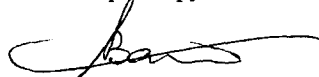


05.09.03

В 157

На правах рукописи



**Валов Артем Владимирович**

**ИМПУЛЬСНО-ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ**

Специальность 05.09 03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск

2009

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, профессор  
Сарваров Анвар Сабулханович;

– доктор технических наук, профессор  
Возмилов Александр Григорьевич.

Ведущая  
организация

– Московский энергетический институт  
(технический университет).

Защита состоится 25 июня 2009 г., в 10 часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 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) 267-96-90, E-mail: 63046@gambler.ru.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



**Актуальность темы.** В настоящее время подавляющее большинство вспомогательных механизмов и, в первую очередь, механизмов, требующих пониженной скорости вращения без нагрузки, таких, как транспортеры в ночное время суток, вентиляторы, насосы, компрессоры, воздуходувки, 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 повышенное электропотребление. Переход к регулированию частоты вращения приводит к заметной экономии электроэнергии, во многих случаях до 30–40%.

Имеются современные двухзвенные преобразователи частоты на полностью управляемых ключах. Они решают все проблемы регулирования. Однако их применение не всегда оправдано из-за высокой стоимости, сложной эксплуатации, высокого уровня квалификации персонала, так как в них заложены избыточные регулировочные возможности.

Имеются также простые способы регулирования скорости: переменное число пар полюсов в двигателе, регулирование напряжения на статоре, импульсное регулирование и т.д. Данные способы обладают малыми капитальными затратами, простотой эксплуатации. Но они, вместе с этим, обладают большим значением потерь, главным образом, за счет скольжения.

Для названного класса механизмов, не требующих высокой точности поддержания скорости, полезно найти решения, которые, с одной стороны, отвечали бы признаку “простота”, а с другой, – не несли бы с собой потери скольжения в асинхронном двигателе. По этой причине работа, посвященная изучению возможностей электропривода с векторно-импульсным управлением, является актуальной.

**Целью** диссертационной работы является улучшение регулировочных и энергетических характеристик асинхронного электропривода с тиристорным преобразователем напряжения.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- систематизация сведений по современным способам улучшения энергетических показателей асинхронных электроприводов;
- разработка импульсно-векторного управления асинхронным электроприводом с фазным ротором как одного из способов улучшения энергетических показателей;
- разработка математической модели импульсно-векторного управления асинхронным электроприводом с фазным ротором;
- разработка структуры электропривода;
- создание алгоритма управления электроприводом;
- проектирование и реализация лабораторного стенда для проведения натурных испытаний электропривода, чтобы проверить предложенные алгоритмы управления и характеристики, полученные с помощью математической модели.

**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, проведенных на макете, аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ электротехники, корректным использованием теории.

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

- принцип действия импульсно-векторного электропривода;
- методика электромагнитного расчета токов и момента электропривода, основанная на модели импульсно-векторного управления асинхронным электроприводом, которая включает в себя на разных этапах проектирования фрагменты типовых расчетов, общепринятых для асинхронных машин;
- алгоритмы управления вентилями;
- структура электропривода и синтез системы управления с импульсными регуляторами тока и скорости;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований на лабораторном макете, подтверждающие адекватность принятой модели, а также возможность реализации предложенных структур и алгоритмов управления.

#### **Научная новизна работы:**

- предложен новый импульсно-векторный способ регулирования скорости асинхронным двигателем с фазным ротором при питании двигателя от источника с неизменной постоянной частотой, в котором удается повысить энергетические показатели за счет исключения потерь скольжения (патент РФ №2288535).
- предложены обобщенные расчетные модели электропривода с импульсно-векторным регулированием, которые включают в себя на разных этапах проектирования фрагменты типовых расчетов, общепринятых для машин асинхронных и синхронных, позволяющие решать задачи анализа статики и динамики системы управления, оптимального выбора элементов;
- разработаны перспективные структуры электропривода с импульсно-векторным управлением, отличающиеся улучшенными регулировочными и энергетическими характеристиками.

#### **Научное значение работы** заключается в следующем:

- систематизированы сведения по простым способам регулирования скорости вала двигателя и предложен перспективный новый способ регулирования скорости асинхронного двигателя с фазным ротором при питании двигателя от источника с неизменной постоянной частотой, имеющий повышенные энергетические показатели за счет исключения потерь скольжения;

– предложены обобщённые расчётные математические модели электропривода с импульсно-векторным управлением, позволяющие решать задачи оптимального выбора элементов, синтеза систем автоматического управления, анализа динамики систем управления;

– предложены и обоснованы алгоритмы управления импульсно-векторным электроприводом;

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

Научная новизна работы подтверждена двумя патентами на изобретение РФ

**Практическое значение** работы заключается в следующем:

– разработаны структурные, функциональные и принципиальные схемы векторно-импульсных систем управления электроприводом;

– предложена методика расчёта установившихся и динамических процессов в асинхронном электроприводе с векторно-импульсным управлением;

– разработаны рекомендации по проектированию электропривода;

– разработан и реализован лабораторный стенд установки на основе асинхронного двигателя с фазным ротором, на котором проверены все предположения.

**Внедрение.** В учебном процессе теория импульсно-векторного управления применяется:

– при чтении лекций по курсу “Системы управления электроприводов” на кафедре электропривода Южно-Уральского государственного университета;

– при проведении лабораторных работ по курсу “Системы управления электроприводов”

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 импульсным управлением и 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:

– 14 международной научно-технической конференции “Электроприводы переменного тока – ЭПТТ 2007”, Екатеринбург: УПИ, 2007 г.;

– Международной конференции “Электроэнергетика и автоматизация в металлургии и машиностроении”, Магнитогорск, 2008 г., 22–24 октября;

- 11 и 12 Международных конференциях “Электромеханика, электротехнология, электрические материалы и компоненты”, Алушта, 2006 и 2008 годы;
- 12 Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых “Современные техника и технологии”, Томск: Томский политехнический университет, 2006 г., 27–31 марта;
- Всероссийской конференции – конкурсе студентов выпускного курса высших учебных заведений, –СПб.. Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), 2006 г

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, в том числе 2 патента РФ. Одна печатная работа опубликована в издании, рекомендованном ВАК.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 166 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков, 15 таблиц, список используемой литературы из 132 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** на основе анализа состояния электроприводов переменного тока на металлургических предприятиях обоснована возможность достижения заметных результатов в энергосбережении путем модернизации наиболее массовых электроприводов – электроприводов механизмов вентиляторного типа и электроприводов вспомогательных механизмов.

Показано, что во многих случаях существует необходимость в изменении производительности механизмов на длительное время, например, при остановке отдельных технологических агрегатов, смене времени суток, времени года и других случаях.

Проведенный обзор показал остроту проблемы получения пониженных скоростей без больших потерь на продолжительное время включения, особенно в неотвественных приводах средней и большой мощности. Также в диссертации отмечается, что в связи со значительным ростом числа электроприводов вентиляторных электроустановок, транспортеров и насосов внедрение регулируемого электропривода становится все более и более целесообразным. Рассмотрены особенности и требования к электроприводам данных механизмов.

При поиске новых эффективных решений в классе энергосберегающих электроприводов экономически выгодными оказались асинхронные машины с фазным ротором.

Установлено, что основной причиной ухудшения энергетических показателей на низкой скорости вращения у асинхронных двигателей являются потери, связанные с повышенным скольжением.

Был предложен и разработан новый способ управления двигателем – импульсно-векторный (патент №2288535 РФ), отличающийся отсутствием потерь скольжения.

Принцип действия асинхронного электропривода с фазным ротором и импульсно-векторным управлением пояснен на рис. 1. Если в асинхронном двигателе питать постоянным током только две из трех обмоток статора, то возможно получить 6 фиксированных МДС статора в зависимости от того, какие обмотки статора получают питания ( $F_{c1}, F_{c2}, \dots, F_{c6}$ ). Обмотка ротора при этом получает питание от источника постоянного тока и создает МДС  $F_p$ . В зависимости от положения ротора импульсно-векторная система подает напряжение питания на те две обмотки статора, которые вместе с МДС ротора создадут вращающий момент.

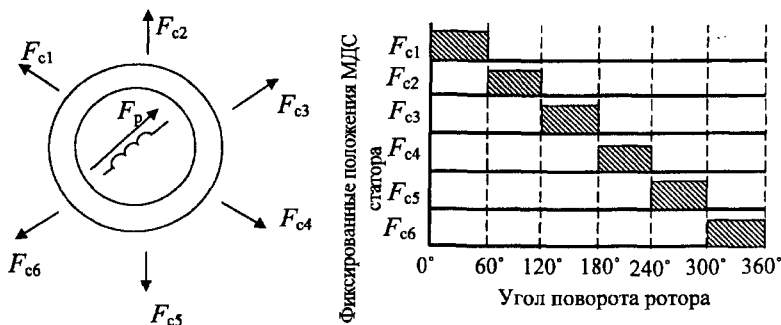


Рис. 1 Принцип действия импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором

Так, при положении вектора МДС ротора  $F_p$ , как на рис. 1, максимальный вращающий момент возникнет, если на статор двигателя подать напряжение, соответствующее вектору  $F_{c1}$

Функциональная схема, реализующая данный принцип управления, представлена на рис. 2. Статорная обмотка  $AX, BY, CZ$  асинхронного двигателя через тиристорный коммутатор подключена к питающей многофазной сети переменного тока  $A, B, C$ , а на выход коммутатора включена обмотка ротора асинхронного двигателя  $ax, by$  (рис. 2).

На первый управляющий вход тиристорного коммутатора подключен вывод регулятора тока РТ, а на второй управляющий вход – вывод датчика положения ротора ДПР, механически связанного с валом асинхронного двигателя.

Первый управляющий вход регулятора тока РТ соединен с источником задающего напряжения  $U_{3Т}$ , пропорционального желаемому току статора, а второй – с выводом датчика тока ДТ, который включен последовательно с обмотками ротора (рис. 2).

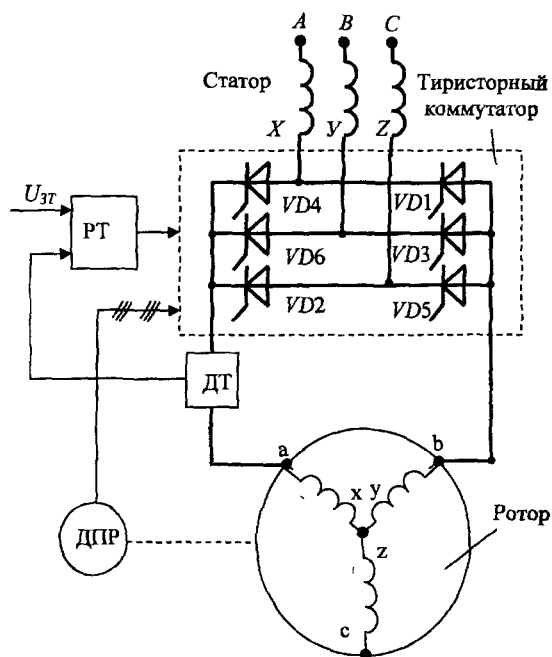


Рис. 2. Функциональная схема электропривода

Полярность импульсов тока определяется знаком желаемого электромагнитного момента двигателя. Величина импульсов тока регулируется величиной угла задержки отпирающих импульсов, подаваемых на управляющие входы тиристорных коммутаторов.

Предлагаемый в диссертации электропривод имеет следующие особенности:

- 1) простую схему тиристорного коммутатора – в случае трехфазного асинхронного двигателя требуется лишь шесть тиристорных ключей;
- 2) исключаются потери скольжения в роторе (асинхронный двигатель с фазным ротором переводится в режим работы синхронной электрической машины с возбужденным ротором);
- 3) для реверса электропривода не требуется двойного комплекта тиристорного коммутатора (в этом случае за счет изменения знака напряжения на выходе регулятора тока работает пара тиристорных, обеспечивающая другую полярность импульсов тока и знак электромагнитного момента двигателя).

**Вторая глава** диссертации посвящена разработке математической модели системы импульсно-векторного управления, а также вычислению расчетных характеристик электропривода.

Чтобы создать электромагнитный момент двигателя, необходимо подать управляющие импульсы на два тиристора тех двух фаз статора асинхронного двигателя, фазную зону которых пересекает магнитная ось обмотки ротора.

Вектор магнитодвижущей силы (МДС) обмоток статора перемещается в расточке статора двигателя дискретно, скачкообразно. Каждая пара тиристорных, прилегающих к обмоткам разных фаз статора и включенных последовательно, работает в режиме однополупериодного выпрямления, поэтому токи в обмотках статора и электромагнитный момент двигателя носят импульсный характер.



Была предложена математическая модель асинхронного электропривода, учитывающая особенности совместной работы последовательно включенных тиристорного преобразователя, цепей статора и ротора асинхронного двигателя. Эта модель представляет собой 6 однотипных схем включения обмоток. Каждая из схем представляет собой 3 магнитно-взаимосвязанные последовательно включенные обмотки (две обмотки статора и одну эквивалентную обмотку ротора). Обмотка ротора

поворачивается относительно неподвижных обмоток статора. Выбор схемы из трех катушек зависит от положения ротора.

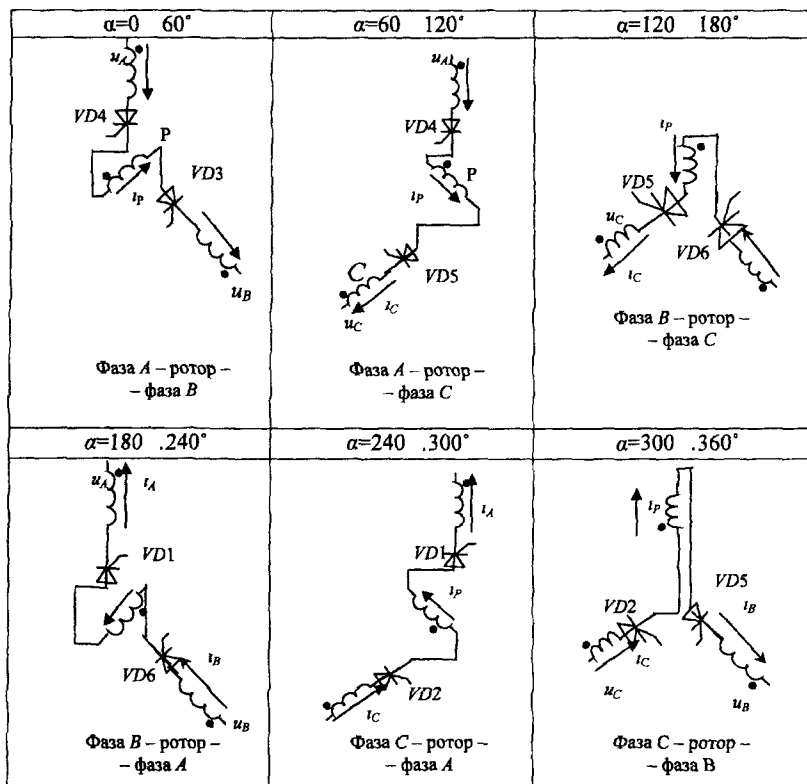
В диссертации приводится полный расчет механического и электромагнитного равновесия электропривода с помощью решения системы дифференциальных уравнений.

В табл. 1 представлены 6 вариантов функциональных схем включения обмоток двигателя.

С помощью этой математической модели проведен расчет переменных двигателя: скорости вращения ротора  $V$  ( $n_0 = 105$  рад/с), динамического момента  $M$

Таблица 1

Схемы включения обмоток двигателя



( $M_H = 37 \text{ Нм}$ ), токов, протекаемых по обмоткам статора  $i_C$  ( $I_{1n} = 10,4 \text{ А}$ ) и ротора  $i$  ( $I_{2n} = 15 \text{ А}$ ), выпрямленного напряжения преобразователя  $U$ . Фрагмент этих расчетных кривых представлен на рис. 3

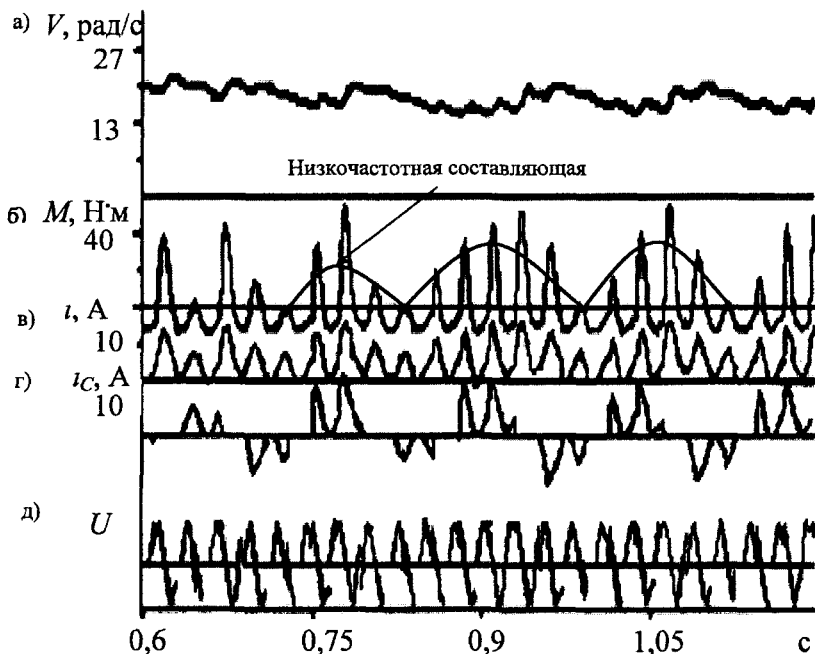


Рис. 3 Фрагмент расчетных кривых электропривода в режиме поддержания скорости: а) скорость  $V$ ; б) динамический момент  $M$ ; в) ток ротора  $i$ ; г) ток фазы  $C$  статора  $i_C$ , д) напряжение на выходе преобразователя  $U$

По расчетным кривым (рис. 3) в диссертации получены статические (механические и электромеханические) характеристики (рис. 4), которые получили экспериментальное подтверждение в главе 4. При помощи этих характеристик было доказано, что электропривод с импульсно-векторным управлением обладает благоприятными массогабаритными показателями, выраженными в относительно малых значениях отношения тока статора к моменту  $2,25$ , в отличие от  $5-7$  в традиционных схемах тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель (ТПН-АД). Здесь ток статора и момент взяты в долях от их номинальных значений.

По этим характеристикам в диссертации было установлено, что электропривод с последовательным включением обмоток статора и ротора наряду с благоприятной энергетикой развивает сравнительно малые моменты, что объясняется последовательным соединением обмоток статора и ротора и импульсным характером напряжения питания (для расчета брался серийный асинхронный двигатель). Поэтому в работе рассмотрены и предложены раз-

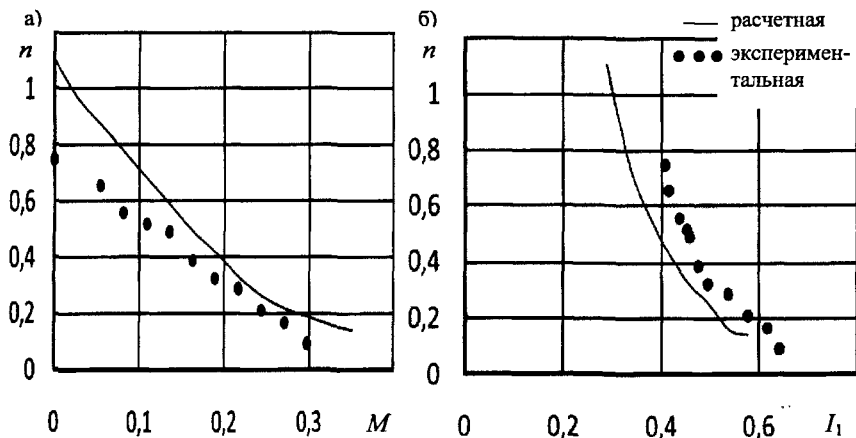


Рис. 4. Статические характеристики электропривода: а) механическая; б) электромеханическая

личные варианты, устраняющие этот недостаток – подключение электропривода к источнику повышенного напряжения, независимое питание цепей ротора и статора (патент РФ № 2337466), увеличение скважности импульсов электромагнитного момента, а также применение реверсивного тиристорного комплекта.

Кроме изучения статических характеристик электропривода, в диссертации было обращено внимание на переходные процессы в электроприводе – произведен расчет процесса пуска асинхронного двигателя импульсно-векторным способом (рис. 5):

- частота импульсов момента и токов при импульсном управлении с ростом скорости уменьшается одинаково в отличие от “прямого” пуска, в котором частота тока статора неизменна и равна 50 Гц, а частота тока ротора уменьшается с ростом скорости;

- при “прямом” пуске максимальный пик тока статора  $i_{1\max}$ , потребляемый из сети, и максимальный пик тока ротора  $i_{2\max}$  в 6–7 раз превышает пики токов в номинальном режиме, что приводит к “просадке” напряжения питающей сети при пуске мощных двигателей. При импульсном регулировании максимальная величина токов  $i_{1\max}$  и  $i_{2\max}$  не превышает трехкратной;

- при “прямом” пуске среднеквадратичное значение тока статора  $I_1$  и ротора  $I_2$  составляет 6–7 номинальных значений тока статора. Это приводит к перегреву обмоток двигателя при пуске и ограничению числа пусков двигателя в час. При импульсном управлении величина среднеквадратичного тока статора и ротора не превосходит одного номинального значения.

Адекватность модели была подтверждена экспериментами.

**Третья глава диссертации** посвящена составлению и выбору структуры управления импульсно-векторным электроприводом. Исследование было начато с рассмотрения свойств объекта регулирования (рис. 6).

Особенностью данной схемы является переменная частота квантования логического устройства ЛУ, зависящая от скорости вращения вала двигателя, которая изменяется в широких пределах от 0 до 50 Гц. В результате чего свойства объекта регулирования зависят от скорости вращения, т.к. при этом меняется частота квантования импульсного элемента.

Для изучения свойств импульсно-векторного электропривода были получены частотные характеристики объекта регулирования при разных скоростях вращения (табл. 2). В качестве примера здесь представлены частотные характеристики только для четырех фиксированных скоростей вращения (10, 40, 80, 100 рад/с). Синхронная скорость этого электропривода равна 105 рад/с. Так как частотные характе-

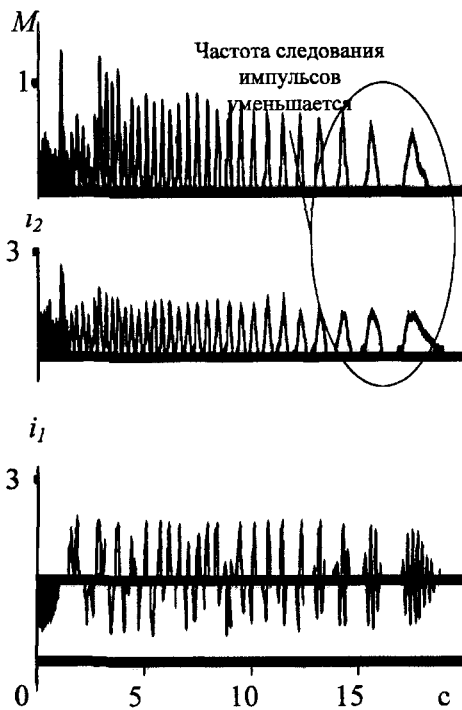


Рис. 5 Осциллограммы процесса пуска при импульсно-векторном управлении

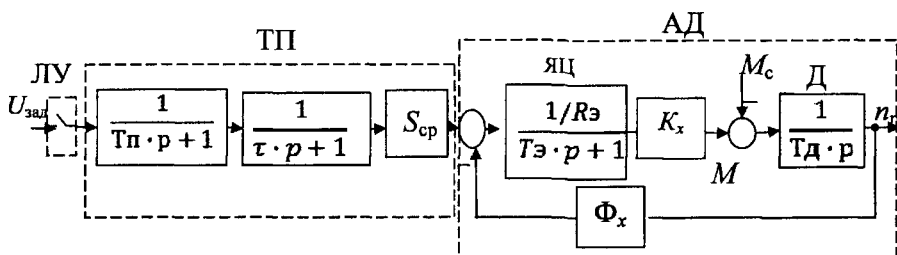


Рис. 6. Структурная схема электропривода:

АД – асинхронный двигатель, ТП – тиристорный преобразователь напряжения; ЯЦ – звено, учитывающее электромагнитные параметры цепи протекания тока;  $K_x$ ,  $\Phi_x$  – коэффициенты линеаризации, которые учитывают непостоянство потока в двигателе;  $S_{cp}$  – коэффициент усиления тиристорного преобразователя; Д – звено, учитывающее механическую инерцию привода; ЛУ – логическое устройство, которое либо разрешает создавать момент  $M$  в двигателе, либо запрещает

Частотные характеристики объекта регулирования

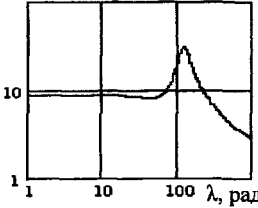
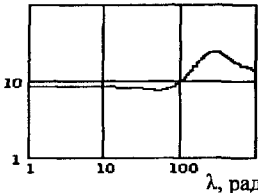
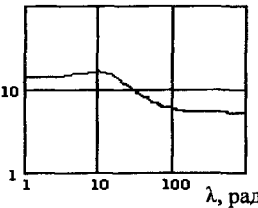
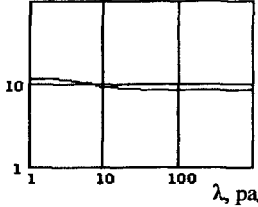
ристики импульсной системы принято строить в функции псевдочастоты  $\lambda$ , то все графики, представленные в табл. 2, построены в зависимости от этой частоты  $\lambda$ .

Как следует из табл. 2, объект регулирования обладает различными свойствами на разных скоростях вращения, а на низких скоростях характеризуется повышенной колебательностью. Величина резонансного максимума  $M$  при этом достигает величины 3,5

Для уменьшения колебания скорости было предложено несколько вариантов схем: введение добавочного сопротивления в цепь ротора, применение данного электропривода для механизмов с большим моментом инерции, замыкание накоротко свободных обмоток на статоре, применение схем с обратными связями по току и скорости.

В диссертации отражены все эти способы. Наилучшие результаты показала схема с последовательным соединением импульсных регуляторов (рис. 7). Другие варианты, например, применение схем с непрерывными регуляторами тока и скорости показали менее лучшие результаты.

На рис. 7 представлена схема с последовательным соединением импульсных регуляторов. Здесь к объекту регулирования (рис. 6) добавлены два последовательно включенных контура с импульсными регуляторами: контур тока (внутренний) и контур скорости (внешний). Импульсные регуляторы содержат импульсные элементы, частота квантования которых совпадает с частотой квантования импульсного элемента ЛУ объекта регулирования, т.е. импульсы управления подаются одновременно на импульсный элемент ЛУ и на импульсные элементы регуляторов. Тогда регуляторы

Скор. вращ. рад/с	Вход Узад; Выход $n_r$
10	<p data-bbox="692 238 806 263">L, (рад/с)/В</p> 
40	<p data-bbox="692 556 806 580">L, (рад/с)/В</p> 
80	<p data-bbox="692 828 806 852">L, (рад/с)/В</p> 
100	<p data-bbox="692 1130 806 1155">L, (рад/с)/В</p> 

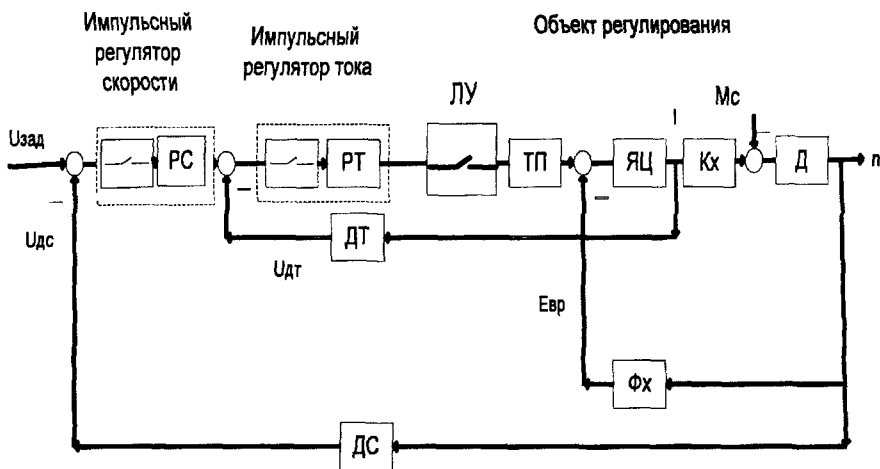


Рис. 7 Схема с последовательно соединенными импульсными регуляторами: РТ – регулятор тока; РС – регулятор скорости; ДТ, ДС – датчики тока и скорости; ЯЦ – звено, характеризующее электромагнитные свойства цепи; Д – звено, характеризующее механические свойства электропривода;  $K_x$ ,  $\Phi_x$  – коэффициенты линеаризации; ТП – тиристорный преобразователь,  $M_c$  – статический момент;  $I$  – ток ротора;  $n$  – скорость вращения

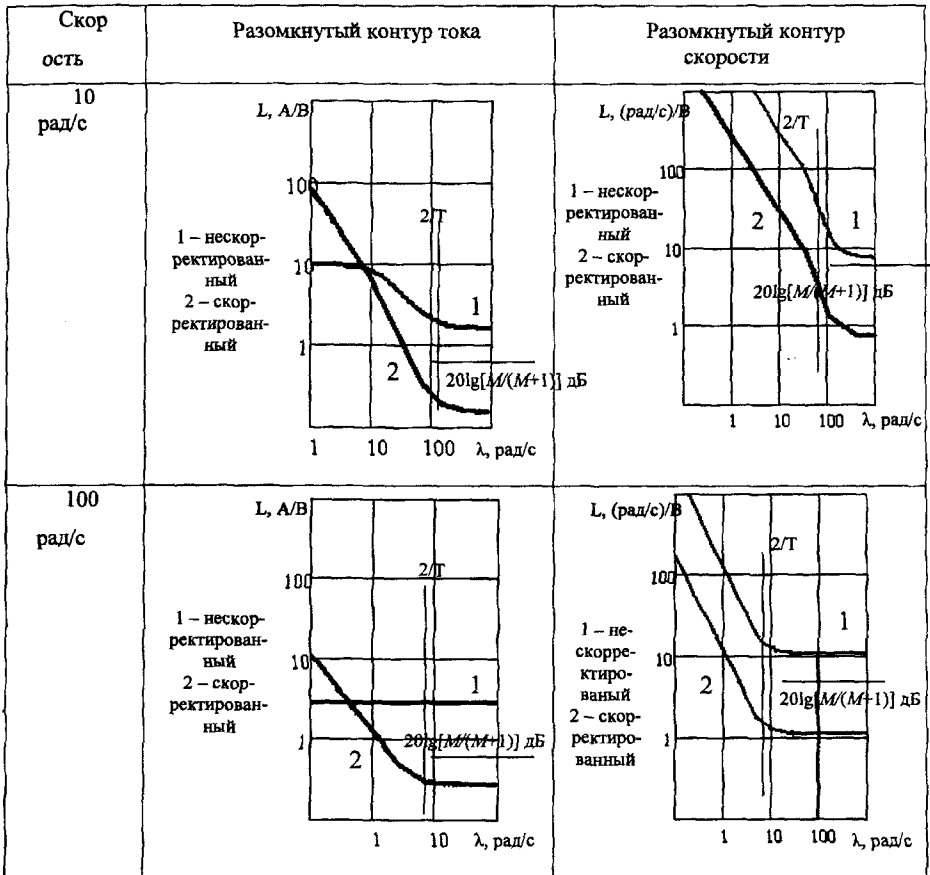
тока и скорости изменяют свои свойства вместе с изменением свойств объекта регулирования.

В качестве примера в автореферате приведены частотные характеристики контура тока и скорости (табл. 3) для двух скоростей вращения (10 и 100 рад/с) в схеме с последовательным соединением импульсных регуляторов.

При настройке импульсной системы всегда необходимо следить за двумя дополнительными условиями: 1) частота среза должна быть меньше, чем  $2/T$  ( $T$  – период квантования импульсного элемента); 2) высокочастотная часть ЛАЧХ должна лежать ниже прямой  $20\lg[M/(M+1)]$  дБ, где  $M$  – допустимый резонансный максимум.

Из кривых 1 (табл. 3) видно, что дополнительные условия устойчивости импульсной нескорректированной системы не выполняются. Кроме того, синтез системы управления осложняется переменной частота квантования импульсного элемента ЛУ. Благодаря применению предложенного импульсного регулятора эта задача была легко решена. В результате были получены частотные характеристики скорректированной разомкнутой системы (кривые 2), которые удовлетворяют дополнительным условиям устойчивости на всех скоростях вращения вала ротора электропривода.

Частотные характеристики контура тока и скорости



**Четвертая глава.** Для экспериментальной проверки основных положений теории в лаборатории автоматизированного электропривода кафедры ЭПА Южно-Уральского государственного университета был выполнен действующий макетный образец импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором.

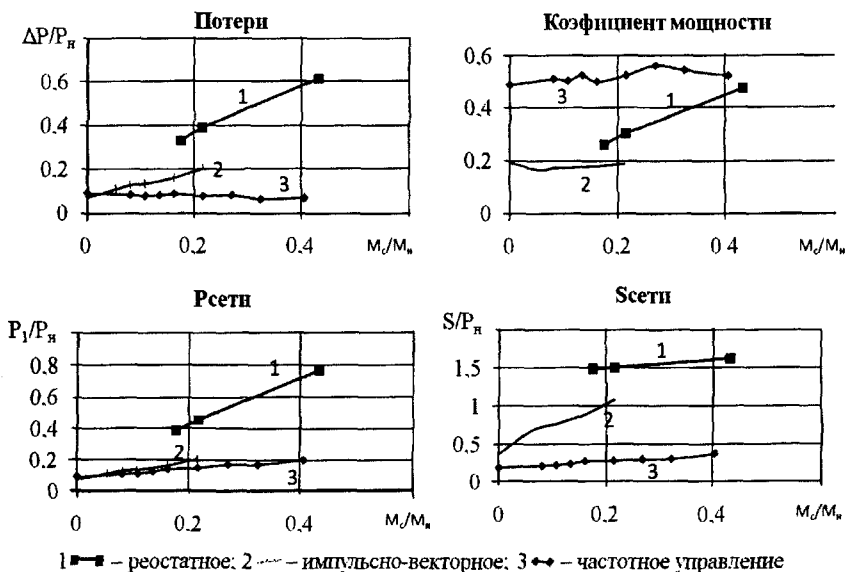
Чтобы определить максимальный момент, который может развивать электропривод, на макете была снята угловая характеристика рис. 8 (зависимость момента от угла поворота вала ротора) одной фазной зоны электропривода (кривая 1). На всем интервале поворота вала были открыты только два тиристора – один из анодной группы, другой из катодной группы. Переключая тиристоры в коммутаторе так, чтобы обеспечить импульсно-векторное управление, получили кривую 2, огибающую семейство угловых характеристик.



Для подтверждения верности математической модели, описанной в главе 2, на макете снимались статические (механическая и электромеханическая) характеристики (см. рис. 4).

На основании сравнения экспериментальных и теоретических кривых был сделан вывод, что экспериментальные данные подтверждают расчетные с точностью 10% для моментов выше  $0,1M_H$ , т.е. математическая модель, полученная из 6 схем включения обмоток (см. табл. 1), достоверно определяет статические характеристики для моментов больше  $0,1M_H$ .

Энергетическая эффективность подтвердилась при сравнении энергетических показателей электропривода (рис. 9) для различных способов



1 ■ — реостатное; 2 — импульсно-векторное; 3 ◆ — частотное управление



получения низкой скорости вращения двигателя (реостатного, импульсно-векторного, частотного). Снимались показатели как электропривода (потери активной мощности  $\Delta P/P_H$  в электроприводе, коэффициент мощности электропривода), так и показатели сети (активная  $P_{\text{сети}}$  и полная  $S_{\text{сети}}$  мощности) для различных общепринятых способов регулирования скорости.

Из анализа графиков в диссертации был сделан следующий вывод: при импульсно-векторном управлении энергетические показатели в два раза лучше, чем при реостатном управлении АДФР. По потерям  $\Delta P/P_H$  и потреблению активной мощности  $P_1/P_H$  импульсно-векторное управление приближается к частотному управлению, т.е. кривая 2 приближается к кривой 3.

Хотя коэффициент мощности электропривода как мера разделения активной и реактивной мощностей имеет небольшое значение (0,2), из-за большого числа высших гармоник в составе напряжения питания, это обстоятельство компенсируется малой величиной потребления полной мощности из сети  $S_{\text{сети}}$ .

Чтобы подтвердить верность динамической модели, полученной в главе 3 (см. рис. 6), снималась частотная характеристика разомкнутого электропривода (вход напряжение задания  $U_{\text{зад}}$  – выход скорость  $n_p$ ). Эта же частотная характеристика получена расчетным путем на динамической модели (глава 3). Расчетная (кривая 2) и экспериментальная (кривая 1) характеристики представлены на рис. 10. При сравнении кривых видно, что модель (см. рис. 6), полученная в главе 3, верна и может быть принята для дальнейших расчетов.

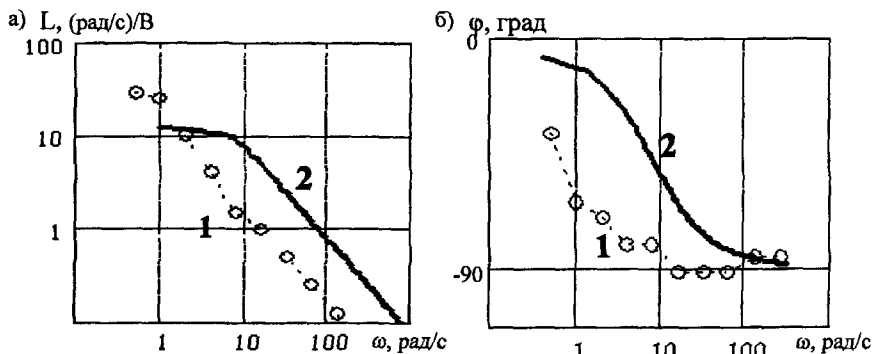


Рис. 10. Сравнение экспериментальных и расчетных частотных характеристик: а) ЛАЧХ, б) ФЧХ, 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – разработка и исследование импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором для механизмов, требующих пониженной скорости вращения без нагрузки. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют отметить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. С целью энергосбережения в электроприводах переменного тока применяются разнообразные способы регулирования скорости, но весьма разные и порой противоречивые условия ведения технологического процесса приводят к неоднозначным решениям, что требует постоянного и последовательного уточнения их технико-экономических характеристик, вариантов электропривода и целесообразных сфер применения.

2. Автором предложен импульсно-векторный способ регулирования скорости асинхронного электропривода (патент №2288535 РФ), отличающийся относительной простотой (для регулирования используется один тиристорный мост в цепи статора) и сравнительно малыми электрическими потерями.

3. Предложена математическая модель электропривода с импульсно-векторным регулированием скорости, представленная в трехфазной неподвижной системе координат, которая позволяет определить мгновенные значения токов в обмотках статора и ротора, скорость и электромагнитный момент электропривода, а также рассчитать механическую, электромеханическую и энергетические характеристики электропривода. Обращается внимание на сравнительно малые значения отношения тока статора к моменту ( $I_{\text{статора}}/M = 2 \dots 2.5$ ) при пуске электропривода, что свидетельствует о его благоприятных массогабаритных показателях. Корректность модели подтверждена экспериментами, выполненными на лабораторном макете электропривода.

4. Наибольшую эффективность импульсно-векторного управления следует ожидать для электроприводов механизмов, которые отключать нерационально, а более целесообразно переводить на пониженную скорость вращения (шахтные вентиляторы, транспортеры в ночное время суток). Основные решения по импульсно-векторному регулированию скорости асинхронного двигателя можно распространить на схемы импульсно-векторного пуска также синхронных двигателей.

5. Рассмотрены и предложены схемные варианты, позволяющие увеличить моменты, развиваемые электроприводом – подключение обмоток к источнику повышенного напряжения, независимое питание цепей ротора и статора (патент РФ № 2337466), применение реверсивного тиристорного комплекта.

6. Показано, что звено тиристорный преобразователь – асинхронный двигатель в схеме импульсно-векторного управления является слабо демпфируемым импульсным звеном с переменной частотой квантования, зависящей от скорости вращения. Наиболее эффективно подавление колебаний в электроприводе с таким звеном достигается в двухконтурной системе с линейными обратными связями по току ротора и скорости и импульсными регуляторами тока и скорости. Дана методика выбора структуры системы управления и параметров регуляторов.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах**

*Статьи, входящие в издания, рекомендованные ВАК*

**1. Валов, А.В.** Энергетические показатели импульсно-векторного управления асинхронным электроприводом с фазным ротором / А.В. Валов // Вестник ЮУрГУ Серия “Энергетика”. –2008. –Выпуск 9 –№11(111). – С. 57–59

*Статьи и труды научных конференций*

**2. Валов, А.В.** Импульсно-векторное управление асинхронным двигателем с фазным ротором / А.В. Валов // Научные труды 12 Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых. “Современные техника и технологии СТТ 2006 27–31 марта” – Томск: Томский политехнический университет, 2006. –Том 1 –С. 239–240

**3. Валов, А.В.** Математическая модель импульсно-векторного управления асинхронным двигателем с фазным ротором / А.В. Валов // Научные труды Всероссийской конференции конкурсе студентов выпускного курса высших учебных заведений. –СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет), 2006 –С. 50–52.

**4. Усынин, Ю.С.** Математическая модель способа управления асинхронным электроприводом переменного тока / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Д.В. Попов // Научные труды 11 Международной конференции “Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты” – Крым, Алушта, 2006. –С. 236.

**5. Усынин, Ю.С.** Способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором / Ю.С. Усынин, А.В. Валов, Д.В. Попов // Научные труды 14 Международной научно-технической конференции “Электроприводы переменного тока – ЭППТ 2007” –Екатеринбург, 2007. –С. 233–234

**6. Валов, А.В.** Импульсно-векторное управление асинхронным двигателем с фазным ротором / А.В. Валов // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007 –С. 91.

**7. Усынин, Ю.С.** Импульсное управление асинхронным двигателем с фазным ротором / Ю.С. Усынин, А.В. Валов // Вестник ЮУрГУ Серия “Энергетика” –2007. –Выпуск 8. –N20(92). –С. 24–26.

**8. Валов, А.В.** Импульсно-векторное управление электроприводом переменного тока / А.В. Валов, Ю.С. Усынин // Научные труды 12 Международной конференции “Электромеханика, электротехнология, электрические материалы и компоненты”. – Крым, Алушта, 2008.

**9. Валов, А.В.** Проблемы импульсно-векторного регулирования электроприводом переменного тока / А.В. Валов, Ю.С. Усынин // Научные труды Международной конференции “Электроэнергетика и автоматизация в металлургии и машиностроении”. – Магнитогорск, 22–24 октября 2008. –С. 133–138.

*Патенты РФ*

10. **Патент РФ № 2288535 МПК H02P 27/05.** Асинхронный электропривод с фазным ротором и способ управления им / Ю С. Усынин, А.В Валов, В.В Деккер. Заявл. 04 07.2005 Оpubл. 27 11.2006 Бюл. № 33

11. **Патент РФ № 2337466 МПК H02P 27/05.** Асинхронный электропривод с фазным ротором / Ю С. Усынин, А.В. Валов, С.А. Чупин Заявл. 09 07.2007 Оpubл. 27.10.2008 Бюл. № 30

**Валов Артем Владимирович**

**ИМПУЛЬСНО-ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ**

Специальность 05 09 03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать 18.05.2009 Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1 Тираж 80 экз. Заказ 163/203

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ  
454080, г Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.