

**На правах рукописи**

**ЮШКОВ ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО  
ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С УПРАВЛЕНИЕМ ПО ФАЗЕ ТОКА**

**Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты**

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

**Самара – 2010**

Диссертационная работа выполнена на кафедре автоматики факультета электронной техники ГОУВПО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
ГУЛЯЕВ Игорь Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
ВЫСОЦКИЙ Виталий Евгеньевич

кандидат технических наук  
ГАРЦЕВ Николай Александрович

Ведущая организация: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Защита состоится 7 декабря 2010 г. в 10 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 при самарском государственном техническом университете (СамГТУ) по адресу: г. Самара, ул. Первомайская д. 18, корпус №1, ауд. 4А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета, с авторефератом – на официальном сайте СамГТУ [www.samgtu.ru](http://www.samgtu.ru)

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 443010, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04, тел: (846) 278-44-94, факс(846) 278-40-00, e-mail: [krotkov@samgtu.ru](mailto:krotkov@samgtu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.217.04, кандидат технических наук, доцент



Кротков Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

**Актуальность работы.** Электродвигатели двойного питания получили широкое распространение. При этом ряд применений, связанный с тяжелыми условиями пуска, например, тяговый электропривод автономных транспортных средств, электропривод шаровых мельниц, прокатных станков и другие, требует оперативного регулирования параметров процесса электромеханического преобразования энергии. Это вызывает необходимость разработки энергоэффективных машин двойного питания с возможностью глубокой регулировки скорости, момента на валу двигателя при любых оборотах, энергетическими показателями, такими как  $\cos \varphi$ , коэффициент гармоник и т.д.

Разработка новых принципов управления электромеханическими преобразователями энергии и эффективных инструментариев управления в этой области позволит обеспечить конкурентоспособность России в долгосрочном периоде в условиях модернизации мирового хозяйства и перехода на новый технологический уклад. Основой для этого является теория машин двойного питания, использование новых передовых решений для создания энергоэффективных вентильных двигателей. Качество разработок должно обеспечиваться применением самых современных преобразователей частоты с использованием силовых IGBT ключей. Таким требованиям отвечает разработанный в Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева двигатель переменного тока, получивший название асинхронизированный вентильный двигатель в контактном (АВД) и бесконтактном исполнении (БАВД).

Усилиями ведущих научных коллективов Московского энергетического института, НТС ОАО «НТЦ электроэнергетики», Всероссийского научно-исследовательского института электроэнергетики, ВНИИ электропривода, Самарского государственного технического университета, государственных технических университетов г.г. Санкт-Петербурга, Томска, Липецка, Иваново, Н.Новгорода и других, разработаны различные типы электродвигателей двойного питания, нашедшие применение во многих областях науки и техники.

Большой вклад в развитие и практическую реализацию электрических машин двойного питания внесли ведущие российские и зарубежные ученые, среди которых следует отметить И.П. Копылова, Ю.Г. Шакаряна, А.В. Иванова-Смоленского, И. Раца, К.П. Ковача, Г.Б. Онищенко, Б.В. Тихменева, И.Л. Локтеву, М.М. Ботвинника, Ю.П. Сонины, в научных трудах которых разработаны принципы построения, основы теории и управления двигателями двойного питания, предложен целый спектр востребованных на практике технических решений.

**Цель диссертационной работы.** Разработка научных основ совершенствования асинхронизированного вентильного двигателя путем улучшения его энергетических характеристик, массогабаритных показателей, расширения функциональных возможностей за счет питания обмотки якоря от инвертора напряжения, управляемого по фазе тока.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в диссертационной работе ставятся и решаются следующие задачи:

Формирование структурной схемы и разработка асинхронизированного вентильного двигателя, управляемого по фазе тока статора, с использованием широтно-импульсной модуляции и регулирования входного питающего напряжения.

Исследование асинхронизированного вентильного двигателя на основе разработанных математических моделей, прогнозирование и выработка рекомендаций для повышения энергетической эффективности, улучшения массогабаритных показателей, регулировочных и динамических характеристик с учетом возможных способов управления, целенаправленного изменения и сочетания режимных параметров.

Разработка микроконтроллерной системы для управления асинхронизированным вентильным двигателем по фазе тока и обеспечения его режимов пуска.

Разработка экспериментального стенда контактного и бесконтактного варианта асинхронизированного вентильного двигателя на базе инверторов напряжения с IGBT-модулями и эффективной измерительной системы для снятия характеристик асинхронизированного вентильного двигателя на базе программно-аппаратного комплекса LabView.

**Методы исследования.** Поставленные задачи решены с использованием обобщенной теории электрических машин, теории электрических цепей, векторного анализа, линейной алгебры и прикладной математики, а также с применением методов компьютерного моделирования в среде Matlab.

Обработка экспериментальных характеристик выполнена с использованием системы LabView.

**Научная новизна.** На единой методологической основе разработана теория статических и динамических режимов асинхронизированного вентильного двигателя с управлением по фазе тока.

Разработаны методы управления с поддержанием постоянства угла сдвига фаз между током и напряжением во всем диапазоне изменения частот инвертора напряжения якоря.

Принципы и методики экспериментального исследования асинхронизированного вентильного двигателя с двумя преобразователями частоты на IGBT модулях в режиме инвертора напряжения с применением измерительной системы, спроектированной на основе программно-аппаратного комплекса LabView.

**Положения, выносимые на защиту.** Асинхронизированный вентильный двигателем с инвертором напряжения в якоря, управляемый по фазе тока.

Модель для оценки энергоэффективности, механических и регулировочных характеристик асинхронизированного вентильного двигателя в квазиустановившемся режиме работы.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в диссертационной работе ставятся и решаются следующие задачи:

Формирование структурной схемы и разработка асинхронизированного вентильного двигателя, управляемого по фазе тока статора, с использованием широтно-импульсной модуляции и регулирования входного питающего напряжения.

Исследование асинхронизированного вентильного двигателя на основе разработанных математических моделей, прогнозирование и выработка рекомендаций для повышения энергетической эффективности, улучшения массогабаритных показателей, регулировочных и динамических характеристик с учетом возможных способов управления, целенаправленного изменения и сочетания режимных параметров.

Разработка микроконтроллерной системы для управления асинхронизированным вентильным двигателем по фазе тока и обеспечения его режимов пуска.

Разработка экспериментального стенда контактного и бесконтактного варианта асинхронизированного вентильного двигателя на базе инверторов напряжения с IGBT-модулями и эффективной измерительной системы для снятия характеристик асинхронизированного вентильного двигателя на базе программно-аппаратного комплекса LabView.

**Методы исследования.** Поставленные задачи решены с использованием обобщенной теории электрических машин, теории электрических цепей, векторного анализа, линейной алгебры и прикладной математики, а также с применением методов компьютерного моделирования в среде Matlab.

Обработка экспериментальных характеристик выполнена с использованием системы LabView.

**Научная новизна.** На единой методологической основе разработана теория статических и динамических режимов асинхронизированного вентильного двигателя с управлением по фазе тока.

Разработаны методы управления с поддержанием постоянства угла сдвига фаз между током и напряжением во всем диапазоне изменения частот инвертора напряжения якоря.

Принципы и методики экспериментального исследования асинхронизированного вентильного двигателя с двумя преобразователями частоты на IGBT модулях в режиме инвертора напряжения с применением измерительной системы, спроектированной на основе программно-аппаратного комплекса LabView.

**Положения, выносимые на защиту.** Асинхронизированный вентильный двигатель с инвертором напряжения в якоря, управляемый по фазе тока.

Модель для оценки энергоэффективности, механических и регулировочных характеристик асинхронизированного вентильного двигателя в квазиустановившемся режиме работы.

цифровой системы управления высоковольтными преобразователями частоты серии ВПЧА».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

XI научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Мордовского государственного университета имени Н.П.Огарева (г. Саранск); XIV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск); VII республиканской Научно-практической конференции «Наука и инновации в Республике Мордовия» (г. Саранск); международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2008. (г. Саратов); IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2008. (г. Новосибирск); Научных конференциях XXXVIII и XXXVII Огаревских чтениях 2008 2009 гг. (г. Саранск); Международной научно-технической конференции «Энергетика-2008: инновации, решения, перспективы» (г. Казань); Итоговой региональной научно-практической конференции «Научный потенциал молодежи – будущему Мордовии» (г. Саранск); Международной научно-технической конференции «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (г. Тольятти).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 научных статей, материалов докладов и тезисов, в том числе статья в изданиях из списка ВАК, получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, патент на полезную модель.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация изложена на 193 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 165 наименований, приложений, включает 107 рисунков и 2 таблицы.

#### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведена актуальность темы работы, определены ее цель, задачи исследования, обозначены методы их решения, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, обоснована достоверность полученных результатов и выводов, представлены основные положения, выносимые на защиту, апробация и публикации по теме диссертационного исследования, описан объем и структура диссертации.

**В первой главе** приведен обзор современного состояния разработок и теорий в области электромеханических преобразователей энергии. Показано, что на современном этапе классическая структура регулируемого электропривода состоит из преобразователя частоты, обеспечивающего питание электрической машины, в которой осуществляется электромеханическое преобразование энергии, а система управления, в соответствии с заложенным в нее алгоритмом и сигналами обратной связи, управляет данным процессом.

АВД представляет собой машинно-вентильный комплекс на основе асинхронного двигателя с фазным ротором, включенным в режиме двойного

питания и управлением по принципу вентильного двигателя в контактном и бесконтактном исполнении (рис.1).

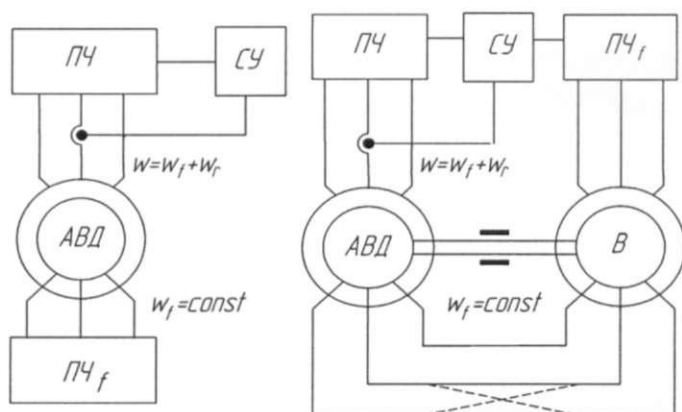


Рис. 1. Структурная схема АД в контактном и бесконтактном варианте

управляется по фазе тока. Применение двух ПЧ в статоре и роторе позволяет управлять четырьмя переменными и, как следствие, управлять энергетическими режимами работы машины в полном объеме.

Произведено сравнение достоинств и недостатков различных электромеханических преобразователей энергии.

Рассмотрены различные типы преобразователей для асинхронизированного вентильного двигателя. Показано, что для питания якоря возможно использование как инвертора напряжения, так и инвертора тока, приведены их достоинства и недостатки.

Приведены основные этапы исследований асинхронизированного вентильного двигателя.

**Вторая глава** посвящена теоретическим основам электромеханических преобразований энергии в асинхронизированном вентильном двигателе.

В основу теории положены уравнения Парка-Горева. При записи уравнений и приведении их к системе координат, вращающейся синхронно с частотой токов якоря, система уравнений, описывающая динамические процессы, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{U} = (r + j \cdot \nu \cdot x_{\sigma}) \cdot \dot{I} + j \cdot \nu \cdot \dot{\Psi} + \frac{d\dot{\Psi}}{dt}, \\ \dot{U}_f = (r_f + j \cdot s_0 \cdot x_f) \cdot \dot{I}_f + j \cdot s_0 \cdot \dot{\Psi} + \frac{d\dot{\Psi}}{dt}, \\ \dot{\Psi} = x \cdot (\dot{I} + \dot{I}_f), \\ M = \operatorname{Re} j \cdot \dot{\Psi} \cdot \dot{I}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\dot{U}$ ,  $\dot{U}_f$  - обобщенные векторы напряжений якоря и возбуждения,  $r$ ,  $r_f$  - активное сопротивление обмоток якоря и возбуждения,  $x_\sigma$ ,  $x_f$ ,  $x_{af}$  - индуктивности рассеяния обмоток якоря и возбуждения, а также их взаимоиндуктивность,  $x$ ,  $x_{af}$  индуктивности обмоток якоря и возбуждения,  $\nu$ ,  $s_0$  - относительная частота токов якоря и возбуждения,  $\dot{I}$ ,  $\dot{I}_f$  - обобщенные векторы токов якоря и возбуждения,  $\dot{\Psi}$  - обобщенный вектор потокосцепления,  $M$  - электромагнитный вращающий момент.

Квазиустановившиеся режимы работы асинхронизированного вентильного двигателя также описываются уравнением (1) при условии приравнивания всех производных к нулю.

С точки зрения работы асинхронизированного вентильного двигателя от инверторов напряжения в цепях возбуждения и якоря, известными в системе уравнений (1) будут являться величины напряжений возбуждения и напряжений якоря.

Векторная диаграмма АД представлена на рис. 2.

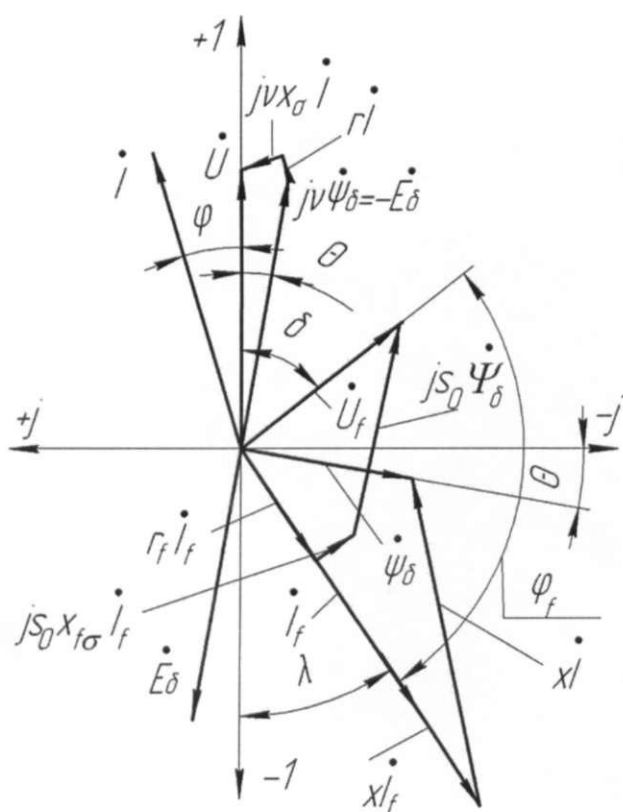


Рис. 2. Векторная диаграмма АД в системе координат, вращающейся синхронно с частотой токов якоря

Где  $\Psi = \frac{2}{3} \Psi_m$  - модуль обобщенного вектора магнитного потокосцепления,  $\Psi_m$  - амплитуда обобщенного магнитного потокосцепления,  $U = \frac{2}{3} U_m$  - модуль обобщенного вектора напряжения якоря,  $U_m$  - амплитуда напряжения якоря,  $I = \frac{2}{3} I_m$  - модуль обобщенного вектора тока якоря,  $I_m$  - амплитуда тока якоря,  $\varphi$  - угол между обобщенными векторами тока и напряжения якоря,  $\lambda$  - угол между током возбуждения и отрицательной действительной осью,  $\theta$  - угол между обратным обобщенным вектором ЭДС якоря и обобщенным вектором напряжения якоря - угол нагрузки.

Основные выражения АД имеют вид:

$$I = \frac{U \cdot \sin \theta}{r \cdot \sin(\varphi + \theta) + \nu \cdot x_\sigma \cdot \cos(\varphi + \theta)}, \quad (2)$$



$$I_f = \frac{U_f \cdot \cos \delta - s_0 \cdot \Psi \cdot \cos \theta}{s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \sin \lambda - r_f \cdot \cos \lambda}, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \frac{I_f (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos \lambda + r_f \cdot \sin \lambda) + s_0 \cdot \Psi \cdot \sin \theta}{I_f (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \sin \lambda - r_f \cdot \cos \lambda) + s_0 \cdot \Psi \cdot \cos \theta}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{I \cdot (r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_\sigma \cdot \cos \varphi)}{U + I \cdot (-r \cdot \cos \varphi + v \cdot x_\sigma \cdot \sin \varphi)}, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{\sin \lambda}{\cos \lambda} = \frac{(r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_\sigma \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \theta + \sin \theta \cdot v \cdot x_{ar} \cdot \sin \varphi}{(r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_\sigma \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \theta + \sin \theta \cdot v \cdot x_{ar} \cdot \cos \varphi}, \quad (6)$$

$$\Psi = \frac{U_f \cdot (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\delta + \lambda) + r_f \cdot \sin(\lambda + \delta))}{s_0^2 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\lambda + \theta) + s_0 \cdot r_f \cdot \sin(\lambda + \theta)}, \quad (7)$$

$$v_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}, \text{ где } a = \Psi \cdot x_\sigma \cdot \cos(\varphi + \theta) \quad (8)$$

$$b = \Psi \cdot r \cdot \sin(\varphi + \theta) - U \cdot x_\sigma \cdot \cos \varphi, \quad c = U \cdot r \cdot \sin \varphi,$$

$$M = \frac{U \cdot I \cdot (r \cdot \sin \varphi + x_\sigma \cdot v \cdot \cos \varphi)}{r \cdot v \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \theta) + v^2 \cdot x_\sigma}. \quad (9)$$

На основании данных выражений строятся математические модели. При их реализации в средах математического моделирования, например, таких как Matlab, Matcad или при определенных допущениях в электронных таблицах Excel, возможно оценить энергоэффективность, получить механические, рабочие и регулировочные характеристики асинхронизированного вентильного двигателя с управлением по фазе тока в квазиустановившихся режимах работы.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию АД.

В диссертационной работе осуществлялось математическое моделирование квазиустановившихся и динамических режимов работы.

Для осуществления математического моделирования необходима среда, которая бы позволила решать систему дифференциальных, линейных, нелинейных и трансцендентных уравнений. Одним из мощных пакетов математического моделирования считается среда математического моделирования Matlab, лицензионный пакет которого имеется в Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева.

Математические исследования проводились при различных режимах работы АД. Рассматривались режимы с возбуждением как промышленной, так и низкой фиксированной частотой. Для доказательства того, что АД с управлением по фазе тока якоря может работать в режимах, аналогичных двигателю постоянного тока, осуществлено моделирование режимов работы с поддержанием неизменной скорости вращения вала, поддержанием неизменным напряжения якоря и поддержанием неизменным тока возбуждения.

При выполнении математического моделирования сделаны следующие допущения: не учитываются потери в стали машины; считается, что все обмотки

симметричны и имеют одинаковое число витков; не учитывается насыщение машины; считается, что машина с гладким воздушным зазором, без пазов на роторе и статоре; распределение МДС синусоидально; считается, что машина не имеет нелинейных сопротивлений.

При использовании инвертора напряжения для питания цепи якоря следует учитывать его главную особенность – независимость выходного напряжения инвертора от нагрузки. Поэтому проведены исследования квазиустановившихся режимов работы при поддержании неизменными напряжений возбуждения и якоря – естественные характеристики. Под естественными характеристиками двигателя понимают механические характеристики двигателя без введения обратных связей. То есть, характеристики момента, как функции от  $f(v, \varphi, \theta, s_0, U, U_f)$ .

Математическая модель для исследования режимов работы АД с управлением по фазе тока якоря записывается в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_f \cdot (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\delta + \lambda) + r_f \cdot \sin(\lambda + \delta))}{s_0^2 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\lambda + \theta) + s_0 \cdot r_f \cdot \sin(\lambda + \theta)} = \frac{U \cdot (r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_\sigma \cdot \cos \varphi)}{v \cdot r \cdot \sin(\varphi + \theta) + v^2 \cdot x_\sigma \cdot \cos(\varphi + \theta)}, \\ \operatorname{tg} \lambda = \frac{(r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_\sigma \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \theta + \sin \theta \cdot v \cdot x_{ar} \cdot \sin \varphi}{(r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_\sigma \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \theta + \sin \theta \cdot v \cdot x_{ar} \cdot \cos \varphi}, \\ \operatorname{tg} \delta = \frac{I_f (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos \lambda + r_f \cdot \sin \lambda) + s_0 \cdot \Psi \cdot \sin \theta}{I_f (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \sin \lambda - r_f \cdot \cos \lambda) + s_0 \cdot \Psi \cdot \cos \theta}, \\ I = \frac{U \cdot \sin \theta}{r \cdot \sin(\varphi + \theta) + v \cdot x_\sigma \cdot \cos(\varphi + \theta)}, \\ I_f = \frac{r \cdot I \cdot \sin \varphi + v \cdot x_\sigma \cdot I \cdot \cos \varphi + v \cdot x_{ar} \cdot I \cdot \cos \varphi}{v \cdot x_{ar} \cdot \cos \lambda}, \\ \Psi = \frac{U \cdot (r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_\sigma \cdot \cos \varphi)}{v \cdot r \cdot \sin(\varphi + \theta) + v^2 \cdot x_\sigma \cdot \cos(\varphi + \theta)}, \\ M = \frac{U_f \cdot U \cdot \sin \theta \cdot \cos(\varphi + \theta) \cdot (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\delta + \lambda) + r_f \cdot \sin(\lambda + \delta))}{(s_0^2 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\lambda + \theta) + s_0 \cdot r_f \cdot \sin(\lambda + \theta)) \cdot (r \cdot \sin(\varphi + \theta) + v \cdot x_\sigma \cdot \cos(\varphi + \theta))}. \end{array} \right. \quad (10)$$

Данная модель, реализованная в системе математического моделирования Matlab, решается численным методом Гаусса-Ньютона и позволяет получить механические и рабочие характеристики АД с поддержанием неизменным напряжения якоря, частоты возбуждения и сдвига фаз между током и напряжением якоря.

Результаты моделирования естественных характеристик приведены на рис.

3.

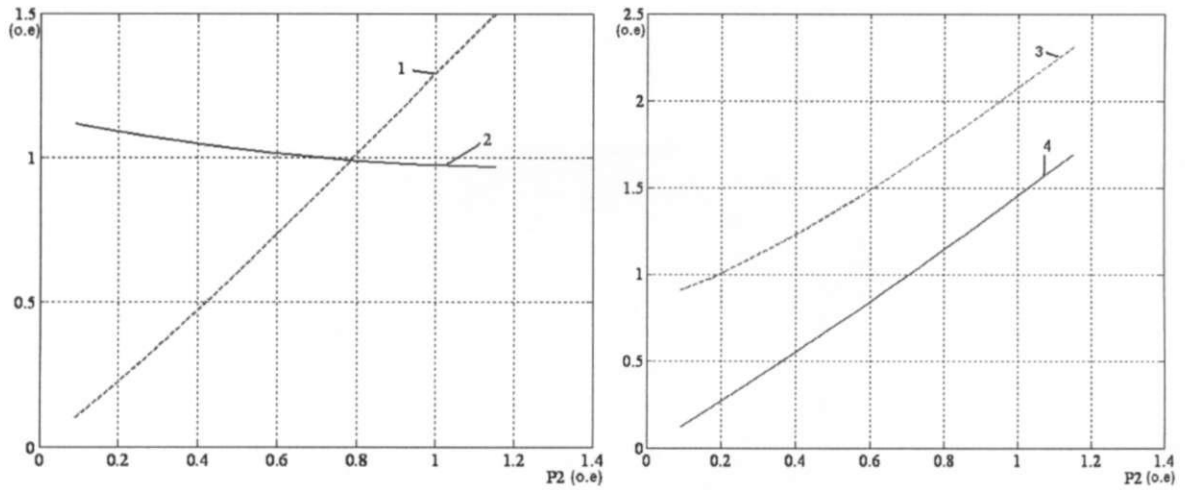


Рис. 3. Результаты математического моделирования естественных характеристик работы АД при  $s_0 = 0,2$ ,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $U_f = 0,2$ ,  $U = 1$

1 – момент на валу, 2 – относительная частота токов якоря,  
3 – ток возбуждения, 4 – ток якоря

Режим поддержания скорости неизменной на математической модели проводился по аналогии с экспериментом на физическом макете при следующих параметрах: частота возбуждения – 10 Гц или  $s_0 = 0,2$ ; угол сдвига фаз между током и напряжением якоря в системе управления задается равным  $\varphi = 20^\circ$ ; напряжение возбуждения  $U_f = 0,025$ ; поддерживалась частота вращения, равная  $N = 0,5$  или 750 об./мин. (по условию эксперимента) за счет изменения напряжения якоря (рис. 4).

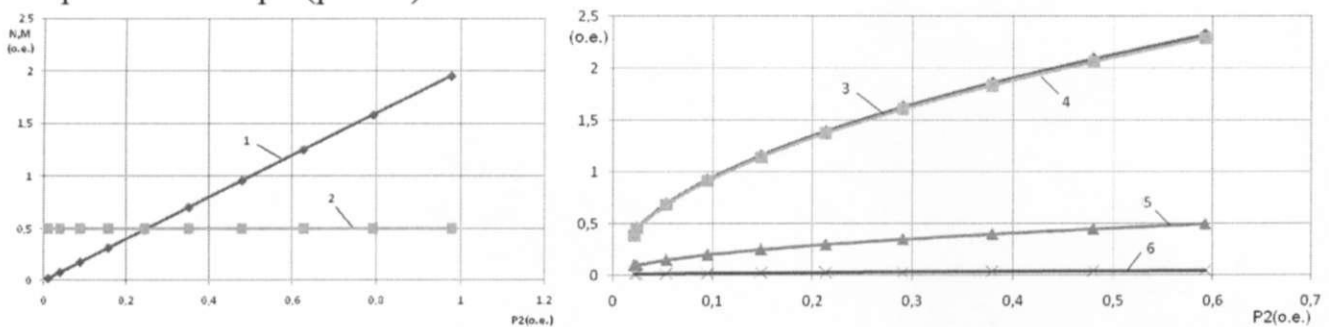


Рис. 4. Результаты математического моделирования режима поддержания скорости АД при  $s_0 = 0,2$ ,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $U_f = 0,025$

1 – момент на валу, 2 – частота вращения вала,  
3 – ток якоря, 4 – ток возбуждения, 5 – напряжение якоря, 6 – напряжение возбуждения

У ДПТ имеется теоретический режим работы с питанием от источника тока, при этом у двигателя на любых оборотах момент остается постоянным. Для подтверждения того, что АД работает аналогично двигателю постоянного тока, проведены исследования режима поддержания тока возбуждения неизменным.

Математическая модель данного режима позволяет осуществлять моделирование в более доступной системе - в электронных таблицах Excel. Особенностью таких таблиц является то, что поиск решения уравнений может осуществляться двумя методами: методом Ньютона или методом сопряженных градиентов (рис.5).

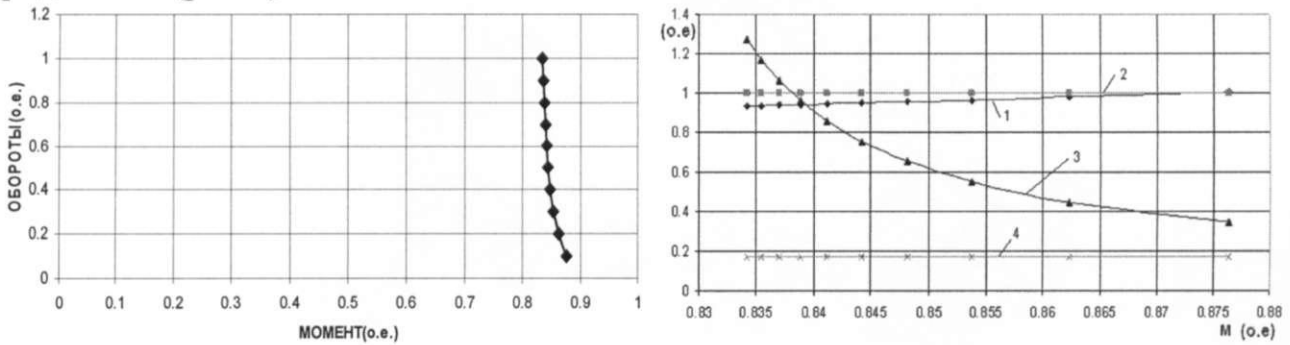


Рис. 5 Результаты математического моделирования режима поддержания тока возбуждения неизменным АД при  $s_0 = 0,2$ ,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $U_f = 0,19$

1 – ток якоря, 2 – ток возбуждения,  
3 – напряжение якоря, 4 – напряжение возбуждения

Напряжение возбуждения практически постоянно, а напряжение якоря изменяется по нелинейному закону. Ток возбуждения поддерживается постоянным и равным номинальному значению, а ток якоря при этом изменяется в пределах от 0.9 до 1.

Для более глубокого исследования двигателя и режимов его работы, создана модель, на которой можно исследовать переходные процессы работы асинхронизированного вентильного двигателя с управлением по фазе тока в пакете математического моделирования – Matlab с использованием пакетов Simulink (рис.6).

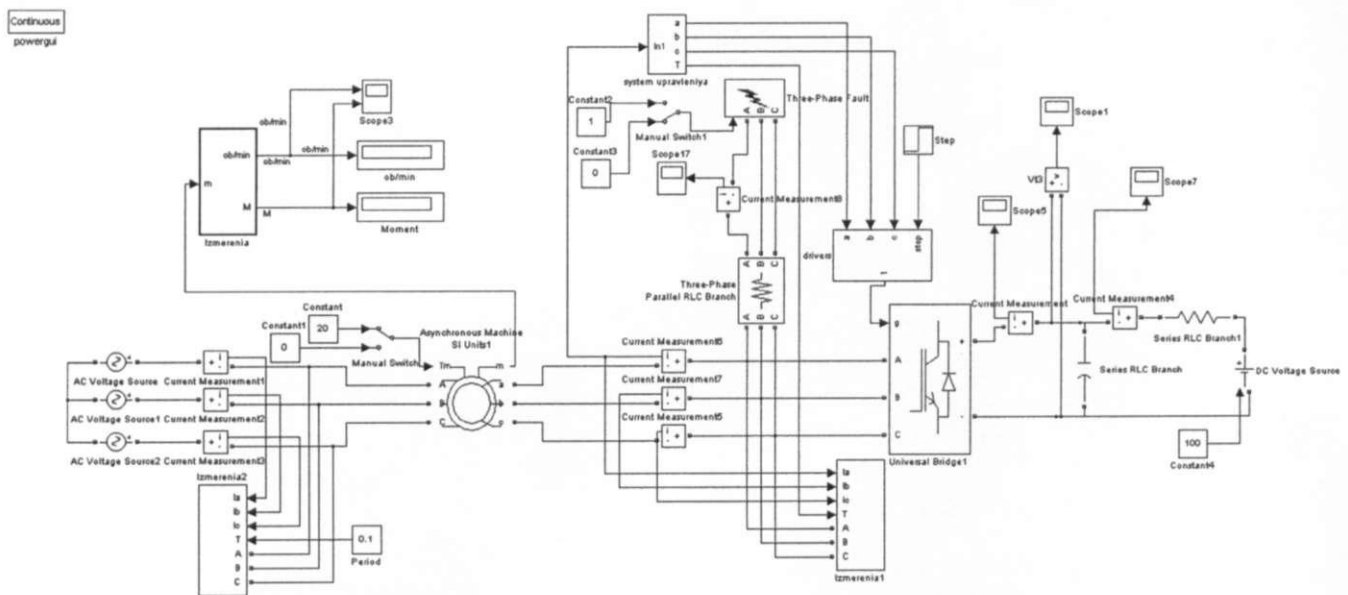


Рис.6. Математическая модель динамических процессов в системе Matlab

Фазные напряжения якоря имеют прямоугольный характер. На рис.8 представлена временная диаграмма тока и напряжения фазы А АД с управлением по фазе тока якоря, получившаяся в результате математического моделирования.

Исследования АД с коммутацией IGBT модулей показали, что электромагнитный вращающий момент двигателя колеблется с частотой коммутации инвертора напряжения якоря (рис.7).

Результаты моделирования показывают, что при частоте возбуждения  $s_0 = 0,2$  и угле сдвига фаз между током и напряжением  $\varphi = 20^\circ$ , коэффициент мощности становится равным 0.91, что выше по сравнению с коэффициентом мощности базового двигателя 0.86.

После введения ШИМ выходного напряжения инвертора коэффициент мощности приближается к 0.93, поскольку ШИМ выходного напряжения инвертора влияет на гармонический состав.

Рис. 7. Ток и напряжение фазы А АД с управлением по фазе тока якоря

напряжением при любой частоте работы инвертора напряжения, а применение ШИМ выходного напряжения инвертора улучшает энергетические характеристики. Применение полностью управляемых силовых вентилей – IGBT модулей позволяет управлять инвертором с поддержанием  $\cos \varphi = 1$ , коэффициент мощности в этом случае приближается к 0.98, из-за наличия коэффициента искажения, связанного с несинусоидальным характером выходного напряжения инвертора.

Проведенные исследования режимов работы АД от инвертора напряжения на имитационной модели (рис. 8) показали, что управление инвертором по фазе тока позволяет жестко фиксировать сдвиг фаз между током и напряжением

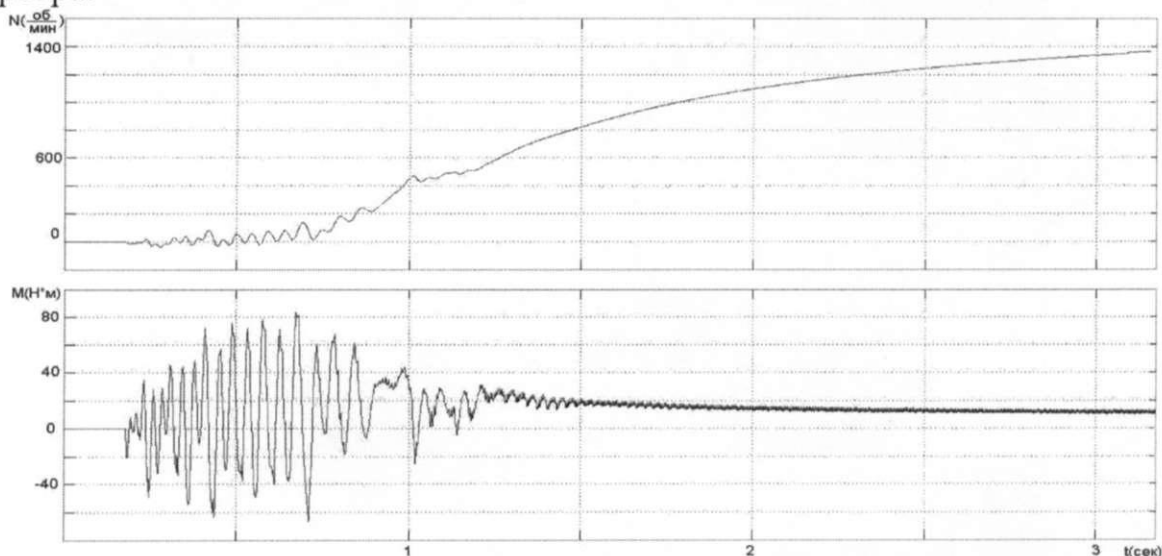


Рис. 8. Результаты математического моделирования динамики АД при  $s_0 = 0,2, \varphi = 20^\circ, U_f = 15 В$

Результаты моделирования показывают, что при резком набросе питающего напряжения, система управления синхронизируется и двигатель надежно пускается в ход.

**Четвертая глава** посвящена проектированию и результатам экспериментальных исследований АД с управлением по фазе тока.

С целью подтверждения выводов, полученных в результате теоретических исследований, создан экспериментальный исследовательский стенд, предназначенный для исследований статических и динамических режимов работы АД в контактном и бесконтактном варианте.

Осуществлена разработка подходов и методов, обеспечивающих проектирование АД на основе преобразователей частоты с IGBT модулями. Создан преобразователь частоты якоря на базе преобразователя частоты ОМЕГА-55 с явно выраженным звеном постоянного тока, и инверторным звеном на IGBT модулях, система управления которого выполнена на микроконтроллере DSP TMS 320F2812, для которого написана программа, обеспечивающая работу АД с управлением по фазе тока якоря.

Осуществлена разработка алгоритмов и программ, обеспечивающих контроль и диагностику функционирования АД с управлением по фазе тока – создан измерительный комплекс на базе программно-аппаратного комплекса LabView фирмы National Instruments для проведения необходимых измерений. Созданное программное обеспечение позволяет обрабатывать информацию и определять действующие значения токов, напряжений, частот, мощностей, коэффициента мощности и момента на валу через мгновенные значения, снятые с частотой дискретизации 100000 выборок в секунду (рис.9).

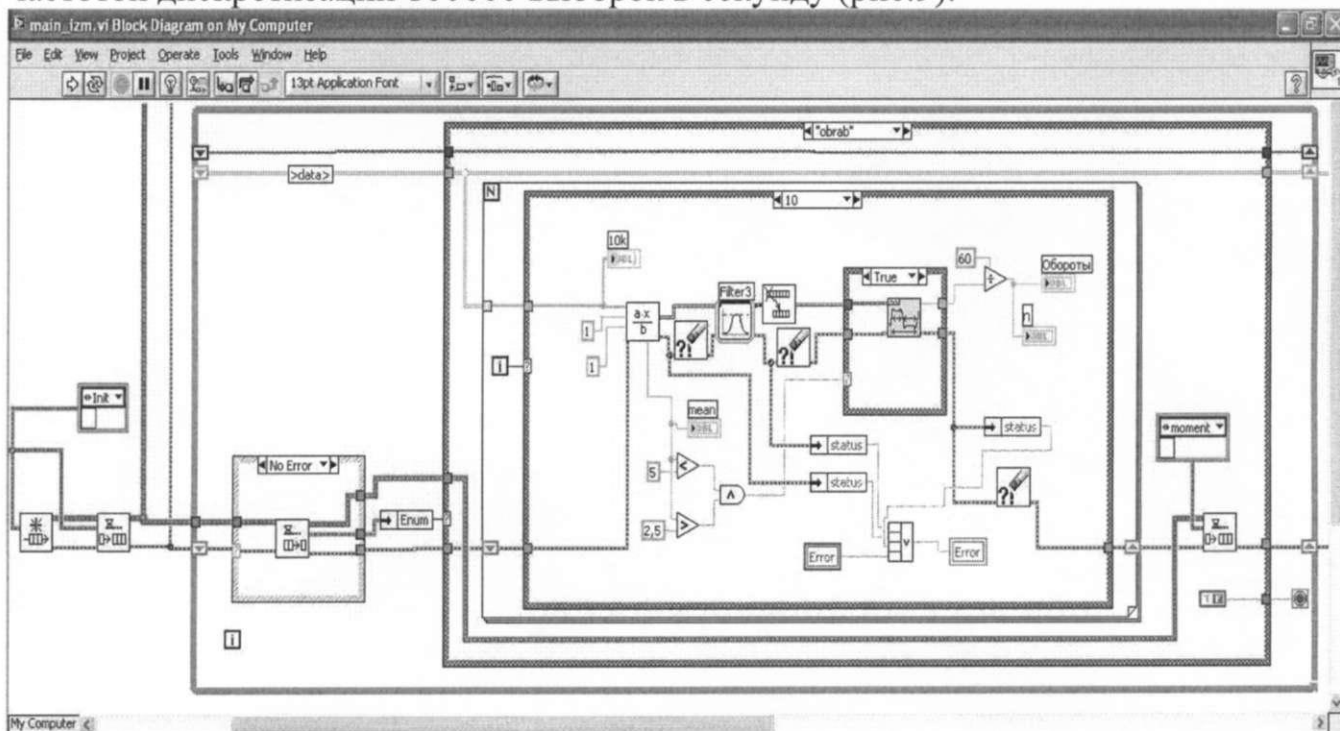


Рис.9. Функциональная схема программы обработки сигналов датчиков тока

В состав стенда входят: асинхронные двигатели с фазным ротором 4AK160S4Y3 и 4AK160S8Y3, нагрузочный генератор П-62. В качестве преобразователя частоты возбуждения используется агрегат ОМЕГА2-22 производства завода «Электровыпрямитель» на IGBT модулях с широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения.

Программа микроконтроллера написана при помощи системы Matlab (рис. 10).

После запуска программа автоматически переводится на язык Си и передается в программу отладки микропроцессора Code Composer stududio, в которой программа компилируется, загружается в процессор и запускается на исполнение.

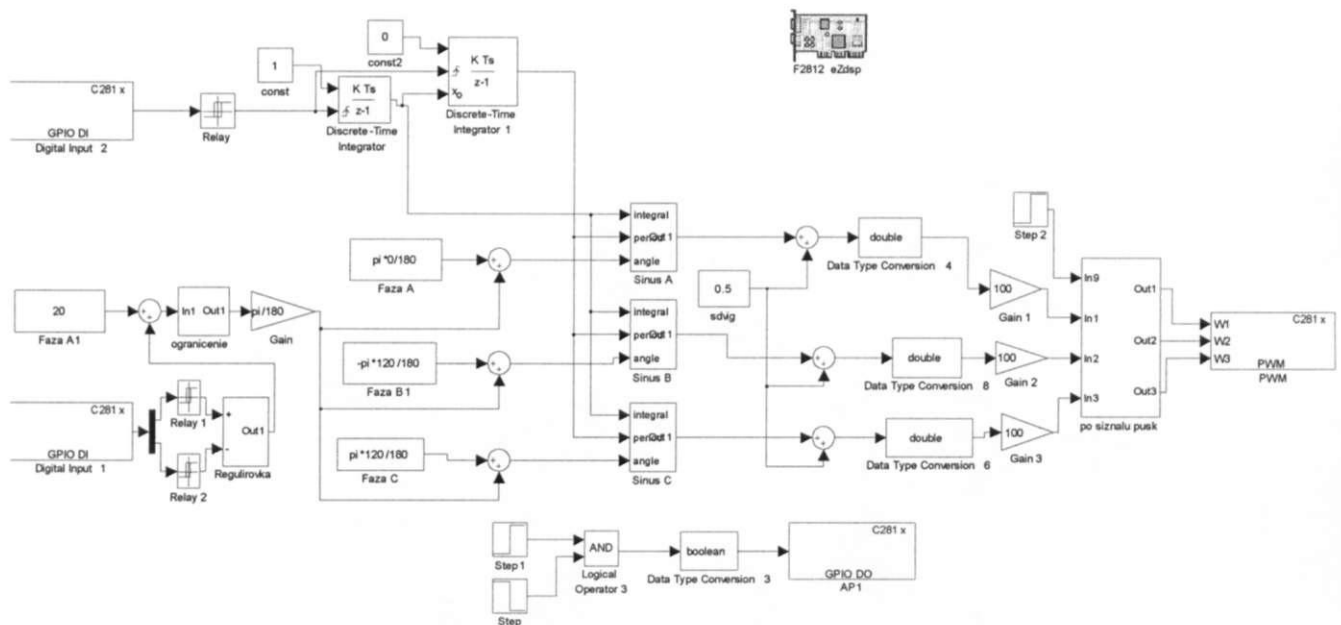


Рис. 10. Функциональные блоки программы управления микроконтроллером DSP TMS 320F2812 из среды Matlab

Кроме того, в системе управления предусмотрен блок регулирования угла сдвига фаз между током и напряжением якоря  $\varphi$ . Особенность данного блока заключается в том, что регулирование угла осуществляется оператором вручную, и позволяет изменять угол непосредственно во время работы двигателя.

Экспериментальные исследования АД с управлением по фазе тока подтвердили адекватность математических исследований.

Для доказательства того, что АД с питанием якоря от инвертора напряжения и управлением по фазе тока, так же как и АД с питанием от зависимого инвертора тока имеет характеристики, аналогичные двигателю постоянного тока, проведены исследования трех режимов работы: режим поддержания скорости, режим поддержания напряжения якоря и режим поддержания тока якоря.

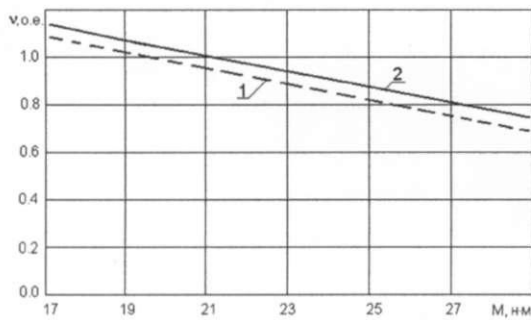


Рис.11. Результаты теоретических и экспериментальных исследований естественных характеристик АД с управлением по фазе тока.  
1 – расчетная, 2 - экспериментальная

На основе математических моделей рассчитаны механические характеристики исследуемых режимов работы. По разработанным методикам проведены экспериментальные исследования соответствующих режимов.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что АД с питанием якоря от инвертора напряжения и управлением по фазе тока имеет характеристики, аналогичные двигателю постоянного тока (рис.11-12).

Естественные механические характеристики АД с питанием от инвертора напряжения и управлением по фазе тока близки к характеристикам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Соответственно, и рабочие характеристики АД близки к характеристикам двигателя постоянного тока.

Скоростная характеристика для приводов с мощным АД при малых значениях активного сопротивления якоря - жесткая в диапазоне номинальных нагрузок. Лучшие энергетические показатели и перегрузочную способность имеет привод при  $\varphi = 0^\circ$  в связи со снижением размагничивающего действия реакции якоря на основной магнитный поток, в данном режиме со стороны якоря потребляется чисто активная мощность, а реактивная мощность поступает со стороны возбуждения.

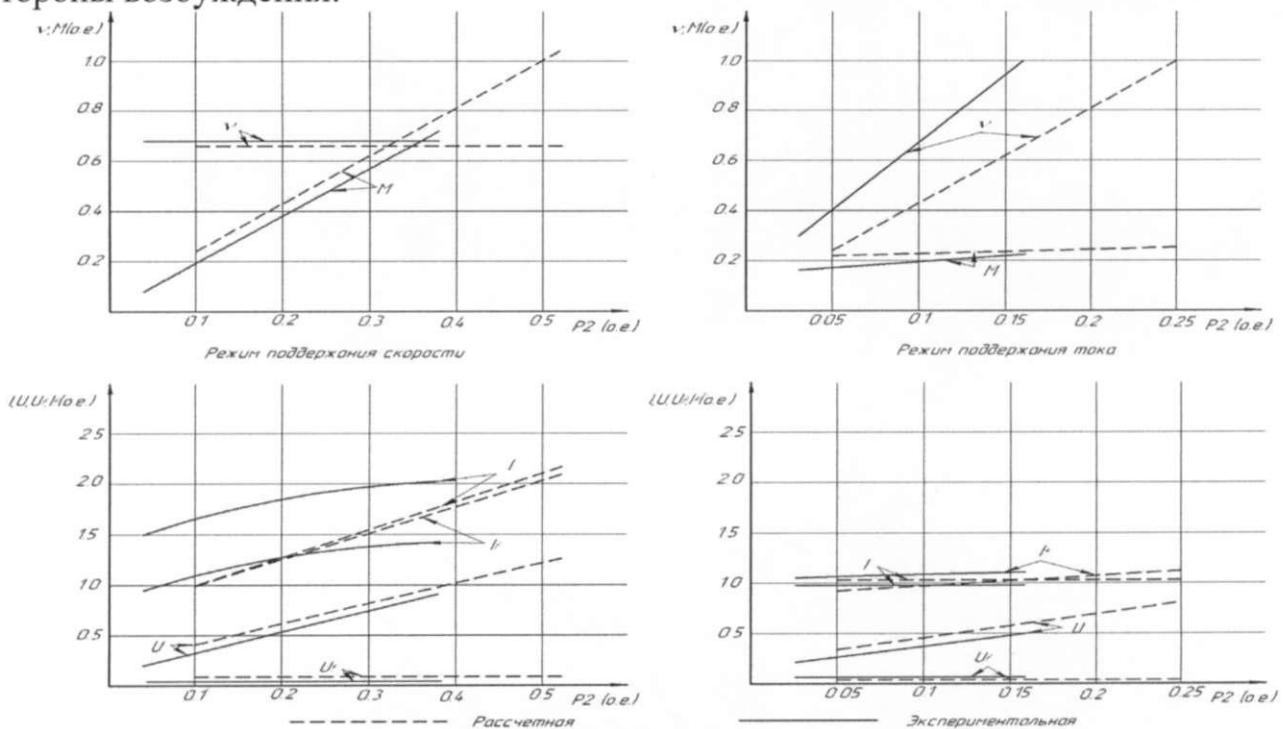


Рис. 12. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований АД с управлением по фазе тока



Разброс токов якоря объясняется тем, что теоретическая модель не учитывает, что преобразователь частоты возбуждения не может осуществить рекуперацию энергии возбуждения в сеть. Это приводит к тому, что в момент времени, когда мощность направлена от двигателя к преобразователю, происходит накапливание энергии в конденсаторе звена постоянного тока, и в момент отпирания очередного вентиля вся накопленная энергия отдается обратно в двигатель, что наблюдается по характерным выбросам напряжения в цепи возбуждения. А на низкой частоте даже небольшое изменение напряжения приводит к значительному изменению тока. Экспериментально замечено, что на более низких частотах (3-5 Гц) в определенном диапазоне нагрузок данный эффект отсутствует. Отсюда можно дать рекомендацию работать на более низких частотах, либо применять специализированный преобразователь, в котором предусмотрена возможность сброса энергии в сеть, например, преобразователь типа Front End.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработан и исследован новый вариант асинхронизированного вентильного двигателя с преобразователем низкой фиксированной частоты и ШИМ возбуждения, преобразователем частоты якоря со звеном постоянного тока и зависимым инвертором напряжения на полностью управляемых силовых вентилях – IGBT модулях, управляемым по фазе тока.

В процессе диссертационного исследования получены следующие результаты и выводы:

1. Разработан принцип работы асинхронизированного вентильного двигателя с управлением по фазе тока.

2. Создан экспериментальный стенд для исследования процессов электромеханического преобразования энергии асинхронизированным вентильным двигателем в контактном и бесконтактном исполнении согласно разработанной структурной схеме, на котором подтверждены теоретические положения его работы с управлением по фазе тока и доказана его способность работать в режимах, аналогичных двигателю постоянного тока с независимым возбуждением.

3. Разработана микроконтроллерная система управления для управления асинхронизированным вентильным двигателем по фазе тока и обеспечения его режимов пуска, которая позволяет жестко фиксировать фазу напряжения относительно фазы тока якоря с любым фазовым сдвигом, заданным в электрических градусах, во всем диапазоне рабочих частот

4. Созданные математические модели квазиустановившихся и динамических режимов работы показали, что поддержание скорости возможно путем изменения напряжения якоря. Зависимость мощности на валу от напряжения якоря при этом носит линейный характер.

5. Разработана измерительная система для снятия характеристик асинхронизированного вентильного двигателя на базе программно-аппаратного комплекса LabView для анализа и прогнозирования его энергоэффективности, которая показала, что применение инвертора напряжения в цепи якоря с использованием ШИМ напряжения якоря приводит к увеличению коэффициента мощности двигателя.

## **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рекомендованных ВАК РФ научных журналах**

1. Юшков И.С. Естественные характеристики асинхронизированного вентильного электродвигателя на базе инвертора напряжения / Казаков Ю.Б., И.С. Юшков, И.В. Гуляев // Вестник ИГЭУ – 2010. – № 3. – С. 56-59.

### **В других журналах и изданиях**

2. Юшков И.С. Несимметричная схема выпрямления на IGBT - транзисторах с ШИМ – управлением / И.С. Юшков, А.В. Карасев // Материалы XI научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарева: в 3 ч. Ч. 3: Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – С. 10.

3. Юшков И.С. Современные принципы построения асинхронизированного вентильного двигателя / И.С. Юшков, И.В. Гуляев // Труды XIV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – С. 441-442.

4. Юшков И.С. Перспективные направления исследований асинхронизированного вентильного двигателя / И.С. Юшков, И.В. Гуляев, А.Н. Ломакин, Г.М. Тутаев // Наука и инновации в Республике Мордовия: материалы VII респ. Науч.-практ. Конф. Саранск, 2008. – С. 584-587.

5. Юшков И.С. Моделирование зависимого инвертора напряжения ведомого по фазе тока / И.С. Юшков, И.В. Гуляев, А.Н. Ломакин, Г.М. Тутаев // «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2008. Материалы международной научно-технической конференции. Саратов, 2008. – С. 350-354.

6. Юшков И.С. Моделирование динамических процессов в обобщенной электромеханической системе при векторном управлении / И.С. Юшков, И.В. Гуляев, А.Н. Ломакин, Г.М. Тутаев // Материалы IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2008. В 7 томах. Т. 7. – Новосибирск, 2008. - С. 129-133.

7. Юшков И.С. Система управления преобразователя частоты якоря асинхронизированного вентильного двигателя / И.С. Юшков, И.В. Гуляев, Г.М. Тутаев // Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Энергетика-2008: инновации, решения, перспективы». В 5 кн.; Кн. 4 «Энергомашиностроение». - Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2008. – С. 148-152.

8. Юшков И.С. Моделирование работы асинхронизированного вентильного двигателя с инвертором напряжения ведомого по фазе ЭДС якоря / И.С. Юшков, И.В. Гуляев // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: сборник трудов Международной научно-технической конференции. Тольятти. В 3-х ч. – Тольятти: ТГУ, 2009. - Ч. 1. – С. 282-286.

9. Юшков И.С. Экспериментальные исследования статического режима асинхронизированного вентильного двигателя с управлением по фазе тока при поддержании неизменной скорости вращения вала / И.С. Юшков, И.В. Гуляев // Материалы Итоговой региональной научно-практической конференции «Научный потенциал молодежи – будущему Мордовии»: в 2 ч. Ч. 2: Естественные и технические науки. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – С. 178-180.

10. Юшков И.С. Исследование угла нагрузки асинхронизированного вентильного двигателя в режиме поддержания номинального тока якоря / И.С. Юшков, И.В. Гуляев // Материалы XIV научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарева: в 2 ч. Ч. 1: Технические и естественные науки – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. С. 27-29.

11. Юшков И.С. Микроконтроллерная система управления преобразователя частоты якоря асинхронизированного вентильного двигателя / И.С. Юшков, И.В. Гуляев // Электронное научное издание «Электроника и информационные технологии» - выпуск 2 (4) — 2008. № гос. регистрации 0420800067. Идентификационный номер: 0420800067\0012 — Режим доступа: [http://fetmag.mrsu.ru/2008-2/pdf/06\\_Asinchro.pdf](http://fetmag.mrsu.ru/2008-2/pdf/06_Asinchro.pdf)

12. Юшков И.С. Исследование момента асинхронизированного вентильного двигателя в режиме поддержания номинального тока возбуждения / И.С. Юшков, И.В. Гуляев // Электронное научное издание «Электроника и информационные технологии» - № 2 (6) - 2009. № гос. регистрации 0420800067. Идентификационный номер: 0420900067\0031. Режим доступа: <http://www.fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/Asynchronous.pdf>

#### **Патенты и свидетельства**

13. Пат. РФ на полезную модель № 87303 кл. Н 02 М 7/48, 2009. Опубл. 27.09.2009. Бюл. № 27 Устройство для управления инвертором напряжения вентильного двигателя / И.В. Гуляев Г.М. Тутаев, И.С.Юшков; Мордовский госуниверситет им. Н.П. Огарева.

14. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009615450 «Программа обработки экспериментальных исследований электропривода» / И.В. Гуляев, Г.М. Тутаев, И.С.Юшков, М.В Ильин; Мордовский госуниверситет им. Н.П. Огарева.

**Личный вклад автора.** В работах автору принадлежат: обобщение результатов [1, 2, 3, 4]; реализация математической модели [5, 6, 8, 11]; методические подходы [9]; выполнение расчетов и практическая реализация [10]; разработка программы [12-13], разработка функциональных схем [7].

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета  
Д212.217.04 ГОУ ВПО Самарский государственный технический университет  
(Протокол №11 от 26 октября 2010 г.)

Подписано в печать 27.10.10.  
Объем 1,25 п. л. Тираж 100 экз. Заказ № 1639.  
Типография Издательства Мордовского университета  
430005, г. Саранск, ул. Советская, 24