

На правах рукописи



Козина Татьяна Андреевна

СИСТЕМА ИМПУЛЬСНО-ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ  
И КОСВЕННЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ  
УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2012

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Усынин Юрий Семенович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент Зюзев Анатолий Михайлович,  
профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского энергетического института ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург;

доктор технических наук, профессор Сарваров Анвар Сабулханович,  
заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и мехатроника» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт (технический университет)».

Защита состоится 13 декабря 2012 г. в 12:00 в аудитории 1001 главного учебного корпуса на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

Автореферат разослан «06» ноября 2012 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс: (351) 267-91-23, E-mail: lilia.if@mail.ru.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ю.С. Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Электроприводы механизмов с одно- и двухсменными графиками работы с целью энерго- и ресурсосбережения при снятии технологических нагрузок целесообразно переводит на пониженную скорость (ленточные транспортеры, промышленные вентиляторы и т.д.), хотя в настоящее время они остаются нерегулируемыми. В условиях роста цен на электроэнергию и другие виды энергоресурсов появилась необходимость в их модернизации. Эти механизмы потребляют около 25–30% от всей электроэнергии. Из-за отсутствия регулирования производительности изменением частоты вращения для них характерно завышенное электропотребление. Переход к регулированию частоты вращения приводит к заметной экономии электроэнергии, во многих случаях до 30–40%.

Рассматриваемые электроприводы изначально были спроектированы как нерегулируемые, и к ним обычно не предъявляют жесткие требования по точности регулирования. Для названного класса механизмов необходимо добиться улучшения показателей энергосбережения при минимальных ресурсных затратах.

Существует вариант импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором и тиристорным коммутатором в цепи статора, имеющий различные схемные варианты, хорошо подходящий для рассматриваемых механизмов, поскольку он достаточно недорогой, не содержит избыточных регулировочных способностей, и обладает малым энергопотреблением в режимах пониженных скоростей. Серьезным недостатком данного электропривода является наличие датчика положения на валу двигателя, обусловленное принципом работы электропривода, что значительно затрудняет установку и эксплуатацию, увеличивает стоимость электропривода. По этой причине работа, посвященная изучению возможностей электропривода с векторно-импульсным управлением и косвенным определением углового положения ротора, является актуальной.

**Целью** диссертационной работы является улучшение показателей энергосбережения в массовом электроприводе при минимальных ресурсных затратах.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

- уточнение требований к электроприводам механизмов с нагрузкой вентиляторного типа;
- разработка системы импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором и косвенным определением углового положения ротора, использующей типовое оборудование и современные законы управления;
- систематизация сведений по существующим методам косвенного определения вектора состояния системы;

– разработка математического описания системы импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором и косвенным определением углового положения ротора;

– синтез алгоритма косвенного определения положения ротора;

– исследование системы импульсно-векторного управления с косвенным определением углового положения ротора на модели и экспериментальной установке.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались основные положения теории электромеханического преобразования энергии, общей теории электротехники, практические аспекты промышленной электроники, методы экспериментального исследования, методы математического моделирования систем на ЭВМ, метод физического эксперимента.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается удовлетворительным для инженерной методики совпадением основных теоретических результатов и экспериментальных данных, проверенных на макете, аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ электротехники, корректным использованием теории.

**Научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

– принцип действия импульсно-векторного электропривода с косвенным определением углового положения ротора;

– зависимости переменных состояний электропривода в функции положения ротора для многофазной, несимметричной, нелинейной, импульсной системы, теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные;

– алгоритм косвенного определения углового положения ротора, заключающийся в двухэтапном определении положения (на первом этапе определяется начальное положение, на втором – отслеживается текущее), отличающийся надежностью и простотой;

– модель электропривода, позволяющая рассчитывать режимы работы импульсной системы управления асинхронным двигателем, используя метод конечных элементов;

– результаты расчетных и экспериментальных исследований на макете, подтверждающие адекватность принятой модели, а также возможность реализации предложенных структур и алгоритмов управления.

**Научная новизна работы:**

– предложена, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена система электропривода с импульсно-векторным управлением асинхронным двигателем с фазным ротором, отличающаяся отсутствием механического датчика положения на валу двигателя и косвенным определением углового положения ротора, обеспечивающая устойчивую работу электропривода в области низких частот вращения и характеризующаяся пониженным энергопотреблением;

– разработана математическая модель системы импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором как многофазной, несимметричной, нелинейной, импульсной системы с целью выделения

функциональных зависимостей переменных состояний электропривода в функции положения ротора. Показано, что при решении этих задач целесообразно совмещение традиционных методов анализа электрических цепей с методом конечных элементов, что существенно упрощает процедуру обработки и анализа результатов моделирования;

– предложен способ косвенного определения углового положения ротора в импульсно-векторной системе управления асинхронным двигателем с фазным ротором, заключающийся в двухэтапном определении положения ротора, отличающийся тем, что вместо измерения токов и напряжений на обмотках двигателя, сопровождающихся непрерывной математической обработкой, производится только сопоставление их величин, что существенно снижает необходимую мощность средств вычисления системы управления.

**Научное значение работы** заключается в следующем:

– систематизированы сведения по косвенным способам определения вектора состояния системы электропривода, дана их классификация и области применения;

– предложены обобщённые расчётные математические модели электропривода с импульсно-векторным управлением с датчиком на валу двигателя и без механического датчика, позволяющие решать задачи оптимального выбора элементов, синтеза систем автоматического управления, анализа динамики систем управления;

– предложены и обоснованы алгоритмы косвенного определения положения ротора в импульсно-векторном электроприводе;

– разработаны перспективные структуры электропривода, имеющие высокие регулировочные и энергетические показатели.

Научная новизна работы подтверждена патентом на изобретение РФ.

**Практическое значение работы** заключается в следующем:

– разработаны структурные, функциональные и принципиальные схемы импульсно-векторной системы управления электроприводом с косвенным определением углового положения ротора;

– предложена методика расчёта установившихся и динамических процессов в асинхронном электроприводе с импульсно-векторным управлением, рассчитывающая электродвигатель методом конечных элементов и определяющая положение ротора косвенным способом;

– разработаны рекомендации по проектированию электропривода;

– разработан и реализован лабораторный стенд установки, позволяющий снимать и оценивать напряжения на обмотках двигателя при работе в импульсном режиме.

**Внедрение.** В учебном процессе материалы диссертации используются в курсах «Теория электропривода», «Системы управления электроприводов», «Экспериментальное исследование электроприводов» на кафедре электропривода Южно-Уральского государственного университета.

*В производственном процессе* электропривод с импульсно-векторным управлением применяет ООО НТЦ “Приводная техника” при модернизации электроприводов шахтных вентиляторов и ленточных транспортеров.

**Реализация выводов и рекомендаций работы.** Разработанные структурные и функциональные схемы электропривода с импульсно-векторным управлением и косвенным определением углового положения ротора, методики их расчёта приняты для использования:

– Южно-Уральским государственным университетом в учебном процессе на кафедре “Электропривод и автоматизация промышленных установок”.

**Апробация работы.** В полном объёме работа докладывалась на расширенном заседании кафедры “Электропривод и автоматизация промышленных установок” Южно-Уральского государственного университета.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе на:

– XII и XIII международных конференциях «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» МКЭЭЭ-2008, Алушта, 2008 и 2010 гг.;

– Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бернадосовские чтения), Иваново, 2009 и 2011 гг.;

– XXXVIII и XXXIX Уральских семинарах «Механика и процессы управления», Екатеринбург: УрО РАН, 2008 и 2009 гг.;

– Международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию Казанского государственного энергетического университета: секция «Электроэнергетика и электроника», Казань: КГЭУ, 2008 г.;

– II Всероссийской научно-технической конференции «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий», Уфа: УГНТУ, 2009 г.;

– I международном симпозиуме по фундаментальным и прикладным проблемам науки, Миасс, 2010 г.;

– II научной конференции аспирантов и докторантов, Челябинск: ЮУрГУ, 2010 г.;

– ежегодных научных конференциях Южно-Уральского государственного университета, Челябинск: ЮУрГУ, 2008–2012 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 1 патент РФ. Три печатных работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 192 страницах машинописного текста, содержит 97 рисунков, 15 таблиц, список используемой литературы из 233 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цели, методы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ состояния электроприводов массовых механизмов, уточнены особенности работы рассматриваемых электроприводов и требования к ним, выявлена необходимость улучшения показателей энергосбережения в массовом электроприводе при минимальных ресурсных затратах.

В промышленности существует большой класс рабочих механизмов, у которых по условиям технологического процесса желательно и позволительно относительно длительное снижение скорости, сопровождающееся, как правило, малыми моментами статической нагрузки при умеренных требованиях к точности регулирования скорости. Это вентиляторы на предприятиях с одно или двухсменными графиками работы, уличные транспортеры в холодное время года, насосы гидравлических прессов и др. В данных механизмах нежелательна полная остановка электропривода, предпочтителен перевод на пониженную скорость, позволяющий экономить электроэнергию и ресурсы технологического оборудования. Для рассматриваемых электроприводов время пуска не лимитировано, желательным является пуск при разгруженном механизме с ограничением динамических нагрузок. Чтобы не усложнять эксплуатацию оборудования, на электроприводы этих механизмов не следует устанавливать дополнительные механические датчики (например, скорости или положения).

Проведенный анализ возможных вариантов регулирования скорости данных механизмов, использующих преобразователи частоты, позволил выявить существенные недостатки таких вариантов: высокую стоимость, сложность эксплуатации, большие потери из-за скольжения.

Существует вариант импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором и коммутатором в цепи статора. Импульсно-векторный способ управления обеспечивает все необходимые технологические режимы рассматриваемых механизмов, имеет простую схему силовых цепей, характеризуется малым энергопотреблением при пониженных скоростях вращения. Известные схемы импульсно-векторного электропривода требуют установки датчика положения на вал двигателя, что в ряде случаев нежелательно по условиям эксплуатации. Между тем, в регулируемых электроприводах переменного тока с непрерывным управлением имеются технические решения с косвенной оценкой вектора состояния системы. Таким образом, для рассматриваемого класса механизмов целесообразно рассмотреть возможности и особенности реализации электропривода с косвенным измерением положения ротора с учетом специфики импульсно-векторного регулирования.

Для решения поставленной задачи в качестве исходной схемы, позволяющей наиболее ясно и наглядно представить особенности работы импульсно-векторных систем, была выбрана схема, приведенная на рис. 1. В ней статорные обмотки  $AX$ ,  $BY$ ,  $CZ$  через тиристорный коммутатор подключены к питающей многофазной сети переменного тока  $A, B, C$ , а на выход коммутатора включены обмотки ротора асинхронного двигателя  $ax$ ,  $by$ . Обмотка  $cz$  остается свободной.

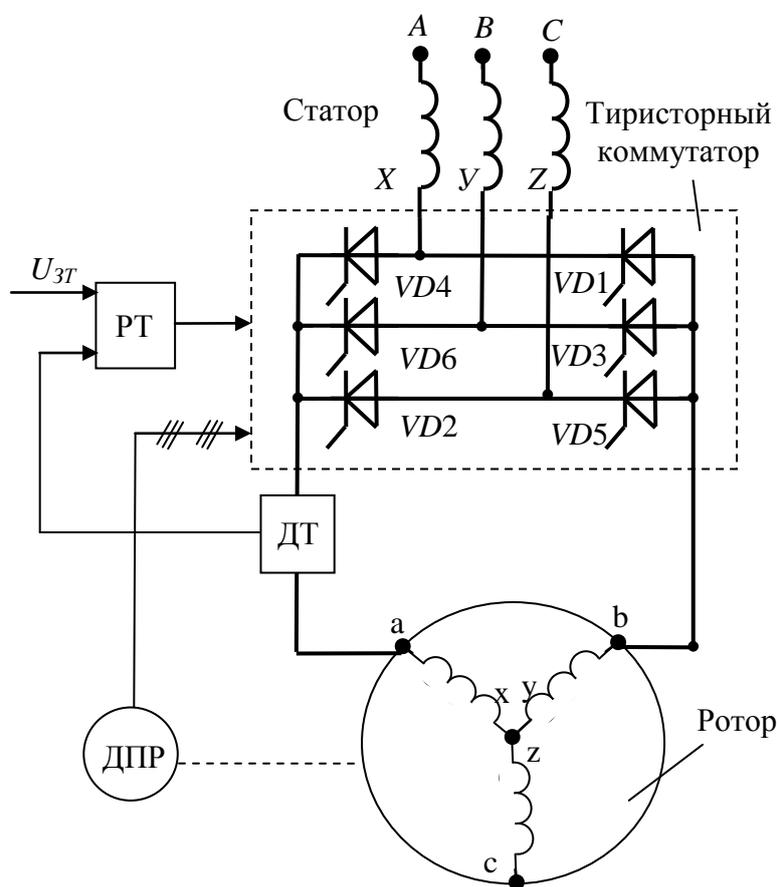


Рис. 1. Функциональная схема электропривода: ДТ – датчик тока, РТ – регулятор тока, ДПР – датчик положения ротора,  $U_{зт}$  – источник задающего напряжения, пропорционального желаемому току статора

Чтобы создать электромагнитный момент двигателя, в зависимости от сигнала с датчика положения ротора ДПР на два тиристора двух фаз статора асинхронного двигателя, фазную зону которых пересекает магнитная ось обмотки ротора, подаются управляющие импульсы. Вектор МДС обмоток статора перемещается в расточке статора двигателя дискретно с шагом  $60^\circ$ . Эти переключения производят таким образом, чтобы ориентация векторов МДС обмоток статора и ротора соответствовала двигательному моменту.

В рамках решения поставленной задачи информацию о положении

ротора необходимо получать косвенным способом. Учитывая, что косвенные методы оценки вектора состояния системы в силу своей природы зависят от топологии схемы, параметров двигателя, режимов работы, целесообразно, провести обзор и анализ существующих косвенных методов применительно к исследуемой схеме (см. рис. 1).

**Вторая глава** диссертации посвящена поиску способа косвенного определения положения ротора для импульсно-векторной системы управления.

Был проведен обзор и анализ существующих систем с косвенной оценкой вектора состояния системы, включающий более 150 русскоязычных и англоязычных источников, на основании которого была составлена классификация известных косвенных методов по используемому принципу вычисления:

1. Системы, вычисляющие вектор состояния системы по моделям двигателя на основе информации о токах и напряжениях статора:
  - 1.1 Адаптивные системы с эталонной моделью (Model Reference Adaptive System MRAS);
  - 1.2 Адаптивные наблюдатели полного порядка;
  - 1.3 Адаптивные наблюдатели пониженного порядка (наблюдатель Люенбергера);
  - 1.4 Расширенный фильтр Кальмана;
  - 1.5 Наблюдатели, использующие скользящие режимы;
  - 1.6 Нейронные наблюдатели.
2. Системы идентификации на основе статической функциональной зависимости:
  - 2.1 Модуля полного сопротивления двигателя;
  - 2.2 Угла нагрузки;
  - 2.3 ЭДС, наводимой в статоре полем ротора.
3. Прочие методы.

Систематизация сведений позволила провести сопоставление косвенных методов по требованиям к вычислительным ресурсам, чувствительности к шумам в измерениях, восприимчивости к изменению параметров двигателя, быстродействию, точности и минимальной скорости работы системы  $\omega_{\min}$  в долях от номинальной синхронной скорости вращения  $\omega_{0H}$ .

Поскольку сама идея импульсно-векторного регулирования скорости требует знания положения ротора в любой момент времени, включая и периоды отключенного состояния электропривода, то этому требованию могут удовлетворить далеко не все известные и рассмотренные способы косвенного определения состояния.

Проведенный анализ позволил заключить, что существующие методы косвенной оценки не подходят для определения положения ротора в исследуемой системе импульсно-векторного управления, так как, во-первых, модели наблюдателей созданы для стандартного короткозамкнутого двигателя и не могут описывать поведение системы импульсно-векторного электропривода с фазным ротором с нетрадиционными вариантами соединения обмоток статора и ротора; во-вторых, большинство косвенных методов оценивают скорость вращения, а не угловое положение ротора при повышенных требованиях к правильности оценки, в-третьих, точные методы идентификации положения сопряжены с большим количеством вычислений, что приводит к удорожанию системы и задержке получения результата; в-четвертых, большинство косвенных методов неработоспособны на малых скоростях, на которых необходимо вращаться рассматриваемым механизмом.

Тем не менее, проведенный обзор методов позволил определить возможные пути решения задачи косвенного определения положения и выработать логику синтеза вычислителя положения, включающую разрешение ряда вопросов: какие величины, доступные для прямого измерения, использовать в качестве входных сигналов вычислителя

положения, какой принцип идентификации положения ротора использовать, в каком виде представлять выходной сигнал идентификатора и определить требуемую точность идентификации положения.

Было обнаружено, что удобнее определять положение ротора в два этапа: на первом этапе определять начальное угловое положение ротора в условиях полной неопределенности, на втором – отслеживать текущее состояние углового положения, используя информацию предыдущих состояний системы. Таким образом, вторая глава определила ход и направление дальнейших исследований.

**В третьей главе диссертации** описана математическая модель электропривода с импульсно-векторным управлением и разработан алгоритм косвенного определения начального углового положения ротора.

В рассматриваемом электроприводе возможно шесть вариантов включения обмоток статора и ротора, следовательно, и схем замещения силовых цепей тоже шесть. Например, если к сети подключены обмотки

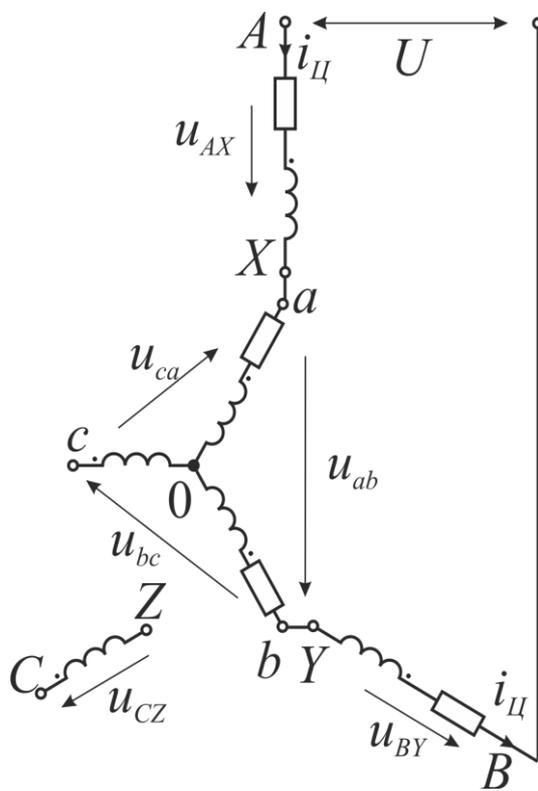


Рис. 2. Схема замещения цепи AX-ab-YB

статора AX и BY, обмотка CZ остается обесточенной, а ток протекает по цепи AX-ab-YB, то схема замещения цепи будет выглядеть так, как показано на рис. 2. Для приведенной схемы замещения записаны уравнения состояния электропривода.

Принадлежность величин к конкретной обмотке обозначены буквенными индексами, которые для различных обмоток следующие: для фазных обмоток статора – AX, BY, CZ; для напряжений на кольцах ротора – ab, bc, ca.

На схеме замещения и в уравнениях приняты следующие обозначения:  $\alpha$  – угол поворота ротора;  $r_1$  и  $r_2$  – активные сопротивления фазных обмоток статора и ротора;  $L_M$  – взаимная индуктивность обмоток при совмещении их осей;  $L_{1\sigma}$  и  $L_{2\sigma}$  – индуктивности рассеяния обмоток

статора и ротора;  $E_{20}$  – напряжение на кольцах ротора;  $U_{1H}$  – номинальное линейное напряжение статора;  $i_{Ц}$  – мгновенное значение тока силовой цепи.

Напряжения на обмотках двигателя в уравнениях Кирхгофа с учетом угла поворота ротора для мгновенных значений имеют вид:

$$\begin{aligned}
u_{CZ} &= \sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} \cdot L_M \cdot \cos(\alpha - 60^\circ) \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\
u_{AX} &= r_1 \cdot i_{\Pi} + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt} + 0,5 \cdot L_M \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt} + L_M \cdot \left( 1 + \sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} \cdot \cos(\alpha) \right) \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\
u_{BY} &= r_1 \cdot i_{\Pi} + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt} + 0,5 \cdot L_M \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt} + L_M \cdot \left( 1 + \sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} \cdot \cos(\alpha + 60^\circ) \right) \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\
u_{ab} &= \sqrt{3} \cdot r_2 \cdot i_{\Pi} + \sqrt{3} \cdot L_{2\sigma} \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt} + L_M \cdot \left( \sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} + \cos(\alpha) + \cos(\alpha - 60^\circ) \right) \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\
u_{bc} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r_2 \cdot i_{\Pi} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot L_{2\sigma} \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt} + L_M \cdot \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} + \cos(\alpha - 60^\circ) + \cos(\alpha) \right) \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt}; \\
u_{ca} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot r_2 \cdot i_{\Pi} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot L_{2\sigma} \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt} + L_M \cdot \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} + \cos(\alpha + 60^\circ) + \cos(\alpha + 120^\circ) \right) \cdot \frac{di_{\Pi}}{dt}.
\end{aligned}$$

Значение производной тока цепи:

$$\frac{di_{\Pi}}{dt} = \frac{u_A - u_B - 2 \cdot i_{\Pi} \cdot (r_1 + r_2)}{2 \cdot (L_{1\sigma} + L_{2\sigma}) + L_M \cdot \left( 3 + \sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} \right) + L_M \cdot \left( 1 + \sqrt{3} \cdot \frac{E_{20}}{U_{1H}} \right) \cdot (\cos(\alpha) + \cos(\alpha + 60^\circ))}$$

Электромагнитный момент двигателя:

$$\begin{aligned}
M &= 2 \cdot \frac{d}{d\alpha} (L_{AP} \cdot i_{\Pi}^2 + L_{BP} \cdot i_{\Pi}^2) = 2 \cdot i_{\Pi}^2 \cdot \frac{dL_{AP}}{d\alpha} + 2 \cdot i_{\Pi}^2 \cdot \frac{dL_{BP}}{d\alpha} = \\
&= -2 \cdot L_M \cdot i_{\Pi}^2 \cdot (\sin(\alpha) + \sin(\alpha + 60^\circ)) = M_A + M_B.
\end{aligned}$$

Математическая модель, основанная на приведенных уравнениях, учитывает следующие особенности рассматриваемого электропривода: дискретный режим работы электропривода (эта особенность учитывается тем, что математическая модель содержит набор уравнений состояний для всех шести вариантов включения обмоток двигателя); последовательное соединение обмоток статора и ротора, одна из обмоток статора остается обесточенной. Схема исследовалась при всех вариантах включения обмоток и разных напряжениях  $U$ , прикладываемых к обмоткам двигателя: постоянном; идеальном синусоидальном; прерывистых напряжениях, соответствующих мгновенным значениям на выходе тиристорного коммутатора при разных углах управления.

Решение названных уравнений позволяет определить функциональные зависимости переменных состояния электропривода от углового положения ротора и использовать данные зависимости для решения задачи косвенного вычисления начального углового положения ротора.

Так, зависимости действующих значений тока цепи  $I_{\Sigma}$ , электромагнитного момента  $M$  и напряжений на обмотках двигателя от углового положения ротора для переменных напряжений  $U$  приведены на рис. 3. Расчетные зависимости были получены в среде *Matlab* и проверены на экспериментальной установке.

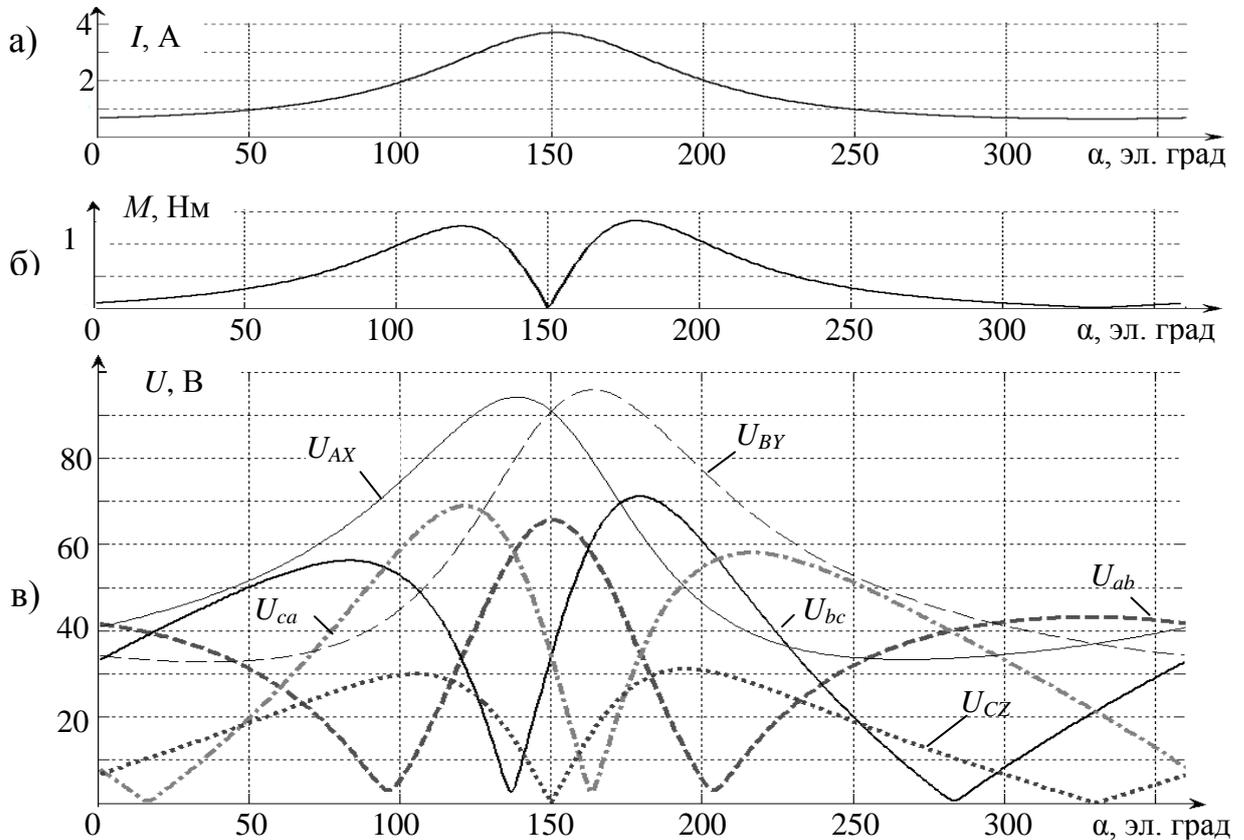


Рис. 3. Действующие значения при изменении  $\alpha$  от 0 до 360 эл. град:

а) тока цепи; б) электромагнитного момента; в) напряжений на обмотках статора и кольцах ротора

Автором был предложен алгоритм однозначного определения начального углового положения ротора, основанный на сопоставлении действующих напряжений на обмотках статора и кольцах ротора (рис. 4). Вычислитель, использующий разработанный алгоритм, прост в реализации, использует минимальную элементную базу и несложные математические вычисления. Начальное угловое положение определяется при неподвижном роторе и подаче на обмотки двигателя тестового напряжения пониженного значения. На входе вычислителя фиксируются мгновенные значения напряжений на обмотках статора и кольцах ротора. По ним рассчитываются действующие значения, определяется сектор, и на статорные обмотки, создающие максимальный двигательный момент, подается питающее напряжение.

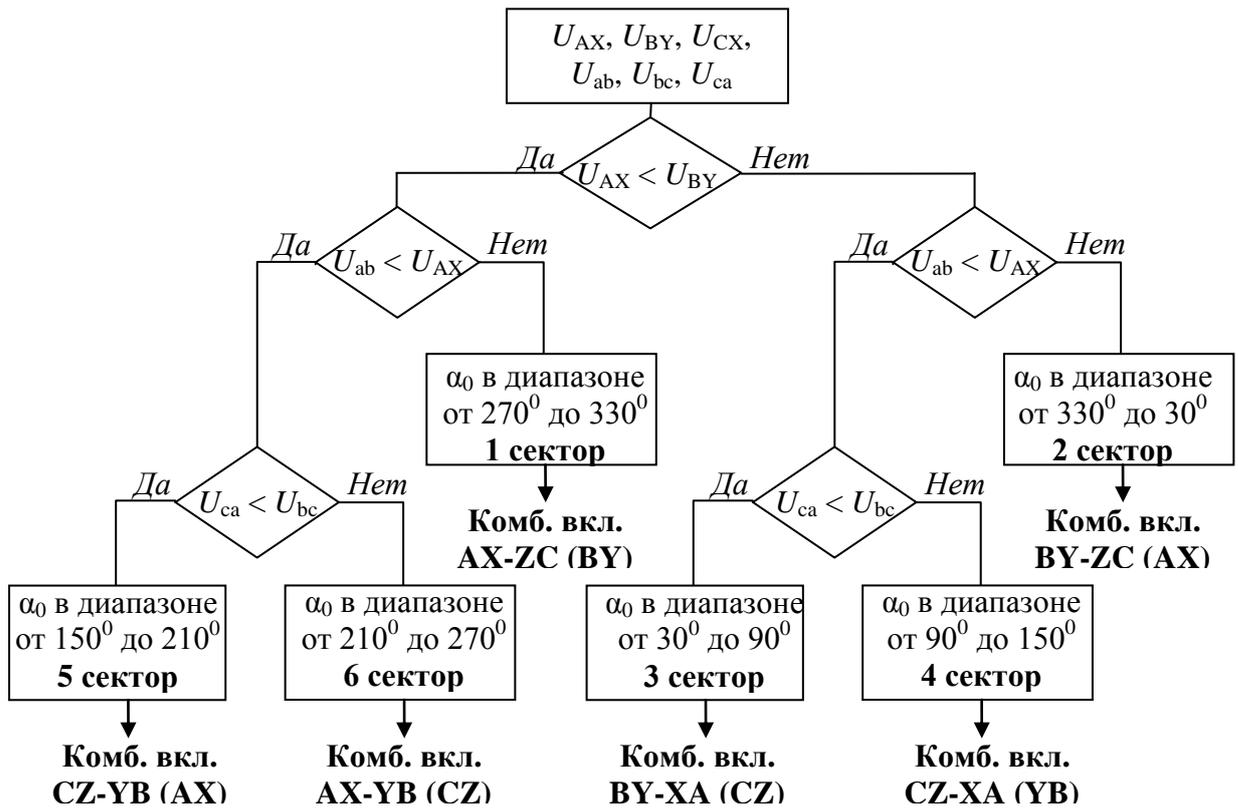


Рис. 4. Алгоритм определения начального углового положения ротора

**Четвертая глава** посвящена вычислению текущего угла поворота ротора и анализу системы импульсно-векторного управления с косвенным определением углового положения ротора.

Для моделирования и анализа системы импульсно-векторного управления с датчиком положения на валу и без механического датчика использовалось программное обеспечение ANSYS, применение которого позволило исследовать работу системы управления в установившихся и переходных режимах и выработать требуемые законы управления в системе импульсно-векторного управления с косвенным определением углового положения ротора.

Программное обеспечение ANSYS позволяет исследовать электромагнитные процессы в тесной взаимосвязи с механическими перемещениями, тем самым обеспечивается возможность анализа изменения напряжений на обмотках двигателя в зависимости от взаимного расположения обмоток статора и ротора.

Моделирование рассматриваемой системы происходило в три этапа. На первом этапе была создана модель асинхронного двигателя с фазным ротором как звена системы управления и проведено исследование его работы в

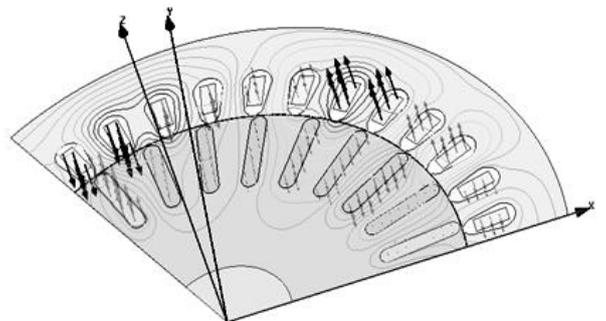
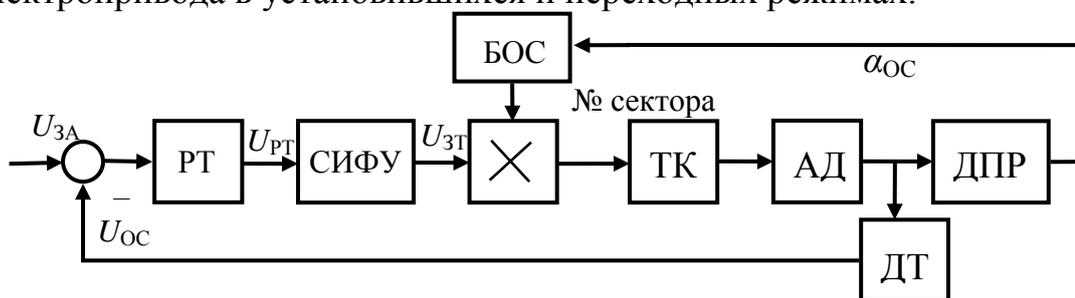


Рис. 5. Фрагмент расчета, иллюстрирующий распределение потока двигателя и плотности тока в поперечном разрезе машины

установившихся и переходных режимах методом конечных элементов. Фрагмент расчета, иллюстрирующий распределение потока двигателя и плотности тока в поперечном разрезе машины, приведен на рис. 5.

Второй этап моделирования посвящен синтезу и исследованию системы импульсно-векторного управления с механическим датчиком положения ротора. Принцип работы системы электропривода потребовал от автора нетрадиционного исполнения системы импульсно-фазового управления СИФУ с шестью каналами синхронизации и создания специфического блока определения сектора. Функциональная схема системы электропривода приведена на рис. 6.

На третьем этапе моделирования была разработана модель системы импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с косвенным определением углового положения ротора и проведено исследование этой системы электропривода в установившихся и переходных режимах.



$U_{ЗАД}$  – напряжение задание,  $U_{OC}$  – напряжение обратной связи, пропорциональное току в цепи, РТ – регулятор тока,  $U_{РТ}$  – напряжение на выходе регулятора тока, СИФУ – система импульсно-фазового управления,  $U_{ЗТ}$  – напряжение задания на ток, ТК – тиристорный коммутатор, АД – асинхронный двигатель, ДПР – датчик положения ротора, ДТ – датчик тока, БОС – блок определения сектора,  $\alpha_{OC}$  – угловое положение ротора

Рис. 6. Функциональная схема системы импульсно-векторного управления

Система с косвенным определением положения, как и система с датчиком положения ротора, содержит блоки АД, РТ, СИФУ, ТК, ДТ, а функции датчика положения ротора и блока определения сектора в системе выполняет блок косвенного определения положения ротора БКОП. Он включает в себя вычислитель начального углового положения ротора, принцип действия которого описан в главе 3, и вычислитель текущего значения положения  $\alpha_T$ , позволяющий своевременно совершать переключения тириستоров при работе системы в переходных и установившихся режимах.

Косвенный вычислитель  $\alpha_T$  содержит три датчика напряжений ДН на обмотках статора и блоки СКЗ расчета среднеквадратичных значений напряжений. Функциональная схема БКОП  $\alpha_T$  приведена на рис. 7. На вход блока поступают мгновенные значения напряжений на обмотках статора  $u_{AX}$ ,  $u_{BY}$ ,  $u_{CZ}$ , на выходе формируются сигналы управления тиристорами. БКОП содержит шесть каналов определения сектора. Каналы поочередно формируют управляющие импульсы тиристоров в случае выполнения соответствующего условия при сравнении напряжений на обмотках статора. На рис. 8 приведен фрагмент процесса формирования отпирающих

импульсов тиристоров по усредненным за три расчетных шага значениям напряжений  $U_{AX}$ ,  $U_{BY}$ ,  $U_{CZ}$ . На отрезке времени  $t_1-t_2$   $U_{AX} \geq U_{BY}$ , на выходе шестого канала формируется значение «1», отпирающие импульсы подаются на тиристоры  $VD3$  и  $VD2$ . В момент времени  $t_2$  напряжение  $U_{AX}$  становится меньше  $U_{BY}$ , сигнал  $U_6$  исчезает, начинает работать первый канал. На участке времени  $t_2-t_3$  выполняется условие  $U_{CZ} \geq U_{AX}$ , и на выходе первого канала формируется сигнал  $U_1 = 1$ , отпирающие импульсы подаются на тиристоры  $VD2$  и  $VD5$ .

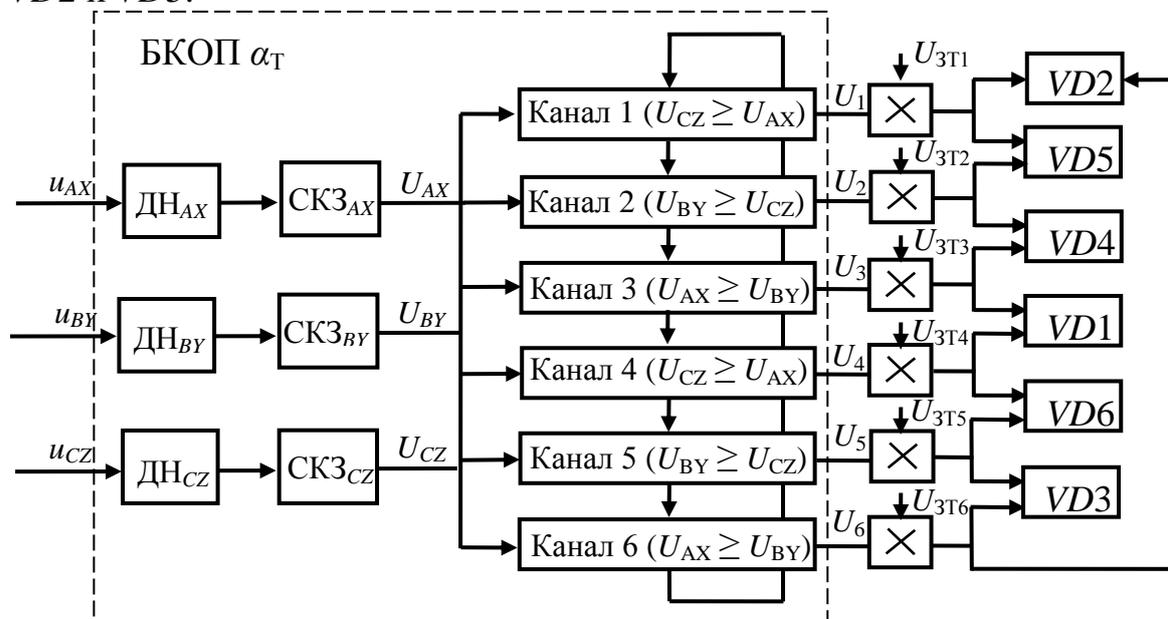


Рис. 7. Функциональная схема блока косвенного определения текущего положения ротора БКООП  $\alpha_T$

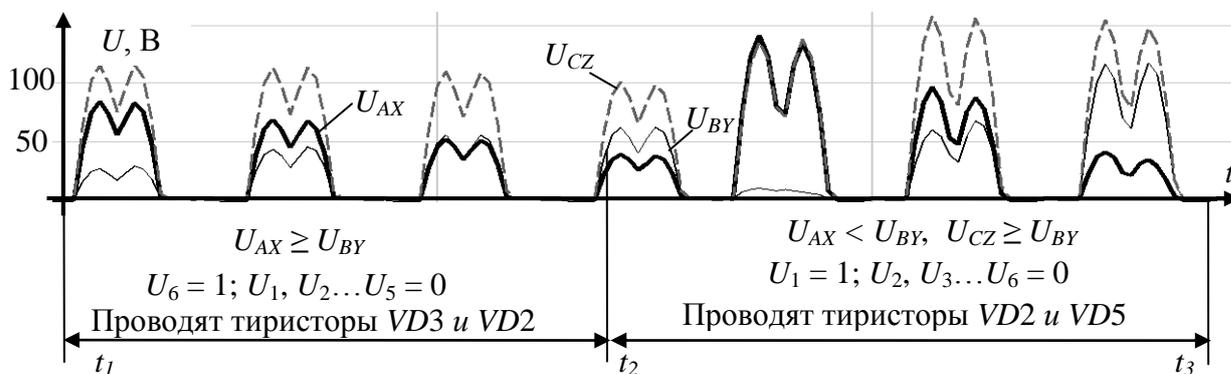


Рис. 8. Фрагмент процесса формирования отпирающих импульсов по усредненным значениям напряжений

Механизмы, на которые позиционируется система импульсно-векторного управления с косвенным определением углового положения ротора, требуют обеспечения плавного пуска и вспомогательных режимов работы на пониженных скоростях при малых статических моментах. В качестве примера в таблице приведены показатели качества систем импульсно-векторного управления с косвенным определением положения ротора (СИВУ с КОП) и с датчиком положения ротора (СИВУ с ДПР) для скорости вращения 0,2 от номинальной синхронной скорости  $\omega_{0H}$ . Таблица содержит следующие по-

казатели качества процессов: максимальное и среднеквадратичное значения тока силовой цепи в долях от номинального тока статора  $I_{max}/I_{1H}$  и  $I_{CPKB}/I_{1H}$ ; максимальный и средний электромагнитные моменты двигателя в долях от номинального момента  $M_{max}/M_H$  и  $M_{CP}/M_H$ ; колебания скорости  $\Delta\omega/\omega_{0H}$ , вызванные импульсным режимом работы. При этом вычислитель положения позволяет корректно определять угловое положение ротора с точностью до сектора при сколь угодно малых скоростях вращения, включая нулевую скорость.

Показатели качества процессов

Показатель	$I_{max}/I_{1H}$	$I_{CPKB}/I_{1H}$	$M_{max}/M_H$	$M_{CP}/M_H$	$\Delta\omega/\omega_{0H}$
СИВУ с ДПР	2,2	0,6	3,2	0,4	0,11
СИВУ с КОП	2,5	0,6	3,3	0,5	0,12

Вычислитель углового положения ротора, реализованный на предложенном алгоритме двухэтапного косвенного вычисления, имеет простую структуру и требует не более шести датчиков напряжений и программируемый контроллер, обладающий малыми вычислительными ресурсами по сравнению с известными способами косвенного определения вектора состояния. Вычислитель характеризуется низкой чувствительностью к изменениям параметров двигателя, в том числе и к изменению активного сопротивления (изменение активного сопротивления статора более чем в два раза не сказывалось на работе вычислителя) и к шумам в измерениях за счет усреднения значений напряжений. Характеристики СИВУ с КОП и показатели качества процессов позволяют заключить, что задачи диссертационного исследования были успешно решены и цель работы достигнута.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – разработка и исследование импульсно-векторной системы управления асинхронным двигателем с фазным ротором и косвенным определением углового положения ротора с целью улучшения показателей энергосбережения в массовом электроприводе при минимальных ресурсных затратах. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют отметить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. Автором был предложен новый способ косвенного определения углового положения ротора в импульсно-векторной системе управления асинхронным двигателем с фазным ротором, отличающийся от известных косвенных способов низкими требованиями к вычислительным ресурсам системы управления, устойчивой работой на пониженных скоростях, слабой чувствительностью к помехам и к изменениям параметров системы.

2. Разработано математическое описание импульсно-векторной системы управления асинхронным двигателем с фазным ротором как многофазной, несимметричной, нелинейной, импульсной системы, ориентированной на по-

лучение функциональных зависимостей электрических переменных системы от углового положения ротора.

3. Показано, что определение положения ротора в импульсно-векторной системе управления удобнее выполнять в два этапа: рассчитывать начальное угловое положение ротора, сопоставляя действующие напряжения на обмотках двигателя, и отслеживать текущее положение ротора, сопоставляя среднеквадратичные значения напряжений на обмотках статора, используя информацию о предыдущих состояниях системы.

4. Предложена нетрадиционная система импульсно-фазового управления, синхронизирующая отпирающие импульсы тиристоров с сетью в импульсно-векторной системе управления, что позволило увеличить развиваемый двигателем электромагнитный момент.

5. Показано, что при моделировании многофазной, несимметричной, нелинейной, импульсной системы целесообразно совмещать традиционные методы анализа электрических цепей с методом конечных элементов, что существенно упрощает процедуру обработки и анализа результатов моделирования;

6. Предложены, разработаны и проверены на модели и лабораторном макете функциональные схемы системы импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором и косвенным определением углового положения ротора, не уступающие по качеству процессов электроприводам, имеющим датчики непосредственного измерения углового положения ротора.

7. Система импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором и косвенным определением углового положения ротора может быть рекомендована для приводов тех механизмов, в которых полную остановку привода при снятии технологических нагрузок целесообразно заменять работой на пониженных скоростях вращения. Такая необходимость возникает, например, при одно- и двухсменных графиках работы ленточных транспортеров при отрицательных температурах для предотвращения смерзания смазки, в приводах вытяжных вентиляторов для исключения обратного потока воздуха или газа.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

*Статьи, входящие в издания, рекомендованные ВАК*

1. **Усынин, Ю.С.** Асинхронный электропривод с импульсно-векторным управлением / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина // *Электротехника*, 2011. – №3. – М.: ЗАО «Знак». – С. 15–19.

2. **Усынин, Ю.С.** Импульсные регуляторы тока в электроприводах переменного тока с импульсно-векторным управлением / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина // *Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”*. – 2011. – Выпуск 16. – №34(251). – С. 42–45.

3. **Усынин, Ю.С.** Определение начального углового положения ротора в бездатчиковой системе импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина, С.П. Лохов // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2012. – Выпуск 17. – №16(275). – С. 111–115.

*Статьи и труды научных конференций*

4. **Козина, Т.А.** Бездатчиковые системы определения скорости и положения ротора в асинхронном электроприводе / Т.А. Козина // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. – Выпуск 19. С. 43–55.

5. **Козина, Т.А.** Асинхронный электропривод с импульсно-векторным управлением / Т.А. Козина // Материалы II научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т2. – С. 158–161.

6. **Усынин, Ю.С.** Асинхронный электропривод с бездатчиковой схемой импульсно-векторного управления / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина // Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 18. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – С. 229–233.

7. **Saprunova, N.M.** Spectral measurements by the digital oscillograph GDS-806c / N.M. Saprunova, T.A. Kozina // 13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. – Alushta, 2010. – С. 137.

8. **Сапрунова, Н.М.** Исследование вольтамперных характеристик цифровым осциллографом GDS-806 С / Н.М Сапрунова, Т.А. Козина // Вестник ЮУрГУ. Серия “Энергетика”. – 2010. – Выпуск 14. – №32(208). – С. 76–78.

9. **Сапрунова, Н.М.** Проблемы электромагнитной совместимости преобразователя частоты с сетью / Н.М Сапрунова, Т.А. Козина // Труды XXXVIII Уральского семинара «Механика и процессы управления». – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – Том 2. – С. 71–74.

10. **Сапрунова, Н.М.** Исследование преобразователя частоты средней мощности / Н.М Сапрунова, Т.А. Козина // Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 18. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – С. 55–58.

*Патент РФ*

11. **Патент РФ № 2408973 МПК Н 02Р 27/05.** Асинхронный электропривод с фазным ротором / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Т.А. Козина, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков – №2009148035/07(070970) заявл. 23.12.2009.; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.