

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 62-83+621.313.333

**ОДНОЛЬКО**  
Дмитрий Сергеевич

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ  
С ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

Минск, 2015

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный  
руководитель:

**Опейко Ольга Федоровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета (г. Минск)

Официальные  
оппоненты:

**Михалев Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры философии и методологии университетского образования Республиканского института высшей школы (г. Минск);

**Стрижнев Александр Гаврилович**, кандидат технических наук, начальник сектора НП ООО ОКБ «Техносоюзпроект» (г. Минск)

Оппонирующая  
организация:

Белорусский государственный технологический университет, кафедра «Автоматизация производственных процессов и электротехники» (г. Минск)

Защита состоится «20» ноября 2015 г. в 10.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.02 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости 65, корп. 2, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах просим высылать на адрес университета и предварительно отправлять по факсу (8-017) 292-91-37 (для стран СНГ (8-10-375-17)-292-9137) на имя председателя совета по защите диссертаций Ф.А. Романюка.

Автореферат разослан «14» октября 2015 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор

Сергей И.И.

© Однолько Д.С., 2015

© Белорусский национальный  
технический университет, 2015

## ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь в промышленности и на транспорте активно внедряются энергосберегающие частотно-регулируемые электроприводы (ЧРЭП), спроектированные на основе системы автономный инвертор напряжения - асинхронный двигатель (АИН-АД). Эффективность их работы определяется не только качеством преобразователя частоты (ПЧ) и двигателя, но и системой автоматического управления.

Проблема синтеза качественных систем частотного, в особенности векторного, управления значительно усложняется тем, что электромагнитные параметры АД, изменяются в процессе его работы. Знание параметров важно не только для синтеза управления, но и для контроля состояния двигателя. Особенно важно знать активные сопротивления статора и ротора, поскольку они изменяются в широких пределах и дают информацию о температуре обмоток двигателя. Встроенный в двигатель датчик температуры удорожает двигатель, снижает его надежность, однако дает один из способов определения сопротивлений обмоток и нагрева машины. В электроприводе (ЭП) применение для этих целей идентификации является более рациональным.

Решению проблемы определения параметров электрических машин и асинхронной машины, в частности, уделяют внимание ученые всего мира: Г.Г. Пивняк, В.Г. Макаров, С.М. Пересада, А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, Д.И. Родькин, А.П. Черный, Ю.А. Мошинский, Б.И. Фираго, И.Я. Браславский, А.В. Волков, Е.Е. Потапенко, В.В. Панкратов, В.Г. Каширских, Т. Orłowska-Kowalska, M. Bodson, J. Chiasson и др. Разработанные специалистами методы нашли применения в комплектных ЭП различных фирм. Проблема параметрической идентификации АД в ЧРЭП не получила окончательного решения, а развитие методов идентификации необходимо для повышения качества ЭП.

Известно, что точность параметрической идентификации можно повысить, увеличивая число наблюдений или интервал времени наблюдения за объектом. Однако длительный интервал идентификации может противоречить требованиям к качеству управления. Сокращение интервала времени, отводимого на идентификацию, является актуальной задачей.

Совершенствование датчиков и микроконтроллеров (МК) управления ЭП открывает новые возможности, но и требует развития методов идентификации.

Поэтому актуально совершенствование методов идентификации за счет рационального использования быстродействия МК и датчиков с целью сокращения времени идентификации; рационального выбора режимов, при которых ведется идентификация; корректного учета влияния широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения на электромагнитные процессы в АД, а также помех для повышения достоверности идентификации.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2011-2015 годы: «15. Макротехнология «Электротехника»: производство преобразователей частоты для управления электроприводами» (Указ Президента Республики Беларусь №378 от 22.07.2010 г.). Работа выполнялась в соответствии: с НИР Белорусского национального технического университета №Ф110Б-123 БНТУ по теме «Разработка методов параметрического синтеза робастных и адаптивных систем управления электропривода на основе ПИД-контроллеров» (2011-2012 гг., № ГР 20120217); с грантом Министерства образования Республики Беларусь ГБ12-03 по теме «Синтез и исследование методов оперативной идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя» (2012 г., № ГР 20120803); с НИОКР Белорусского национального технического университета № ИТ-11/2-09-БНТУ по теме «Разработать программный комплекс многодвигательного электропривода с векторным микропроцессорным управлением» в рамках государственной научно-технической программы на 2011-2015 годы «Информационные технологии» (2011-2014 гг., № ГР 20120220).

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационной работы состоит в разработке методов и алгоритмов параметрической идентификации АД в ЧРЭП с векторной ШИМ напряжения с улучшенными быстродействием и помехоустойчивостью.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ известных методов параметрической идентификации АД и обосновать возможность их совершенствования в ЧРЭП с векторной ШИМ напряжения, используя возможности микропроцессорной и измерительной техники.

2. Получить описание электромагнитных процессов в системе АИН-АД при неподвижном и вращающемся роторе двигателя с учетом импульсного характера напряжения, формируемого по принципу векторной ШИМ.

3. Разработать методы и алгоритмы параметрической идентификации АД в ЧРЭП при неподвижном и вращающемся роторе с улучшенными быстродействием и помехоустойчивостью.

4. Разработать имитационную модель (ИМ) ЧРЭП на основе системы АИН-АД с векторной ШИМ напряжения с учетом изменений активных сопротивлений АД и помех при измерении тока статора, разработать для ИМ программное обеспечение (ПО) параметрической идентификации АД.

5. Разработать опытный образец ПО параметрической идентификации АД для микропроцессорной системы векторного частотного управления ЭП.

**Объектом исследования** является ЧРЭП на основе системы АИН-АД с векторной ШИМ. **Предмет исследования:** параметрическая идентификация АД в ЧРЭП на основе системы АИН-АД с векторной ШИМ.

**Научная новизна.** Новизна результатов исследований заключается в следующем:

- впервые разработан метод и алгоритм параметрической идентификации АД в ЧРЭП при неподвижном роторе, отличающийся питанием АД напряжением, специально сформированным по принципу векторной ШИМ, формированием массивов значений тока фазы статора и применением ретроспективного и рекуррентного вариантов метода наименьших квадратов (МНК);

- разработан метод и алгоритм параметрической идентификации АД в ЧРЭП при вращающемся роторе, отличающийся использованием модели электромагнитных процессов на интервалах импульсов в системе АИН-АД с векторной ШИМ напряжения и рекуррентного варианта МНК, что впервые позволяет определять активные сопротивления АД за интервал включения нулевого базового вектора напряжения;

- разработана ИМ ЧРЭП на основе системы АИН-АД с векторной ШИМ напряжения, отличающаяся наличием ПО идентификации, учетом изменений активных сопротивлений АД и помех при измерении тока статора.

**Положения, выносимые на защиту.** Автором защищаются:

1. Метод и алгоритм параметрической идентификации АД в ЧРЭП при неподвижном роторе, отличающийся питанием АД напряжением, специально сформированным по принципу векторной ШИМ, формированием массивов значений тока фазы статора и применением ретроспективного и рекуррентного вариантов МНК, что позволяет сократить время идентификации и снизить влияние помех на ее результат, способствуя быстродействию и энергоэффективности ЭП.

2. Метод и алгоритм параметрической идентификации АД в ЧРЭП при вращающемся роторе, отличающийся использованием модели электромагнитных процессов на интервалах импульсов в системе АИН-АД с векторной ШИМ напряжения и рекуррентного варианта МНК, для определения за интервал включения нулевого базового вектора напряжения активных сопротивлений АД, что способствует экономичному использованию вычислительных ресурсов МК и оперативной подстройке системы управления ЭП: параметров регуляторов и наблюдателей потокосцепления и скорости ротора.

3. Имитационная модель ЧРЭП на основе системы АИН-АД с векторной ШИМ напряжения, отличающаяся наличием ПО идентификации, учетом изменений активных сопротивлений АД и помех при измерении тока статора, позволяющая проводить численные эксперименты с различными АД с короткозамкнутым ротором, что обеспечивает сокращение сроков разработки частотно-регулируемых ЭП с параметрической идентификацией АД.

**Личный вклад соискателя.** Автором диссертации лично получены результаты, выносимые на защиту. Научный руководитель осуществлял постановку задач исследований, совместно с соискателем проводил обобщение результатов теоретических и практических исследований.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований докла-

дывались, обсуждались и получили положительные отзывы на Международных и Республиканских научных, научно-технических и научно-практических конференциях: «Автоматизация технологических процессов» (г. Минск, БНТУ, 2011 г.); «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (Украина, г. Кременчуг, КрНУ им. М. Остроградского, 2011 г., 2012 г.); «Современные информационные технологии в системе научного и учебного эксперимента: опыт, проблемы, перспективы» (г. Гродно, ГрГУ им. Я. Купалы, 2011 г.); «Информационные технологии и системы 2011, 2012» (г. Минск, БГУИР, 2011 г., 2012 г.); «4-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления» (Россия, г. Таганрог, 2011 г.); «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (г. Минск, БНТУ, 2012 г., 2013 г., 2015 г.); «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (г. Минск, БГТУ, 2012г.); «Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития» (г. Гродно, ГрГУ им. Я. Купалы, 2012 г.); «Актуальные вопросы физики и техники» (г. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2012 г.); «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2012 г.); «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, БНТУ, 2011 г., 2012г., 2013г., 2014г.); «Энергия 2012» (Россия, г. Иваново, ФГБОУВПО Ивановский гос. ун-т им. В.И. Ленина, 2012 г.).

Результаты диссертационной работы внедрены на Частном предприятии «НТПЦ «Белкоммунмаш» (г. Минск) и в учебный процесс БНТУ при подготовке инженеров по специальности «Автоматизированные электроприводы».

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные результаты диссертации отражены в 6 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, общим объемом 3 авторских листа. Опубликовано 23 статьи и доклада в сборниках научных трудов и материалов конференций. Получен 1 патент Республики Беларусь на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка использованных источников и приложения. Общий объем работы составляет 205 страниц, в том числе 60 рисунков на 35 страницах, 12 таблиц на 8 страницах, 4 приложения на 35 страницах и список из 157 источников на 15 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность темы, отмечена связь работы с научными программами, сформулированы цель и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор методов определения электромагнитных параметров АД, выполнен анализ методов параметрической идентификации

АД в ЧРЭП, исследованы пределы изменений электромагнитных параметров АД при частотном регулировании и определены способы совершенствования параметрической идентификации АД в приводах с векторной ШИМ напряжения.

Синтез систем частотного управления АД, а так же систем прямого управления моментом выполняется для модели АД, составленной на основании Т-образной СЗ электромагнитных процессов в АД. В уравнения его расчетной модели входят и влияют на динамические свойства четыре параметра:  $R_s$  – активное сопротивление статора, Ом;  $L_m$  – взаимная индуктивность, Гн;  $T_r = L_r / R_r = (L_m + L_{r\sigma}) / R_r$  – постоянная времени ротора, с;  $L_\sigma = \sigma \cdot L_s = L_{s\sigma} + k_r \cdot L_{r\sigma}$  – полная индуктивность рассеяния (где  $L_s, L_r, L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$  – полные индуктивности и индуктивности рассеяния статора и ротора, Гн;  $R_r$  – активное сопротивление ротора, Ом;  $k_r$  – коэффициент магнитной связи ротора). Параметрической идентификацией АД далее называется определение совокупности параметров  $R_s, L_m, T_r, L_\sigma$  либо ее части.

Разработана классификация методов параметрической идентификации АД и выделено три группы: методы *стендовой* параметрической идентификации АД, которые предполагают использование специального оборудования (испытательного стенда); методы *предварительной* и *текущей* параметрической идентификации АД, которые позволяют определять электромагнитные параметры АД в специальных и штатных режимах работы ЧРЭП соответственно.

Анализ известных методов предварительной параметрической идентификации АД показал, что для определения четырех электромагнитных параметров  $R_s, L_m, T_r, L_\sigma$  зачастую используют несколько тестовых включений двигателя в режиме намагничивания при неподвижном роторе либо дополнительное включение в режиме холостого хода, что затягивает идентификацию. Для ЧРЭП характерны высокие требования к быстрдействию, поэтому сокращение интервала времени, отводимого на идентификацию, является актуальной проблемой.

Определено, что большинство методов текущей параметрической идентификации АД основаны на использовании первой гармоники тока статора, которую получают через фильтрацию фактического сигнала тока. Фильтрация приводит к потере части информации, а низкая степень фильтрации обуславливает проблему дифференцирования негладкого из-за ШИМ сигнала тока. При этом определение оптимальных параметров фильтра – сложная задача. Поэтому для идентификации актуально использование мгновенных измерений тока.

Показано, что возможное совершенствование параметрической идентификации АД с использованием быстрдействия датчиков тока и высокой производительности МК требует новых методов. Для обеспечения достоверности вычислительных алгоритмов, работа которых в реальных условиях сопровождается помехой, необходимо выполнять идентификацию на основе методов оценивания, предполагающих статистический анализ множества измерений.

Установлено, что совершенствование методов параметрической идентификации АД в ЧРЭП с векторной ШИМ напряжения возможно за счет рассмотрения электромагнитных процессов в АД за период импульсов, что позволит использовать ШИМ как входное воздействие для идентификации.

**Во второй главе** обоснована целесообразность применения МНК при разработке методов параметрической идентификации АД; получено описание электромагнитных процессов в АД при неподвижном и вращающемся роторе с учетом векторной ШИМ напряжения; разработаны методы и алгоритмы предварительной и текущей параметрической идентификации АД в ЧРЭП, обеспечивающие определение четырех параметров АД:  $R_s$ ,  $T_r$ ,  $L_m$ ,  $L_\sigma$ , при предварительной идентификации; и двух параметров:  $R_s$  и  $R_r$ , при текущей.

Основная роль отводится идентификации при неподвижном роторе. Определенные в результате такой идентификации четыре электромагнитных параметра используются в устройстве управления в течение следующего за остановкой интервала времени, пока ЭП работает с заданной скоростью, до следующей остановки и идентификации. Во многих случаях такое периодическое определение параметров достаточно для качественного управления.

В процессе функционирования АД нагревается, что является основной причиной изменения сопротивлений обмоток. Поэтому в случаях длительного режима работы АД полезно определение активных сопротивлений при вращающемся роторе методом текущей идентификации.

Установлено, что для параметрической идентификации АД в условиях ограниченной информации о случайных составляющих процесса: ковариационной матрице помехи, плотности распределения вероятностей определяемых параметров, предпочтительным является МНК, который допускает выбор объема обрабатываемой информации и различные способы ее использования.

Обоснована возможность использования напряжения, сформированного по принципу векторной ШИМ, в качестве входного воздействия для предварительной и текущей параметрической идентификации АД в ЧРЭП. Использование особенностей векторной ШИМ напряжения в методах идентификации позволяет сократить время идентификации и обеспечить алгоритмизуемость.

Предложено формировать в МК управления ЭП массивы значений тока фазы статора в течение однократного включения АД при его питании специально сформированным по принципу векторной ШИМ напряжением, обеспечивающим неподвижность ротора. Это позволяет уменьшить количество включений АД при выполнении его предварительной параметрической идентификации в ЧРЭП, сокращая время ее выполнения и затраты электроэнергии.

Разработан метод и алгоритм предварительной параметрической идентификации АД на основе модели электромагнитных процессов в АД в неподвижных относительно статора осях  $\alpha$ - $\beta$  с учетом векторной ШИМ напряжения и применением ретроспективного и рекуррентного вариантов МНК. Тестовым воздействием является специально сформированное по принципу векторной ШИМ напряжение, обеспечивающее намагничивание АД при непо-

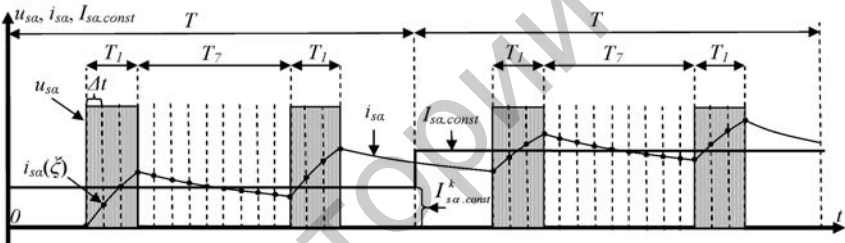


движном роторе. Источником информации – сформированные в течение однократного включения АД массивы значений тока фазы статора. Параметры определяются последовательно:  $R_s \rightarrow L_\sigma \rightarrow L_m \rightarrow T_r$ .

Предложены рекомендации для определения параметров модулированного напряжения: частоты ШИМ ( $f$ , Гц), модуля вектора напряжения ( $U_m$ , В), продолжительности модуляции ( $T_\mu$ , с); на основании номинальных паспортных данных АД.

Разработан алгоритм формирования массивов значений тока фазы статора в течение однократного включения АД при его питании напряжением, сформированным по принципу векторной ШИМ с трехуровневым компаратором и обеспечивающим неподвижность ротора. При этом алгоритм можно адаптировать и для других способов реализации векторной ШИМ.

Формируются массивы (рисунок 1): средних значений  $I_{sa, const}^k$  тока фазы статора за периоды  $T$  ШИМ; мгновенных значений  $i_{sa}(\xi)$  тока фазы статора, измеренных через время  $\Delta t$  на интервалах  $T_1$  проводящего и  $T_7$  непроводящего состояний АИН.



**Рисунок 1. – Временные диаграммы проекций вектора напряжения статора  $u_{sa}$ , тока статора  $i_{sa}$  и его постоянной составляющей  $I_{sa, const}$  при питании АД от АИН импульсным напряжением, обеспечивающем намагничивание АД при неподвижном роторе**

Получено выражение (1) для определения  $R_s$  на основе ретроспективного варианта МНК с использованием сформированного массива средних значений тока фазы статора в квазиустановившемся режиме

$$\hat{R}_s = U_m \left( \sum_{k=k_{st}}^{k_\mu} (I_{sa, const}^k)^2 \right)^{-1} \left( \sum_{k=k_{st}}^{k_\mu} I_{sa, const}^k \right), \quad (1)$$

где  $I_{sa, const}^k$  – элементы матрицы  $I_{sa, const}^{1 \times k_\mu}$ ,  $k \in [(k_\mu - k_{st}), k_\mu]$ , А;  $I_{sa, const}^{1 \times k_\mu}$  – матрица-строка, каждый элемент которой представляет собой среднее значение фазного тока статора за период ШИМ;  $k_\mu$  – количество периодов ШИМ, прошедших в течение намагничивания двигателя;  $k_{st}$  – количество периодов ШИМ, прошедших до момента наступления квазиустановившегося режима.

Получено выражение (2) для определения  $L_\sigma$  на основе ретроспективного варианта МНК с учетом допущений, соответствующих проводящему состоянию АИН с векторной ШИМ при неподвижном роторе двигателя

$$\hat{L}_\sigma = 2\Delta t \cdot u_{s\alpha,ul} \left( \sum_{j=1}^{k_{U1}} \sum_{\xi_{U1}=2}^{(k_{\xi,U1}-1)} \left( i_{s\alpha}^{j,(\xi_{U1}+1)} - i_{s\alpha}^{j,(\xi_{U1}-1)} \right)^2 \right)^{-1} \left( \sum_{j=1}^{k_{U1}} \sum_{\xi_{U1}=2}^{(k_{\xi,U1}-1)} \left( i_{s\alpha}^{j,(\xi_{U1}+1)} - i_{s\alpha}^{j,(\xi_{U1}-1)} \right) \right), \quad (2)$$

где  $i_{s\alpha}^{j,\xi_{U1}}$  – значение тока статора на  $\xi_{U1}$ -ом интервале выборки тока, соответствующей  $j$ -ому интервалу включения базового вектора  $U_1$ , А;  $k_{U1}$  – количество интервалов включения базового вектора  $U_1$  в течение намагничивания АД;  $k_{\xi,U1}$  – количество интервалов выборок тока  $\xi_{U1}$ ;  $\Delta t$  – интервал времени между выборками тока, с;  $u_{s\alpha,ul}$  – мгновенное значение напряжения фазы  $\alpha$  на интервалах проводящего состояния АИН (для базового вектора  $U_1$  и фазы  $\alpha - u_{s\alpha,ul} = 2U_{dc} / 3$ ), В.

Определение  $L_m$  предложено выполнять на основе известных выражений с учетом сформированного массива средних значений тока фазы статора

$$\hat{L}_m = \hat{L}_s - \hat{L}_\sigma / 2, \quad \hat{L}_s = \Psi_{s\alpha, \text{const}}^{k_{st}} / I_{s\alpha, \text{const}}^{k_{st}}, \quad \Psi_{s\alpha, \text{const}}^{k_{st}} = T \sum_{k=1}^{k_{st}} (U_m - \hat{R}_s I_{s\alpha, \text{const}}^k)$$

где  $\Psi_{s\alpha, \text{const}}^{k_{st}}$  – среднее значение потокосцепления статора, соответствующие периоду ШИМ в момент наступления квазиустановившегося режима, Вб;  $I_{s\alpha, \text{const}}^{k_{st}}$  – среднее значение тока статора, соответствующие периоду ШИМ момент наступления квазиустановившегося режима ( $I_{s\alpha, \text{const}}^{k_{st}} \in I_{s\alpha, \text{const}}^{1 \times k_{\mu}}$ ), А;  $T$  – период ШИМ, с.

Получены выражения для определения величины  $\alpha_r = 1 / T_r$  на основе рекуррентного варианта МНК с учетом вычисленных значений  $R_s, L_\sigma, L_m$ :

- за интервал включения нулевого базового вектора напряжения с использованием сформированного массива мгновенных значений тока фазы статора;
- за время переходного процесса при намагничивании АД с использованием сформированного массива средних значений тока фазы статора.

Предложены условия, которые позволяют выделить итоговое значений величины  $\alpha_r$  среди последовательно (рекуррентно) формируемых оценок. В качестве результата вычисления первым методом предложено использовать значение, полученное путем усреднения по нескольким периодам ШИМ.

Разработанный метод предварительной параметрической идентификации АД, обеспечивающий определение параметров  $R_s, T_r, L_m, L_\sigma$  при неподвижном роторе, имеет преимущества. Время определения параметров сокращено не менее чем 50 % за счет выполнения идентификации в течение однократного включения двигателя, что повышает быстродействие ЭП и снижает затраты электроэнергии. Снижено влияние помех, сопровождающих измерения тока статора, на результат идентификации за счет использования статистического метода анализа (ретроспективного варианта МНК) массивов измерений тока.

Для формирования напряжения, питание которым обеспечивает требуемый для идентификации режим работы АД, используются аппаратно-программные возможности ЧРЭП, при этом параметры модулируемого напряжения однозначно определяются на основании номинальных паспортных данных АД. Метод хорошо алгоритмируем, что способствует разработке простых и эффективных программ интегрируемых в ПО привода с микропроцессорной системой управления.

Показано, что в режиме вращения ротора, когда ЭП выполняет технологическую задачу, входное воздействие для текущей параметрической идентификации АД есть модулированное выходное напряжение АИН. Преимущества для параметрической идентификации АД при вращающемся роторе имеет модель электромагнитных процессов на интервалах импульсов в системе АИН-АД с векторной ШИМ напряжения, что позволяет выполнять идентификацию на интервалах включения нулевого базового вектора напряжения. Такая модель допускает использование мгновенных измерений тока статора на участках, где его форма изменения экспоненциальная гладкая, что позволяет качественно выполнять дифференцирование сигнала тока.

На основании модели АД в неподвижной относительно статора системе координат  $\alpha$ - $\beta$  с учетом импульсного характера питающего напряжения получено описание электромагнитных процессов в системе АИН-АД, соответствующее интервалу включения нулевого базового вектора напряжения

$$R_s \omega_r i_{s\beta} + L_\sigma \omega_r (di_{s\beta}/dt) + L_\sigma (d^2 i_{s\alpha}/dt^2) + (R_s + R_r)(di_{s\alpha}/dt) + R_r R_s i_{s\alpha}/L_r = 0, \quad (3)$$

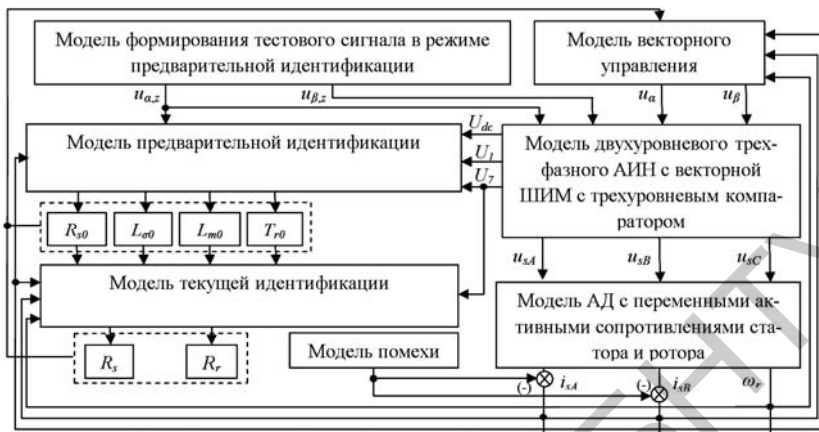
$$-R_s \omega_r i_{s\alpha} - L_\sigma \omega_r (di_{s\alpha}/dt) + L_\sigma (d^2 i_{s\beta}/dt^2) + (R_s + R_r)(di_{s\beta}/dt) + R_r R_s i_{s\beta}/L_r = 0, \quad (4)$$

где  $\omega_r$  – электрическая угловая скорость вращения ротора, рад/с;  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$  – проекции вектора тока статора, А.

Разработан метод и алгоритм текущей параметрической идентификации АД в ЧРЭП при вращающемся роторе с использованием выражения (3), рекуррентного варианта МНК, результатов предварительной идентификации и допущении о коррелированности активных сопротивлений АД. Метод обеспечивает определение параметров  $R_s$  и  $R_r$  за интервал включения нулевого базового вектора напряжения на периоде ШИМ. Малое время идентификации обеспечивает экономии вычислительных ресурсов МК и оперативную подстройку системы управления ЭП. Метод хорошо алгоритмируем, что способствует разработке простых и эффективных программ, интегрируемых в ПО привода с микропроцессорным управлением. Алгоритм не содержит настраиваемых коэффициентов, что позволяет переносить и одинаково эффективно использовать разработанное на основе алгоритма ПО идентификации в различных ЧРЭП.

**В третьей главе** выполнено имитационное моделирование процесса параметрической идентификации АД в ЧРЭП.

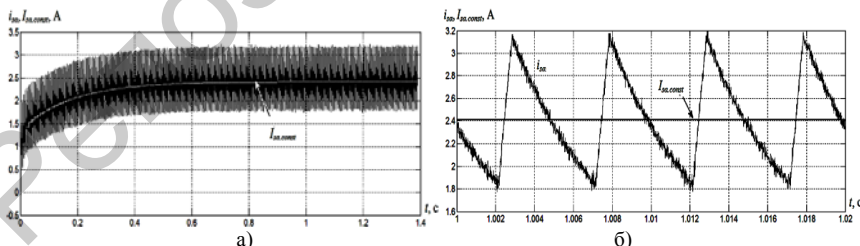
Разработана функциональная схема ИМ, которая содержит все необходимые элементы для исследования алгоритмов идентификации (рисунок 2).



$u_{\alpha}, u_{\beta}$  ( $u_{\alpha,z}, u_{\beta,z}$ ) – сигналы задания;  $u_{sA}, u_{sB}, u_{sC}$  – напряжения питания АД;  $i_{sA}, i_{sB}$  – токи фаз статора АД;  $\omega_r$  – механическая угловая скорость ротора;  $U_1, U_7$  – сигналы включения ненулевого и нулевого базовых векторов при векторной ШИМ  
**Рисунок 2. – Функциональная схема ИМ для исследования алгоритмов параметрической идентификации АД в ЧРЭП**

Разработана имитационная модель ЧРЭП на основе системы АИН-АД с векторной ШИМ напряжения, которая дополнена моделью изменяющихся во времени активных сопротивлений АД и моделью помехи при измерении тока статора. Разработано ПО предварительной и текущей параметрической идентификации АД в виде  $m$ -функций МАТЛАВ. Такая реализация алгоритмов на ИМ способствует переносу ПО из ИМ в МК управления ЭП.

Выполнен анализ алгоритмов предварительной и текущей идентификации на ИМ для АД различной мощности от 2,2 до 160 кВт. Отдельные результаты моделирования представлены на рисунках 3, 4 и в таблице 1.



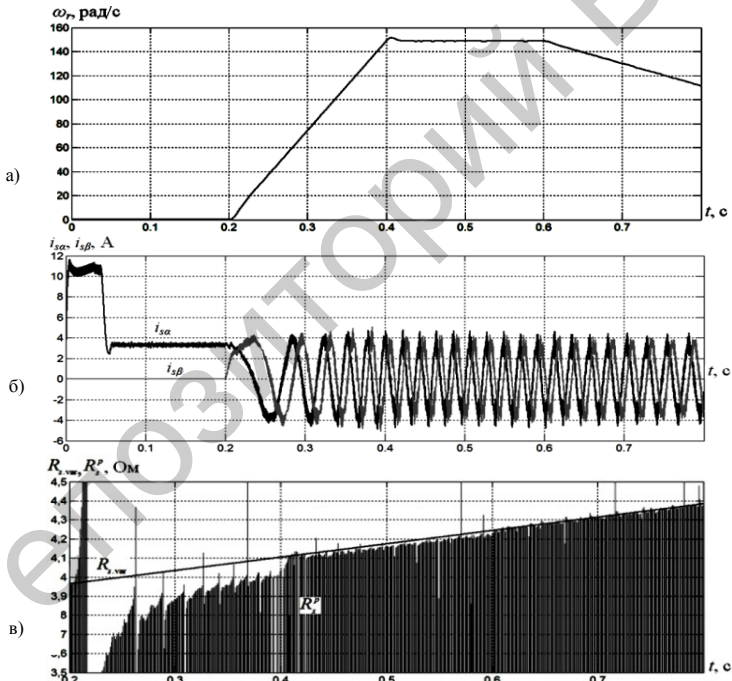
а) - изменения мгновенного значения  $i_{sa}$  и среднего значения  $I_{sa, const}$  тока статора;  
 б) - укрупненный фрагмент изменения токов  $i_{sa}, I_{sa, const}$

**Рисунок 3. – Графики переходных процессов в режиме предварительной параметрической идентификации двигателя АИР90Л4 при  $f = 0,1$  кГц,  $U_{dc} = 100$  В,  $U_m = 9,1$  В**

Учет в ИМ помех при измерении тока статора и анализ их влияния показал устойчивость процесса идентификации к действию помех.

Таблица 1 – Результаты анализа алгоритма предварительной идентификации на ИМ

Параметры АД	$R_{ss}$ , Ом	$1/T_r$ , $c^{-1}$ (по методу 1)	$1/T_r$ , $c^{-1}$ (по методу 2)	$L_{\sigma}$ , Гн	$L_m$ , Гн
АИР90L4 ( $P_n = 2,2$ кВт, $U_m = 9,1$ В, $T_u \approx 1,4$ с (время идентификации), $W_u \approx 29$ Вт·с (энергозатраты))					
Фактические	3,79	9,64	9,64	0,0308	0,273
Вычисленные	3,79	9,50	10,2	0,0300	0,270
Относительная погрешность, %	0,0	1,5	-5,8	2,6	1,1
АИР132M4 ( $P_n = 11$ кВт, $U_m = 4,7$ В, $T_u \approx 2,3$ с, $W_u \approx 80$ Вт·с)					
Фактические	0,596	4,44	4,44	0,00520	0,0859
Вычисленные	0,597	4,57	4,77	0,00520	0,0840
Относительная погрешность, %	- 0,2	- 2,9	- 7,4	0,0	2,2
АНР315S4 ( $P_n = 160$ кВт, $U_m = 1,7$ В, $T_u \approx 3,4$ с, $W_u \approx 350$ Вт·с)					
Фактические	0,0197	2,41	2,41	$600 \times 10^{-6}$	0,00790
Вычисленные	0,0208	2,62	2,70	$630 \times 10^{-6}$	0,00750
Относительная погрешность, %	- 5,6	- 8,7	- 12,0	- 5,0	5,1



а) – изменение угловой скорости ротора; б) – изменения токов статора  $i_{sas}$ ,  $i_{s\beta}$ ; в) – вычисления значений активного сопротивления статора  $R_{sp}$ , на периодах ШИМ и процесс изменения его фактического значения  $R_{sv, var}$

Рисунок 4. – Временные диаграммы в режиме текущей параметрической идентификации двигателя АИР90L4 при  $f = 1$  кГц,  $U_{dc} = 550$  В

Установлено, что максимальная погрешность текущей параметрической идентификации АД наблюдается во время разгона двигателя и для случая, когда значения усредняются за 10 периодов ШИМ, не превышает 12 %. Погрешность, наблюдаемая при работе АД с постоянной скоростью или в режиме торможения  $t = 0,4 \div 0,8$  с, не превышает 2 %. Таким образом, разработанный алгоритм текущей идентификации рекомендуется использовать в установившемся режиме работы АД, а в динамических режимах отключать.

Разработана ИМ ЧРЭП с косвенным бездатчиковым векторным управлением, синтез которой выполнен на основании известных методов. Исследовано влияние активных сопротивлений АД на качество управления: на точность вычисления угловой скорости ротора и сохранение ее диапазона регулирования в статических режимах. Показано, что определение активных сопротивлений АД в условиях их изменения обеспечивает повышение точности вычисления угловой скорости ротора в 1,3 - 2 раза, и обеспечивает стабильность динамических свойств ЭП за счет настройки наблюдателя скорости и регуляторов соответственно изменившимся значениям данных электромагнитных параметров.

**В четвертой главе** выполнено экспериментальное исследование ЭП с опытным образцом ПО идентификации.

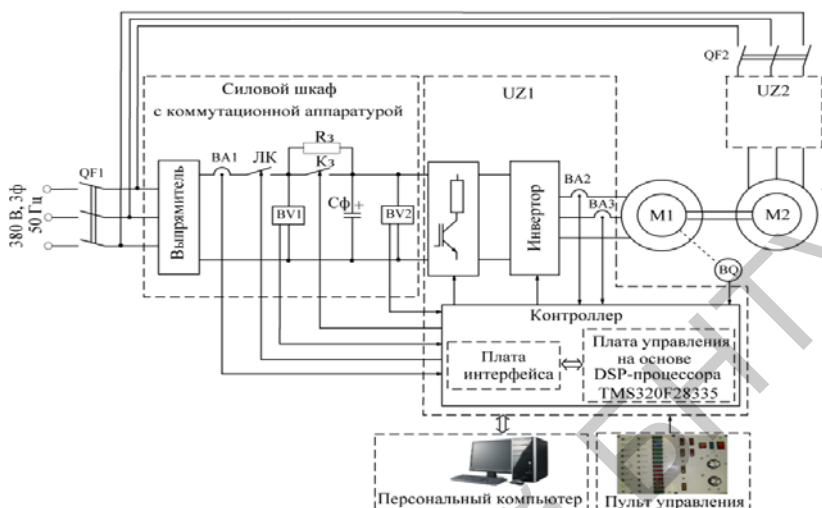
Лабораторный макет представляет собой комплектный многодвигательный ЭП с микропроцессорным управлением, нагрузочным агрегатом и информационно-измерительной частью (рисунок 5).

В качестве устройства управления применяется микроконтроллер *TMS320F28335*. Опытный образец ПО идентификации разработан в среде *CodeComposerStudio v3.3* на языке C и обеспечивает предварительную параметрическую идентификацию АД при неподвижном роторе. Выполнена его интеграция в ПО «Motor Control» МК управления ЭП. ПО «Motor Control» обеспечивает прямое векторное управление АД с косвенным определением потокосцепления ротора с датчиком либо без датчика скорости.

Экспериментальное исследование опытного образца ПО идентификации выполнено для двигателя модели АИР90L4У3.

По программе исследований вначале выполнена идентификация холодного двигателя при температуре корпуса  $T_c = 20$  °С. В системе векторного управления использованы параметры, определенные в результате идентификации. Выполняется анализ функционирования системы при разгоне двигателя, 20 минут вращения с заданной скоростью и торможении. Далее весь цикл, начиная с идентификации, выполняется повторно. При этом температура корпуса двигателя увеличилась до  $T_c = 26$  °С. Установлено, что управление, сформированное с использованием полученных при идентификации параметров АД, обеспечивает динамические свойства ЭП близкие к расчетным.

В таблице 2 представлены результаты экспериментальных исследований.



**ВА1** – датчик тока на стороне постоянного тока; **ЛК** – линейный контактор; **BV1** – датчик напряжения на стороне постоянного тока; **BV2** – датчик напряжения фильтра; **Кз** – контактор заряда фильтра; **Rз** – зарядный резистор; **Cφ** – емкость фильтра; **BA2, BA3** – датчики фазного тока двигателя **M1**; **UZ1, UZ2** – преобразователи исследуемой **M1** и нагрузочной **M2** машин; **BQ** – датчик положения; **M1, M2** – асинхронные машины; **QF1, QF2** – автоматические выключатели

**Рисунок 5. – Функциональная схема лабораторного макета**

Таблица 2 – Электромагнитные параметры двигателя АИР90L4У3, определенные экспериментальным и расчетным способами

Способ определения	Параметры АД			
	$R_s, \text{ Ом}$	$l/T_s, \text{ с}^{-1}$	$L_\sigma, \text{ Гн}$	$L_m, \text{ Гн}$
Предварительная параметрическая идентификация холодного АД при $T_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	3,52	9,66	0,0220	0,300
Предварительная параметрическая идентификация АД при $T_c = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ (приведенное к $T_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )	3,60 (3,52)	9,90 (9,67)	0,0220	0,296
Расчет по номинальным паспортным данным по методике, разработанной Фираго Б.И.	3,79	9,63	0,0334	0,272

Определено, что результаты лабораторных испытаний близки с результатами моделирования. Время выполнения идентификации мало отличается: 1,4 секунды при моделировании; 1,2 секунды во время эксперимента. Осциллограммы изменения тока и потокосцепления статора (рисунок 6) имеют схожие формы, а значения данных переменных в квазиустановившемся режиме отличаются: на 5 – 7 % для тока статора, на 9 – 12,5 % для потокосцепления статора.

Учитывая близость результатов эксперимента и моделирования, сделан вывод, что разработанная ИМ, на основании которой исследован алгоритм

предварительной идентификации, адекватна реальной системе ЭП с асинхронным ЭД и АИН с векторной ШИМ напряжения.

Система векторного управления АД в макете ЭП имеет функцию вычисления потокосцепления ротора и, при бездатчиковом управлении, скорости с помощью адаптивного наблюдателя. При этом ошибка вычисления потокосцепления и скорости возрастает с увеличением активных сопротивлений.



а) - изменения среднего значения тока фазы А статора (в амперах); б) - изменения мгновенного значения тока фазы А статора за период ШИМ (в амперах)  
**Рисунок 6. – Графические окна с осциллограммами, полученными за время намагничивания двигателя АИР90L4У3 при  $f = 0,1$  кГц,  $U_{dc} = 580$  В и  $U_m = 9,1$  В (по оси абсцисс время в секундах)**

Экспериментально подтверждено, что использование результатов параметрической идентификации АД при бездатчиковом векторном управлении с адаптивным наблюдателем потокосцепления ротора и скорости позволяет улучшить качество функционирования системы ЭП: повысить на 23 % точность вычисления скорости в статических режимах и понизить на 36 % максимальную ошибку вычисления скорости в динамических режимах по сравнению со случаем, когда для наладки системы ЭП используются значения активных сопротивлений, рассчитанные по номинальным паспортным данным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработана классификация методов параметрической идентификации АД. Установлено, что для определения электромагнитных параметров АД в условиях помех и ограниченной информации о случайных составляющих процесса: ковариационной матрице помехи, плотности распределения вероятностей определяемых параметров и др., предпочтительным является МНК, который допускает выбор объема исходной информации и различные способы ее использования [1-3, 6-18, 20, 21, 24, 31, 32].



2. Показана возможность и целесообразность использования напряжения, сформированного по принципу векторной ШИМ, в качестве входного воздействия для параметрической идентификации АД в ЧРЭП. Использование векторной ШИМ напряжения в методах идентификации позволяет улучшить быстродействие и алгоритмируемость. Дан способ формирования напряжения для идентификации при неподвижном роторе [4-6, 14, 23, 31, 33].

3. Предложено формировать в МК управления ЭП массивы значений тока фазы статора в течение однократного включения АД при его питании специально сформированным по принципу векторной ШИМ напряжением, обеспечивающим неподвижность ротора. Однократное включение АД для идентификации позволяет сократить ее время не менее чем на 50 % и затраты электроэнергии на аналогичную величину. Разработан алгоритм формирования массивов значений тока фазы статора при векторной ШИМ с трехуровневым компрессором. Данный вид векторной ШИМ распространен, что позволяет использовать алгоритм в ПЧ широкого модельного ряда, и вновь проектируемых [4, 6, 23, 31, 33].

4. Разработан метод параметрической идентификации АД в ЧРЭП при неподвижном роторе, обеспечивающий определение активного сопротивления статора, постоянной времени ротора, полной индуктивности рассеяния и взаимной индуктивности при допущениях о равенстве индуктивностей статора и ротора и отсутствии насыщения магнитной цепи, отличающийся питанием АД напряжением, специально сформированным по принципу векторной ШИМ, формированием массивов значений тока фазы статора и применением ретроспективного и рекуррентного вариантов МНК, что позволяет снизить влияние помех на результат идентификации и сократить ее время не менее чем на 50 % при возможной погрешности идентификации до 12,7 %, способствуя быстродействию и энергоэффективности ЭП [4, 6, 23, 30, 31, 33].

5. Выявлены преимущества модели электромагнитных процессов на интервалах импульсов в системе АИН-АД с векторной ШИМ напряжения для параметрической идентификации АД в ЧРЭП при вращающемся роторе. Такая модель, используя быстродействие датчика тока и аналого-цифрового преобразователя МК, допускает использование измерений мгновенных значений тока статора на участках, где его форма экспоненциальная гладкая, что позволяет качественно выполнять дифференцирование сигнала тока и определять параметры за интервал включения нулевого базового вектора напряжения [5, 33].

6. Разработан метод параметрической идентификации АД в ЧРЭП при вращающемся роторе, отличающийся использованием модели электромагнитных процессов на интервалах импульсов в системе АИН-АД с векторной ШИМ напряжения и применением рекуррентного варианта МНК, для определения за интервал включения нулевого базового вектора напряжения, который составляет  $0,02 \div 0,1 \cdot T$ , где  $T$  – период ШИМ, активных сопротивлений АД при возможной погрешности до 12 %, что способствует экономичному ис-

пользованию вычислительных ресурсов МК и оперативной подстройке системы управления ЭП: параметров регуляторов и наблюдателей потокосцепления и скорости ротора [5, 14, 22, 31, 33].

7. Алгоритмы параметрической идентификации АД в ЧРЭП, разработанные на основании предложенных методов идентификации, можно использовать в системах управления ЭП, в том числе без датчика скорости, что позволяет повысить точность вычисления угловой скорости ротора в  $1,3 \div 2$  раза при сохранении диапазона ее регулирования. Применение алгоритмов идентификации дает возможность косвенно определять температуру АД, что позволяет использовать двигатели без датчиков температуры в них, что снижает стоимость и увеличивает надежность привода [4, 6, 22, 23, 29, 31].

8. Разработана имитационная модель ЧРЭП на основе системы АИН-АД с векторной ШИМ напряжения, отличающаяся наличием ПО идентификации, учетом изменений активных сопротивлений АД и помех при измерении тока статора, позволяющая проводить численные эксперименты с различными АД с короткозамкнутым ротором на этапе проектирования ЧРЭП с параметрической идентификацией АД. ПО параметрической идентификации АД разработано в виде *m*-функций MATLAB, что способствует выполнению его переноса из ИМ в МК управления ЭП простыми способами [6, 25, 28, 31, 33].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанные методы и алгоритмы параметрической идентификации АД могут быть рекомендованы для применения в тяговом ЧРЭП городского электротранспорта и в асинхронном ЧРЭП некоторых подъемно-транспортных механизмов. Разработанная имитационная модель ЧРЭП с ПО параметрической идентификации АД, позволяет ускорить и упростить проектирование ЧРЭП с параметрической идентификацией АД.

Получены акты о практическом использовании результатов исследования (Приложение А диссертации) в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ и на Частном предприятии «НТПЦ «Белкоммунмаш» (г. Минск), где разработанный на языке С для микроконтроллера TMS320F28335 опытный образец ПО идентификации интегрирован в ПО управления лабораторным макетом тягового асинхронного ЧРЭП. Разработанные программы переносимы на другие модели МК, т.к. написаны на языке программирования высокого уровня, что позволяет их использовать в ПО управления различных ЧРЭП.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи

1. Однолько, Д.С. Синтез и исследование алгоритма оценки активного старторного сопротивления асинхронного двигателя при неподвижном роторе / Д.С. Однолько // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2012. – № 2. – С. 33–39.

2. Однолько, Д.С. Моделирование и анализ процесса идентификации активных сопротивлений асинхронного двигателя с использованием нечеткого логического наблюдателя / Д.С. Однолько // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2012. – № 4. – С. 45–52.

3. Однолько, Д.С. Алгоритм идентификации электромагнитных параметров асинхронной машины при работе от трехфазной электрической сети / Д.С. Однолько // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – № 1. – С. 47–55.

4. Однолько, Д.С. Алгоритм параметрической идентификации асинхронного двигателя и его экспериментальное тестирование / Д.С. Однолько // Вестник Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. – 2013. – № 4. – С. 9–14.

5. Однолько, Д.С. Совместная идентификация активного сопротивления статора и ротора асинхронного двигателя на интервале широтно-импульсной модуляции / Д.С. Однолько // Электротехника. – 2013. – № 5. – С. 16–20.

6. Однолько, Д.С. Параметрическая идентификация асинхронного двигателя в составе частотно-регулируемого электропривода при неподвижном роторе / Д.С. Однолько // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2014. – № 2. – С. 64–72.

### Материалы конференций и тезисы докладов

7. Однолько, Д.С. Идентификация состояния трехфазных асинхронных двигателей / Д.С. Однолько // Электроника, автоматика и измерительная техника: межвузовский сборник научных трудов с международным участием / Уфимский гос. авиационный тех. ун-т; под науч. ред.: Г.В. Миловзоров. – Уфа, 2011. – С. 21–25.

8. Однолько, Д.С. Методика идентификации трехфазного асинхронного двигателя / Д.С. Однолько // Наука – образованию, производству, экономике: материалы девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2011 г. В 4 т. / Белорус. нац. тех. ун-т; редкол.: Б.М. Хрустальев [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 198.

9. Однолько, Д.С. Дискретный алгоритм отслеживания «дрейфа» параметров для микропроцессорных систем управления асинхронными двигателями / Д.С. Однолько // 4-я Всероссийская мультikonференция по проблемам управления: материалы 4-й Всероссийской мультikonференции. Т. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 376–378.

10. Однолько, Д.С. Оценивание параметров асинхронного электродвигателя / Д.С. Однолько, О.Ф. Опейко // Автоматизация технологических процессов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 марта 2011 г. / Белорус. нац. тех. ун-т, МинскЭкспо; редкол.: Г.Н. Здор [и др.]. – Минск, 2011. – С. 115–116.

11. Однолько, Д.С. Лабораторное моделирование и анализ системы идентификации параметров электропривода переменного тока методом наименьших квадратов / Д.С. Однолько // Современные информационные технологии в системе научного и учебного эксперимента: опыт, проблемы, перспективы: материалы Респ. науч.-метод. конф., Гродно, 4–5 апр. 2011 г. / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: Е.А. Ровба [и др.]. – Гродно, 2011. – С. 43–44.

12. Однолько, Д.С. Моделирование и анализ системы идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя методом наименьших квадратов / Д.С. Однолько // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збірник наукових праць ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук 07–08 квітня 2011 р. / Кремен. нац. ун-т імені Михайла Остроградського; ред. рада О.П. Чорний [та інш.]. – Кременчук, 2011. – С. 125–126.

13. Однолько, Д.С. Методика идентификации параметров асинхронной машины с короткозамкнутым ротором на основе нечеткой логики / Д.С. Однолько // Информационные технологии и системы 2011: материалы междунар. науч. конф., Минск, 26 октября 2011 г. / БГУИР; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2011. – С. 47–48.

14. Однолько, Д.С. Параметрическая идентификация асинхронного двигателя в частотно-регулируемом электроприводе / Д.С. Однолько // Наука – образованию, производству, экономике: материалы девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2012 г. В 4 т. / Белорус. нац. тех. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 231.

15. Однолько, Д.С. Имитационное моделирование акселерантного алгоритма идентификации асинхронного двигателя / Д.С. Однолько // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы XV респ. науч. конф. студ. и асп., Гомель, 26-28 марта 2012 г. В 2 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: О.М. Демиденко [и др.]. – Гомель, 2012. – Ч. 1. – С. 89–90.

16. Однолько, Д.С. Алгоритм отслеживания «дрейфа» параметров асинхронного двигателя для микропроцессорных систем управления / Д.С. Однолько // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: збірник наукових праць Х Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, Кременчук 28–29 березня 2012 р. / Кремен. нац. ун-т імені Михайла Остроградського; ред. рада О.П. Чорний [та інш.]. – Кременчук, 2012. – С. 142–143.

17. Однолько, Д.С. Аналитическое исследование процесса синтеза наблюдателя параметров асинхронного двигателя / Д.С. Однолько // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: ма-

териалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 апреля 2012 г. / Белорус. нац. тех. ун-т, МинскЭкспо; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2012. – С. 140–141.

18. Однолько, Д.С. Компьютерное исследование сходимости регрессионных методов идентификации физических объектов при различном выборе матрицы усиления / Д.С. Однолько // Актуальные вопросы физики и техники: материалы I респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 17 апреля 2012 г. В 2 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: А.В. Рогачев [и др.]. – Гомель, 2012. – Ч.2. – С. 198–200.

19. Однолько, Д.С. Влияние цифрового дифференцирования и сглаживания дискретных сигналов на процесс идентификации параметров в электроприводе переменного тока / Д.С. Однолько, О.Ф. Опейко // Энергия 2012: материалы региональной науч.-техн. конф. студ. и асп. с междунар. уч., Иваново, 17–19 апреля 2012 г. В 4 т. / Ивановский государ. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина; редкол.: В.В. Тютиков [и др.]. – Иваново, 2012. – Т. 4. – С. 12–19.

20. Однолько, Д.С. Текущая параметрическая идентификация асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором / Д.С. Однолько // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17-18 мая 2012 г. / Белорус. гос. технолог. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2012. – С. 155–159.

21. Опейко, О.Ф. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя в системе векторного управления / О.Ф. Опейко, Д.С. Однолько // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17-18 мая 2012 г. / Белорус. гос. технолог. ун-т; редкол.: И.М. Жарский [и др.]. – Минск, 2012. – С. 144–148.

22. Однолько, Д.С. Системы бездатчиковой тепловой диагностики в электротехническом машиностроении / Д.С. Однолько // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития: материалы II респ. науч.-техн. конф., Гродно, 17-18 мая 2012 г. / ГрГУ им. Я. Купалы, ОАО «Белкард»; редкол.: В.А. Струк [и др.]. – Гродно, 2012. – С. 145–148.

23. Однолько, Д.С. Алгоритм полной параметрической идентификации для частотно-регулируемого асинхронного электропривода в режиме наладки / Д.С. Однолько // Информационные технологии и системы 2012: материалы междунар. науч. конф., Минск, 24 октября 2012 г. / БГУИР; редкол.: Л.Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2012. – С. 288–289.

24. Однолько, Д.С. Оперативное определение активного сопротивления статора и электромагнитной постоянной времени ротора асинхронной машины / Д.С. Однолько // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 91–92.

25. Однолько, Д.С. Формирование имитационной модели переменных активных сопротивлений асинхронного двигателя / Д.С. Однолько // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы II междунар. науч.-практ. конф., Междуреченск, 3-5 апреля 2013 г. / Филиал КузГТУ. – Междуреченск, 2013. – С. 270–272.

26. Однолько, Д.С. Влияние технических характеристик промышленных датчиков тока на точность вычисления производных тока статора на малых интервалах времени / Д.С. Однолько // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13–14 марта 2013 г. / Белорус. нац. тех. ун-т, МинскЭкспо; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 108–109.

27. Однолько, Д.С. Программно-алгоритмическое обеспечение устройства идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя / Д.С. Однолько // Наука – образованию, производству, экономике: материалы одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2013 г. В 4 т. / Белорус. нац. тех. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 228.

28. Однолько, Д.С. Параметрическая неопределенность асинхронного двигателя в системе бездатчикового векторного управления / Д.С. Однолько // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2014 г. В 4 т. / Белорус. нац. тех. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2014. – Т. 1. – С. 223.

29. Однолько, Д.С. Параметрическая идентификация асинхронного электропривода с векторным управлением / Д.С. Однолько, О.Ф. Опейко // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 4-5 февраля 2015 г. / Белорус. нац. тех. ун-т, МинскЭкспо; редкол.: Ф.И. Пантелеенко [и др.]. – Минск, 2015. – С. 35–36.

#### **Патенты**

30. Способ определения электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя : пат. 18372 С1 Респ. Беларусь, МПК (2006) Н 02Р 23/14, Н 02Р 21/14, G 01R 27/02, G 01R 31/34 / Д.С. Однолько : заявитель Белорус. нац. тех. ун-т. – № а 20111807; заявл. 23.12.2011 ; опубл. 30.08.2013 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. –2013. – № 4. –С.41.

#### **Отчеты о НИР**

31. Синтез и исследование методов оперативной идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя : отчет о НИР (заключ.) / Белорус. нац. техн. ун-т ; рук. О.Ф. Опейко. – Минск, 2012. – 92 с. – № ГР 20120803.

32. Разработка методов параметрического синтеза робастных и адаптивных систем управления электроприводами на основе ПИД-контроллеров : отчет о НИР (заключ.) / Белорус. нац. техн. ун-т ; рук. О.Ф. Опейко. – Минск, 2012. – 25 с. – № ГР 20120217.

33. Разработать программный комплекс многодвигательного электропривода с векторным микропроцессорным управлением : отчет о НИР (заключ.) / Белорус. нац. техн. ун-т ; рук. О.Ф. Опейко. – Минск, 2013. – 90 с. – № ГР 20120220.

**РЭЗЮМЭ**  
**Аднолька Дзмітрый Сяргеевіч**

**Параметрычная ідэнтыфікацыя асінхроннага рухавіка ў частотна-рэгулюемым электрапрыводзе з вектарнай шыротна-імпульснай мадуляцыяй**

**Ключавыя словы:** электрапрывод, параметрычная ідэнтыфікацыя, асінхронны рухавік, метады найменшых квадратаў, схема замяшчэння.

**Мэта работы** палягае ў распрацоўцы метадаў і алгарытмаў параметрычнай ідэнтыфікацыі асінхроннага рухавіка (АР) у частотна-рэгулюемым электрапрыводзе (ЧРЭП) з вектарнай шыротна-імпульснай мадуляцыяй (ШІМ) напружання з палепшанымі хуткадзейнасцю і перашкодаўстойлівасцю.

**Метады даследаванняў** грунтуюцца на выкарыстанні тэорыі электрапрывода (ЭП), электрычных машын, тэорыі аўтаматычнага кіравання, метады найменшых квадратаў (МНК), а таксама мадэлявання і эксперыменту.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацаваны метады і алгарытмы параметрычнай ідэнтыфікацыі АР пры нерухомым ратары, які адрозніваецца сілкаваннем АР напружаннем, адмыслова сфармаваным па прынцепах вектарнай ШІМ, фарміраваннем масіваў значэнняў току статора і выкарыстаннем МНК, што дазваляе значна паскорыць ідэнтыфікацыю. Распрацаваны метады і алгарытмы параметрычнай ідэнтыфікацыі АР пры рухомым ратары, які адрозніваецца выкарыстаннем мадэлі электрамагнітных працэсаў у сістэме аўтаномнага інвертара напружання - асінхронны рухавік (АІН - АР) з вектарнай ШІМ напружання на інтэрвалах імпульсаў і выкарыстаннем МНК, што дазваляе выканаць ідэнтыфікацыю аператыўна. Распрацавана імітацыйная мадэль ЧРЭП на аснове сістэмы АІН - АР з вектарнай ШІМ напружання, якая адрозніваецца наяўнасцю праграмага забеспячэння (ПЗ) ідэнтыфікацыі, улікам змяненняў актыўных супраціўленняў АР і пераход пры вымярэнні току статора, якая дазваляе праводзіць лікавыя эксперыменты з рознымі АР на этапе праектавання ЧРЭП з параметрычнай ідэнтыфікацыяй АР.

**Вынікі даследаванняў выкарыстоўваюцца** ў навучальным працэсе кафедры «Электрапрывод і аўтаматызацыя прамысловых устаноў і тэхналагічных комплексаў» БНТУ і на прыватным прадпрыемстве «НТПЦ «Белкамунмаш» (г. Мінск), дзе распрацаваны на мове С эксперыментальны асабнік ПЗ ідэнтыфікацыі інтэграваны ў ПЗ кіравання макетам цягавога ЧРЭП.

**Галіна выкарыстання вынікаў дысертацыі** - цягавы асінхронны ЭП гарадскога электратранспарту і асінхронны ЭП некаторых пад'ёмна-транспартных механізмаў.

**РЕЗЮМЕ**  
**Однолько Дмитрий Сергеевич**

**Параметрическая идентификация асинхронного двигателя в частотно-регулируемом электроприводе с векторной широтно-импульсной модуляцией**

**Ключевые слова:** электропривод, параметрическая идентификация, асинхронный двигатель, метод наименьших квадратов, схема замещения.

**Цель работы** состоит в разработке методов и алгоритмов параметрической идентификации асинхронного двигателя (АД) в частотно-регулируемом электроприводе (ЧРЭП) с векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения с улучшенными быстродействием и помехоустойчивостью.

**Методы исследований** базируются на использовании теории электропривода (ЭП), электрических машин, теории автоматического управления, метода наименьших квадратов (МНК), а также моделирования и эксперимента.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработан метод и алгоритм параметрической идентификации АД при неподвижном роторе, отличающийся питанием АД напряжением, специально сформированным по принципу векторной ШИМ, формированием массивов значений тока статора и применением МНК, что позволяет значительно ускорить идентификацию. Разработан метод и алгоритм параметрической идентификации АД при вращающемся роторе, отличающийся использованием модели электромагнитных процессов в системе автономный инвертор напряжения - асинхронный двигатель (АИН-АД) с векторной ШИМ напряжения на интервалах импульсов и применением МНК, что позволяет выполнить идентификацию оперативно. Разработана имитационная модель ЧРЭП на основе системы АИН-АД с векторной ШИМ напряжения, отличающаяся наличием программного обеспечения (ПО) идентификации, учетом изменений активных сопротивлений АД и помех при измерении тока статора, позволяющая проводить численные эксперименты с различными АД на этапе проектирования ЧРЭП с параметрической идентификацией АД.

**Результаты исследований используются** в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ и на Частном предприятии «НТПЦ «Белкоммунмаш» (г. Минск), где разработанный на языке С опытный образец ПО идентификации интегрирован в ПО управления макетом тягового ЧРЭП.

**Область применения результатов диссертации** - тяговый асинхронный ЭП городского электротранспорта и асинхронный ЭП некоторых подъемно-транспортных механизмов.



## SUMMARY

Adnolka Dzmitry

### **Induction motor parametric identification in frequency controlled electrical drive with vector pulse width modulation**

**Key words:** electrical drive, parametric identification, induction motor, last square method, equivalent circuit.

**The goal of the work** is to develop induction motor (IM) parametric identification methods and algorithms in frequency controlled electrical drive with vector pulse width modulation (PWM) improving rapidity and noise safety.

**Methods of research** are based on electrical drive and electrical machines theory, control theory, last square method, also the simulation and experiments.

**Results and innovation.** The method and algorithm are developed for induction motor parametric identification with stopped rotor, which new results consist on the singular voltage vector pulse width modulation, and formation of stator current's arrays with application of last square method for reduce identification time.

The method and algorithm are developed for induction motor parametric identification with rotating rotor, which new results consist on model of electromagnetic process for inverter, induction motor, and application of last square method on the impulse period, for reduce identification time.

The model is performed for simulation of electrical drive system with power inverter and induction motor, including vector pulse width modulation, particularity of this model is presence in it of the software for parameters identification, simulation of motor resistances variation and noises of current sensors, the model allow the simulation of electrical drive systems with analysis of identification processes.

**The research results are used** on the learning for the students of the "Electrical drive and automation of industry tools and technological complexes" department in BNTU and on Private enterprise «NTPC «Belcommunmash» (Minsk), were the developed software for parameters identification on C language is introduced on Motor Control system.

**Domain of dissertation's results apply** – traction electrical drive with induction motors and electrical drive with induction motors for some lifting and traction mechanisms.

Научное издание

**ОДНОЛЬКО**  
Дмитрий Сергеевич

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ  
С ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

Подписано в печать 07.10.2015. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 90. Заказ 770.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.