

На правах рукописи

Боловин Евгений Владимирович

**РАЗРАБОТКА АЛГЕБРАИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ
ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы
05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент,
Глазырин Александр Савельевич

Научный консультант:

доктор технических наук, доцент,
Полищук Владимир Иосифович

Официальные оппоненты:

Макаров Валерий Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и электротехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (г. Казань)

Харламов Виктор Васильевич доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (г. Омск)

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина**» (г. Екатеринбург)

Защита состоится «19» декабря 2018 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 на базе ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Усова, 7, 8 корпус ТПУ, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан: «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь объединенного
диссертационного совета Д 212.269.11
канд. техн. наук

Дементьев Ю.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время асинхронные электродвигатели нашли широкое применение для приводов большинства общепромышленных механизмов, в связи с их основными достоинствами, а именно: надежность, относительно малая себестоимость, легкость в изготовлении, возможность стабильной работы при кратковременных механических перегрузках. Существуют следующие группы электропривода, включающие асинхронные электродвигатели (АД), которые осуществляют автоматизацию и механизацию производственных механизмов и технологических процессов:

1. Нерегулируемые асинхронные электроприводы. Низкая эксплуатационная надежность нерегулируемых электроприводов является их основным недостатком. Данный недостаток связан с тяжелыми условиями эксплуатации: с частыми пусками и перегрузками асинхронного двигателя, со случайным характером нагрузок, которые зачастую носят резкопеременный характер.

2. Электропривод, выполненный по схеме «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД). Преобразователи частоты обычно используют два вида управления электродвигателем: скалярное и векторное. Оба метода управления во многом зависят от правильной оценки параметров асинхронного двигателя и очень чувствительны к их изменению.

3. Электропривод, выполненный по схеме «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель» (ТРН-АД). ТРН обеспечивает плавность пуска АД с заданными параметрами разгона, при этом такой электропривод существенно дешевле в производстве относительно ПЧ-АД. Одним из основных недостатком данного метода регулирования являются большие потери энергии при снижении скорости, что уменьшает коэффициент полезного действия электропривода и приводит к увеличению энергопотребления.

На основании, можно сделать вывод, что первый метод управления электроприводами является устаревшим и заменяется на более надежные, эффективные и перспективные разработки, чем и являются второй и третий методы управления. Известно, что оба последних метода управления во многом зависят от правильной оценки параметров асинхронного двигателя и очень чувствительны к их изменению. Также эффективность работы систем управления электроприводов зависит от текущих значений параметров электродвигателей, таких как активное сопротивление и индуктивность статорной обмотки, взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, активное сопротивление и индуктивность роторной обмотки. При наладке электроприводов измеряют лишь активное сопротивление статорной обмотки, другие же параметры рассчитываются на основе каталожных данных по эмпирическим методикам. Полученные по этим методикам значения параметров в свою очередь могут сильно отличаться от реальных значений.

Известно что, значения параметров асинхронных электродвигателей зависят от теплового состояния и режима работы. Например, в режиме прямого пуска индуктивность может измениться на 30-40%, а активное сопротивление ротора – более чем в полтора раза. В свою очередь активное сопротивление статорной обмотки, зависящее от теплового состояния, может изменяться на 20-30% в процессе работы двигателя. Данное явление особенно характерно для повторно-кратковременного режима. Следовательно, есть объективная необходимость в определении текущих значений параметров электродвигателей непосредственно в процессе работы электропривода. Однако, большая часть переменных состояния электродвигателей и электромагнитных параметров недоступна прямому измерению. В асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором не представляется возможным или крайне сложно измерить потокосцепления статора и ротора, индуктивность и активное сопротивление роторной обмотки, а во время работы асинхронного двигателя параметры статора становятся недоступными для прямого измерения.

Определение текущих значений параметров асинхронных электродвигателей возможно путем проведения динамической идентификации переменных состояния и параметров электродвигателя.

Существенный вклад в создание и усовершенствование методов идентификации внесли множество российских и зарубежных ученых: Беспалов В.Я., Вольдек А.И., Воронин А.А., Жерве Г.К., Зюзев А.М., Каширских В.Г., Копылов И.П., Котин Д.А., Макаров В.Г., Печуркин Ю.И., Резник Д.В., Рогозин Г.Г., Родкин Д.И., Ромашкин Ю.В., Сивокобыленко В.Ф., Сидельников Б.В., Широков Н.Г., Шрейнер Р.Т., Шубенко В.А., B.K. Bose, G. Calolino, T.W. Chan, A. Chikhi, M.K. Choi, G. Girincione, M. Cirincione, R.A. Fisher, C.F. Gauss, B.L. Ho, M. Jancovie, R.E. Kalman, Y. Koubaa, A.C. Megherbi, M. Pucci, M.G. Simoes, G.C.D. Sousa и другие.

Анализ имеющихся работ показывает, что при разработке методов идентификации параметров асинхронных двигателей, разработчики сталкиваются со следующими проблемами:

1. Сложность определения значений всех электромагнитных параметров машин переменного тока в реальном времени;
2. Нецелесообразность использования дорогих или неудобных в эксплуатации датчиков: датчики крутящего момента, потокоцепления, ускорения, температуры и другие;
3. Сложность избавления от естественных стационарных и наведенных импульсных шумов в измерительной системе;
4. Проблема дискретизации сигналов измерительной системы по времени и квантование по уровню;
5. Невозможность получения идеального решения задачи идентификации в силу наличия противоречия между быстродействием, высокой точностью, надежностью и наименьшими затратами на процедуру идентификации.

Большой объем научных работ в данном направлении и тот факт, что интенсивность публикаций до настоящего времени не снижается, говорит о том, что вопрос разработки методов идентификации параметров асинхронных двигателей до сих пор окончательно не решен и является актуальным.

Объектами исследования являются асинхронные двигатели, эксплуатирующиеся в составе рабочих комплексов, включающих микропроцессорные системы управления электроприводами.

Предметом исследования является математическое и алгоритмическое обеспечение микропроцессорных систем, осуществляющие идентификацию, диагностику и управление асинхронными двигателями.

Идея работы заключается в разработке методов идентификации параметров асинхронных двигателей с использованием преимуществ алгебраического подхода и дискретных моделей.

Целью диссертационной работы разработка и апробирование алгебраических методов идентификации параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов на основе дискретных моделей в режиме реального времени, функционирующих в условиях изменения режима работы, флуктуаций параметров и помехах в измерительных цепях.

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

1. Разработать методы идентификации параметров асинхронных двигателей, обеспечивающие быстродействие, высокую точность, несмещенность оценок.
2. Создать имитационные модель регулируемого асинхронного двигателя для проверки методов идентификации в различных режимах работы, в частности при импульсно-фазовом и широтно-импульсном регулировании напряжения, подаваемого на обмотки статора.
3. Предложить алгоритмы обработки текущей информации при динамической идентификации параметров асинхронного двигателя, позволяющие учесть совокупность требований обусловленных дискретизацией сигналов измерительной системы по времени, квантованием по уровню, наличием стационарных и импульсных шумов в измерительной системе, необходимостью постфильтрации полученных оценок параметров, сложностью реализации цифрового дифференцирования измерительных сигналов.

4. Провести экспериментальное апробирование разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей в различных режимах работы двигателя и оценить полученные результаты.

Научные положения выносимые на защиту:

1. Выявление преимуществ алгебраических методов идентификации параметров асинхронных двигателей по результатам критического экспертного анализа

2. Разработка метода алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей с неподвижным ротором на основе дискретных моделей.

2.1. Разработка метода алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей с неподвижным ротором и его апробация.

2.2. Сравнительный анализ методов построения дискретных моделей асинхронного двигателя для решения задачи идентификации параметров асинхронных двигателей.

3. Разработка и апробирование метода алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей

4. Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации сигналов, поступающих с датчиков, как неотъемлемая часть решения задачи идентификации параметров асинхронных двигателей.

5. Разработка структуры нелинейного прогнозирующего фильтра-постфильтратора для выделения тренда полученных оценок и выработка рекомендаций по настройке фильтра

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемой при исследовании математической модели, проверкой результатов на экспериментальной установке, качественным и количественным сопоставлением данных теоретических исследований с экспериментальными данными.

Методы исследования. В диссертационной работе для решения поставленных задач нашли применение теоретические и экспериментальные методы исследований. К теоретическим относятся: теория систем автоматического управления, теория электропривода, теория электрических машин, теория дифференциальных и разностных уравнений, а также методы составления и решения систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений, методы численного дифференцирования, численные методы решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений, численные методы аппроксимации и сглаживания экспериментальных данных, метод наименьших квадратов, уравнения Парка-Горева, метод пространства состояний, билинейное преобразование. Экспериментальные исследования проводились на экспериментальных установках, где для измерения качества разработанных методов идентификации применялась относительная интегральная погрешность.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан и апробирован на математических моделях метод алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей с неподвижным ротором *отличающийся тем, что* математическая модель двигателя представлена в дискретном виде; процедура идентификации позволяет определять активное сопротивление и эквивалентную индуктивность обмотки статора, приведенные к статору активное сопротивление и эквивалентную индуктивность обмотки ротора, индуктивность, обусловленную магнитным потоком в воздушном зазоре асинхронных двигателей на основании данных, получаемых с датчиков тока и напряжения в режиме реального времени с допустимой в инженерной практике погрешностью.

2. Разработан и экспериментально апробирован метод алгебраической идентификации параметров Т-образной схемы замещения асинхронных двигателей регулируемых электроприводов *отличающийся тем, что* математическая модель двигателя представлена в дискретном виде; алгоритм идентификации предполагает предварительную фильтрацию сигналов с датчиков; асимптотически устойчивый тренд оценок параметров Т-образной схемы замещения обеспечивается

при изменении режима работы двигателя, наличии помех в измерительных цепях, при этом преодолена уязвимость операции цифрового дифференцирования сигналов.

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований выявлено свойство робастности алгебраического метода идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей, возникающее благодаря разработанному алгоритму нелинейной прогнозирующей фильтрации оценок, при этом обеспечивается нечувствительность к следующим нестационарным возмущениям: перекося фаз трехфазной питающей сети; наличие токовых пауз, несинусоидальность токов и напряжений питающей сети при подключении двигателя по схеме «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель»; дополнительная шумовая составляющая, вызванная наличием широтно-импульсной модуляции статорного напряжения при подключении двигателя по схеме «преобразователь частоты - асинхронный двигатель».

Практическая ценность работы:

1. Разработаны технические решения по разработке и совершенствованию методов идентификации параметров асинхронных двигателей, эксплуатирующихся в составе рабочих комплексов, в режиме реального времени, отраженные в патентах Российской Федерации на изобретение №2564692, №2570363. Эти технические решения позволяют обеспечить малую чувствительность разработанного метода идентификации к следующим факторам: флуктуации параметров, наличие в измерительной системе шумовой составляющей и импульсных помех, изменениям режима работы и способу регулирования асинхронного двигателя.

2. Разработанные способы и алгоритмы оценивания параметров полезны как при диагностике функционирования и своевременной замене выходящих из строя асинхронных электродвигателей, так и при настройке систем управления электроприводов.

Реализация результатов работы. Результаты исследований внедрены в ООО «Завод ПСА «ЭлеСи», а также в учебную деятельность ФГАОУ ВО НИ ТПУ, что подтверждено соответствующими актами.

Основное содержание диссертации соответствует научным специальностям по классификатору ВАК:

05.09.03 Электротехнические комплексы и системы – П.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

05.09.01 Электромеханика и электрические аппараты – П.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 следующих научных мероприятиях: Международной научно-практической конференции «Динамикатана съвременната наука -2012», г.София, 17–25 июня 2012г.; Международной научно-практической конференции «Vedecky Pokrok na Prelomu Tysyachalety», г.Прага, 27мая – 5июня 2012 г.; Международной научно-практической конференции «Aktualne problemy powjczesnych nauk-2012» г.Прага, 27июня – 5июля 2012г.; XII Региональной научно-практической студенческой конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», г. Томск, 4-8 июня 2012г.; I Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», г.Новосибирск, 2 – 6 декабря 2014 г.; Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», г.Тамбов, 28 февраля 2015г.; VII Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика», г.Новосибирск, 9-12 июня 2015г.; VII Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 14-16 октября 2015 г.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 23 печатных работах, которые включают в себя 6 статей в журналах, рекомендуемых ВАК, 3 публикации, индексируемые в реферативной базе SCOPUS, 2 патента на полезную модель, 2 патента на изобретение, 2 свидетельства о регистрации электронного ресурса, 8 тезисов докладов в материалах конференций различного уровня

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. В целом общий авторский вклад в работах, выполненных в соавторстве, составляет не менее 60%.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое научное положение. Выявление преимуществ алгебраических методов идентификации параметров асинхронных двигателей по результатам критического экспертного анализа

Разработкой и усовершенствованием методов идентификации параметров асинхронных двигателей занимаются во многих странах, и результатам исследований находится разнообразное применение, практически во всех технических областях. В связи с этим существует множество различных групп способов идентификации со своими преимуществами и недостатками. Соответственно необходимо использовать методику, которая может дать полную и объективную информацию о каждой группе методов идентификации и провести сравнительный анализ этих групп. Для этого воспользуемся критическим экспертным анализом методов идентификации параметров асинхронных двигателей. Для применения данного анализа сформируем критерии, необходимые для достижения наилучших показателей работоспособности методов: 1. Высокая точность процедуры идентификации. 2. Быстродействие метода идентификации. 3. Определение значений параметров без необходимости вывода из работы двигателя. 4. Определение значений параметров без необходимости сбора априорной информации. 5. Возможность определения всех параметров одновременно. 6. Простота системы идентификации, заключающаяся в легкой установке, настройке необходимых программ и использование их оператором. 7. Возможность использования методики идентификации параметров асинхронных двигателей индивидуального исполнения. 8. Универсальность системы идентификации параметров асинхронных двигателей, т.е. возможность работы без помощи других методик, работающих параллельно или без предварительной настройки систем идентификации. 9. Возможность идентификации параметров асинхронных двигателей с учетом их изменения. 10. Использование малого количества записывающих устройств и устройств сбора информации.

Результаты критического экспертного анализа методов идентификации параметров асинхронных двигателей сведены в таблицу 1.

Критерии в таблице записаны в виде цифр по мере их нумерации выше и обозначены K1-K10, соответственно, P_i – Ранжирование каждого критерия, BK_i – Весовой коэффициент для каждого критерия, E_i – оценка эксперта соответствия каждому критерию, R_i – приведенная оценка, с учетом весового коэффициента соответствия каждому критерию. Методы идентификации пронумерованы следующим образом: M1 – Методы идентификация параметров асинхронных двигателей на основе анализа частотных характеристик; M2 – Методы идентификация параметров асинхронных двигателей по каталожным данным; M3 – Методы идентификация параметров асинхронных двигателей на основе измерения активной и реактивной мощностей; M4 – Методы идентификация параметров асинхронных двигателей на основе нейронных сетей; M5 – Методы идентификация параметров асинхронных двигателей на основе генетических алгоритмов; M6 – Методы идентификация параметров асинхронных двигателей на основе алгоритмов фаззи-логики; M7 – Методы идентификация параметров асинхронных двигателей на основе алгебраических методов.

Суть критического экспертного анализа¹ методов идентификации параметров асинхронных двигателей заключается в следующем: эксперт после анализа каждой группы методов выставляет оценку по каждому критерию (3 – полностью соответствует критерию, 1 – полностью не соответствует критерию). Далее критериям выставляется уровень ранжирования, который напрямую зависит от важности данного критерия из общего списка (по убывающей 10 – наиболее важный, 1 – наименее важный). Затем высчитывается весовой коэффициент для каждого критерия следующим образом $ВК_i = \frac{P_i}{\sum P_i}$. Далее получаем приведенную оценку, с учетом весового коэффициента соответствия каждому критерию: $R_i = ВК_i \cdot E_i$

Все приведенные оценки с учетом весового коэффициента суммируются и записываются в столбик «сумма». Наиболее успешным будут считаться группа методов, набравшая наибольшее значение суммы.

Таблица 1. Критический экспертный анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей

		Критерий										Σ
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	
M1	E	2	2	1	3	2	1	3	1	1	2	18
	R	0,26	0,22	0,18	0,216	0,32	0,018	0,162	0,036	0,14	0,18	1,732
M2	E	1	3	2	1	3	3	1	2	1	3	20
	R	0,13	0,33	0,36	0,072	0,48	0,054	0,054	0,072	0,14	0,27	1,962
M3	E	2	2	2	3	3	3	1	3	1	1	21
	R	0,26	0,22	0,36	0,216	0,48	0,054	0,054	0,108	0,14	0,27	2,162
M4	E	2	2	3	1	3	1	3	1	3	3	22
	R	0,26	0,22	0,54	0,072	0,48	0,018	0,162	0,036	0,42	0,27	2,478
M5	E	3	1	3	1	3	1	3	3	3	3	24
	R	0,39	0,11	0,54	0,072	0,32	0,018	0,162	0,108	0,42	0,27	2,41
M6	E	2	2	3	3	2	2	3	2	2	2	23
	R	0,26	0,22	0,54	0,216	0,48	0,036	0,162	0,072	0,28	0,18	2,446
M7	E	2	3	3	3	3	2	3	3	3	3	28
	R	0,26	0,33	0,51	0,216	0,48	0,036	0,162	0,108	0,42	0,27	2,792
P		7	6	10	4	9	1	3	2	8	5	55
BK		0,13	0,11	0,18	0,072	0,16	0,018	0,054	0,036	0,14	0,09	

На основе анализа таблицы 1 можно утверждать, что создание процедур для динамической оценки параметров асинхронных двигателей наиболее успешны на основе алгебраических методов, так как не требуют больших вычислительных мощностей, создания сложных систем, сбора предварительной информации и ее записи, при этом обеспечивая оценку параметров в режиме реального времени и с допустимыми для систем электропривода погрешностями. Однако дальнейшее развитие данных методов связано с решением рядом проблем, описание которых представлено далее.

Второе научное положение: Разработка метода алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей с неподвижным ротором на основе дискретных моделей.

2.1. Разработка метода алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей с неподвижным ротором и его апробация.

2.2. Сравнительный анализ методов построения дискретных моделей асинхронного двигателя для решения задачи идентификации параметров асинхронных двигателей.

Одной из основных задач, возникающих при разработке алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей на основе дискретных моделей, является создание работоспособной модели двигателя, входящего в состав электропривода. Существует множество различных математических моделей асинхронного двигателя, такие как: модели в естественных координатах, в ортогональных координатах, неподвижных или вращающихся с определенной частотой, в полярных координатах либо бескоординатные (тензорные) модели. Наиболее эффективной моделью, в рамках решаемой задачи, является модель в неподвижной системе координат $\alpha\beta$. Данная математическая модель в основном применяется для описания электромагнитных и электромеханических процессов в двигателе и управления им при питании двигателя по схеме преобразователь частоты-асинхронный двигатель, где преобладает главная гармоника в спектральном составе статорных токов и напряжений и отсутствуют режимы прерывистых токов. Основными достоинствами такой модели являются ее относительная легкость

¹ Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Ивушкин К.А. Системные основы прогнозирования объектов управления. - Дюссельдорф, Германия: Palmarium Academic Publishing, 2012. - 432 стр.

вычисления, связанная с отсутствием периодических коэффициентов, имеющиеся в дифференциальных уравнениях и малым количеством уравнений, а также повсеместное применение при управлении двигателем по схеме ПЧ-АД.

Математическая модель представленная в неподвижной статорной системе координат $\alpha\beta$ имеет четыре уравнения, описывающие электромагнитные процессы в двигателе, и одно уравнение – механическую часть двигателя:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\alpha}(t) - \frac{R_s}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\alpha}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \Psi_{2\alpha}(t) + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}(t) \\ \frac{di_{1\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\beta}(t) - \frac{R_s}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\beta}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \Psi_{2\beta}(t) - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}(t) \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\alpha}(t) - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}(t) \\ \frac{d\Psi_{2\beta}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\beta}(t) + z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}(t) \\ M_{эм}(t) = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2\alpha}(t) \cdot i_{1\beta}(t) - \Psi_{2\beta}(t) \cdot i_{1\alpha}(t)) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{эм}(t) - M_c(t)) \end{cases} \quad (1)$$

где R_1 –активное сопротивление обмотки статора; R'_2 –приведенное к статору активное сопротивление ротора; $L_1=L_{1\sigma}+L_m$ –эквивалентная индуктивность обмотки статора; $L_2=L'_{2\sigma}+L_m$ –эквивалентная индуктивность обмотки ротора; $L_{1\sigma}$ –индуктивность рассеяния обмотки статора; $L'_{2\sigma}$ –приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора; L_m –результатирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины; $R_s = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}$ –эквивалентное сопротивление двигателя; $U_{1\alpha}(t) = U_{1m} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t)$ –синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси α ортогональной неподвижной системы координат $\alpha\beta$; $U_{1\beta}(t) = U_{1m} \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t)$ –косинусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси β ортогональной неподвижной системы координат $\alpha\beta$; $U_{1m} = \sqrt{2} \cdot U_1$ –амплитудное значение фазного напряжения статорной обмотки; U_1 –действующее значение фазного напряжения статорной обмотки; f_1 –частота напряжения статора; $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ –составляющие тока статора (фазные токи обмотки статора) в системе координат α , β ; $\Psi_{1\alpha}$, $\Psi_{1\beta}$ –составляющие потокосцепления ротора в системе координат $\alpha\beta$; $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя; M_c – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ –коэффициент рассеяния; J –момент инерции двигателя.

Система дифференциальных уравнений (1) записана в нормальной форме Коши. Однако, для разработки алгебраических методов идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей необходима запись математических уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе, в виде системы линейных алгебраических уравнений. Также необходимо учитывать, что в цифровых системах управления электроприводами каналы измерения переменных состояния объекта управления имеют аналогово-цифровые преобразователи, в которых происходит дискретизация непрерывного сигнала по времени и квантование по уровню. Таким образом, возникает задача перехода от непрерывной модели, отражающей основные физические явления в асинхронном двигателе, к дискретной модели, которая бы наилучшим образом аппроксимировала динамические свойства исходного непрерывного объекта. Дискретная модель должна быть описана системой разностных уравнений. При этом необходимо учитывать, что справедливость дискретной модели будет ограничена требованиями теоремы Котельникова-Шеннона-Найквиста.

Для решения задачи перехода от непрерывной модели к дискретной полезно воспользоваться

известными методами численного дифференцирования. В настоящее время существует множество таких методов, но при выборе конкретного метода необходимо опираться на анализ, проведенный в первом научном положении, и представленные там требования. На основании этих требований можно выразить следующие основные группы методов численного дифференцирования:

1. Разности вперед (прямые разности), который состоит в аппроксимации производной конечной разностью: $\frac{dx}{dt} \rightarrow \frac{x[(n+1) \cdot \Delta t] - x(n \cdot \Delta t)}{\Delta t}$.
2. Разности назад (обратные разности) (ОР) в котором производная аппроксимируется разностью назад: $\frac{dx}{dt} \rightarrow \frac{x(n \cdot \Delta t) - x[(n-1) \cdot \Delta t]}{\Delta t}$.
3. Центральные разности $\frac{dx}{dt} \rightarrow \frac{x[(n-1) \cdot \Delta t] - x[(n+1) \cdot \Delta t]}{\Delta t}$.
4. Метод многоточечной аппроксимации (МА) для приближения производной, имеющий вид $\frac{dx}{dt} \rightarrow \frac{x[(n-2) \cdot \Delta t] - 8 \cdot x[(n-1) \cdot \Delta t] + 8 \cdot x[(n+1) \cdot \Delta t] - x[(n+2) \cdot \Delta t]}{12 \cdot \Delta t}$.

Все остальные методы численного дифференцирования можно считать видоизменениями либо усовершенствованием, представленных основных методов. К сожалению, любое изменение приводит к усложнению метода и уменьшению его быстродействия, что крайне нежелательно при решении задачи идентификации параметров асинхронных электродвигателей в режиме реального времени.

Рассмотренные схемы численного дифференцирования позволяют перейти от дифференциальных к разностным уравнениям, которые широко используются для описания стационарных дискретных систем. Существуют и другие способы цифрового дифференцирования, а именно способы основанные на отображениях производных из s-плоскости в z-плоскость. Для представленной задачи целесообразно использовать билинейное преобразование¹ (БП).

Сравнительный анализ методов цифрового дифференцирования был проведен по результатам идентификации параметров асинхронного двигателя с неподвижным ротором.

Для создания режима неподвижного ротора на статор асинхронного электродвигателя, работающего в составе электропривода по схеме «ПЧ-АД», от автономного инвертора напряжения (АИН) с синусоидальной ШИМ-модуляцией подавалось пониженное напряжение на две из трех обмоток статора, при этом ток не превышал значений допустимых по условиям нагрева. Ротор двигателя оставался неподвижным $\omega=0$ рад/с, так как отсутствовал пусковой момент. Пульсациями тока, вызванными ШИМ-модуляцией, пренебрегали, так как несущая частота модуляции много больше номинальной частоты тока. Таким образом уравнение (1) при $\omega=0$ рад/с:

$$\begin{cases} \frac{di_{1a}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1a}(t) - \frac{R_s}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1a}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \Psi_{2a}(t) + 0 \\ \frac{d\Psi_{2a}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2a}(t) + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1a}(t) - 0 \end{cases} \quad (2)$$

В операторной форме записи система уравнений (2) принимает вид:

$$\begin{cases} U_{1a}(p) = R_s \cdot (T_3 \cdot p + 1) \cdot i_{1a}(p) - \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2a}(p) \\ 0 = (T_2 \cdot p + 1) \cdot \Psi_{2a}(p) - L_m \cdot i_{1a}(p) \end{cases} \quad (3)$$

где $T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_s}$ — эквивалентная постоянная времени, $T_2 = \frac{L_2}{R'_2}$ — постоянная времени ротора. Выразив из

второго уравнения системы (3) потокосцепление $\Psi_{2a}(p) = \frac{L_m \cdot i_{1a}(p)}{(T_2 \cdot p + 1)}$ и подставив в (1), избавившись от

постоянной времени T_2 в знаменателе, учитывая что $R_s = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2}$, получаем:

$$\begin{aligned} U_{1a}(p) \cdot T_2 \cdot p + U_{1a}(p) &= \left(R_s \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot p^2 + R_s \cdot T_3 \cdot p + R_s \cdot T_2 \cdot p + R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2} - R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2} \right) \cdot i_{1a}(p); \\ U_{1a}(p) \cdot T_2 \cdot p + U_{1a}(p) &= (R_s \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot p^2 + R_s \cdot T_3 \cdot p + R_s \cdot T_2 \cdot p + R_1) \cdot i_{1a}(p); \end{aligned}$$

¹R.L. Burden, J.D. Faires, Numerical Analysis, 7th ed., Brooks/Cole, Boston, 2000 - 837 p.

$$U_{1\alpha}(p) \cdot T_2 \cdot p + U_{1\alpha}(p) = R_1 \cdot i_{1\alpha}(p) + R_3 \cdot (T_3 + T_2) \cdot p \cdot i_{1\alpha}(p) + R_3 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot p^2 \cdot i_{1\alpha}(p).$$

Для удобства выполнения дальнейших математических операций произведем замену параметров на коэффициенты $K_1 = R_1$, $K_2 = R_3 \cdot (T_3 + T_2)$, $K_3 = R_3 \cdot T_2 \cdot T_3$, $K_4 = T_2$ и вернемся к непрерывной системе координат: $U_{1\alpha}(t) + T_2 \cdot \frac{dU_{1\alpha}(t)}{dt} = K_1 \cdot i_{1\alpha}(t) + K_2 \cdot p \cdot \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} + K_3 \cdot \frac{d^2 i_{1\alpha}(t)}{dt^2} - K_4 \cdot \frac{dU_{1\alpha}(t)}{dt}$. Для нахождения оценок $\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \hat{K}_4$ составлялась система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), путем выполнения задержек сигналов и записи задержанных значений в памяти. С учётом периода дискретизации Δt измерительной системы осуществлялся переход от этой СЛАУ к системе разностных уравнений, записанных в матричном виде, относительно текущего $n \cdot \Delta t$ и предыдущих $n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t$ моментов времени при условии постоянства оценок параметров, где $k = \overline{1,4}$:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (4)$$

где вектор зависимых переменных $\mathbf{B}$ – вектор 4×1 со следующими элементами $b_{k1} = U_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)$, $k = \overline{1,4}$; матрица регрессоров $\mathbf{A}$ – матрица 4×4 с элементами: $a_{k1} = i_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)$; $a_{k2} = D^{(1)}[i_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)]$; $a_{k3} = D^{(2)}[i_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)]$; $a_{k4} = D^{(1)}[U_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)]$; где $i_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)$ – токи; $D^{(1)}[i_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)]$ – первые производные токов; $D^{(2)}[i_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)]$ – вторые производные токов; $U_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)$ – напряжения; $D^{(1)}[U_{1\alpha}(n \cdot \Delta t - (k-1) \cdot \Delta t)]$ – первые производные напряжения на $n \cdot \Delta t$, $n \cdot \Delta t - \Delta t$, $n \cdot \Delta t - 2\Delta t$, $n \cdot \Delta t - 3\Delta t$ шагах соответственно; $\mathbf{x} = [\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \hat{K}_4]^T$ – коэффициенты регрессии; $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon(n \cdot \Delta t), \varepsilon(n \cdot \Delta t - \Delta t), \varepsilon(n \cdot \Delta t - 2\Delta t), \varepsilon(n \cdot \Delta t - 3\Delta t)]^T$ – ошибки, возникающие при переходе от непрерывной системы координат в дискретную. Проведенный анализ показал, что для исследуемого объекта ошибки связаны со следующими тремя основными факторами: 1. Наличие естественных шумовых составляющих сигналов, получаемых с датчиков. 2. Уязвимость цифрового дифференцирования к наличию шумов. 3. Величина периода дискретизации не должна противоречить требованиям теоремы Котельникова.

Для проведения последующего сравнительного анализа реализация производных проводилась на основе описанных ранее методов: обратной разности, многоточечной аппроксимации и с помощью билинейного преобразования.

Из нормального уравнения (4) в предположении невырожденности можем найти вектор коэффициентов методом наименьших квадратов: $\mathbf{A}^T \mathbf{B} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \hat{\mathbf{X}} \Rightarrow \hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} + \boldsymbol{\varepsilon}$.

Для проверки эффективности идентификации параметров АД с неподвижным короткозамкнутым ротором с применением разработанного выше метода при решении реальных задач проводилось исследование модели двигателя ST132L¹.

Таблица 2. Сравнительный анализ результатов идентификации параметров дискретных моделей асинхронного двигателя с неподвижным ротором на основе различных методов цифрового дифференцирования

Коэффициент	Метод	Реальное значение	Погрешность оценки	Время переходного процесса оценивания	Начальное значение оценки
K_1 , Ом	ОР	0,106	7,697	0,1	-0,527
	МА		3,839		-0,212
	БП		2,013		-0,108
K_3 , Ом·с	ОР	0,065	7,596	0,05	0,060
	МА		3,798	0	0,063
	БП		1,956	0	0,064
K_3 , мОм·с ²	ОР	50,51	0,02	0,1	0,494
	МА		0,01		0,505
	БП		0,003		0,512
K_4 , с	ОР	0,379	6,9	0,1	0,345
	МА		3,2	0,08	0,364
	БП		1,3	0,05	0,371

Для анализа качества процесса оценивания параметра была рассмотрена интегральная среднеквадратическая ошибка оценивания коэффициента:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{уст.кон.}} - t_{\text{уст.нач.}}} \sum_{k=t_{\text{уст.нач.}}}^{t_{\text{уст.кон.}}} \left(\frac{x - \hat{x}_k}{x} \right)^2} \cdot 100\% \quad (5)$$

¹Удуг Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: Учебное пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2000. 448 стр.

где $x=K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ – это истинное значение исследуемого параметра, $\hat{x} = \hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \hat{K}_4$ – оцененное значение исследуемого параметра, $t_{уст.нач.} = n_{уст.нач.} \cdot \Delta t$, $t_{уст.кон.} = n_{уст.кон.} \cdot \Delta t$ – время начала и окончания установившийся и достаточного режима оценивания параметров, соответственно, Δt – период дискретизации.

Все полученные оценки различными методами являются несмещенными, что говорит о работоспособности каждого метода. Однако из таблицы 2 видно, что в среднем скорость переходного процесса оценивания у всех методов практически одинакова, кроме коэффициента K_4 , однако разница не является существенной. Наиболее точным методом является билинейное преобразование. Соответственно данный метод БП предпочтителен для дальнейшего использования.

Третье научное положение: Разработка и апробирование метода алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей

Система (1) для решения задач идентификации алгебраическим методом является громоздкой и неэффективной из-за наличия переменных состояний ротора, измерение которых в реальных условиях технически нецелесообразно, а также наличием большого числа уравнений, что в конечном итоге приведет к увеличению вычислительных мощностей. Поэтому следуя рекомендациям¹ систему (1) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{di_{1a}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1a}(t) - \gamma \cdot i_{1a}(t) + \frac{\beta}{T_2} \cdot \Psi_{2a}(t) + z_p \cdot \beta \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}(t) \\ \frac{di_{1\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1\beta}(t) - \gamma \cdot i_{1\beta}(t) + \frac{\beta}{T_2} \cdot \Psi_{2\alpha}(t) - z_p \cdot \beta \cdot \omega \cdot \Psi_{2a}(t) \\ \Psi_{2a}(t) = \int \left(\frac{L_m}{T_2} \cdot i_{1a}(t) - \frac{\Psi_{2a}(t)}{T_2} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}(t) \right) dt \\ \Psi_{2\beta}(t) = \int \left(\frac{L_m}{T_2} \cdot i_{1\beta}(t) - \frac{\Psi_{2\beta}(t)}{T_2} - z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2a}(t) \right) dt \\ M_{эм}(t) = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2a}(t) \cdot i_{1\beta}(t) - \Psi_{2\beta}(t) \cdot i_{1a}(t)) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{2a}(t) \cdot i_{1\beta}(t) - \Psi_{2\beta}(t) \cdot i_{1a}(t)) - \frac{M_c}{J} \end{cases} \quad (6)$$

где $\beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2}$, $\gamma = \frac{R_1}{\sigma \cdot L_1} + \frac{R'_2 \cdot L_m^2}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2}$, $\frac{1}{T_2} = \frac{R'_2}{L_2}$, T_2 – постоянная времени.

После многочисленных постановок и замен в системе (6) получаем уравнение:

$$K_1 \cdot i_{1a}(t) + K_2 \cdot U_{1a}(t) + K_3 \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot i_{1\beta}(t) + K_4 \cdot \left(\frac{dU_{1a}(t)}{dt} + z_p \cdot \omega(t) \cdot U_{1\beta}(t) \right) + K_5 \cdot \frac{di_{1a}(t)}{dt} = \frac{d^2 i_{1a}(t)}{dt^2} + z_p \cdot \omega(t) \cdot \frac{di_{1\beta}(t)}{dt}, \text{ где}$$

$$K_1 = -\frac{R_1}{\sigma \cdot L_1 \cdot T_2}, \quad K_2 = \frac{1}{\sigma \cdot L_1 \cdot T_2}, \quad K_3 = \frac{R_1}{\sigma \cdot L_1}, \quad K_4 = \frac{1}{\sigma \cdot L_1}, \quad K_5 = \frac{R_1 \cdot L_2 + R'_2 \cdot L_1}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2}.$$

Раскрываем скобки и приводим подобные:

$$\begin{aligned} & K_1 \cdot (i_{1a}(z) + 2 \cdot i_{1a}(z) \cdot z^{-1} + i_{1a}(z) \cdot z^{-2}) + K_2 \cdot (U_{1a}(z) + 2 \cdot U_{1a}(z) \cdot z^{-1} + U_{1a}(z) \cdot z^{-2}) + \\ & + K_3 \cdot z_p \cdot \omega(z) \cdot (i_{1\beta}(z) + 2 \cdot i_{1\beta}(z) \cdot z^{-1} + i_{1\beta}(z) \cdot z^{-2}) + K_4 \cdot \left(\frac{2}{\Delta t} (U_{1a}(z) - U_{1a}(z) \cdot z^{-2}) + \right. \\ & \left. + z_p \cdot \omega(z) \cdot (U_{1\beta}(z) + 2 \cdot U_{1\beta}(z) \cdot z^{-1} + U_{1\beta}(z) \cdot z^{-2}) \right) + K_5 \cdot \frac{2}{\Delta t} \cdot (i_{1a}(z) - i_{1a}(z) \cdot z^{-2}) = \\ & = \frac{2}{\Delta t} \cdot (i_{1a}(z) - 2 \cdot i_{1a}(z) \cdot z^{-1} + i_{1a}(z) \cdot z^{-2}) + z_p \cdot \omega(z) \cdot \frac{2}{\Delta t} \cdot (i_{1\beta}(z) - i_{1\beta}(z) \cdot z^{-2}). \end{aligned}$$

Для получения оценок параметров асинхронного двигателя необходимо составить дискретную модель в форме линейной дискретной системы алгебраических уравнений, представленным ранее способом.

После того как были найдены оценки коэффициентов, необходимо вычислить оценки параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя следующим образом:

$$\hat{R}_1 = -\frac{\hat{K}_3}{\hat{K}_4}, \quad \hat{R}'_2 = \frac{\hat{K}_3 - \hat{K}_5}{\hat{K}_4}, \quad \hat{L}_1 = \frac{\hat{K}_3 - \hat{K}_5}{\hat{K}_2}, \quad \hat{\sigma} = -\frac{\hat{R}_1}{\hat{K}_3 \cdot \hat{L}_1}, \quad \hat{L}_m = \hat{L}_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\hat{K}_4} \cdot \hat{L}_1}, \quad \hat{T}_2 = \frac{1}{\hat{K}_2 \cdot \hat{\sigma} \cdot \hat{L}_1}, \quad \hat{L}_2 = \frac{\hat{T}_2}{\hat{R}'_2},$$

¹M. Cirincione, M. Pucci, G. Gorrincione, G. Calolino. A new experimental application of least-squares techniques for the estimation of the induction parameters // Journal of electrical engineering and technology – 2002– pp. 345–349

где K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – специальные коэффициенты, необходимые для определения оценок параметров асинхронного двигателя.

Таким образом получен алгебраический метод идентификации параметров асинхронных электродвигателей на основе дискретных моделей.

Для проверки эффективности идентификации параметров АД, включенного по схеме ПЧ-АД с применением разработанного метода проводилось исследование модели двигателя ST132L, статорные обмотки которого подключены к выходу АИН, работающего в режиме ШИМ-модуляции. Полученные переходные процессы оценивания параметров приведены на рисунках 1-3.

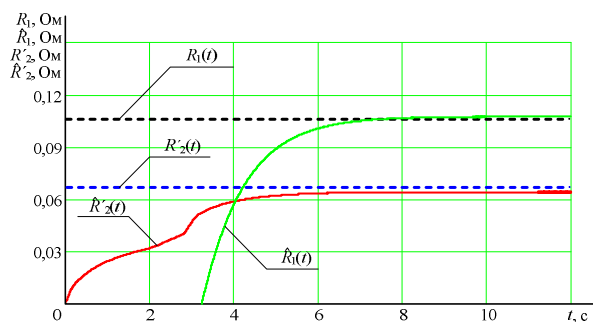


Рис. 1. Переходные процессы оценок активного сопротивления обмотки статора $\hat{R}_1$ и приведенного к статору активного сопротивления обмотки ротора $\hat{R}_2$

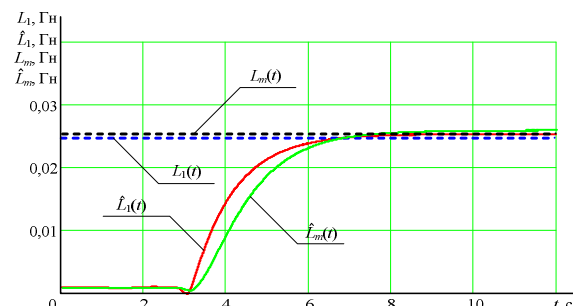


Рис. 2. Переходные процессы оценок эквивалентной индуктивности обмотки статора $\hat{L}_1$ и результирующей индуктивности, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя $\hat{L}_m$

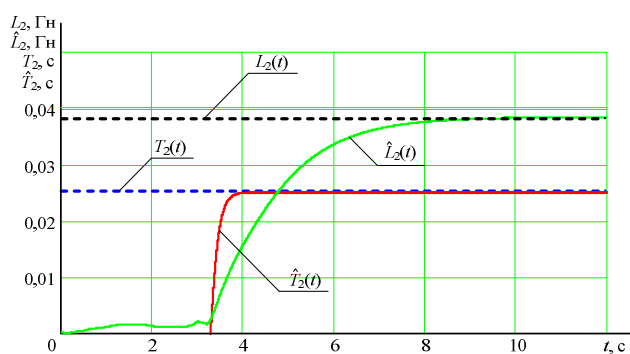


Рис. 3. Переходные процессы оценок постоянной времени ротора $\hat{T}_2$ и приведенной к статору эквивалентной индуктивности обмотки ротора $\hat{L}_2$

Проведенный анализ полученных результатов (рис. 1-3) и интегральная среднеквадратическая ошибка оценивания параметра (5) позволяет утверждать:

1. Все полученные оценки являются устойчивыми и несмещенными, интегральная среднеквадратическая ошибка оценивания параметров асинхронного двигателя составляют не более 5%, что говорит о работоспособности разработанного алгебраического метода идентификации параметров асинхронных электродвигателей на основе дискретных моделей.

2. Время переходного процесса оценивания параметров модели асинхронного электродвигателя занимает не более семи секунд (рис. 3.4.3-3.4.5), что позволяет проводить идентификацию в режиме реального времени.

Четвертое научное положение: Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации сигналов, поступающих с датчиков, как неотъемлемая часть решения задачи идентификации параметров асинхронных двигателей.

Одними из важнейших составляющих, необходимых для идентификации параметров асинхронного двигателя, являются снятие, запись и цифровая обработка сигналов датчиков. Не стоит забывать, что каждое измерение – это сумма полезного сигнала и погрешности или, так называемой, шумовой составляющей. Данные шумы, в основном, делятся на два типа: случайные и систематические, которые появляются за счет воздействия электронных систем регистрации, внешних радиопомех, изменений условий окружающей среды. Соответственно основной задачей при обработке цифрового сигнала является получение сигнала, наиболее приближенного к аналоговому сигналу, снимаемому с датчика, что достигается при условии

тщательной очистки цифрового сигнала от шумовых составляющих. Такую очистку цифрового сигнала обеспечивают цифровые фильтры.

Необходимость применения цифровых фильтров в задаче алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей также связано и с другими причинами:

1. Работа с производными внутри алгоритма вычисления оценок параметров. Известно, что происходит сильное отклонение функции производной от реальной при появлении шумовых составляющих на самой функции сигнала.

2. Идентификация параметров асинхронного двигателя производится в режиме реального времени вне зависимости от режима работы двигателя. При этом двигатель работает в составе электропривода, выполненного по схеме «ПЧ-АД», соответственно сигналы с датчиков токов и напряжения статора поступают после ШИМ-модуляции, что приводит к необходимости выделения тренда полезного сигнала.

В разработке алгебраических методов идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей необходима предварительная фильтрация данных поступающих с датчиков. Для проверки работоспособности процедур предварительной фильтрации и их анализа сформулируем критерии для такой фильтрации: 1. Высокая точность выделения тренда в процессе фильтрации. 2. Быстродействие процесса фильтрации. 3. Возможность интегрирования процесса фильтрации в процедуру идентификации параметров асинхронных электродвигателей. 4. Устойчивость процесса фильтрации. 5. Малые вычислительные мощности, необходимые для процесса фильтрации входных данных. Далее рассмотрены наиболее перспективные классические методы цифровой фильтрации:

1. Арифметическое скользящее среднее (simple moving average SMA) $SMA_{n \cdot \Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{k=n \cdot \Delta t - T + 1}^{n \cdot \Delta t} y_k$,

где y_k – зашумленная функция. N – ширина окна сглаживающего интервала

2. Линейно взвешенное скользящее среднее (weighted moving average WMA)

$$WMA_{n \cdot \Delta t} = \frac{1}{N \cdot (N + 1)} \sum_{k=n \cdot \Delta t - N + 1}^{n \cdot \Delta t} [k - (n \cdot \Delta t - N)] \cdot y_k$$

3. Экспоненциально взвешенное скользящее среднее (exponentially weighted moving average

$$EMA) EMA_{n \cdot \Delta t} = \alpha \sum_{k=1}^{n \cdot \Delta t} (1 - \alpha)^{n \cdot \Delta t - k} \cdot y_k + (1 - \alpha)^{n \cdot \Delta t} \cdot y_0, \quad \alpha = \frac{2}{N + 1}$$

4. Фильтр Ланцоша (ФЛ) зачастую применяют для изменения разрешения оцифрованных изображений. Однако в последнее время он находит широкое применение в электротехнике в качестве цифрового дифференцирующего фильтра

$$y(n \cdot \Delta t) = \frac{3}{\Delta t \cdot (N + 1)(2N + 1)} \sum_{k=0}^{2N} (N - k) \cdot x[(n - k) \cdot \Delta t].$$

5. Фильтры Баттерворта низких частот (ФБ) относится к цифровым фильтрам, метод проектирования которых позволяет получить максимально гладкую амплитудно-частотную характеристику в полосе пропускания и записывается в виде

$$y(n \cdot \Delta t) = \sum_{N=0}^k \frac{b_N}{a_0} \cdot x[(N - k) \cdot \Delta t] - \sum_{N=1}^k \frac{a_N}{a_0} \cdot y[(N - k) \cdot \Delta t].$$

Работоспособность рассмотренных методов фильтрации проверена путем выделения тренда функции токов статора на основе математической модели асинхронного двигателя ST132L с учетом наложения шумовых составляющих в процентном соотношении от полезного сигнала. Все результаты сведены в таблицу 3. Необходимо отметить, что основной упор ставился на фильтрацию сигналов с 10% шумовой составляющей, так как значения шумовой составляющей в реальных объектах в основном встречаются именно в таких рамках. Индекс арабской цифрой обозначает порядок ширину окна сглаживающего интервала, римской – порядок фильтра.

Как видно из таблицы 3 полученные временные ряды, описывающие производные тока имели интегральную среднеквадратическую ошибку оценивания не более 4%, что допустимо в

Таблица 3. Сравнительный анализ результатов фильтрации сигналов на основе различных семейств фильтров

Фильтр	Относительный уровень шумовой составляющей от амплитуды полезного сигнала, %							
	$\sigma=5\%$		$\sigma=10\%$		$\sigma=15\%$		$\sigma=20\%$	
	ПР	УР	ПР	УР	ПР	УР	ПР	УР
SMA ₂	23,81	22,32	-	-	-	-	-	-
SMA ₆	14,14	10,91	-	-	-	-	-	-
SMA ₁₀	8,32	6,12	13,8	9,28	14,60	13,23	17,54	16,34
SMA ₁₆	4,39	3,87	7,84	7,61	11,62	10,04	15,42	13,76
SMA ₂₀	3,60	3,21	5,54	4,97	9,01	8,76	12,62	11,93
WMA ₁₀	-	-	15,43	10,90	-	-	-	-
WMA ₁₆	-	-	12,13	9,03	-	-	-	-
WMA ₂₀	-	-	11,64	6,55	-	-	-	-
EMA ₁₀	-	-	10,82	8,63	-	-	-	-
EMA ₁₆	-	-	7,06	5,91	-	-	-	-
EMA ₂₀	-	-	6,88	5,54	-	-	-	-
ФЛ _I	26,9	25,6	40,2	38,01	45,2	42,2	51,2	49,2
ФЛ _{II}	5,86	5,23	11,4	9,2	13,03	10,5	15,1	12,7
ФЛ _X	2,93	1,31	3,43	2,94	6,32	5,93	7,87	7,02
ФБ _I	2,64	2,05	3,54	3,07	6,01	5,26	7,32	6,83

инженерской практике. Однако при решении задач идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей в режиме реального времени этого может оказаться недостаточно. Это связано с тем, что одной из наиболее распространенных схем в современном электроприводе является схема ПЧ-АД, где статорные обмотки подключены к выходу автономного инвертора напряжения, работающего в режиме ШИМ-модуляции. Сигналы, поступающие с датчиков статорных токов и, особенно статорных напряжений, содержат дополнительную шумовую составляющую, обусловленную режимом ШИМ-модуляции АИН и возникает задача не только отсеять шумовую составляющую от полезного сигнала, но и выделить тренд данного сигнала. Несмотря на высокую эффективность ФЛ_X, данное семейство цифровых фильтров является фильтрами-дифференциаторами, что делает их непригодными для решения задачи исключительно выделения тренда полезного сигнала токов и напряжений статора, без дальнейшего цифрового дифференцирования. Была рассмотрена работоспособность ФБ_I и SMA₂₀ при решении данной задачи. К сожалению, данные фильтры не смогли выделить полноценный тренд полезного сигнала составляющих по осям $\alpha\beta$ напряжения статора. Данная проблема решается путем увеличения порядка фильтров. Таким образом в качестве предпочтительных фильтров предварительной фильтрации были использованы SMA с шириной окна сглаживающего интервала равной шестидесяти точкам наблюдения и фильтр Баттерворта третьего порядка. Однако фильтр SMA₆₀ нецелесообразно использовать в связи с необходимостью записи 30 предыдущих значений входных сигнала, что противоречит требованиям реализации в системах реального времени. В свою очередь применение фильтра Баттерворта третьего порядка для фильтрации входных сигналов при решении задач идентификации является наиболее целесообразным.

Пятое научное положение: Разработка структуры нелинейного прогнозирующего фильтра-постфильтратора для выделения тренда полученных оценок и выработка рекомендаций по настройке фильтра

Одной из серьезных проблем, возникших при разработке алгебраических методов идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей, является необходимость фильтрации полученных оценок параметров. Необходимость фильтрации связана с тем, что полученные сигналы оценки параметров имеют шумовую составляющую со знакопеременными отклонениями относительно полезного сигнала (рис. 4) и существенные по величине и относительно редкие импульсные "выбросы" также знакопеременного характера (рис. 5). Наличие шумовой составляющей и импульсных "выбросов" и их характер связаны с проблемами решения некорректных задач¹, качеством предварительной фильтрации сигналов, поступающих с датчиков, корректностью операции цифрового дифференцирования и величиной числа обусловленности матриц. Таким образом в рамках решаемой задачи

¹Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Наука, 1979. – 285 с.

полностью избавиться от шумовых составляющих в сигналах оценок не представляется возможным, а возможно лишь снизить шумовой фон до заданного приемлемого уровня.

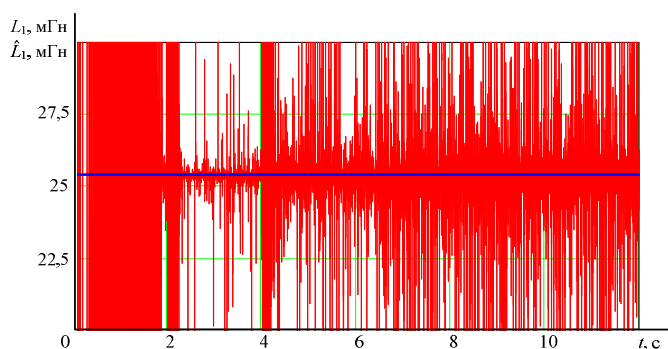


Рис. 4. Переходный процесс оценки эквивалентной индуктивности обмотки статора $\hat{L}_1$, имеющий ярко выраженную дисперсионную составляющую

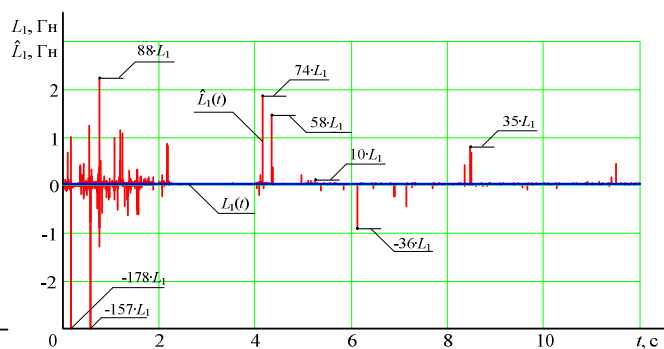


Рис. 5. Переходный процесс оценки эквивалентной индуктивности обмотки статора $\hat{L}_1$, имеющий ярко выраженную импульсную составляющую

Для решения проблемы фильтрации полученных оценок параметров был разработан фильтр, способный подавить импульсные "выбросы" и выделить тренд полезного сигнала оценок параметров асинхронного электродвигателя, при чем успешное решение стало возможно только в классе нелинейных фильтров. При этом разрабатываемый фильтр должен был соответствовать требованиям, представленным в первом научном положении.

Для решения проблем, связанных с фильтрацией полученных оценок был разработан специальный нелинейный фильтр, за основу которого был взят фильтр низких частот первого порядка. Инерционная часть фильтра предназначена для подавления шумовой составляющей полезного сигнала. Другой немаловажной частью данного фильтра является логическая часть, которая предназначена для реализации алгоритма, позволяющего исключить неблагоприятное влияние импульсных "выбросов" на оценку параметров. Структурная схема разработанного нелинейного прогнозирующего фильтра представлена на рисунке 6.

Разработанная процедура цифровой нелинейной прогнозирующей фильтрации является неотъемлемой частью алгебраического метода идентификации параметров асинхронного электродвигателя на основе дискретной модели.

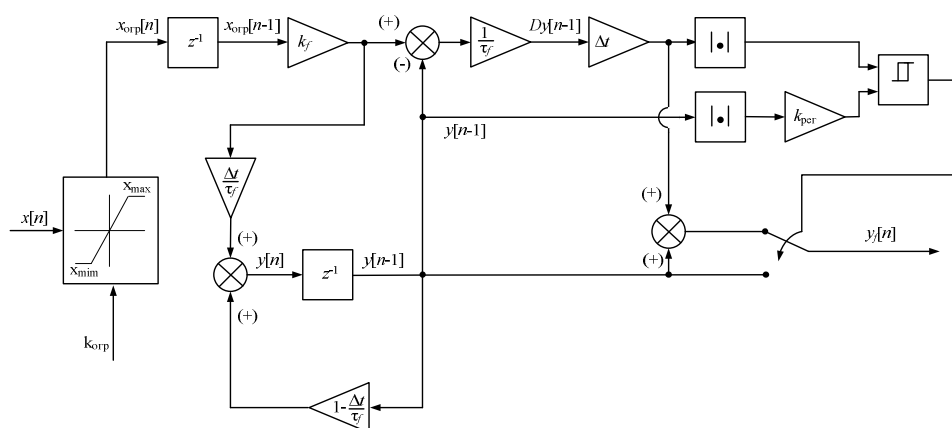


Рис. 6. Структурная схема разработанного нелинейного прогнозирующего фильтра

Для проверки эффективности работы представленного нелинейного прогнозирующего фильтра в качестве фильтра-постфильтратора были проведены исследования переходных процессов в двигателях серии ST, 5А, 6А, АИР. Параметры двигателей данных серий были определены разработанным алгебраическим методом идентификации на основе дискретной модели асинхронной машины, с учетом предложенных решений, описанных ранее. На основании полученных результатов были сформированы представления об оптимальных параметрах и даны рекомендации для настройки таких элементов фильтра как коэффициент

регулирования $k_{рег}$, коэффициент фильтра k_f , постоянная времени фильтра τ_f , коэффициент ограничения $k_{огр}$.

Экспериментальное апробирование разработанных методов алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей на основе дискретных моделей

Для проверки работоспособности разработанных методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей на основе дискретных моделей в режиме реального времени был проведен ряд экспериментов на различных экспериментальных установках, в которых асинхронный электродвигатель работал в четырех различных режимах: пуск на холостом ходу, наброс нагрузки и работа под нагрузкой, сброс нагрузки и работа на холостом ходу, торможение двигателя:

1. Установка, предназначенная для исследования разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей при подключении АД непосредственно к трехфазной питающей сети, токи и напряжения которой оказались несимметричными и несинусоидальными.

2. Установка, предназначенная для исследования разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей при включении двигателя по схеме ПЧ-АД.

3. Установка, предназначенная для исследования разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей при включении двигателя по схеме ТРН-АД.

Полученные на различных установках результаты позволили наиболее полно оценить универсальность разработанных методов идентификации и возможные области применения.

Для экспериментальной апробации разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей при подключении АД непосредственно к промышленной сети была использована установка, представленная на рисунке 7.

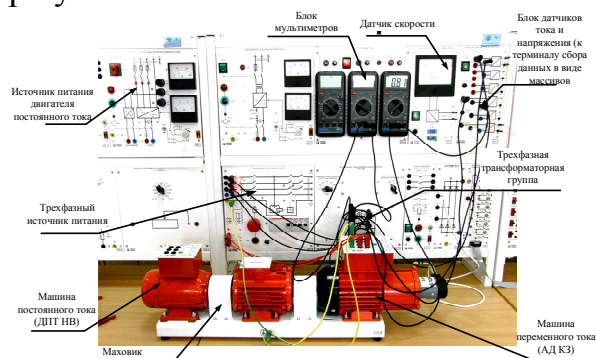


Рис. 7. Внешний вид экспериментальной установки для проверки работоспособности алгебраических методов идентификации асинхронных электродвигателей, питающихся напрямую от сети

между переменными состояния полученными экспериментально, и оцененными:

- при использовании угловой скорости вращения вала ротора в качестве опорного сигнала:

$$\delta_{\omega} = \frac{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |\omega(t) - \hat{\omega}(t, \hat{R}_1, \hat{R}_2, \hat{L}_1, \hat{L}_2, \hat{L}_m)| dt}{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |\omega(t)| dt} \cdot 100\%$$

где $t_{нач}$ — время начала работы двигателя в текущем режиме, например режим пуска на холостом ходу, $t_{кон}$ — время окончания работы двигателя в текущем режиме, $\omega(t)$ и $I(t)$ — опорные траектории угловой скорости вращения вала ротора и результирующего вектора тока статора

Для подтверждения работоспособности разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей на основе дискретных моделей в режиме реального времени и оценки точности определения параметров был проведен сравнительный анализ графиков переходных процессов асинхронного двигателя и его модели с идентифицированными параметрами.

Были найдены относительные интегральные погрешности на основе сравнения значений модулей невязок

- при использовании результирующего вектора тока статора в качестве опорного сигнала:

$$\delta_I = \frac{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |I(t) - \hat{I}(t, \hat{R}_1, \hat{R}_2, \hat{L}_1, \hat{L}_2, \hat{L}_m)| dt}{\int_{t_{нач}}^{t_{кон}} |I(t)| dt} \cdot 100\%$$

исследуемого двигателя, соответственно, $\hat{\omega}(t, \hat{R}_1, \hat{R}_2, \hat{L}_1, \hat{L}_2, \hat{L}_m)$ и $\hat{i}(t, \hat{R}_1, \hat{R}_2, \hat{L}_1, \hat{L}_2, \hat{L}_m)$ – опорные траектории угловой скорости вращения вала ротора и результирующего вектора тока статора модели исследуемого двигателя, параметры которой получены в ходе идентификации с помощью разработанного метода.

Относительные интегральные погрешности, рассчитанные на основе значений модулей невязок фактических и модельных значений опорной траектории угловой скорости вращения вала и результирующего вектора тока статора составили не более 4% в различных режимах. Таким образом, была доказана эффективность алгебраического метода идентификации параметров асинхронных двигателей подключенных напрямую к промышленной сети на основе дискретных моделей в режиме реального времени, несмотря на: 1. Несинусоидальность токов и напряжений и перекоса фаз трехфазной питающей сети. 2. Изменения режима работы асинхронного двигателя.

Для экспериментальной апробации разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей, подключенных по схеме «ТРН-АД», была использована установка, представленная на рисунке 8.

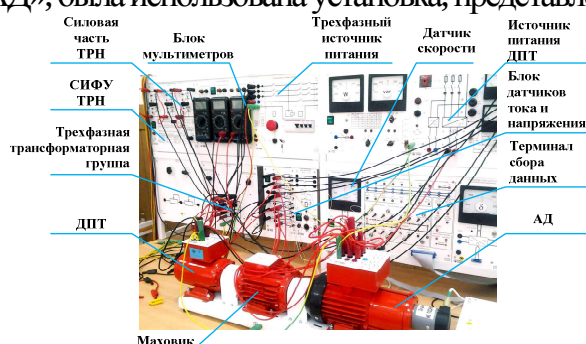


Рис. 8. Внешний вид экспериментальной установки ТРН-АД

в котором появляются явно выраженные характерные участки (токовая пауза) для ТРН в осциллограммах тока и напряжения составляет 60-70 градусов, а при угле управления, выше 77 градусов, электромагнитный момент двигателя становится меньше момента холостого хода, и двигатель начинает тормозиться до полного останова. Полученные результаты идентификации параметров асинхронного двигателя и относительных интегральных погрешностей переходных процессов угловой скорости вращения вала ротора и результирующего вектора тока статора при различном значении угла управления сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Сравнительный анализ результатов идентификации параметров асинхронного двигателя и относительные интегральные погрешности переходных процессов угловой скорости вращения вала ротора и результирующего вектора тока статора при различном значении угла управления

Параметр	Угол управления α , град				
	0	20	40	60	65
$\hat{R}_1$, Ом	46,082	46,031	45,981	45,939	45,901
$\hat{R}_2$, Ом	45,761	45,906	46,045	46,181	46,22
$\hat{L}_1$, Гн	1,13	1,125	1,124	1,119	1,106
$\hat{L}_2$, Гн	0,991	0,991	0,995	1,004	1,004
$\hat{L}_m$, Гн	0,99	0,991	1,002	1,042	1,066
δ_a , %	5,41	6,24	7,54	8,04	8,62
δ_b , %	5,11	7,32	12,54	15,45	16,57

их продолжительность за счет наличия магнитной связи между обмотками фаз ротора и статора асинхронного двигателя.

2. Наличие перехода от трехфазной системы координат к двухфазной неподвижной системе координат $\alpha\beta$, что усугубляет негативное воздействие, представленное в первом пункте, даже при малых углах управления. При этом допустимость перехода к эквивалентным

Была проведена серия экспериментов, в каждом из которых менялся угол управления тиристоров α от 0 до 65 градусов. Такой диапазон угла управления ТРН был выбран в виду того, что присутствовала нагрузка, носящая преимущественно индуктивный характер, соответственно минимальный угол управления, при

На основании таблицы 4 можно утверждать, что получены асимптотически устойчивые, корректные оценки, несмотря на следующие неблагоприятные факторы для процедуры идентификации:

1. Фазные напряжения и особенно токи имеют ярко выраженный несинусоидальный характер, что связано с особенностями работы схемы «ТРН-АД», а именно появлению относительно продолжительных токовых пауз. Еще одним немаловажным фактором является нестационарность токовых пауз, обусловленная угловой скорости ротора на

двухфазным моделям электрических машин строго обоснована Парком Р. и Горевым А.А. лишь для случая гармонических токов и напряжений в цепях статора.

3. Нестационарность режима работы асинхронного двигателя.

Для экспериментальной апробации разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей в составе электропривода, включенного по схеме «ПЧ-АД», была использована установка представленная на рисунке 9.

Полученные результаты идентификации параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя сведены в таблицу 5.

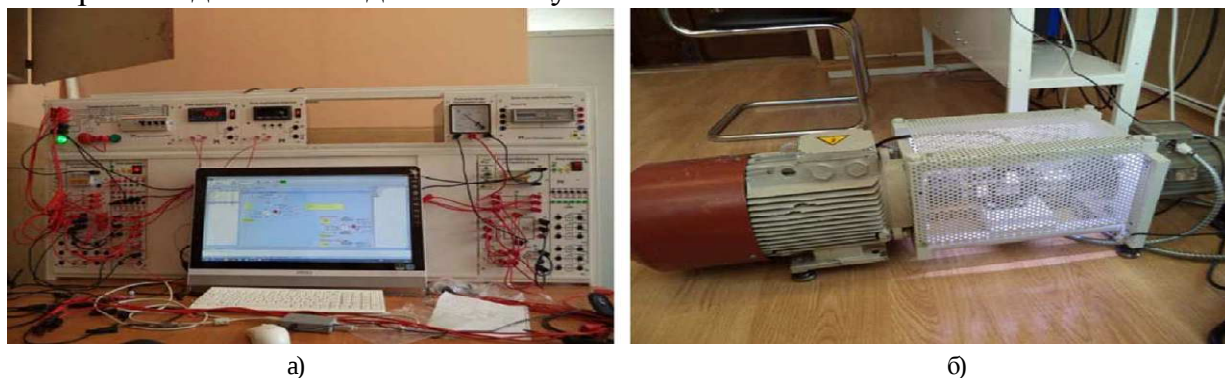


Рис. 9. Внешний вид экспериментальной установки для проверки работоспособности алгебраических методов идентификации асинхронных электродвигателей в составе электропривода, включенного по схеме ПЧ-АД

а – панель блоков силовых преобразователей и измерительных приборов; б – силовой агрегат

Таблица 5. Сравнительный анализ результатов идентификации параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя в составе электропривода, включенного по схеме «ПЧ-АД»

Параметр	Значение
$\hat{R}_1$, Ом	9,087
$\hat{R}_2$, Ом	8,623
$\hat{L}_1$, Гн	1,106
$\hat{L}_2$, Гн	1,077
$\hat{L}_m$, Гн	1,003

Доказана эффективность алгебраического метода идентификации параметров асинхронных электродвигателей в составе электропривода, включенного по схеме «ПЧ-АД», на основе дискретных моделей в режиме реального времени, путем сравнения измеренных и оцененных опорных траекторий угловой скорости вращения вала двигателя в

неблагоприятных для процедуры оценивания факторах. К основным неблагоприятным факторам для процедуры идентификации следует отнести:

1. Исходные сигналы фазных токов и напряжений, прошедшие измерительную систему после исключения ШИМ-составляющей, имеют несинусоидальный характер.

2. Наличие перехода от трехфазной системы координат к двухфазной неподвижной системе координат $\alpha\beta$, что усугубляет негативное воздействие, представленное в первом пункте. При этом допустимость перехода к эквивалентным двухфазным моделям электрических машин строго обоснована Парком Р. и Горевым А.А. лишь для случая гармонических токов и напряжений в цепях статора

3. Наличие неустраняемой шумовой составляющей в измерительных цепях, связанной с объективно существующими проблемами гальванической развязки, экранирования проводников, влияние внешних электромагнитных полей и т.д.

4. Наличие дополнительной шумовой составляющей, обусловленной выбором алгоритма ШИМ-модуляции АИН: синусоидальный или векторный способ ШИМ-модуляции.

5. Нестационарность режима работы асинхронного двигателя.

Погрешность, рассчитанная на основе относительного интегрального значения модуля невязки фактического и модельного значений угловой скорости вращения вала составила 8,3 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения в виде методов и алгоритмов идентификации параметров асинхронных двигателей, эксплуатирующихся в составе рабочих комплексов, в режиме реального времени. При этом

двигатель функционирует в условиях изменения режима работы, флуктуаций параметров и наличии помех в измерительных цепях. Внедрение разработанных способов и алгоритмов способствует повышению конкурентоспособности отечественной промышленной продукции за счет дальнейшего развития автоматизации технологических процессов, непрерывной диагностики функционирования и своевременной замене выходящих из строя асинхронных электродвигателей, что приводит к уменьшению эксплуатационных затрат и простоя технологического оборудования.

Выполненные в диссертационной работе научные исследования представлены следующими новыми результатами:

1. Предложен и апробирован способ алгебраической идентификации параметров асинхронных двигателей с неподвижным ротором регулируемых электроприводов на основе дискретной модели в режиме реального времени. Подтверждением оригинальности предложенного способа являются следующие обоснованные положения:

1.1. Предложены способы создания дискретных моделей асинхронных электродвигателей, необходимых для решения задачи идентификации параметров двигателей. Проведен сравнительный анализ полученных моделей и на основании сформулированных требований к процедуре идентификации выбран наиболее оптимальный способ создания дискретной модели. Наиболее точные оценки параметров асинхронного двигателя с неподвижным ротором получены на основе дискретной модели составленной с применением билинейного преобразования. В среднем погрешность оценок полученных при использовании модели на основе билинейного преобразования в два и четыре раза меньше, чем с использованием моделей на основе многоточечной аппроксимации и прямой разности соответственно. Время переходного процесса оценивания составил не более 0,2 секунды.

1.2. В результате математического моделирования получены оценки параметров асинхронного двигателя с неподвижным ротором на основе дискретной модели в режиме реального времени с погрешностью не более 4%.

2. Предложены и апробированы способ и алгоритм алгебраической идентификации параметров Т-образной схемы замещения асинхронных двигателей регулируемых электроприводов на основе дискретных моделей в режиме реального времени с применением нелинейного прогнозирующего фильтра. Подтверждением оригинальности предложенного способа и алгоритма являются следующие обоснованные положения:

2.1. Проанализированы наиболее перспективные алгоритмы построения фильтров предварительной фильтрации информационных сигналов. Данные фильтры являются неотъемлемой частью решения задачи идентификации асинхронных двигателей регулируемых электроприводов на основе дискретных моделей в режиме реального времени. Рассмотренные фильтры были реализованы и их сравнительный анализ показал, что фильтры Баттерворта являются наиболее привлекательными для решения задачи выделения тренда полезных сигналов поступающих после ШИМ-модуляции.

2.2. Разработан алгоритм и структура нелинейного прогнозирующего фильтра, применяемого для выделения асимптотически устойчивого тренда оценок параметров асинхронного двигателя в режиме реального времени. Продемонстрирована работоспособность данного алгоритма при условии наличия шумовой составляющей и импульсных помех, в среднем превышающих на 3-4 порядка величину оцениваемого параметра, в некоторых случаях достигающих величину в 88-157 раз больше величины оцениваемого параметра.

2.3. В результате математического моделирования получены оценки параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя с погрешностью не более 5%.

2.4. Проведена идентификация параметров Т-образной схемы замещения имитационных моделей асинхронных двигателей серий 5А, АИР, СТ, 6А. На основании проведенной работы были сформулированы общие рекомендации по настройке коэффициентов нелинейного прогнозирующего фильтра для оценки каждого параметра двигателей вышеуказанных серий.

2.5. Эффективность способа оценки параметров асинхронных двигателей регулируемого электропривода на основе дискретных моделей в режиме реального времени доказана

экспериментально, путем сравнения измеренных и оцененных траекторий переходных процессов модуля результирующего вектора тока статора и угловой скорости ротора. Был проведен ряд экспериментов на различных экспериментальных установках при различных режимах работы двигателя:

2.5.1. Установка, предназначенная для исследования разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей, питающихся напрямую от сети. Погрешности, рассчитанные на основе относительных интегральных значений модулей невязок фактических и модельных значений угловой скорости вращения вала составили: при пуске на холостом ходе – 2,71 %, при набросе нагрузки и работе под нагрузкой – 1,94 %, при сбросе нагрузки и работе на холостом ходу – 1,98 %, при торможении двигателя – 3,72 %. Относительные интегральные погрешности переходных процессов результирующего вектора тока статора составили: при пуске на холостом ходе – 2,26 %, при набросе нагрузки и работе под нагрузкой – 1,94 %, при сбросе нагрузки и работе на холостом ходу – 2,35 %.

2.5.2. Установка, предназначенная для исследования разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронных электродвигателей, подключенных по схеме «тиристорный регулятор напряжения-асинхронный двигатель». Погрешности, рассчитанные на основе относительных интегральных значений модулей невязок фактических и модельных значений угловой скорости вращения вала составили: при угле управления $\alpha=0^\circ$ – 5,41 %, при $\alpha=20^\circ$ – 6,24 %, при $\alpha=40^\circ$ – 7,54 %, при $\alpha=60^\circ$ – 8,04 %, при $\alpha=65^\circ$ – 8,62 %. Относительные интегральные погрешности переходных процессов результирующего вектора тока статора составили: при угле управления $\alpha=0^\circ$ – 5,11 %, при $\alpha=20^\circ$ – 7,32 %, при $\alpha=40^\circ$ – 12,54 %, при $\alpha=60^\circ$ – 15,45 %, при $\alpha=65^\circ$ – 16,57 %.

2.5.3. Установка, предназначенная для исследования разработанных алгебраических методов идентификации параметров асинхронного электропривода, выполненного по схеме преобразователь частоты-асинхронный двигатель. Погрешность, рассчитанная на основе относительного интегрального значения модуля невязки фактического и модельного значений угловой скорости вращения вала составила 8,3 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Глазырин А.С., Боловин Е.В. Разработка и лабораторное апробирование метода идентификации параметров электродвигателей на основе разностных // Известия Томского политехнического университета. - 2012 - Т. 321 - № 4 - С. 112-116.

2. Полищук В.И., Глазырин А.С., Боловин Е.В. Определение оптимальных параметров измерительного преобразователя индуктивного типа для диагностической системы электрических машин // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2013 - № 7 (78). - С. 143-149.

3. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Способы повышения обусловленности матриц при решении систем разностных уравнений в задачах идентификации параметров динамических объектов // Известия Томского политехнического университета. - 2013 - Т. 322 - № 2. - С. 51-55.

4. Глазырин А.С., Боловин Е.В. Метод идентификации параметров асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на основе разностных схем // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2013 - № 8(79). - С. 178-185.

5. Козлова Л.Е., Боловин Е.В. Исследование статики и динамики замкнутого бездатчикового асинхронного электропривода собственных нужд ТЭС по схеме ТРН - АД с нейросетевым наблюдателем угловой скорости [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. - 2014 - № 3. - С. 1-6.

6. Боловин Е.В. Критический экспертный анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2015 - № 1(58). - С. 7-27.

Публикации, индексируемые в реферативной базе данных SCOPUS

7. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The Influence of the Design Method for Induction Motor With Stationary Rotor on Identification of Its Parameters // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON); proceedings, Omsk, May 21-23, 2015. - Новосибирск: IEEE Russia Siberia Section, 2015 - p. 1-7.

8. Kozlova L.E., Bolovin E.V., Payuk L.A. Angular Velocity's Neural Network Observer of the Electric Drive of TVR - IM Type Implemented in Software Environment LabVIEW // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2016. — Vol. 132 : Modern Technologies for Non-Destructive Testing. — 2016. — pp. 1 – 6.

9. Bolovin, E.V., Glazyrin, A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2017. – pp. 123–131

Патенты

10. Пат. №151954 РФ. МПК G01R 31/34 (2006.01). Устройство для определения параметров асинхронного электродвигателя / **Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.И. Полищук** – 2014128182/28; заявл. 09.07.2014; опубл. 20.04.2015, бюл. № 11. – 8 с: ил.

11. Пат. №2564692 РФ. МПК G01R 31/34 (2006.01). Способ определения параметров асинхронного электродвигателя / **Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.И. Полищук** – 2014128159/28; заявл. 09.07.2014; опубл. 10.10.2015, бюл. № 28. – 9 с: ил.

12. Пат. №2570363 РФ. МПК G01R 31/34 (2006.01). Способ определения параметров асинхронного электродвигателя / **Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.И. Полищук** – 2014129744/28; заявл. 18.07.2014; опубл. 10.12.2015, бюл. № 34. – 15 с: ил.

13. Пат. №159821 РФ. МПК G01R 31/00 (2006.01). Устройство для определения параметров асинхронного электродвигателя / **Е.В. Боловин, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, В.И. Полищук** – 2014128182/28; заявл. 18.07.2014; опубл. 20.06.2016, бюл. № 5. – 2 с: ил.

Свидетельства о регистрации электронного ресурса

14. Свидетельство о регистрации электронного ресурса **№21100**. ИУО РАО ОФЭРНиО. Программный модуль «Разработка модели нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД» / **Хамитов Р.Н., Козлова Л.Е. Боловин Е.В., Полищук В.И., Глазырин А.С.** Дата регистрации: 27 июля 2015 года. – 3 с.: ил.

15. Свидетельство о регистрации электронного ресурса **№21101**. ИУО РАО ОФЭРНиО. Программный модуль «Моделирование нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора асинхронного электропривода по схеме ТРН-АД» / **Хамитов Р.Н., Козлова Л.Е. Боловин Е.В., Полищук В.И., Глазырин А.С.** Дата регистрации: 27 июля 2015 года. – 3 с.: ил.

Публикации в трудах конференций

16. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Identification of the parameters of the second order dynamic object by difference schemes // Динамиката на съвременната наука -2012 : материали за VII Международна научна практика конференция, Sofia, 17 June-25 September 2011. - София (Болгария): Бял ГРАД-БГ, 2012 - Vol. 13 - p. 42-44.

17. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Identification of the parameters of the first order dynamic object by difference schemes // Vedecky Pokrok na Prelomu Tysyachalety : materialy VIII Mezinarodni Vedecko-Prakticka Konferencie, Praha, 27 May-5 June 2012. - Praha: Education and Science, 2012 - Vol. 29. Technicke vedy. Telovychova a sport. - p. 25-27.

18. Glazyrin A.S., Bolovin E.V. Time delay adjustment for the method of parameter identification of dynamic object // Aktualne problemy nowczesnych nauk-2012: materialy VIII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, Пшемисль, 7-15 Июня 2012. - Przemyśl: Nauka i studia, 2012 - T. 45 - С. 79-81.

19. Боловин Е.В. Разработка и лабораторное апробирование метода идентификации параметров электродвигателей на основе разностных схем // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: труды XII Региональной научно-практической студенческой конференции, Томск, 4-8 Июня 2012. - Томск: Изд-во ТПУ, 2012 - С. 330-334.

20. Боловин Е.В., Глазырин А.С., Полищук В.И. Идентификация параметров асинхронных электродвигателей на основе разностных схем // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 2-6 Декабря 2014. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014 - Т. 2 - С. 8-11.

21. Bolovin E.V. DC motor parameters identification applying difference schemes // Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции: в 13 т., Тамбов, 28 Февраля 2015. - Тамбов: Юком, 2015 - Т. 5 - С. 8-10.

22. Козлова Л.Е., Боловин Е.В. Выбор алгоритма обучения нейроэмулятора угловой скорости электропривода по схеме ТРН-АД // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 9-12 Июня 2015. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015 - Т. 1 - С. 111-113.

23. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Разработка математического и программно-алгоритмического обеспечения компьютеризированного испытательного стенда для тестирования параметров асинхронных электродвигателей // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VII Международной научно-технической конференции, Томск, 14-16 Октября 2015. - Томск: Изд-во ТПУ, 2015 - С. 170-177.