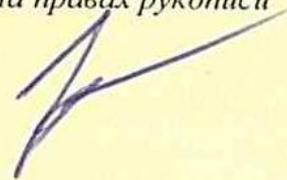


На правах рукописи



Козлов Владимир Владимирович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С КОРРЕКЦИЕЙ
СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Специальность 05.09.03

«Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2012 год

Диссертация выполнена на кафедре 702 «Системы приводов авиационно-космической техники» Московского Авиационного Института (Национального Исследовательского Университета)

Научный руководитель: Попов Борис Николаевич
доктор технических наук, заместитель директора по научной работе ФГУП «МОКБ «МАРС», профессор кафедры 702 «Системы приводов авиационно-космической техники» МАИ,

Официальные оппоненты: Горячев Олег Владимирович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматического управления» Тульского государственного университета

Трубачёв Александр Тимофеевич
кандидат технических наук,
главный специалист «Аэроэлектромаш»

Ведущая организация: ЗАО «АэроЭлектроПривод»

Защита диссертации состоится «27» ноября 2012г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском Авиационном Институте (Национальном Исследовательском Университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4, главный административный корпус, зал заседаний учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Авиационного Института (Национального Исследовательского Университета).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим выслать по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4, МАИ, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан « » 2012 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.125.07
Кандидат технических наук, доцент



Кондратьев А.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Вентильный двигатель (ВД), благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам, является перспективной электрической машиной в широком диапазоне мощностей. ВД прост и надёжен по конструкции, не имеет потерь на возбуждение. Эти качества выделяют его из ряда всех остальных машин и обеспечивают ему применение в системах автоматики, приводах прецизионных следящих систем авиационной и другой техники.

Метод коррекции статических характеристик (КСХ), рассматриваемый в работе, является одним из видов векторного управления синхронными двигателями. Достоинством данного метода является возможность управления синхронным двигателем без измерения фазных токов и отсутствие преобразователей координат.

Цифровая коррекция статических характеристик ВД с управлением на базе микроконтроллеров либо ПЛИС и синусоидальной формой токов статора позволяет повысить КПД привода в целом и обеспечить линейность механических и регулировочных характеристик. Линейность статических характеристик преследует две цели: возможность построения разомкнутого по скорости электропривода и улучшение динамических характеристик электропривода, замкнутого по скорости.

Анализ вопросов возникающих в ходе разработки и эксплуатации электроприводов, а так же изучение опубликованной литературы, позволяют сделать вывод о том, что разработка и экспериментальная проверка математической модели ВД с цифровым управлением на основе методов КСХ и введёнными корректирующими связями является актуальным научно-технической задачей.

Цель и задачи работы

Целью работы является исследование методов КСХ, получение закона коррекции для управления по фазному напряжению, упрощение структуры системы управления ВД с КСХ за счёт исключения преобразователя координат, повышение КПД и улучшение статических характеристик системы с ВД и КСХ в условиях нестабильности питания, технологического разброса параметров двигателя и воздействия окружающей среды.

Задачи исследования:

1. Получение математического описания контура управления в базисе «угол коррекции-фазное напряжение» ($U_m = \text{const}$).
2. Исследование корректирующей характеристики в зависимости от параметров двигателя.
3. Разработка математической модели системы ВД с цифровым устройством управления.
4. Разработка методики цифровой коррекции статических характеристик ВД, в которой учитывается наличие корректирующей связи по напряжению питания.
5. Сравнительный анализ классического векторного управления и управления с коррекцией статических характеристик при $U_m = \text{const}$ и при $U_q = \text{const}$.
6. Экспериментальная проверка разработанных методик и алгоритмов.

Методы исследования

Исследование ВД с КСХ и разработка системы управления выполнены с использованием теории функций комплексной переменной, теоретических основ электротехники и теории автоматического управления.

Численные методы применяются в виде пакетов программ Maple, MatLab, Simulink. Обработка экспериментальных данных производится с применением программы Matlab и MS Excel.

Оценка адекватности разработанных математических моделей и физической модели выполнена при проведении натурных исследований экспериментального образца ВД.

При выполнении экспериментальных исследований использовались вычислительные возможности платы SciBoard, а так же оборудование лабораторного стенда.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Получено математическое описание контура управления с коррекцией статических характеристик при $U_m = \text{const}$.
- На базе анализа влияния параметров двигателя, изменяющихся под воздействием окружающей среды, вследствие технологического разброса, а так же при нестабильности питания, были получены зависимости корректирующей характеристики и ошибки в коррекции от данных параметров.
- Предложена структура системы управления, отличающаяся от известных наличием корректирующей связи по напряжению питания и системой коррекции работающей по полной функции в базисе «угол коррекции-фазное напряжение» без использования преобразователей координат. Наличие корректирующей связи позволило повысить КПД ВД в номинальных режимах на 10% (в условиях нестабильного питания), работа без преобразователей координат позволила сократить объём вычислений.
- Разработана компьютерная модель системы ВД на базе полученного математического описания контура управления.
- Доказана адекватность способа коррекции путём:
 - 1) Исследования минимизации тока d на математической модели.
 - 2) Измерения взаимного положения тока фазы и фазы противо-ЭДС как на математической модели, так и экспериментально.
 - 3) Сравнения с классическим методом векторного управления, использующего регуляторы тока d и q , как на математической модели, так и экспериментально.

Практическая значимость полученных автором результатов для теории и практики определяется следующим:

- Реализована компьютерная модель системы ВД на базе полученного математического описания контура управления.
- Проанализировано влияние параметров двигателя, изменяющихся под воздействием окружающей среды, на форму корректирующей характеристики и ошибку в коррекции.
- Проведено сравнение в одинаковых условиях векторного управления и управления с различными методами КСХ. Даны рекомендации по выбору и применению того или иного способа.

Результаты, выносимые на защиту

- Законы КСХ ВД, обеспечивающие повышение КПД, линеаризацию статических характеристик и повышение электромагнитного момента.
- Математические модели системы ВД с коррекцией статических характеристик .
- Структура системы управления ВД с КСХ при $U_m = \text{const}$, имеющая корректирующую связь по напряжению питания

Достоверность результатов

Достоверность научных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждаются корректным использованием математического аппарата теории автоматического управления и электрических машин, математическим моделированием на базе апробированных математических моделей, экспериментальными исследованиями макета, достаточной апробацией и публикациями полученных результатов.

Внедрение результатов

Результаты работы нашли применение в цифровых приводах ЭП-50/120, ЭП-120/350, СЛГ-270, разработанных ЗАО «АэроЭлектроПривод», и внедрены в учебный процесс на кафедре «Системы приводов авиационно-космической техники».

Апробация работы и публикации

Результаты работы были доложены и обсуждены на международных научно-технических семинарах «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», 2008-2010 гг., Алушта.

Основные материалы диссертации опубликованы в четырёх печатных работах, одна из которых - в издании, входящем в перечень рецензируемых научных журналов и изданий высшей аттестационной комиссии РФ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 63 наименований. Основная часть работы изложена на 132 страницах машинописного текста, иллюстрированного 91 рисунком и 12 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, задачи и методы исследования, научная новизна, практическая значимость, достоверность и апробация результатов диссертации. Дана характеристика публикаций, структуры и объема работы.

В первой главе рассматриваются методы векторного управления и управления с коррекцией статических характеристик.

Производится постановка задач работы в области управления с КСХ. Разрабатывается математическая модель системы управления ВД, использующую в основе стационарную систему координат.

Исходными, являются следующие уравнения, полученные при обычных допущениях:

$$Us = U_m \sin(\omega \cdot t + \Delta\varphi_u) - \omega \cdot C_e \sin(\omega \cdot t) = U_{sm} \cdot \sin(\omega \cdot t + \Delta\varphi');$$

$$\Delta\varphi_u = -\arctan\left(\frac{U_d}{U_q}\right);$$

$$u_d^2 + u_q^2 = U_m^2$$

$$U_d = R \cdot i_d + p \cdot \Psi_d - \omega \cdot \Psi_q;$$

$$U_q = R \cdot i_q + p \cdot \Psi_q - \omega \cdot \Psi_d;$$

$$\Psi_d = L \cdot i_d + \Psi_{fd};$$

$$\Psi_q = L \cdot i_q,$$

где U_m – амплитудное значение фазного напряжения; Us и U_{sm} – суммарное мгновенное и амплитудное напряжение фазы соответственно; ω – электрическая частота вращения, C_e – коэффициент противо-ЭДС фазы, L и R – индуктивность и сопротивление фазы соответственно, $\Delta\varphi'$ – фазовый сдвиг между вектором напряжения Us и током фазы, обусловленный электромагнитной постоянной времени $T_\phi = L/R$; $\Delta\varphi_u$ – угол коррекции, $\Psi_{fd} = \Psi_f$ – вектор потокосцепления от постоянных магнитов, $p = \frac{d}{dt}$.

Решая систему из данных уравнений относительно U_d и $\Delta\varphi_u$, были получены законы КСХ при $U_q = \text{const}$ (известный)(1) и $U_m = \text{const}$ (предлагаемый)(2) соответственно:

$$u_d = \omega \cdot T_\phi (C_e \cdot \omega - u_q); \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\varphi_u = \arctg\left(\frac{u_d}{\sqrt{U_m^2 - u_d^2}}\right) \\ u_{d1,2} = \frac{-\frac{C_e}{T_\phi} \pm \sqrt{\frac{U_m^2}{\omega^2 T_\phi^2} + U_m^2 - \omega^2 C_e^2}}{1 + \frac{1}{\omega^2 T_\phi^2}}; \end{array} \right. \quad (2)$$

Вводится понятие корректирующей характеристики $D\varphi_u = f(U_m, \omega)$ (см. рис.1).

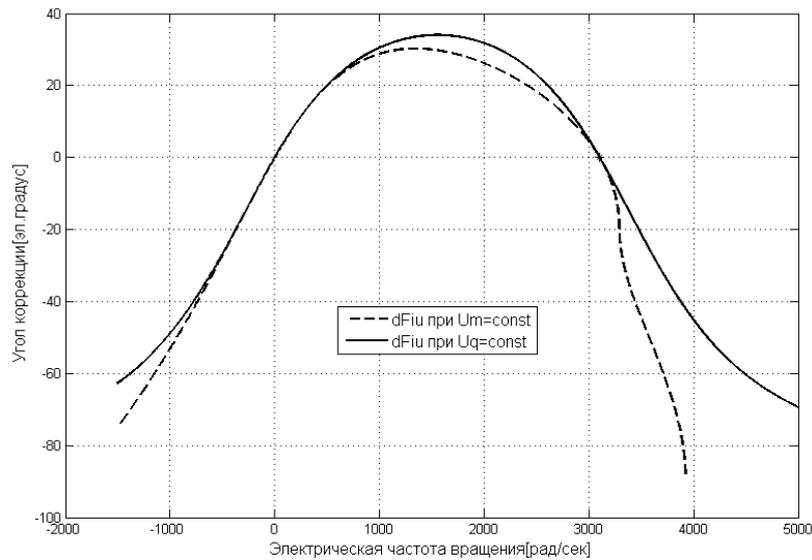


Рис.1. Корректирующие характеристики.

Проводится анализ влияния на корректирующую характеристику параметров двигателя, изменяющихся под воздействием окружающей среды.

На базе полученных выражений и проведённого анализа, в конце главы, предлагается структурная схема системы управления ВД с коррекцией статических характеристик (рис. 2), содержащую корректирующую связь по напряжению питания и блок системы коррекции, работающий в базисе «угол коррекции-фазное напряжение».

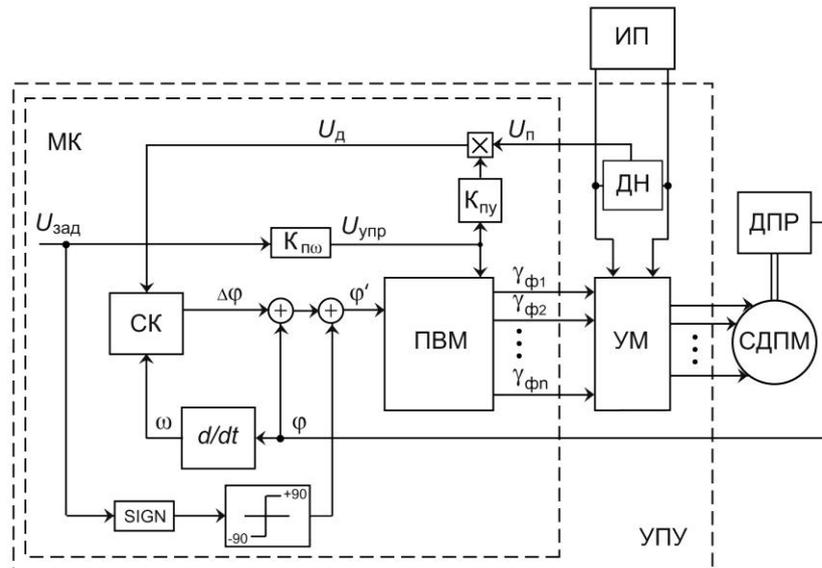


Рис.2. Структура вентильного двигателя с произвольным количеством фаз и статической коррекцией

Данная структурная схема позволяет отказаться от использования преобразователей координат, использовать блок системы коррекции (СК) по полной функции (коррекция по скорости и фазному напряжению), а так же обеспечить работу блока СК с модулями входных величин, что позволяет снизить требуемый объем памяти для МК или ПЛИС.

Во второй главе кратко представлены полные математические модели для контуров управления и самого вентильного двигателя, которые будут использованы при математическом моделировании в среде MatLab/Simulink и при синтезе систем управления для экспериментальных исследований.

В третьей главе приведены разработанные с использованием пакета моделирования MatLab/Simulink и расширения SimPowerSystems компьютерные модели системы ВД для векторного управления и управления с КСХ.

Для объективных и наглядных исследований модели для обоих типов управления созданы по одной концепции (см. рис.3 и рис.4). Результаты моделирования предоставляются так же в одном формате для обоих способов управления. На рис.5 приводятся характеристики систем с КСХ.

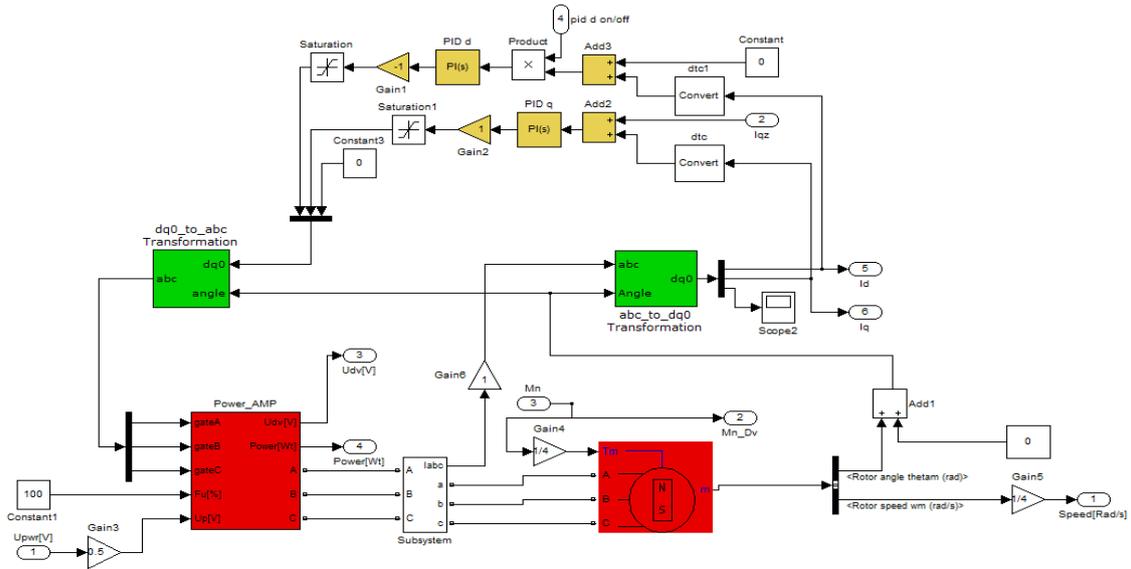


Рис.3. Компьютерная модель системы ВД с векторным управлением.

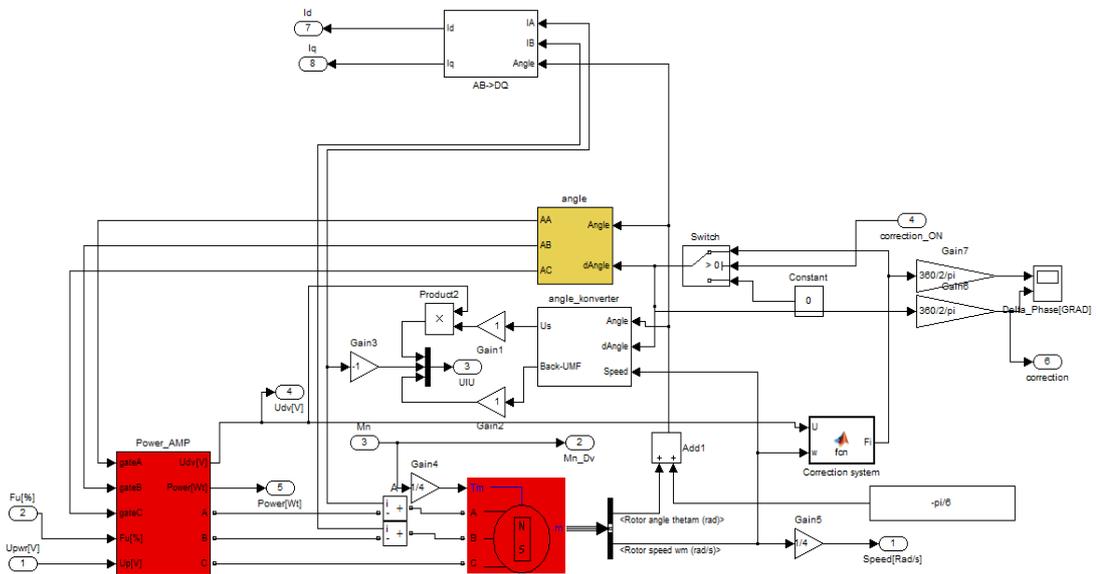
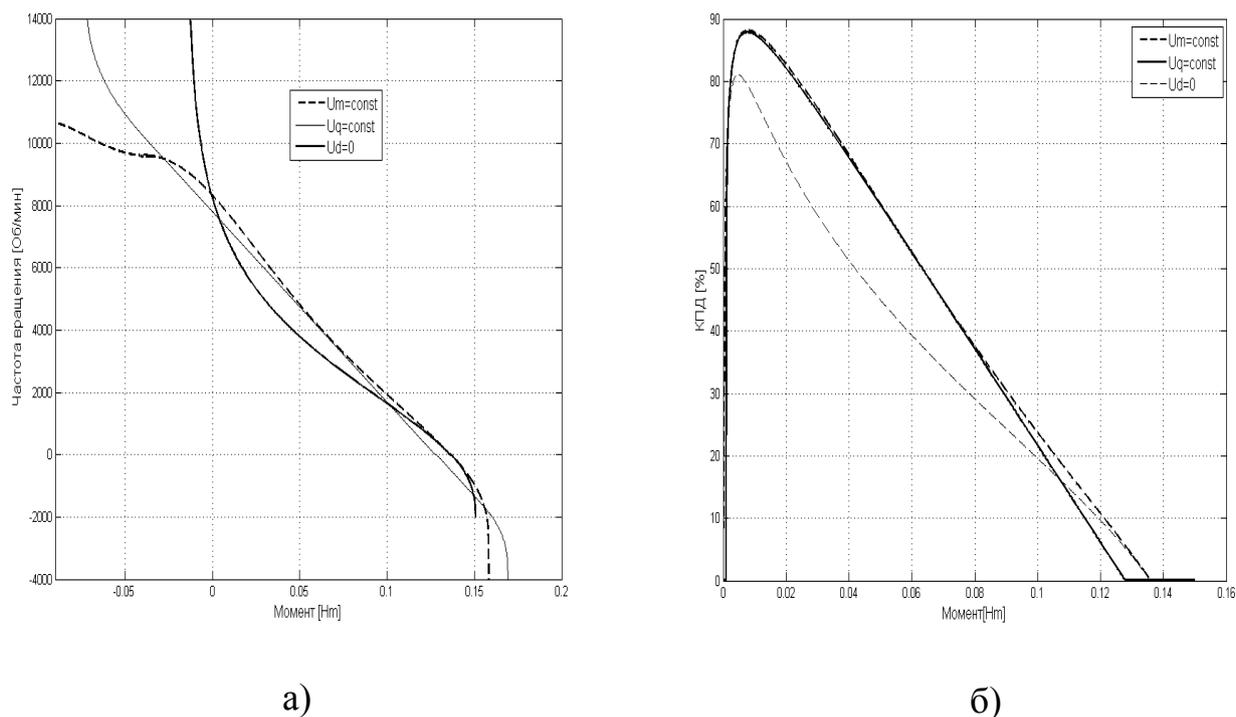


Рис.4. Компьютерная модель системы ВД на основе управления с коррекцией статических характеристик.



а) б)
 Рис.5. Статические характеристики(механическая(а) и энергетическая(б)) скорректированных при $U_m = \text{const}$ и $U_q = \text{const}$, и нескорректированного ВД в условиях ограниченного напряжения питания.

В результате математического моделирования показано, что в условиях статичности основных параметров двигателя статические характеристики полностью совпадают при векторном управлении и управлении с коррекцией статических характеристик при $U_q = \text{const}$. КСХ при $U_m = \text{const}$ имеет незначительную нелинейность ($\sim 3\%$), однако более адекватно работает в условиях ограниченного напряжения сети. Проведено исследование минимизации тока d и показано, что при подключении блока коррекции к нескорректированной системе ток d сводится к нулю и ток фазы устанавливается в противофазе противо-ЭДС (см. рис.6.). Тем самым подтверждается правильность разработанной математической модели в рамках сделанных допущений.

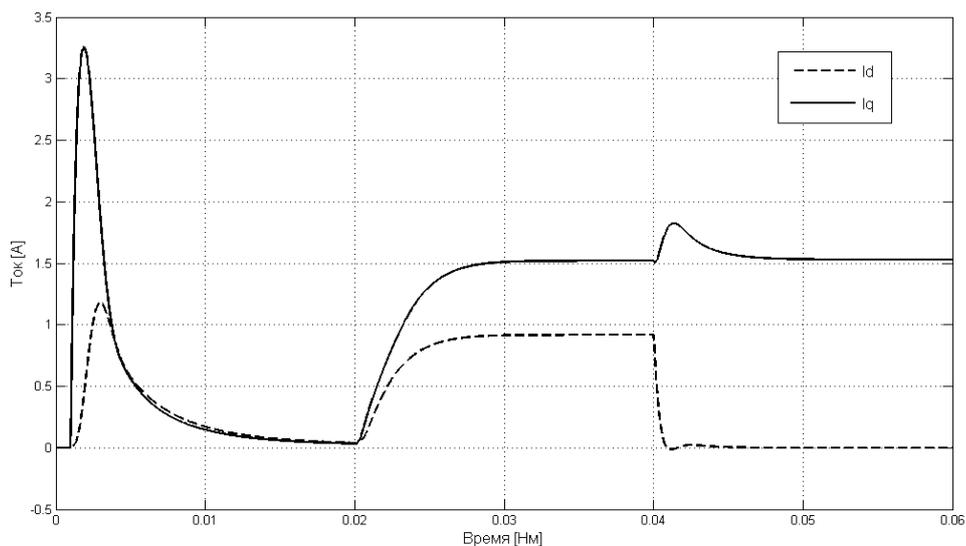


Рис. 6. Переходной процесс токов по осям D и Q (до 0.03 сек. – разгон до холостого хода, 0.03 сек. – скачкообразное изменение нагрузки, 0.06 сек. – включение системы коррекции)

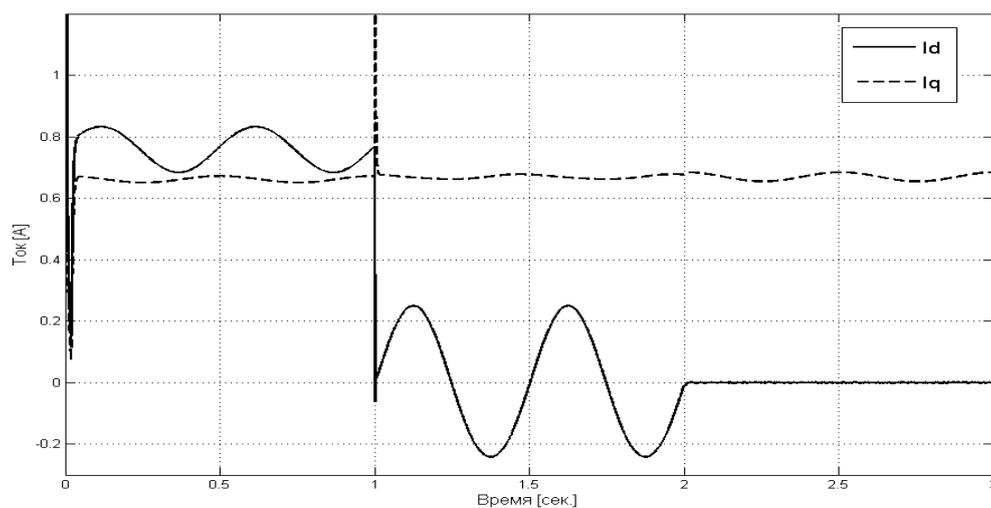


Рис. 7. Переходной процесс токов по осям D и Q при синусоидальных колебаниях напряжения питания $\pm 10\%$ (до 1 сек. – без коррекции, 0.03 сек. – включение коррекции (ОС по напряжению питанию выкл.), 0.06 сек. – включение ОС по напряжению питанию)

Дополнительно проведено исследование работы корректирующей связи по напряжению в условиях нестабильного напряжения питания и показана её эффективность (рис.7.). Наличие корректирующей связи позволило сохранить линейность и параллельность статических характеристик и повысить КПД ВД в номинальных режимах до 7% в условиях нестабильности питания $\pm 10\%$, и до 15% при аварийном питании на 30% ниже нормы.

При математическом моделировании исследовано влияние изменения параметров двигателя под воздействием окружающей среды и при технологическом разбросе параметров. Обобщить результаты данного исследования можно следующим образом:

- Изменение сопротивления обмотки при перегреве на 60°C приводит к ошибке угла коррекции до $\pm 15\%$, что в свою очередь ведёт к потере возможного КПД до 2-4%.

- Технологический разброс в 5% значения индуктивности приводит к ошибке угла коррекции до $\pm 8\%$, что в свою очередь ведёт к потере КПД до 1-2%.

- Технологический разброс в 5% значения коэффициента против-ЭДС приводит к ошибке угла коррекции до $\pm 10\%$ в номинальных режимах, что в свою очередь ведёт к потере КПД до 1-2%.

Таким образом, в большинстве случаев применения статической коррекции для приводов малой мощности данный метод позволяет повысить КПД на 10-20% без использования коррекции по сопротивлению обмотки и на 15-20% с её использованием. Технологический разброс таких параметров как индуктивность и коэффициент против-ЭДС учитывать не имеет смысла (обычно их разброс не превышает даже 3% при серийном производстве), т.к. потери КПД не будут превышать 1-2%.

В четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию системы управления с коррекцией статических характеристик и её сравнению с системой векторного управления.

В начале главы приводится описание экспериментального стенда (см. рис.8 и рис.9) , методики синтеза системы коррекции и методик эксперимента.



Рис.8. Экспериментальный стенд.



Рис.9. Плата управления вентильным двигателем

При проведении эксперимента для различных режимов двигателя показана (рис.10) адекватность разработанной системы коррекции путём измерения взаимного положения тока фазы и противо-ЭДС фазы (определяется по ДПР).

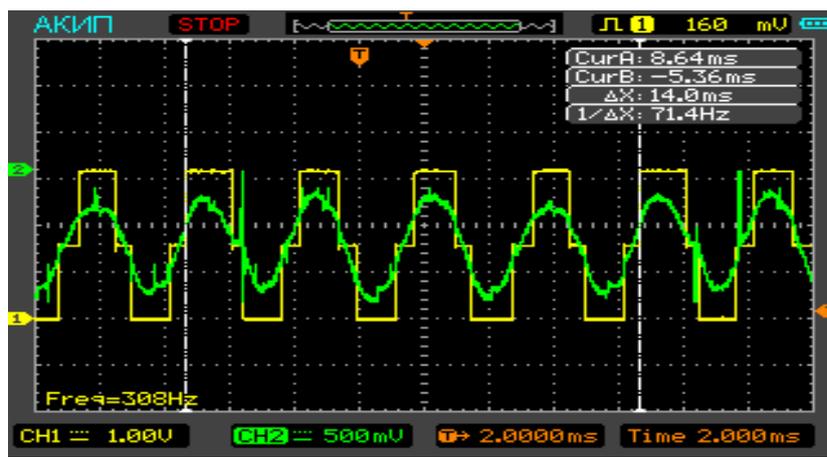


Рис.10. Взаимное расположение тока фазы и фазы противо-ЭДС.

На рис. 11 показаны статические характеристики, полученные в ходе эксперимента в одних и тех же условиях испытания, но при различных методах управления.

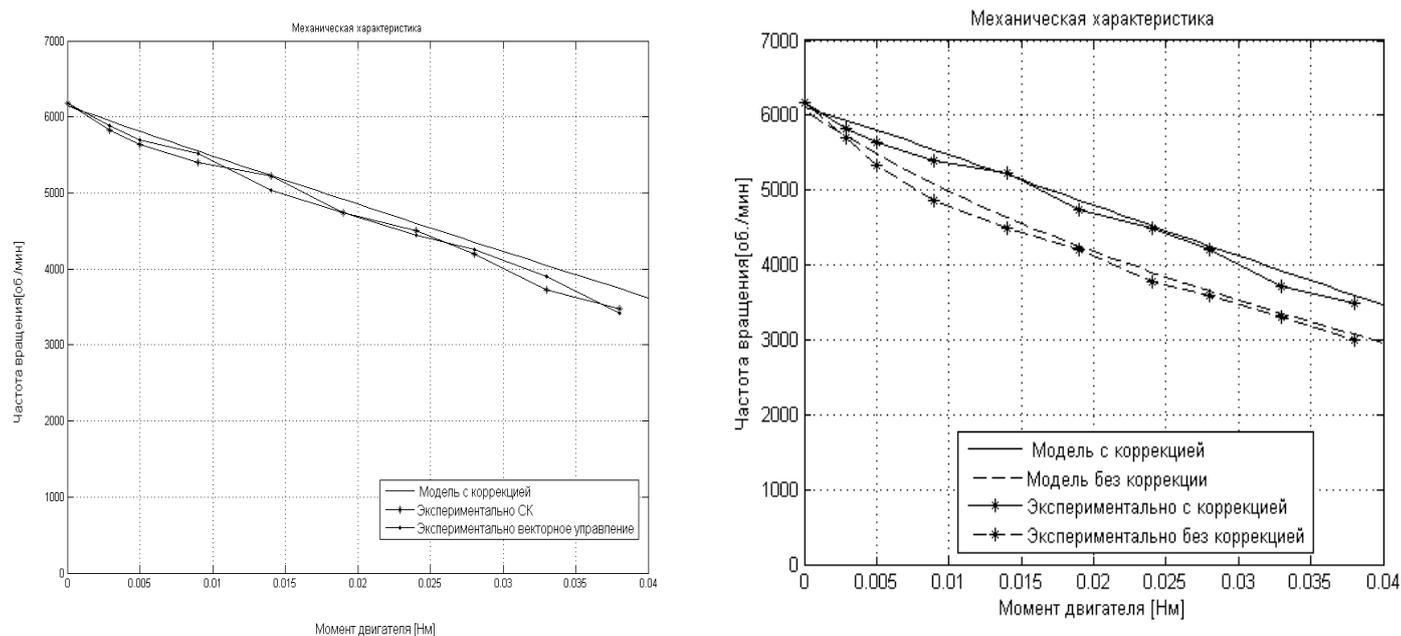


Рис. 11. Механические характеристики при различных типах управления (наложены на результаты математического моделирования)

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель контура управления вентильного электродвигателя, отличающаяся от известных наличием корректирующей связи по напряжению питания, отсутствием преобразователей координат, работой без использования фиктивных параметров.
2. Получены новые законы коррекции статических характеристик вентильного двигателя для коррекции при $U_m = \text{const}$, обеспечивающие минимизацию токов, повышение КПД и линеаризацию СХ.
3. Предложена структура управления ВД для систем на базе ПЛИС и МК, использующая корректирующую связь по напряжению питания и функционирующую без использования преобразователей координат.

4. Проведён анализ влияния изменений параметров двигателя под воздействием окружающей среды на форму и ошибку корректирующей характеристики. Введение корректирующей связи позволило повысить КПД ВД в номинальных режимах на 15% (в условиях нестабильного питания) и сохранить линейность статических характеристик, а работа без преобразователей координат позволила сократить объём вычислений, а так же снизить объём требуемой памяти на блок СК в два раза при реверсивном использовании двигателя, благодаря работе с модулями величин скорости и напряжения.
5. Получены экспериментальные статические характеристики вентильного двигателя при отсутствии коррекции и при введении коррекции, подтвердившие эффективность разработанных законов цифровой коррекции для повышения КПД и линеаризации статических характеристик.
6. Доказана адекватность предлагаемого способа коррекции путём:
 - 1) Исследования минимизации тока d на математической модели.
 - 2) Измерения взаимного положения тока фазы и фазы противо-ЭДС как на математической модели, так и экспериментально.
 - 3) Сравнения с классическим методом векторного управления, использующего регуляторы тока d и q , как на математической модели, так и экспериментально.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ермошин К.С., Козлов В.В., Попов Б.Н. Хуснулина И. Р., Методическое пособие по разработке электронных устройств на основе ПЛИС фирмы Altera в среде Quartus II с использованием платы DE2 // XVII Международный научно-технический семинар, Алушта, 2008.
2. Ермошин К.С., Козлов В.В., Мафтер В.И., Попов Б.Н., Шалыгин А.Н. Метод повышения мощности вентильного двигателя // XVIII Международный научно-технический семинар, Алушта, 2009.
3. Козлов В., Мещерская Е.М., Попов Б.Н. Вычисление скорости и обнаружение отказов в системах с вентильными двигателями // XIV Международный научно-технический семинар, Алушта, 2010.
4. Козлов В., Попов Б.Н. Цифровая коррекция статических характеристик вентильного двигателя // Электронный журнал «Труды МАИ», №49, 2011.