгоритмов предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронных машин с использованием модельных и экспериментальных данных с позиции анализа регрессионных остатков;

4. Произвести апробацию функционирования алгоритма предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором при настройке электропривода с векторной системой управления.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. На основе системы дифференциальных уравнений получены настраиваемые регрессионные модели, аналитически описывающие кривые затухания фазного тока ротора асинхронной машины с неподвижным фазным ротором с разомкнутыми и замкнутыми вторичными обмотками при учете ненулевых начальных условий, *позволяющие* вычислять частные производные по оцениваемым параметрам схемы замещения;

2. На основе системы дифференциальных уравнений получена настраиваемая регрессионная модель, аналитически описывающая кривую затухания фазного тока статора асинхронной машины с неподвижным короткозамкнутым ротором при учете ненулевых начальных условий, *позволяющая* вычислять частные производные по оцениваемым параметрам схемы замещения;

3. Разработаны и апробированы алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с неподвижным фазным ротором с разомкнутыми и замкнутыми вторичными обмотками по кривым затухания фазного тока ротора методом Ньютона, *являющиеся* гарантировано сходящимися, что обеспечивается обоснованным выбором начальных приближений;

4. Разработаны и апробированы алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с неподвижным фазным и короткозамкнутым ротором по кривым затухания фазного тока методом дифференциальной эволюции, *являющиеся* гарантировано сходящимися не зависимо от способа избавления от знака невязки, что обеспечивается ограничением поискового пространства в заданных пределах, имеющих физический смысл, а также равномерным распределением особей начальной популяции в полученном многомерном поисковом пространстве.

#### Теоретическая значимость диссертации:

Разработанные настраиваемые регрессионные аналитические математические модели асинхронных машин с неподвижным фазным и короткозамкнутым ротором, описывающие процесс затухания фазного тока, позволяют вычислять частные производные целевой функции по оцениваемым параметрам схемы замещения при учете ненулевых начальных условий.

#### Практическая значимость диссертации:

1. На базе трехфазного преобразователя частоты реализована электротехническая установка, позволяющая производить и регистрировать характеристики переходного процесса затухания фазных токов в обмотках асинхронных машин, а также определять на их основе оценки параметров схемы замещения с использованием разработанных алгоритмов предварительной идентификации;

2. Подтверждена применимость оценок параметров схемы замещения, полученных с помощью разработанных алгоритмов предварительной идентификации, при настройке векторного электропривода запорной арматуры, испытания которого производились с использованием нагрузочного стенда.

#### На защиту выносятся:

1. Аналитические выражения, описывающие кривые затухания фазного тока ротора асинхронной машины с неподвижным фазным ротором с разомкнутыми и замкнутыми вторичными обмотками при учете ненулевых начальных условий;

2. Аналитическое выражение, описывающее кривую затухания фазного тока статора асинхронной машины с неподвижным короткозамкнутым ротором при учете ненулевых начальных условий;

3. Разработанные и апробированные алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с неподвижным фазным ротором с разомкнутыми и замкнутыми вторичными обмотками по кривым затухания фазного тока ротора методом Ньютона;

4. Разработанные и апробированные алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с неподвижным фазным и короткозамкнутым ротором по кривым затухания фазного тока методом дифференциальной эволюции.

Степень достоверности научных исследований и результатов диссертационной работы подтверждается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений, апробированием разработанных алгоритмов предварительной идентификации на электротехнической установке, качественным и количественным сопоставлением модельных и экспериментальных данных.

Методы диссертационного исследования. В диссертационной работе при решении поставленных задач нашли применение теоретические и экспериментальные методы исследования. К теоретическим методам относятся: теория электропривода, теория систем автоматического управления, теория электрических машин, теория дифференциальных уравнений, методы составления и решения систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений, прямое и обратное преобразование Лапласа, методы оптимизации, такие как метод Ньютона и метод дифференциальной эволюции. К экспериментальным методам относятся: моделирование, регрессионный анализ.

В проведенных исследованиях использованы следующие программные продукты: *Matlab R2020a*, *Mathcad* 14.

Реализация результатов работы. Представленные в диссертационной работе алгоритмы предварительной идентификации реализованы на языке C в программном обеспечении (ПО) микроконтроллера *STM32F407VG* электротехнической установки, применяемой на предприятии АО «ЭлеСи» (г. Томск) для снятия кривых затухания фазных токов и определения на их основе оценок параметров схемы замещения АМ. Получаемые оценки параметров схемы замещения АМ, согласно представленной в диссертационной работе инженерной методике, применяются для настройки векторной системы управления блока управления электроприводом запорной арматуры *ESD-VCX* производства АО «ЭлеСи» (г. Томск), что подтверждено соответствующим актом.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Рассматриваемая область исследования соответствует паспорту специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты» по пункту 5: «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».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на II Всероссийской научно-методической конференции «Современные технологии, экономика и образование», г. Томск,

2020 г., с. 23-25; кафедре «Электропривода и автоматизации промышленных установок», НГТУ НЭТИ, г. Новосибирск; кафедре «Электропривода и автоматизации промышленных установок», УрФУ, г. Екатеринбург; кафедре «Автоматизированного электропривода», МЭИ, г. Москва.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 7 печатных работах, которые включают в себя 2 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК, 2 публикации, индексируемые в реферативной базе SCOPUS, 1 публикацию в журнале, входящем в перечень РИНЦ, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 тезис доклада в материалах конференции.

**Личный вклад автора.** Все разработки и научные результаты, выносимые на защиту и изложенные в тексте диссертации, получены самим автором или при его непосредственном участии. Экспериментальные исследования и программная реализация выполнялась автором лично. Соискатель имеет три статьи в рецензируемых журналах без соавторов.

#### Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертации, приведены цель и задачи работы. Дается аннотация содержания работы по рассматриваемым разделам. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Сформулирована научная новизна и практическая ценность исследований.

В первой главе оцениваются роль и место предварительной идентификации параметров схемы замещения АМ в современном электроприводе с микропроцессорным управлением. Обозначено, что для корректной настройки векторной системы управления (рис. 1) требуется определение оценок электромагнитных параметров АМ, применяемой в составе ЭП.



**Рис. 1.** Компоненты в составе структуры векторной системы управления с косвенной ориентацией по полю ротора, корректная настройка которых требует нахождения оценок параметров схемы замещения АМ

Обзор существующих методов предварительной идентификации параметров схемы замещения АМ приводит к следующим выводам. Используемые методики оценки параметров схемы замещения по каталожным данным не являются универсальными и имеют невысокую точность для АМ нестандартной конструкции. Применение специализированного испытательного оборудования позволяет с высокой точностью оценить параметры схемы замещения, однако данный метод требует выведения АМ из эксплуатации, а также является дорогостоящим и не всегда возможным. Наиболее точным методом оценки параметров схемы замещения АМ можно считать расчет на основании данных завода изготовителя, учитывающего особенности используемых электротехнических материалов, конструкции обмоток и магнитопровода конкретного типоразмера и серии АМ, однако такой подход применим только для непосредственных производителей АМ. Наиболее универсальными и удобными с точки зрения эксплуатации являются методы предварительной идентификации на основе измерительных средств ПЧ, как наиболее широко распространенного и функционального на сегодняшний день устройства управления АМ. Преимуществом такого подхода является возможность определения оценок электромагнитных параметров АМ в составе рабочего комплекса непосредственно перед пуском ЭП без необходимости демонтажа АМ, а также применения дополнительного оборудования.

Во второй главе представлены разработанные алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения АМ с неподвижным ФР с разомкнутыми и замкнутыми вторичными обмотками по кривым затухания фазного тока ротора, для чего решались одномерная и двухмерная модельные задачи оптимизации методами Ньютона и дифференциальной эволюции.





Предложенная процедура предварительной идентификации параметров динамического объекта по кривой затухания тока средствами микропроцессорного устройства производится в два этапа. На первом этапе накачки производится подача ступенчатого управляющего воздействия на вход динамического объекта до полного завершения переходного процесса, время которого определяется свойствами динамического объекта, после чего установившееся значение тока i(0+)запоминается.

На втором этапе организуется процесс затухания тока динамического объекта. Далее согласно функциональной схеме (рис. 2), сопоставляя отклики динамического объекта  $i_{\text{нзм}}(n \cdot \Delta t)$  и настраиваемой модели  $\hat{i}(n \cdot \Delta t)$ , формируется невязка  $\Delta \hat{i}(n \cdot \Delta t)$ , обрабатываемая одним из способов. Далее формируется целевая функция  $S(n \cdot \Delta t, \hat{X}, i(0+))$ , имеющая гарантированный экстремум. После задания начальных приближений  $\hat{X}(0)$  организуется движение рабочей точки по поверхности целевой функции, находится глобальный экстремум согласно заданному критерию оптимизации и производится выдача полученных итоговых оценок  $\hat{X}_{\text{нтог}}$ .

К основным допущениям, принятым при составлении настраиваемых регрессионных математических моделей AM, относятся линейность магнитной системы, отсутствие потерь в магнитопроводе, а также равенство индуктивности рассеяния первичной обмотки и приведенной к первичной индуктивности рассеяния вторичной обмотки. Таким образом, эквивалентная схема замещения для рассматриваемого режима работы AM аналогична стандартной Т-образной схеме замещения трансформатора без учета магнитных потерь.

$$R_{2} = \hat{I}_{2\sigma} + \hat{I}_{1}' = 0$$

$$R_{2} = \hat{I}_{2\sigma} + \hat{I}_{1}' = \hat{I}_{2\sigma} + \hat{I}_{1}' = \hat{I}_{2\sigma} + \hat{I}_{2}' = \hat{I}_{2\sigma}' = \hat{I}$$

Рис. 3. Оцениваемые параметры схемы замещения АМ с неподвижным ФР с разомкнутыми вторичными обмотками Нахождение параметров схемы замещения AM является сложной задачей, в связи с чем произведено разбиение данной задачи на несколько взаимосвязанных подзадач. Таким образом, на первом этапе решена одномерная модельная задача оптимизации, целью которой является определение оценки эквивалентной индуктивности  $\hat{L}_2$  (рис. 3) AM с неподвижным **ФР с разомкнутыми вторичными обмотками** по кривой затухания фазного тока ротора. Математическое описание такого динами-

ческого объекта аналогично математическому описанию закороченной *RL*-цепи. Настраиваемая регрессионная модель, описывающая процесс затухания то-

ка ротора АМ с ФР с разомкнутыми вторичными обмотками, формируется как

$$\hat{i}_{2u_{po}}\left(t,\,\hat{\lambda}\right) = i\left(0+\right) \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot t}\,,\tag{1}$$

где  $\hat{\lambda} = R_2 / \hat{L}_2$  — оценка показателя быстроты затухания переходного процесса;  $R_2$  — предварительно определенное активное сопротивление роторной обмотки;  $\hat{L}_2$  — оценка эквивалентной индуктивности роторной обмотки; *t* — время.

На основании настраиваемой регрессионной модели (1) возможно сформировать две независимые целевые функции как с позиции метода наименьших квадратов  $S_{\text{po}_{\text{KB}}}(\hat{\lambda}) = \sum_{n=1}^{m} \left[ \hat{i}_{2u_{\text{po}}}((n \cdot \Delta t), \hat{\lambda}) - i_{\text{H3M}}(n \cdot \Delta t) \right]^2$ , так и с позиции метода наименьших модулей  $S_{\text{po}_{\text{MOR}}}(\hat{\lambda}) = \sum_{n=1}^{m} \left[ \hat{i}_{2u_{\text{po}}}((n \cdot \Delta t), \hat{\lambda}) - i_{\text{H3M}}(n \cdot \Delta t) \right]$  в дискретной временной области, где  $\Delta t$  – период дискретизации.





В основе разработанного алгоритма по нахождению оценки эквивалентной индуктивности  $\hat{L}_2$  с помощью решения одномерной задачи оптимизации методом Ньютона (рис. 4) лежит итерационная процедура (этап 5), в числителе которой определяется первая частная производная, а в знаменателе – вторая частная производная целевой функции  $S_{po_{-\kappa B}}(\widehat{\lambda})$ . Критерием останова итерационной процедуры является уменьшение модуля расхождения между оценкой показателя  $\hat{\lambda}(k)$  на текущем и предыдущем шагах расчета алгорит-

ма предварительной идентификации ниже заданного предела є (этап 6).

Задание отличающихся начальных приближений алгоритма предварительной идентификации  $\hat{\lambda}_1(0)$ ,  $\hat{\lambda}_2(0)$  (этап 3 на рис. 4) определяет различные траектории сходимости итерационной процедуры (рис. 5, 6).



**Рис. 5.** Итерационные процессы уменьшения производной целевой функции  $\partial S(\hat{\lambda}) / \partial \hat{\lambda}$  при различных начальных приближениях



**Рис. 6.** Итерационные процессы уменьшения относительной погрешности оценивания  $\Delta \hat{L}_{2}(k)$  методом Ньютона

Алгоритм предварительной идентификации эквивалентной индуктивности  $\hat{L}_2$  методом Ньютона демонстрирует асимптотическую устойчивость, а также высокую скорость сходимости к состоятельной оценке. Нахождение несмещенных оценок для данного класса задач, однако, не представляется возможным по причине наличия шумовой составляющей в исходных данных.

В качестве альтернативного метода оптимизации, не требующего в отличие от метода Ньютона нахождения частных производных целевой функции, применялся метаэвристический **метод дифференциальной эволюции** (*DE*), отличительной особенностью которого является простота программной реализации среди методов данной группы. Кроме того, метод позволяет применять для минимизации как целевую функцию, сформированную с позиции метода наименьших квадратов  $S_{po_{KB}}(\hat{\lambda})$ , так и с позиции метода наименьших модулей  $S_{po_{MOR}}(\hat{\lambda})$ . Разработанный итерационный алгоритм предварительной идентификации  $\hat{L}_2$  методом *DE* представлен на рис. 7.



**Рис. 7.** Блок-схема итерационного алгоритма идентификации индуктивности  $\hat{L}_2$  методом дифференциальной эволюции

Движение рабочей точки по поверхности целевой функции зависит от предварительно заданных силы мутации (F), вероятности скрещивания (CR), схемы скрещивания (sh), которые являются настройками метода DE и задаются согласно ландшафту целевой функции (этап 3). Для повышения скорости сходимости алгоритма идентификации к решению в работе предложено ограничение поискового пространства областью положительных решений, имеющих физический смысл, а также равномерном распределении особей начальной популяции в полученном *п*-мерном пространстве. Таким образом, согласно предложенному алгоритму идентификации индуктивности  $\hat{L}_2$  методом *DE* (рис. 7, этапы 3-5) начальная популяция особей, каждая из которых является пробным решением, распределена в заданных пределах  $\hat{\lambda}_{\min}$ ,  $\hat{\lambda}_{\max}$  согласно выражению  $NP = K^D$ , где K – коэффициент популяции; *D* – мерность поискового пространства, равная единице при решении одномерной задачи, NP – размер формируемой популяции. Сформированные начальные популяции с равномерным распределением особей для различных целевых функций, для которых требуется оптимизация одного оцениваемого параметра, представлены на рис. 8, 9.



Процесс нахождения оценки эквивалентной индуктивности  $\hat{L}_2$  (рис. 7) заключается в итерационном формировании новых популяций (этапы 6-13), что требует применения операций мутации (этап 7), скрещивания (этап 8), а также, согласно выбранной целевой функции (этап 10 или 11), операции селекции (этап 12) при неизменном размере популяции. Далее производится выбор лучшей особи  $\hat{\lambda}_{G(best)}$  из новой сформированной популяции, в наибольшей степени соответствующей критерию оптимизации, а также расчет оценки  $\hat{L}_2$  на текущем шаге обработки итерационной процедуры. Критерием останова алгоритма предварительной идентификации является уменьшение дисперсии особей (*Disp*), характеризующей степень сходимости особей популяции к экстремуму целевой функции, ниже заданного предела  $\varepsilon$  (этап 16). В случае успешного завершения итерационной процедуры производится выдача итоговой оценки  $\hat{L}_2$  (этап 17).



Рис. 10. Итерационные процессы уменьшения относительной погрешности оценивания

 $\Delta \hat{L}_{2}(k)$  методом DE

На втором этапе решена двухмерная модельная задача оптимизации, целью



Рис. 11. Оцениваемые параметры схемы замещения АМ с неподвижным ФР с замкнутыми вторичными обмотками

Анализ итерационного процесса уменьшения относительной погрешности (рис. 10) демонстрирует более высокую скорость сходимости алгоритма предварительной идентификации методом DE, целевая функция которого получена взятием модуля невязки. Кроме того способ избавления от знака невязки взятием модуля демонстрирует меньший уровень относительной погрешности оценивания, что делает его более предпочтительным при решении данной задачи оптимизации.

которой является определение оценок двух параметров схемы замещения АМ с неподвижным ФР с замкнутыми вторичными обмотками по кривой затухания фазного тока ротора (рис. 11). Таким образом, оценивается приведенная к ротору индуктивность главного контура намагничивания  $\widehat{L}'_{21} = \widehat{L}'_{\mu}$ , а также индуктивность рассеяния  $\hat{L}_{\sigma}$  при условии равенства индуктивности рассеяния роторной обмотки  $\hat{L}_{2\sigma}$ и приведенной к ротору индуктивности рассеяния статорной обмотки  $\widehat{L}'_{1\sigma}$ . Значения ак-

тивного сопротивления обмотки ротора R<sub>2</sub> и приведенного к ротору активного сопротивления обмотки статора  $R'_1$  определяются предварительно.

Для построения настраиваемой регрессионной модели АМ с ФР с замкнутыми вторичными обмотками применена неподвижная жестко связанная с ротором система координат и, v при учете ненулевых начальных условий. Так как процедура идентификации проводится при неподвижном роторе, математическое описание рассматриваемого динамического объекта аналогично описанию процессов, протекающих в двух независимых ортогональных нагруженных трансформаторах. Таким образом, поведение АМ с неподвижным ФР для рассматриваемого режима работы может быть описано системой дифференциальных уравнений (ДУ), которая соответствует оси u системы координат u, v

$$\frac{\mathrm{d}i_{2u}(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\sigma \cdot L_2} \cdot \underbrace{u_{2u}(t)}_{\sigma \cdot L_2} - \frac{R_{22}}{\sigma \cdot L_2} \cdot i_{2u}(t) + \frac{R_1' \cdot L_{\mu}'}{\sigma \cdot L_2 \cdot L_1^2} \cdot \psi_{1u}(t) + \frac{L_{\mu}'}{\sigma \cdot L_2 \cdot L_1} \cdot z_p \cdot \underbrace{w_{1v}(t)}_{\sigma \cdot L_2 \cdot L_1} \cdot \psi_{1v}(t) + \frac{\mathrm{d}\psi_{1v}(t)}{\mathrm{d}t} = -\frac{R_1'}{L_1} \cdot \psi_{1u}(t) + \frac{R_1' \cdot L_{\mu}'}{L_1} \cdot i_{2u}(t) - z_p \cdot \underbrace{w_{1v}(t)}_{\sigma \cdot L_2} \cdot \psi_{1v}(t),$$
(2)

Ввиду наличия начального тока в закороченных фазных обмотках ротора в момент начала снятия кривой затухания фазного тока для перехода от оригинала (2) к изображению требуется учет ненулевых начальных условий

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}i_{2u}(t)}{\mathrm{d}t} \bigg|_{i_{2u}(0+)\neq 0} \Rightarrow p \cdot I_{2u}(p) - i_{2u}(0+) = p \cdot I_{2u}(p) - i_{2u0} \\ \frac{\mathrm{d}\psi_{1u}(t)}{\mathrm{d}t} \bigg|_{\psi_{1u}(0+)\neq 0} \Rightarrow p \cdot \Psi_{1u}(p) - \psi_{1u}(0+) = p \cdot \Psi_{1u}(p) - \psi_{1u0}. \end{cases}$$
(3)

Ток ротора AM с ФР по оси *и* в операторной форме при ненулевых начальных условий учете (3) записывается как

$$I_{2u}(p) = \frac{p + \left(\frac{R'_{1}}{L_{\sigma}} \cdot \left(\frac{L'_{\mu} + L_{\sigma}}{2 \cdot L'_{\mu} + L_{\sigma}}\right)\right)}{p^{2} + p \cdot \left(\frac{(R_{2} + R'_{1}) \cdot (L'_{\mu} + L_{\sigma})}{L_{\sigma} \cdot (2 \cdot L'_{\mu} + L_{\sigma})}\right) + \left(\frac{R_{2} \cdot R'_{1}}{L_{\sigma} \cdot (2 \cdot L'_{\mu} + L_{\sigma})}\right)} \cdot i_{2u0}.$$
 (4)

Возврат от изображения (4) к оригиналу с помощью применения второй теоремы о разложении позволяет получить аналитическое выражение кривой затухания фазного тока ротора AM с ФР с замкнутыми вторичными обмотками

$$\widehat{i}_{2u\_30}\left(t,\widehat{L}_{\sigma},\widehat{L}_{\mu}'\right) = \frac{P_m(\gamma_1(L_{\sigma},L_{\mu}'))}{Q_n'(\gamma_1(\widehat{L}_{\sigma},\widehat{L}_{\mu}'))} \cdot e^{\gamma_1(\widehat{L}_{\sigma},\widehat{L}_{\mu}')t} + \frac{P_m(\gamma_2(L_{\sigma},L_{\mu}'))}{Q_n'(\gamma_2(\widehat{L}_{\sigma},\widehat{L}_{\mu}'))} \cdot e^{\gamma_2(\widehat{L}_{\sigma},\widehat{L}_{\mu}')t}.$$
(5)

Формируемые при применении различных способов избавления от знака невязки на основе настраиваемой регрессионной модели (5) целевые функции определяются как сумма соответствующих элементарных целевых функций

$$S_{_{30\_KB}}\left(\hat{L}_{_{\sigma}},\hat{L}'_{\mu}\right) = \sum_{n=1}^{m} \left[\hat{i}_{_{2u\_30}}\left(\left(n\cdot\Delta t\right),\hat{L}_{_{\sigma}},\hat{L}'_{\mu}\right) - i_{_{H3M}}\left(n\cdot\Delta t\right)\right]^{2},$$

$$S_{_{30\_MOA}}\left(\hat{L}_{_{\sigma}},\hat{L}'_{\mu}\right) = \sum_{n=1}^{m} \left|\hat{i}_{_{2u\_30}}\left(\left(n\cdot\Delta t\right),\hat{L}_{_{\sigma}},\hat{L}'_{\mu}\right) - i_{_{H3M}}\left(n\cdot\Delta t\right)\right|.$$
(6)

Ландшафт полученных целевых функций (6) представлен на рис 12.



**Рис. 12.** Ландшафт целевых функций, полученных возведением невязки в квадрат  $S_{_{30\_KB}}(\hat{L}_{_{\sigma}},\hat{L}'_{\mu})$  (а), а также взятием модуля невязки  $S_{_{30\_MOR}}(\hat{L}_{_{\sigma}},\hat{L}'_{\mu})$  (б)

Монотонный характер целевой функции  $S_{30_{KB}}(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}'_{\mu})$  (рис. 12, а), полученной возведением невязки в квадрат, позволяет применять для нахождения ее экстре-

$$\begin{cases} F_1(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}'_{\mu}) = 0\\ F_2(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}'_{\mu}) = 0. \end{cases}$$
(7)

Решением задачи оптимизации будет являться нахождение таких значений  $x_1$ ,  $x_2$ , при которых каждое из уравнений системы (7) превращается в верное числовое равенство. Применительно к двухмерной задаче оптимизации это условие соответствует нахождению пересечения двух кривых на плоскости.



**Рис. 13.** Блок-схема итерационного алгоритма идентификации индуктивности  $\hat{L}_{\sigma}, \hat{L}'_{\mu}$  методом Ньютона

Разработанный итерационный алгоритм предварительной идентификации индуктивностей  $\hat{L}_{\sigma}, \hat{L}'_{\mu}$  AM с ФР ротором с замкнутыми вторичными обмотками методом Ньютона представлен на рис. 13. В качестве функций левой части  $F_1(x_1, x_2),$  $F_2(x_1, x_2)$  системы нелинейных алгебраических уравнений (7) выступают частные производные целевой функции  $S_{_{30\ KB}}(\hat{L}_{_{\sigma}},\hat{L}'_{\mu})$  по каждому из оцениваемых значений  $\hat{L}_{\sigma}, \hat{L}'_{\mu}$ . Формирование итерационной процедуры (этап 5) согласно методу Ньютона потребовало составления обратной Якоби, матрицы имеющей вид:

$$W^{-1}(x_{1},x_{2}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{2}(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} & -\frac{\partial F_{1}(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \\ -\frac{\partial F_{2}(x_{1},x_{2})}{G(x_{1},x_{2})} & \frac{\partial F_{1}(x_{1},x_{2})}{G(x_{1},x_{2})} \\ -\frac{\partial F_{2}(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} & \frac{\partial F_{1}(x_{1},x_{2})}{G(x_{1},x_{2})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_{2}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) & -\frac{\partial}{\partial x_{2}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) & \frac{\partial}{G(x_{1},x_{2})} \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) & \frac{\partial}{G(x_{1},x_{2})} \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) & \frac{\partial}{G(x_{1},x_{2})} \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) & \frac{\partial}{G(x_{1},x_{2})} \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) & \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} \right) & \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{2}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} \right) & \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} \right) & \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} \right) & \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} \right) & \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} \right) & \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} \right) & \frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{2}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial S(x_{1},x_{2})}{\partial x_{1}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}} \left( \frac{\partial}{\partial x_{1}} \right) \\ -\frac{\partial}{\partial x_{1}}$$

Таким образом, составление обратной матрицы Якоби  $W^{-1}(\hat{L}_{\sigma}, \hat{L}'_{\mu})$  (8) требует нахождения второй частной производной целевой функции  $S_{_{30\_KB}}(\hat{L}_{\sigma}, \hat{L}'_{\mu})$  по каждо-му из оцениваемых параметров.

Итерационные процессы уменьшения относительных погрешностей оценивания  $\Delta \hat{L}_{\sigma}, \Delta \hat{L}'_{\mu}$ , представленные на рис. 14, 15, демонстрируют характерную для метода Ньютона высокую скорость сходимости.



**Рис. 14.** Итерационные процессы уменьшения относительных погрешностей оценивания индуктивностей рассеяния (а) и главного контура намагничивания (б) методом Ньютона



**Рис. 15.** итерационный процесс нахождения методом Ньютона пересечения на плоскости функций частных производных по искомым оценкам параметров  $\hat{L}_{\sigma}, \hat{L}'_{\mu}$ 

Эмпирически было определено, что согласно ландшафту целевой функции (рис. 12, а)  $S_{_{30\ KB}}(\hat{L}_{_{\sigma}},\hat{L}'_{\mu})$  для обеспечения гарантированной сходимости итерационной процедуры по нахождению оценок двух искомых параметров  $\hat{L}_{\sigma}$ ,  $\hat{L}'_{\mu}$  с применением метода Ньютона к решению необходимо задание начальных приближений  $\widehat{L}_{\sigma}(0),$  $\widehat{L}'_{\mu}(0)$  в разы отличающихся в меньшую сторону относительно предполагаемых искомых оценок, значения которых возможно приблизительно определить согласно паспортным данным исследуемой АМ.

Аналогично решению одномерной задачи применение **метода DE** при решении двухмерной задачи оптимизации позволяет производить непосредственный поиск экстремума целевой функции, полученной как с помощью возведения невязки в квадрат  $S_{_{30\_KB}}(\hat{L}_{\sigma}, \hat{L}'_{\mu})$ , так и с помощью взятия модуля невязки  $S_{_{30\_MOR}}(\hat{L}_{\sigma}, \hat{L}'_{\mu})$ . Сформированный алгоритм предварительной идентификации оценок индуктивностей  $\hat{L}_{\sigma}, \hat{L}'_{\mu}$  аналогичен ранее предложенному алгоритму при решении одномерной задачи оптимизации (рис. 7) и отличается расширением поискового пространства до двухмерного (D = 2). Для сохранения гарантированной сходимости алгоритма с ростом размерности поискового пространства D увеличен и размер исходной популяции особей. Итерационные процессы уменьшения относительных погрешностей оценивания индуктивностей  $\Delta \hat{L}_{\sigma}, \Delta \hat{L}'_{\mu}$  методом DE (рис. 16) являются асимптотически устойчивыми, а точностные характеристики обоих подходов примерно равноценны. Тем не менее с ростом популяции наблюдается уменьшение скорости сходимости итерационной процедуры по сравнению с решением одномерной задачи оптимизации методом DE (рис. 10).



**Рис. 16.** Итерационные процессы уменьшения относительных погрешностей  $\Delta \hat{L}_{\sigma}, \Delta \hat{L}'_{\mu}$ , полученных возведением в квадрат (а) и взятием модуля невязки (б), методом DE

В третьей главе представлен разработанный алгоритм предварительной идентификации параметров схемы замещения АМ с неподвижным КЗ ротором по кривой затухания фазного тока статора методом DE. В связи с тем, что прямое измерение активного сопротивления ротора для АМ с КЗ ротором невозможно, решение задачи оптимизации требует нахождения оценок трех параметров схемы замещения. Решение трехмерной задачи оптимизации методом Ньютона не рассматривается, так как метод требует определения значительного количества частных производных по каждому из искомых параметров (8), что значительно затрудняет его программную реализацию.



Рис. 17. Оцениваемые параметры схемы замещения АМ с неподвижным КЗ ротором

Задачей алгоритма предварительной идентификации является определение следующих параметров схемы замещения AM с неподвижным K3 ротором (рис. 17): приведенной к статору индуктивности главного контура намагничивания  $\hat{L}'_{12} = \hat{L}'_{\mu}$ , индуктивности рассеяния  $\hat{L}_{\sigma}$  при условии равенства индуктивности рассеяния статорной обмотки  $\hat{L}_{1\sigma}$  и приведенной к статору индуктивности рассеяния статорной обмотки  $\hat{L}_{2\sigma}$ , а также приведенного к статору и обмотки  $\hat{R}'$ 

активного сопротивления роторной обмотки  $\hat{R}'_{2}$ .

Формирование настраиваемой регрессионной модели AM с неподвижным КЗ ротором аналогично ранее представленным выкладкам для AM с ФР за исключением того, что процессы рассматриваются в неподвижной жестко связанной со статором двухфазной ортогональной системе координат α, β.

Настраиваемая регрессионная модель, аналитически описывающая процесс затухания фазного тока статора по оси α для AM с неподвижным K3 ротором, имеет вид

$$\hat{i}_{1\alpha_{\mu}\kappa_{3}}\left(t,\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}'\right) = \frac{P_{m}(\gamma_{1}(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}'))}{Q_{n}'(\gamma_{1}(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}'))} \cdot e^{\gamma_{1}(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}')\cdot t} + \frac{P_{m}(\gamma_{2}(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}'))}{Q_{n}'(\gamma_{2}(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}'))} \cdot e^{\gamma_{2}(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}')\cdot t}.$$
(9)

Формируемые на основе настраиваемой регрессионной модели (9) значения целевой функции при применении различных способов избавления от знака невязки определяются как суммы соответствующих элементарных целевых функций

16

$$S_{\text{K3}_{K3}_{KB}}\left(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}'\right) = \sum_{n=1}^{m} \left[\hat{i}_{1\alpha_{\kappa}}\left(\left(n\cdot\Delta t\right),\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}'\right) - i_{\text{H3M}}\left(n\cdot\Delta t\right)\right]^{2},$$

$$S_{\text{K3}_{MOR}}\left(\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}'\right) = \sum_{n=1}^{m} \left|\hat{i}_{1\alpha_{\kappa}}\left(\left(n\cdot\Delta t\right),\hat{L}_{\sigma},\hat{L}_{\mu}',\hat{R}_{2}'\right) - i_{\text{H3M}}\left(n\cdot\Delta t\right)\right|.$$
(10)

Итерационные процессы уменьшения относительных погрешностей оценивания  $\Delta \hat{L}_{\sigma}(k)$ ,  $\Delta \hat{L}'_{\mu}(k)$ ,  $\Delta \hat{R}'_{2}$  (рис. 18), определяемые при минимизации целевых функций (10) методом *DE*, по-прежнему носят асимптотически устойчивый характер, однако наблюдается уменьшения скорости сходимости, что при программной реализации потребует больших вычислительных затрат.



**Рис. 18.** Итерационные процессы уменьшения относительных погрешностей  $\Delta \hat{L}_{\sigma}(k)$ ,  $\Delta \hat{L}'_{\mu}(k)$ ,  $\Delta \hat{R}'_{2}(k)$ , полученных возведением в квадрат (а) и взятием модуля невязки (б), методом DE

В четвертой главе описывается экспериментальная методика снятия кривых затухания фазного тока в обмотках АМ. Для проведения эксперимента средствами автономного инвертора напряжения (АИН) постоянное напряжение подается в контур, состоящий из двух параллельно соединенных фазных обмоток и последовательно с ними включенной третьей обмоткой, до достижения током установившегося значения (рис. 19). Данное установившееся значение тока в последовательно соединенной обмотке измеряется и запоминается. Далее фазные обмотки отключаются от источника постоянного напряжения и замыкаются между собой, после чего происходит затухание тока (рис. 20). Во время затухания тока производится измерение и запоминание мгновенных величин тока в той же обмотке, в которой ранее производилось измерение установившегося значения тока.



Рис. 19. Схема коммутации ключей АИН для обеспечения этапа накачки током на примере АМ с ФР с разомкнутыми вторичными обмотками



**Рис. 20.** Схема коммутации ключей АИН для снятия кривых затухания тока на примере АМ с ФР с разомкнутыми вторичными обмотками

Снятие кривых затухания фазного тока AM с помощью специализированной электротехнической установки (рис. 19, 20), AUH которой выполнен на *MOSFET* транзисторах *IRFP*7530 *N*-типа с низким омическим сопротивлением открытого силового канала, позволяет не учитывать ее влияние на форму тока. Проведение экспериментов по снятию кривых затухания фазных токов AM с неподвижным фазным и K3 ротором продемонстрировано на рис. 21.



**Рис. 21.** Проведение экспериментов по снятию кривых затухания тока AM с фазным (а) и короткозамкнутым ротором (б) с помощью специализированной электротехнической установки

В качестве испытуемых AM, для которых производилось снятие кривых затухания фазного тока и дальнейшее определение на их основе оценок параметров схемы замещения с использованием разработанных алгоритмов предварительной идентификации, выступали AM с K3 ротором серии ЭЛАС в диапазоне мощностей 120...550 Вт, а также AM с ФР модели МТН011-6У1 мощностью 1,4 кВт.

Наблюдается высокая степень совпадения экспериментально полученных кривых затухания фазного тока и откликов настроенных на основе оцененных параметров схемы замещения АМ (табл. 1, 2) регрессионных моделей (рис. 22).



Рис. 22. Примеры экспериментально полученных кривых затухания тока ротора AM с ФР (а) с разомкнутыми вторичными обмотками и статора AM с КЗ ротором ЭЛАС 120 (б) и откликов тока соответствующих настроенных регрессионных моделей

**Таблица 1.** Значения полученных параметров схемы замещения АМ с ФР модели МТН011-6У1, а также показатели корректности настроенных регрессионных моделей

<i>i</i> (0+),	k <sub>прив</sub>	$R_2$ ,	$R_1'$ ,	$\widehat{L}'_{\mu}$ ,	$\hat{L}_{\sigma}$ ,	δ,	DW,	Критерий Стьюдента		
А		Ом	Ом	Гн	Гн	%	o.e.	<i>s</i> , o.e. $\cdot 10^{-3}$	<i>p</i> , o.e.	
Разомкнутые вторичные обмотки										
2	9,9	0,545	0,45	160		4,2	0,067	2,2	0,456	
Замкнутые вторичные обмотки										
2	9,9	0,545	0,45	184	1,1	3,79	0,052	2,4	0,351	

**Таблица 2.** Значения полученных параметров схемы замещения АМ с КЗ ротором серии ЭЛАС, а также показатели корректности настроенных моделей

Модель	<i>i</i> (0+),	$R_1$ ,	$\widehat{R}_{2}^{\prime}$ ,	$\widehat{L}'_{\mu}$ ,	$\hat{L}_{\sigma}$ ,	δ,	DW,	Критерий	
	А	Ом	Ом	Гн	Гн	%	o.e.	Стьюдента	
		0.111	0.111	1	1			<i>s</i> , o.e. $\cdot 10^{-3}$	<i>p</i> , o.e.
ЭЛАС 120	0,5	72,95	36,76	1,419	0,17	1,01	1,924	0,546	0,444
ЭЛАС 180	0,7	43,10	21,96	1,042	0,12	1,295	1,65	0,8228	0,344
ЭЛАС 370	1,24	21,35	11,04	0,638	0,06	1,678	0,876	1,526	0,469
ЭЛАС 550	1,4	6,27	6,27	0,653	0,03	3,514	0,285	1,874	0,137

Значения интегральных погрешностей, определенных согласно выражению  $\delta = \left[ \int_{0}^{t} \left[ i_{\text{изм}}(t) - \hat{i}(t, \hat{X}) \right] / \int_{0}^{t} i_{\text{изм}}(t) \cdot dt \right] \cdot 100\%, \text{ не превышают 5\%, что является приемле-$ 

мым для инженерной практики. Иным способом, позволяющим подтвердить, что настроенная регрессионная модель с приемлемой достоверностью описывает экспериментальные данные, является анализ регрессионных остатков, для чего применены критерии Дарбина-Уотсона (DW) и Стьюдента. Согласно критерию Дарби-Уотсона полученные значения DW-критерия находятся в допустимом диапазоне 0...2 о.е., что свидетельствует о том, что регрессионные остатки независимы, но имеют положительную автокорреляцию. Согласно критерию Стьюдента среднеквадратическая ошибка *s* расхождения в наборах экспериментальных и модельных данных составляет не более 2,4 с вероятностью (p-значение) не менее 0,137.

19

Для проверки функционирования векторной системы управления (рис. 1), настроенной на основе идентифицированных параметров схемы замещения (табл. 2), организованной в ПО электропривода *ESD-VCX* (АО ЭлеСи, г. Томск), применялся нагрузочный стенд (рис. 23), обеспечивающий формирование требуемого момента нагрузки на валу испытуемой АМ серии ЭЛАС.



Рис. 23. Внешний вид испытательного нагрузочного стенда



**Рис. 24.** Работа векторной системы управления, настроенной с использованием оцененных параметров схемы замещения АМ ЭЛАС 370

Ключевыми настройками векторной системы управления, непосредственно влияющими на характеристики и работоспособность ЭП в целом, являются постоянная времени ротора  $\hat{T}_r$ , коэффициент момента  $\hat{K}_i$  и ток намагничивания  $\hat{i}_{flux}$ . Значения настроек векторной системы управления, рассчитанные на основании оцененных параметров схемы замещения АМ представлены в табл. 3.

Таблица 3. Настройки векторной системы управления, полученные на основе оцененных параметров схемы замещения, а также расхождения относительно номинальных параметров

Модель	$\widehat{T}_r = \frac{\widehat{L}_2}{\widehat{R}_2'}, c$	$\widehat{K}_i = \frac{3}{2} \cdot \frac{\widehat{L}_{\mu}^{\prime 2}}{\widehat{L}_2} \cdot z_p, \text{ o.e.}$	$\widehat{i}_{flux}$ , A	$\Delta M_{_{ m HOM}},$ %	$\Delta I_{_{ m HOM}},$ %	Δω <sub>ном</sub> , %
ЭЛАС 120	0,043	3,79	0,3	22,38	10	1,5
ЭЛАС 180	0,052	2,8	0,46	24,6	7,5	0,3
ЭЛАС 370	0,063	1,74	0,81	28,7	2,4	2,7
ЭЛАС 550	0,11	0,92	1,05	12,28	8,5	1,6

Векторная система управления ЭП, настроенная на основе оцененных параметров AM, работоспособна (рис. 24) и обеспечивает стабилизацию скорости при изменении момента нагрузки на валу AM, что свидетельствует о корректной настройке регуляторов контуров тока и скорости. Максимальная величина относительной погрешности момента (табл. 3)  $\Delta M_{\rm HOM}$ , определяемого на выходе регулятора скорости векторной системы управления относительно сигнала с датчика момента при номинальном уровне нагрузки на валу AM, не превышает 29%. Достигнутый результат является приемлемым для классических систем подчиненного регулирования ЭП с постоянными коэффициентами регуляторов. Тем не менее величины относительных отклонений тока статора  $\Delta I_{\rm HOM}$  и скорости ротора  $\Delta \omega_{\rm HOM}$  при номинальном уровне нагрузки на валу относительно номинальных величин не превышают 10% и 2,7% соответственно, что свидетельствует о корректности настроек системы управления, отражающих реальные процессы, происходящие в AM.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Полученные на основании системы дифференциальных уравнений аналитические выражения, описывающие кривые затухания фазного тока асинхронной машины с фазным и короткозамкнутым ротором, позволяют вычислять частные производные по оцениваемым параметрам схемы замещения. Это делает возможным их применение в качестве настраиваемых регрессионных моделей при построении алгоритмов предварительной идентификации, как с помощью классических, так и с помощью метаэвристических методов оптимизации оцениваемых параметров.

2. Разработанные алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с неподвижным фазным ротором с разомкнутыми и замкнутыми вторичными обмотками по кривой затухания фазного тока ротора методом Ньютона демонстрируют гарантированную сходимость, что обеспечивается обоснованным выбором начальных приближений. Алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения методом Ньютона демонстрируют высокую скорость сходимости, однако составление итерационной процедуры требует вычисления значительного числа частных производных целевой функции по оцениваемым параметрам, что затрудняет их программную реализацию.

3. Разработанные алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с неподвижным фазным и короткозамкнутым ротором по кривым затухания фазного тока методом дифференциальной эволюции демонстрируют гарантированную сходимость не зависимо от способа избавления от знака невязки, что обеспечивается ограничением поискового пространства в заданных пределах, имеющих физический смысл. Алгоритмы предварительной идентификации параметров схемы замещения методом дифференциальной эволюции демонстрируют более низкую скорость сходимости по сравнению с методом Ньютона. Это, однако, компенсируется простотой программной реализации итерационной процедуры, для организации которой не требуется вычисление частных производных целевой функции по оцениваемым параметрам.

4. На основании данных, полученных на электротехнической установке, произведена апробация разработанных алгоритмов предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с фазным и короткозамкнутым ротором методами Ньютона и дифференциальной эволюции. Анализ регрессионных остатков с использованием трех критериев: визуального анализа, критерия Стьюдента и критерия Дарби-Уотсона, а также определенный уровень интегральной погрешности (не более 5%) свидетельствуют о корректности допущений, принятых при составлении настраиваемых регрессионных моделей для рассматриваемого режима работы асинхронной машины, а также об устойчивой сходимости разработанных алгоритмов предварительной идентификации. 5. Произведенная на базе нагрузочного стенда апробация функционирования разработанного алгоритма предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в составе электропривода запорной арматуры свидетельствует о применимости на практике полученных оценок параметров при настройке векторной системы управления.

# ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

# Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК

**1. Буньков** Д.С. Обзор методов оценивания параметров схемы замещения асинхронной электрической машины для организации векторной системы управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2021 - Т. 17 - №. 3-4 - С. 24-38.

**2.** Буньков Д.С. Алгоритм предварительной идентификации параметров схемы замещения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором по кривой затухания фазного тока // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2022 - Т. 18 - №. 1 - С. 5-23.

# Публикации, индексируемые в реферативной базе данных SCOPUS

3. Глазырин А.С., Аникин В.В., Буньков Д.С., Антяскин Д.И., Старцева Ю.Н., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н., Кладиев С.Н., Филипас А.А. Нелинейное алгебраическое оценивание индуктивности вибрационного электромагнитного активатора по кривой затухания тока // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020 - Т. 331 - №. 1 - С. 148-157.

4. Шубин С.С., Ямалиев В.У., Глазырин А.С., Буньков Д.С., Кладиев С.Н., Раков И.В., Боловин Е.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н. Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2021 - Т. 332 - №. 1 - С. 204-214.

## Публикации в журналах, входящем в перечень РИНЦ

**5. Bunkov D.S.** Technique of setting up a pipeline valve electric actuators control system using the equivalent circuit parameters, estimated by falling current curve // Resource-efficient technologies. -2021 - V. 2 - P. 1-9.

## Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021665731. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Программный модуль «Программа для ЭВМ для идентификации параметров асинхронной машины с помощью модифицированного метода дифференциальной эволюции с ограничением многомерного поискового пространства» / Буньков Д.С., Антяскин Д.И., Глазырин А.С., Раков И.В., Боловин Е.В., Кладиев С.Н., Набунский И.В., Баннов Д.М., Филипас А.А. Дата регистрации: 01 октября 2021 года.

## Публикации в трудах конференций

**7.** Раков И.В., Буньков Д.С., Набунский И.А., Колесников С.В. Линейная аппроксимация заданной функции нейронной сетью // Современные технологии, экономика и образование: сборник научных II Всероссийской научнометодической конференции, Томск, 02–04 сентября 2020 г., С. 23-25.