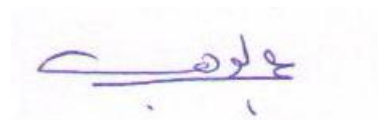


На правах рукописи



Амр Рефки Али Абд Эль Вхаб

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С
УЛУЧШЕННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА
БАЗЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Дементьев Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Иванчура Владимир Иванович

кандидат технических наук,
Богданов Александр Александрович

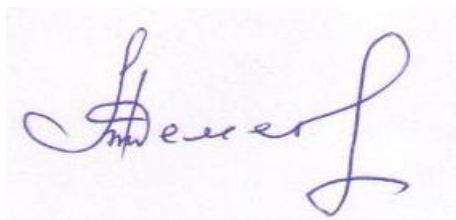
Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск.

Защита диссертации состоится « 12 » Марта 2012 г. в 15:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.11 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в ауд. 217 учебного корпуса 8 по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 или на сайте: www.lib.tpu.ru

Автореферат разослан « 09 » 02. 2012 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций



к.т.н., доцент

Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы.

Использование синхронных двигателей с постоянными магнитами является одним из перспективных направлений развития электропривода. Данные двигатели уже сейчас выпускаются в очень большом диапазоне мощностей, от единиц ватт, до десятков мегаватт. Преимуществом этих двигателей перед другими типами двигателей является малые габариты, возможность работать с высокой угловой скоростью, малый момент инерции ротора, малые электромеханическая и электромагнитная постоянные времени, что позволяет реализовывать на их базе высокодинамичные технические системы.

Перечисленные достоинства синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) делают их привлекательными в различных областях применения, в том числе и в робототехнике, где требуется сочетание таких качеств, как высокий момент, малые масса и габариты, высокое быстродействие.

Если массогабаритные показатели синхронных двигателей с постоянными магнитами формируются на стадии проектирования двигателя, то динамические характеристики определяются в большой степени системой управления. Существенный вклад в создание и усовершенствование СДПМ и электрических приводов на их основе занимались и занимаются многие Российские и зарубежные ученые А.К. Аракелян, А.А. Дубенский, О.Г. Вегнер, И.А. Вевюрко, Д.А. Завалишин, А. А. Готов, Д. В. Корельский, И. Е. Овчинников, В. В. Панкратов, Г. Г.Соколовский, В. А. Флоренцев, Т. Д. Батзел, С. Боючикер, Г. А. Саролино, Н. Габраил, А. Глюмианю, Д. Греинер, Ф. Е. Хюссин, Е. Кадиаппан, Ж. Х. Кан, Д. Х. Ким, Р. Мохамед, Ю. А. Мохамед, Ж. С. Мореира, П. Пиллаю, М. Рахман, Д. Тодд, М. Н. Уддин, П. Вас, Л. Зонг, и многие другие.

Как показывает анализ имеющихся работ, при разработке систем управления электропривода с СДПМ возникает противоречие между быстродействием электропривода и уровнем пульсаций электромагнитного момента. Реализация на практике системы управления электропривода на базе СДПМ, обеспечивающей улучшенные динамические характеристики, была затруднена ввиду недостаточной проработанности алгоритмов управления таким электроприводом. На основании вышеизложенного, следует отметить, что вопрос разработки алгоритмов управления электроприводом на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающий высокое быстродействие и низкий уровень пульсаций электромагнитного момента до сих пор окончательно не решен и является актуальным.

Объектом исследования является электропривод на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами для высокодинамичного технологического оборудования.

Предметом исследования являются алгоритмы управления электроприводом с СДПМ и его динамические характеристики

Целью диссертационной работы является улучшение динамических характеристик контура регулирования момента электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами для повышения его быстродействия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать алгоритмы управления СДПМ, обладающие высоким быстродействием и низким уровнем пульсаций электромагнитного момента;
2. Создать имитационные модели регулируемого электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами для исследования динамических характеристик;
3. Провести анализ влияния времени дискретизации системы управления электропривода на величину пульсаций электромагнитного момента;
4. Провести экспериментальные исследования электропривода на базе СДПМ с различными алгоритмами управления в динамических режимах и оценить полученные результаты.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись теоретические и экспериментальные методы исследований. При теоретических исследованиях использованы: математическая модель двигателя, базирующаяся на преобразованиях Парка-Горева, теория электрических машин и электрического привода, методы обобщенной электрической машины, математического анализа, компьютерного и математического моделирования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемой при исследовании математической модели, применением широко известной среды моделирования Simulink пакета Matlab, проверкой результатов на экспериментальной установке, качественным и количественным сопоставлением данных теоретических исследований с экспериментальными данными.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выявлены закономерности формирования знаков производных электромагнитного момента и модуля вектора потокосцепления статора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, позволяющие обеспечить эффективное управление состоянием СДПМ
2. Получены алгоритмы при непосредственном управлении ключами инвертора электроприводом на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, отличающиеся тем, что они обеспечивают высокое быстродействие при относительно низком уровне пульсаций электромагнитного момента.

3. Установлена взаимосвязь между максимально возможной амплитудой пульсаций электромагнитного момента СДПМ, временем дискретизации системы управления и параметрами двигателя, определяющая условия применения алгоритмов управления в реальном времени.

Практическая ценность работы:

На основании предложенных в работе алгоритмов для системы управления электроприводом на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами разработаны:

- Компьютерная программа моделирования в среде Matlab, позволяющая проводить исследования динамических и статических режимов электропривода;
- Программное обеспечение для системы управления, реализованной на серийно выпускаемом современном цифровом сигнальном микроконтроллере, электроприводом на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами.
- Экспериментальная установка, позволяющая провести качественную и количественную оценку результатов теоретических исследований.

Реализация результатов работы.

Результаты исследований внедрены в ООО НПФ «Мехатроника-Про» и в учебный процесс кафедры электропривода и электрооборудования (ЭПЭО) ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», а также использовались в научно-исследовательских работах кафедры ЭПЭО ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по созданию и разработке перспективных регулируемых электроприводов для робототехнических комплексов и высокودинамичного технологического оборудования, что подтверждено соответствующими актами.

На защиту выносятся:

1. Аналитические выражения, позволяющие построить алгоритмы формирования вектора напряжения статора, необходимые для регулирования модуля вектора потокосцепления статора и электромагнитного момента синхронного электродвигателя с постоянными магнитами;
2. Алгоритмы управления состоянием синхронного двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающие формирование максимально возможных величин производных момента и потокосцепления, с учетом ограничений по напряжению для получения максимального быстродействия;
3. Результаты сравнения статических и динамических характеристик синхронного двигателя с постоянными магнитами управляемого при помощи разработанных алгоритмов управления с классическими алгоритмами управления – полеориентированного управления и прямого управления моментом по быстродействию и пульсациям момента.
4. Функциональная зависимость между временем дискретизации системы управления синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, его параметрами и возможным уровнем пульсаций электромагнитного момента.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии». Томск, 2011. 24-26 мая 2011г.; на международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». ТПУ, г. Томск, 6 – 8 октября 2011 г.; на V Юбилейной международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» имени Г.А. Сипайлова, ТПУ, г. Томск, 12 – 14 октября 2011 г.; на международной научно-практической Интернет-конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании». Одесса, 21-28 декабря 2011 г., на конференциях энергетического института и научных семинарах кафедры электропривода и электрооборудования ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет в период 2009 – 2011 г.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 8 работах, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 3 работы опубликованы в сборниках конференций, получено 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, выполнена на 145 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунков, 6 таблиц, список использованной литературы из 127 наименований, и приложение из двух страниц. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы в области исследований: «Имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, разработка алгоритмов эффективного управления».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние проблемы, обоснована актуальность, сформулированы цель и основные задачи работы.

В первой главе показаны основные преимущества синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (СДПМ) перед другими типами двигателей, и проанализированы перспективные области их использования.

Одной из перспективных областей применения СДПМ является их использование в качестве сервоприводов робототехнических устройств. Это обусловлено такими конструктивными характеристиками СДПМ, как малые массогабаритные показатели, низкая инерционность, вызванная малым моментом инерции ротора и малой электромагнитной постоянной времени, возможность формировать относительно большой электромагнитный момент. Для обеспечения высокого быстродействия электропривода на базе СДПМ, как отдельную задачу можно рассматривать повышение быстродействия контура электромагнитного момента, который является силовым воздействием для механической подсистемы электропривода.

Решение этой задачи позволит повысить быстродействие электропривода в целом, а также позволит в ряде случаев существенно упростить процедуру синтеза алгоритмов управления электропривода со сложными кинематическими схемами.

Также в первой части проведен анализ научных исследований в области совершенствования систем управления электроприводов на базе СДПМ. Проведенный анализ показал, что подавляющее большинство работ направлены на совершенствование систем полеориентированного управления и прямого управления моментом. При этом, основными направлениями совершенствования являются снижение уровня пульсаций электромагнитного момента двигателя, улучшение динамических характеристик привода, а также бездатчиковое управление координатами электропривода.

Помимо этого в результате анализа выявлено, что алгоритмам прямого управления моментом присущ такой недостаток, как высокий уровень пульсаций момента, а для полеориентированного управления и некоторых других алгоритмов, построенных на базе использования инвертора с широтно-импульсной модуляцией, характерно существенно более низкое быстродействие по сравнению с системой прямого управления моментом.

На основании проведенного анализа в конце главы сформулирована цель работы и определены задачи исследований.

Во второй главе представлено математическое описание электропривода на базе СДПМ. Физическая модель трехфазного СДПМ приведена на рис. 1. Соответствующая ей математическая модель, с учетом общепринятых допущений имеет следующий вид:

$$\vec{u}_1 = R_1 \vec{i}_1 + \frac{d\vec{\psi}_1}{dt};$$

$$M_\Delta = L_1 (\Psi_1 \Psi_2^*),$$

где $\vec{u}_1$ - вектор фазного напряжения статора; R_1 - фазное активное сопротивление обмотки статора; $\vec{i}_1$ - вектор фазного тока статора; $\vec{\psi}_1$ - вектор фазного потокосцепления статора; M_Δ - электромагнитный момент двигателя; L_1 - индуктивность фазы статора; Ψ_2 - вектор потокосцепления ротора;

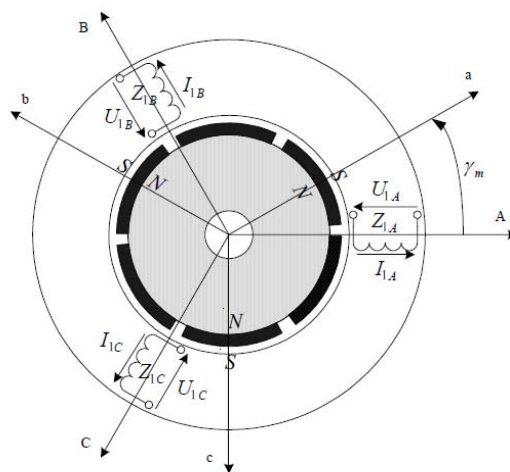


Рис. 1. Физическая модель СДПМ

$$\begin{cases} \vec{u}_1 = \frac{2}{3} [u_{1a}(t) + \bar{a}u_{1b}(t) + \bar{a}^2u_{1c}(t)] \\ \vec{i}_1 = \frac{2}{3} [i_{1a}(t) + \bar{a}i_{1b}(t) + \bar{a}^2i_{1c}(t)] \\ \vec{\psi}_1 = \frac{2}{3} [\psi_{1a}(t) + \bar{a}\psi_{1b}(t) + \bar{a}^2\psi_{1c}(t)] \end{cases}$$

$$\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \bar{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \Psi_2^* = \mathbf{D} \Psi_2; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} -$$

матрица поворота обобщенного вектора напряжения, тока, потокосцепления.

При разработке алгоритмов управления СДПМ большое распространение нашла двухфазная модель СДПМ в системе координат d - q , неподвижной относительно ротора. Математическая модель СДПМ при векторной форме записи в этом случае имеет вид:

$$\begin{cases} U_{1d} = R_1 i_{1d} + p(L_{1d} i_{1d} + \Psi_2) - \omega_r z_{\bar{r}} (L_{1q} i_{1q}); \\ U_{1q} = R_1 i_{1q} + pL_{1q} i_{1q} + \omega_r z_{\bar{r}} (L_{1d} i_{1d} + \Psi_2); \\ M_{\dot{\gamma}} = \frac{3}{2} z_{\bar{r}} (\psi_{1d} i_{1q} - \psi_{1q} i_{1d}); \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_{\dot{\gamma}} - M_c), \end{cases}$$

где ω – угловая частота вращения ротора. Структурная схема СДПМ в системе координат d - q представлена на рис. 2.

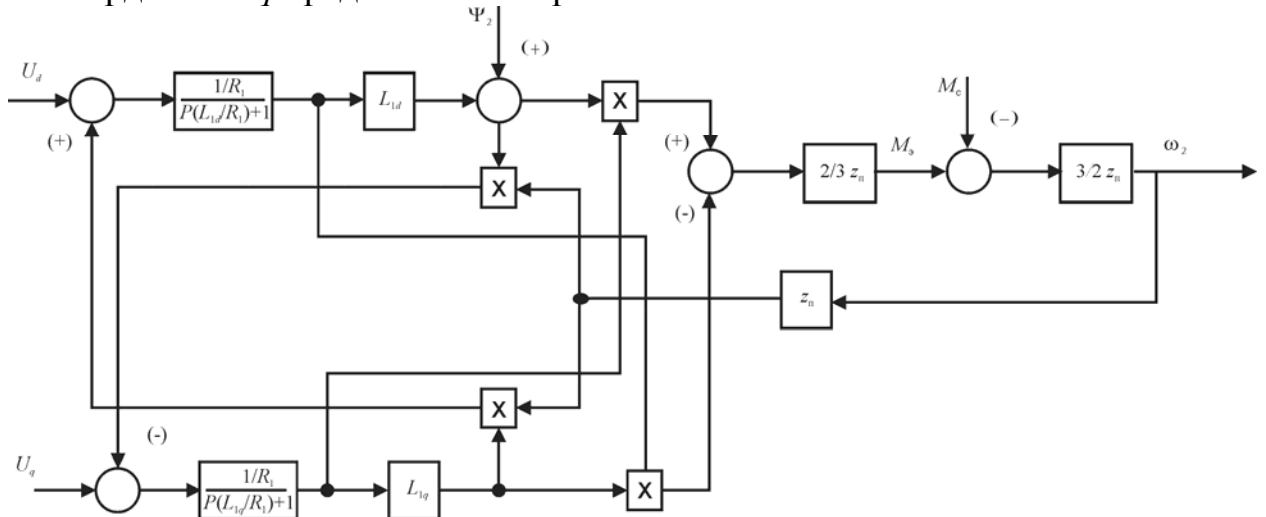


Рис. 2. Структурная схема СДПМ во вращающейся системе координат

Помимо модели СДПМ во второй главе рассмотрены наиболее распространенные системы управления СДПМ, к которым относятся полеориентированное управление и прямое управление моментом. На базе этих моделей было проведено компьютерное моделирование, при помощи которого были проанализированы динамические характеристики

электропривода. Сравнительный анализ этих способов управления показал, что быстроедействие электропривода с полеориентированным управлением на порядок хуже, чем в электроприводе с прямым управлением моментом. В тоже время, уровень пульсаций момента не превышает 4 % от номинального значения. Для прямого управления моментом, при частоте дискретизации 10 кГц уровень пульсаций момента превышал 100 %. Снижение уровня пульсаций удалось достичь за счет повышения частоты дискретизации до 100 кГц, но даже при этой частоте он составлял около 16 %.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов управления электропривода с улучшенными динамическими характеристиками на базе СДПМ.

Для синтеза алгоритмов управления был проведен анализ процессов, протекающих при управлении СДПМ. При этом за основу было взято то, что знак производной регулируемой величины определяет, движемся ли мы к цели управления или от нее. Например, если в некоторый момент времени электромагнитный момент больше заданного значения, то для достижения цели управления необходимо обеспечить отрицательный знак производной.

При этом, цели управления были заданы условиями:

$$\begin{aligned} |\Psi_{1ref}| - |\Psi_1| &\rightarrow 0; \\ |M_{ref}| - |M| &\rightarrow 0, \end{aligned}$$

где Ψ_{1ref} – заданное значение модуля вектора потокосцепления статора;
 M_{ref} – заданное значение электромагнитного момента.

Анализ зависимостей производных регулируемых величин показал, что знаки их производных определяются знаками скалярных произведений векторов потокосцеплений и ЭДС обмоток СДПМ, в соответствии с зависимостями:

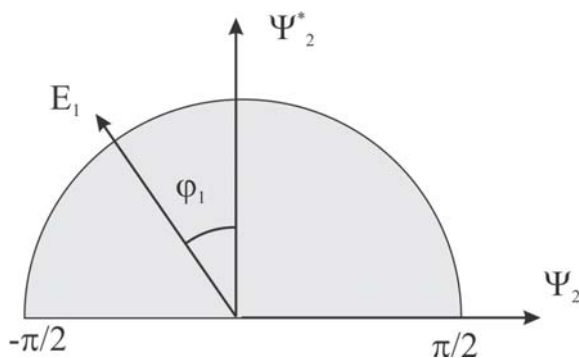


Рис. 3. Взаимное положение ЭДС статора и потокосцепление ротора, обеспечивающие положительную производную момента

$$\text{sign}(E_1 \Psi_2^*) = \text{sign} \dot{M}_{ref}; \quad (1)$$

$$\text{sign}(E_1 \Psi_1) = \text{sign} \dot{\Psi}_{1ref}, \quad (2)$$

где $E_1 = U_1 - I_1 R_1 - \omega \Psi_1^*$.

Другими словами, для того чтобы обеспечить требуемый знак производных регулируемых величин, достаточно чтобы взаимное расположение векторов потокосцеплений и ЭДС находилось в некоторой заданной области. Например, на рис. 3 показан сектор, нахождение в котором вектора ЭДС статора

гарантирует положительную производную электромагнитного момента.

Выразив требуемые для достижения цели управления знаки производных регулируемых величин через ошибки регулирования в виде

зависимостей:

$$\text{sign}(\dot{M}_{ref}) = \frac{M_{ref} - M}{|M_{ref} - M|};$$

$$\text{sign}(|\dot{\Psi}_{1ref}|) = \frac{|\Psi_{1ref}| - |\Psi_1|}{\left| |\Psi_{1ref}| - |\Psi_1| \right|},$$

а также приняв сонаправленность векторов, составляющих соответствующее скалярное произведение в (1) и (2), были получены универсальные алгоритмы совместного управления электромагнитным моментом и модулем вектора потокосцепления статора для системы координат $d-q$ в виде зависимостей:

$$\begin{cases} u_{1d} = \frac{1}{2} \left(k_2 \Psi_{1d} \frac{|\Psi_{1ref}| - |\Psi_1|}{\left| |\Psi_{1ref}| - |\Psi_1| \right|} + i_{1d} R_1 - \omega \Psi_{1q} \right); \\ u_{1q} = \frac{1}{2} \left(k_1 \Psi_{2d} \frac{M_{ref} - M}{|M_{ref} - M|} + k_2 \Psi_{1q} \frac{|\Psi_{1ref}| - |\Psi_1|}{\left| |\Psi_{1ref}| - |\Psi_1| \right|} \right) + i_{1q} R_1 + \omega \Psi_{1d}, \end{cases} \quad (3)$$

где k_1, k_2 – некоторые положительные знакоопределенные функции.

Выбор функций k_1 и k_2 будет определять скорость изменения электромагнитного момента и потокосцепления статора. В простейшем случае, можно взять эти функции в виде постоянных коэффициентов, тогда скорость изменения регулируемых величин будет независима от величины ошибки регулирования. Данный вариант реализации будет иметь ряд недостатков:

1. Задание малых значений коэффициентов будет способствовать низкому быстродействию системы.
2. Задание коэффициентов обеспечивающих хорошее быстродействие, при наличии задержки в формировании вектора напряжения определяемой периодом ШИМ, приводит к большим пульсациям регулируемых величин.
3. При работе на больших скоростях, когда ЭДС вращения близка к предельному напряжению, ограниченному величиной напряжения в цепи постоянного тока инвертора, возможно отклонение вектора напряжения от требуемого направления, что может негативно отразиться на динамике системы в целом.

Один из вариантов выбора функций k_1 и k_2 , исключающий перечисленные выше недостатки, заключается в том, чтобы производные регулируемых величин были пропорциональны ошибкам регулирования. При этом они будут определяться следующими зависимостями:

$$\begin{cases} k_1 = |M_{ref} - M| k_1'; \\ k_2 = \left| |\Psi_{1ref}| - |\Psi_1| \right| k_2', \end{cases}$$

где коэффициенты k_1' и k_2' должны выбираться из тех соображений,

чтобы ошибки регулирования электромагнитного момента и потокосцепления статора вносили одинаковый вес, и в тоже время, желательно, чтобы не вводили вектор напряжения в область ограничения. Для выполнения этих условий можно предложить их предварительный расчет по формулам:

$$\begin{cases} k_1' = \frac{U_{1max}}{M_H \psi_{2d}}; \\ k_2' = \frac{U_{1max}}{|\Psi_1|_H^2}, \end{cases}$$

где U_{1max} – максимальное напряжение, которое может сформировать инвертор; M_H – номинальный момент двигателя; $|\Psi_1|_H$ – номинальное значение потокосцепления статора двигателя.

Для обеспечения лучшего быстродействия был рассмотрен также вариант управления, когда формирование амплитуды вектора напряжения осуществлялось на уровне ограничений. В этом случае, после нахождения составляющих вектора напряжения в соответствии с (3) по приведенной выше методике, их значение нормировалось на максимальном уровне в соответствии с зависимостями:

$$u_{1d}' = u_{1d} \frac{U_{1max}}{|U_1|}; \quad u_{1q}' = u_{1q} \frac{U_{1max}}{|U_1|},$$

где U_{1max} – максимально возможное фазное напряжение обмотки статора, определяемое по формуле:

$$U_{1max} = \frac{2U_d}{3},$$

где U_d – напряжение цепи постоянного тока инвертора.

Также был рассмотрен вариант управления СДПМ при непосредственном управлении ключами инвертора. Для этого аналогично приведенному выше способу был получен алгоритм управления в неподвижной системе координат α - β :

$$\begin{aligned} u_{1\alpha} &= \frac{1}{2} \left(-k_1 \psi_{2\beta} \frac{M_{ref} - M}{|M_{ref} - M|} + k_2 \psi_{1\alpha} \frac{|\Psi_{1ref}| - |\Psi_1|}{\left| |\Psi_{1ref}| - |\Psi_1| \right|} \right) + i_{1\alpha} R_1; \\ u_{1\beta} &= \frac{1}{2} \left(k_1 \psi_{2\alpha} \frac{M_{ref} - M}{|M_{ref} - M|} + k_2 \psi_{1\beta} \frac{|\Psi_{1ref}| - |\Psi_1|}{\left| |\Psi_{1ref}| - |\Psi_1| \right|} \right) + i_{1\beta} R_1. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Из полученных составляющих вектора напряжения определялось его угловое положение в системе координат α - β :

$$\gamma = \arctan \frac{u_{1\beta}}{u_{1\alpha}}.$$

Далее определялся ближайший к нему из возможных шести векторов напряжения. Например, если угол γ будет расположен, как это показано на

рис. 4, то инвертор сформирует состояние ключей, при котором реализуется вектор $\bar{U}[110]$.

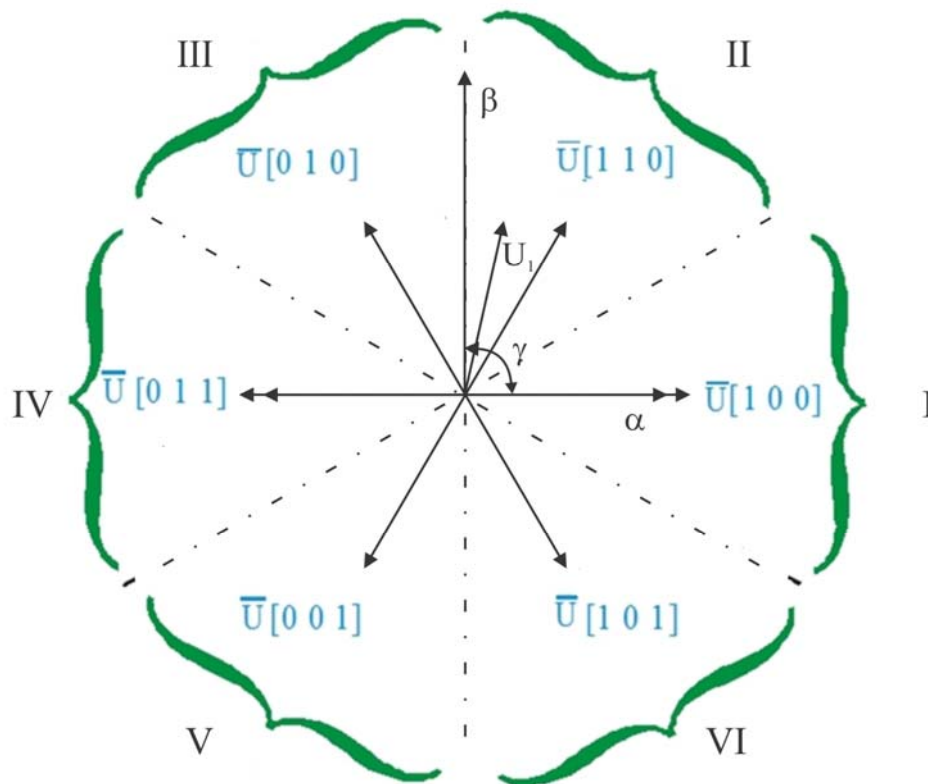


Рис. 4. Расположение векторов напряжения на координатной плоскости

В четвертой главе проводились исследования разработанных алгоритмов управления путем компьютерного моделирования в среде Matlab Simulink. При моделировании были использованы следующие параметры двигателя: $R_1=0.55$ Ом, $L_1=0.00625$ Гн, $\Psi_2=0.1727$ Вб, $z_n=3$, $J=0.00017428$ кг·м².

В модели инвертора учитывалось «мертвое время» $T_{м.в.}=2$ мкс. Для приближения работы модели к реальным условиям в нее вводились временные задержки, отражающие время дискретизации характерное для реальных цифровых систем управления.

В результате моделирования было выявлено, что все три варианта реализации алгоритма управления имеют одинаковое быстродействие при ступенчатом изменении управляющего воздействия, а также нечувствительны к изменениям момента сопротивления. В тоже время, алгоритм, формирующий максимальное значение вектора напряжения, и алгоритм, реализующий непосредственное управление ключами имеет большой уровень пульсаций момента. Наилучшие характеристики в этом отношении показал алгоритм, где знакоопределенные функции пропорциональны ошибкам регулируемых величин. Результаты моделирования работы СДПМ с этим алгоритмом управления приведены на рис. 5 – рис. 9.

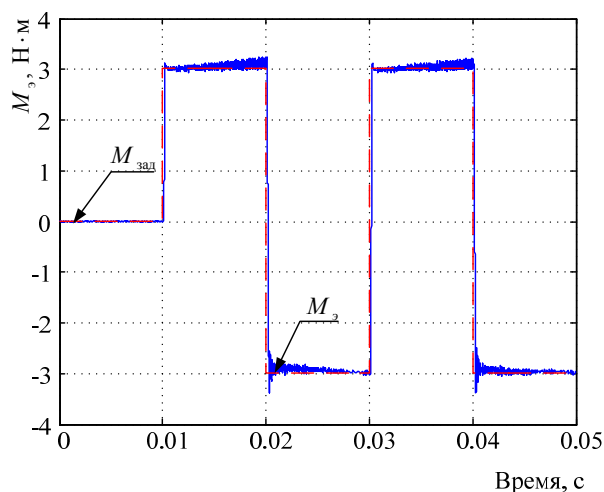


Рис. 5. Реакция на управляющее воздействие по моменту

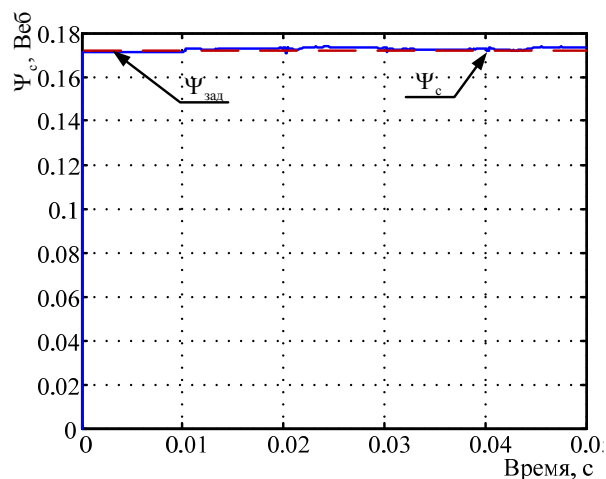


Рис. 6. Реакция потокосцепления статора на управляющее воздействие по моменту

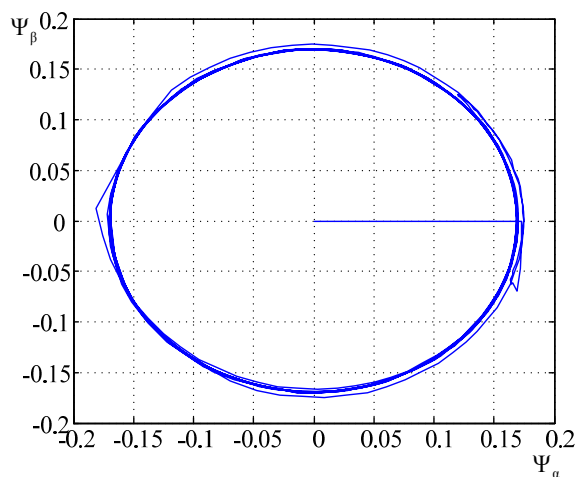


Рис. 7. Годограф потокосцепления статора при пуске и реверсе без нагрузки

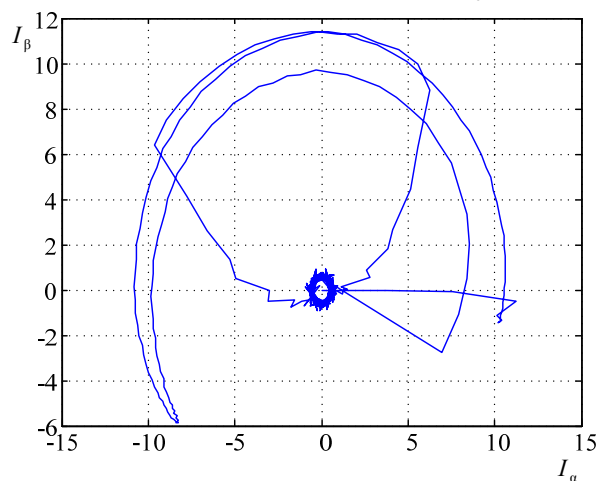


Рис. 8. Годограф тока статора при пуске и реверсе без нагрузки

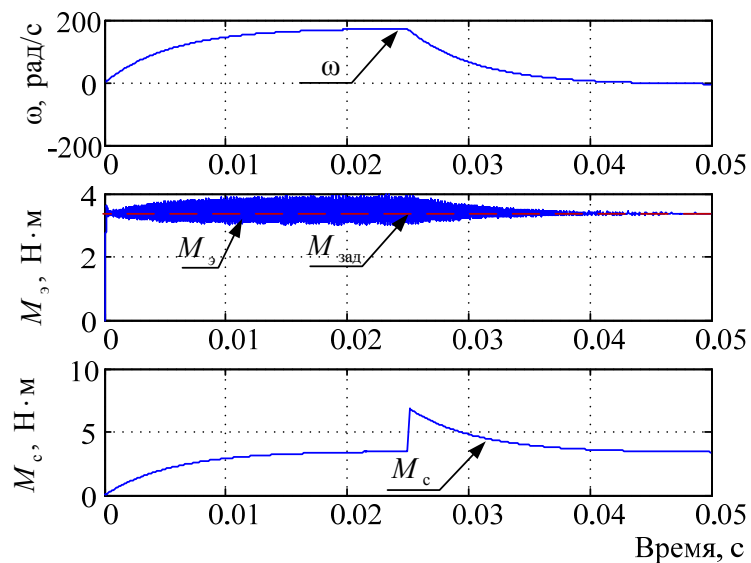


Рис.9. Реакция электромагнитного момента на изменение момента сопротивления

Сравнение полученных результатов с результатами моделирования электропривода с СДПМ при полеориентированным управлением и прямым управлением моментом показало, что электропривод с разработанным алгоритмом управления, при частоте модуляции 10 кГц имеет такое же быстродействие, как и при прямом управлении моментом, имея при этом уровень пульсаций примерно в 1.35 раз меньше чем при полеориентированном управлении и в 3.35 раз меньше, чем при прямом управлении моментом с частотой дискретизации 100 кГц.

Электропривод с алгоритмами управления при формировании предельного значения модуля вектора напряжения показал уровень пульсаций незначительно превышающий пульсации, характерные для прямого управления моментом. В качестве примера, на рис. 10 показан график переходного процесса электропривода при реализации алгоритма управления с непосредственным управлением ключами, при частоте дискретизации 100 кГц.

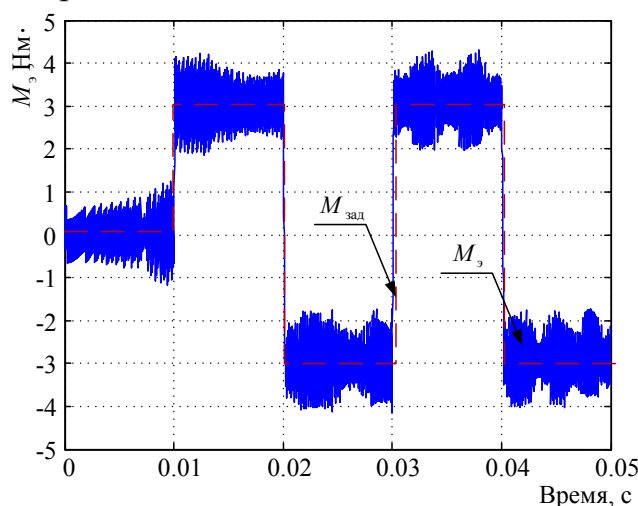


Рис. 10. Реакция на управляющее воздействие по моменту

Для приблизительной оценки уровня пульсаций электромагнитного момента электропривода при прямом управлении моментом и разработанных алгоритмов управления с формированием максимальной амплитуды вектора напряжения была получена зависимость, позволяющая определить уровень пульсаций в зависимости от времени дискретизации системы управления и параметров

двигателя, имеющая следующий вид:

$$\Delta M_{\max} = 2z_{\Pi} \Psi_2 \frac{U_d T_{dis}}{L_1},$$

где z_{Π} – число пар полюсов двигателя; T_{dis} – время дискретизации.

Подставив в это уравнение параметры исследуемого двигателя, были получены значения максимально возможного изменения электромагнитного момента двигателя за период дискретизации. Результаты расчетов уровня пульсаций для различных величин времени дискретизации приведены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние периода дискретизации на пульсации момента

T_{dis} , мс	0.1	0.05	0.02	0.01
$\Delta M_{\max}$, %	276.6	138.1	55.3	27.6

Анализ результатов моделирования показал, что пульсации момента за период дискретизации незначительно отличаются от представленных в таблице.

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям электропривода на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами.

В лаборатории кафедры электропривода и электрооборудования создан лабораторный экспериментальный стенд, позволяющий исследовать электроприводы на базе СДПМ.

Общий вид установки представлен на рис. 11, а на рис.12 представлена функциональная схема разработанного лабораторного экспериментального стенда.

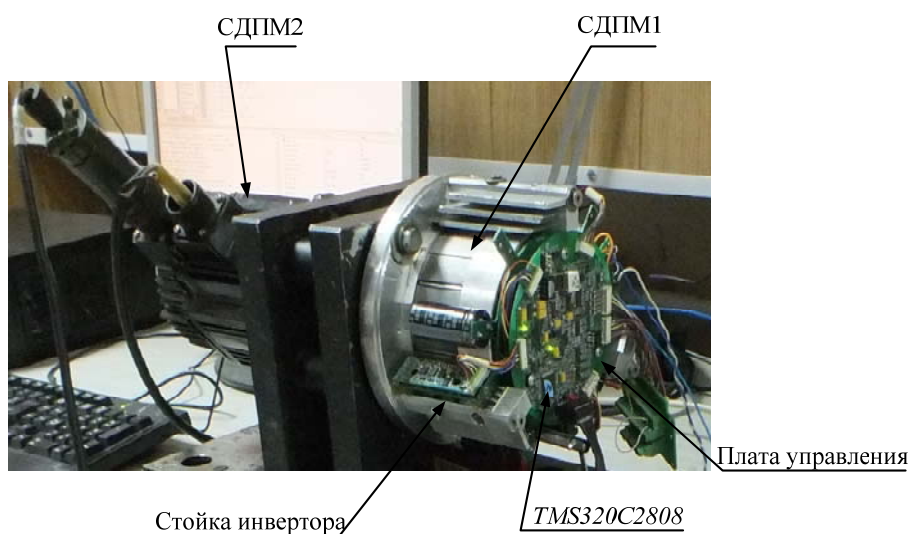


Рис. 11. Общий вид лабораторной экспериментальной установки

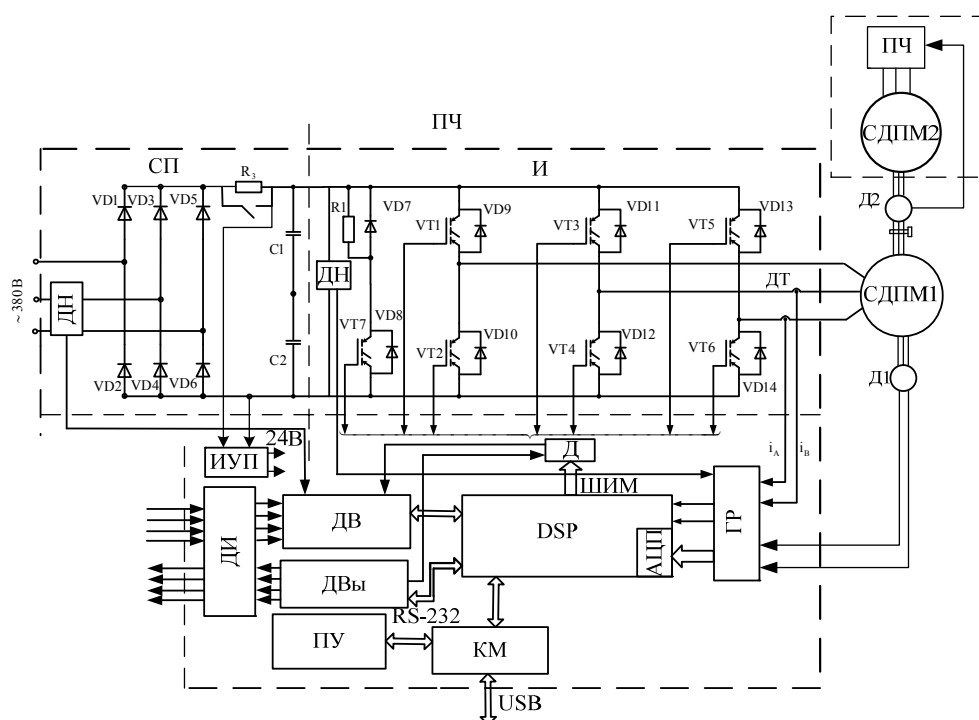


Рис. 12. Функциональная схема лабораторной экспериментальной установки

Электро механическая часть экспериментального стенда состоит из двухмашинного агрегата, включающего в себя механически связанные между собой и работающие на общий вал синхронный двигатель с постоянными магнитами СДПМ1 мощностью 1,5 кВт, напряжением 300 В, номинальной частотой вращения ротора 4000 об/мин и синхронный двигатель с постоянными магнитами СДПМ2 типа SGMSH-10ACA61, мощностью 1,0 кВт, напряжением 200 В и номинальной частотой вращения ротора 3000 об/мин, с закрепленными на валу двигателей, соответственно резольвером и оптическим датчиком положения.

На лабораторном стенде была проведена сравнительная оценка основных технических характеристик электропривода на базе СДПМ для полеориентированного управления и прямого управления моментом. Результаты исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2. Показатели электропривода с системой прямого управления моментом и полеориентированного управления

	Прямое управление моментом при частоте дискретизации 50 кГц				переориентированное управление при частоте дискретизации 10 кГц			
	МСММ	МСБМ	БСММ	БСБМ	МСММ	МСБМ	БСММ	БСБМ
Количество переключений транзисторов	20 КГц	18 КГц	13 КГц	10 КГц	частота ШИМ 10кГц			
Пульсации момента	$\pm 28.3 \%$				$\pm 6.67 \%$			
Быстродействие на ступеньку момента	200 мкс				2 мс			
Затраты вычислительной мощности	97 %.				32 % при 10 кГц			
Полоса пропускания при малом $T_{м.в.}$ по моменту	2000 Гц ($T_{м.в.} = 2.5$ мкс)				600 Гц ($T_{м.в.} = 2.5$ мкс)			
Полоса пропускания при большом $T_{м.в.}$ по моменту	1600 Гц ($T_{м.в.} = 5$ мкс)				250 Гц ($T_{м.в.} = 5$ мкс)			

МСММ – малая скорость и малый момент; МСБМ – малая скорость и большой момент; БСММ – большая скорость и малый момент; БСБМ – большая скорость и большой момент.

Исследования показали, что пульсации момента и быстродействие исследуемых систем соответствуют полученным результатам при моделировании, что также подтверждает адекватность разработанной имитационной модели. Также установлено, что величина «мертвого времени» влияет на полосу пропускания по моменту. При полеориентированном управлении это влияние существенно больше, чем при

прямом управлении моментом.

На базе разработанного стенда была проведена проверка адекватности имитационной модели электропривода на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, приведенными на рис. 13, показали приемлемую их сходимость. Более низкочастотный спектр частот в токах и моменте, полученных экспериментально, объясняется меньшей частотой оцифровки сигнала, по сравнению с результатами моделирования.

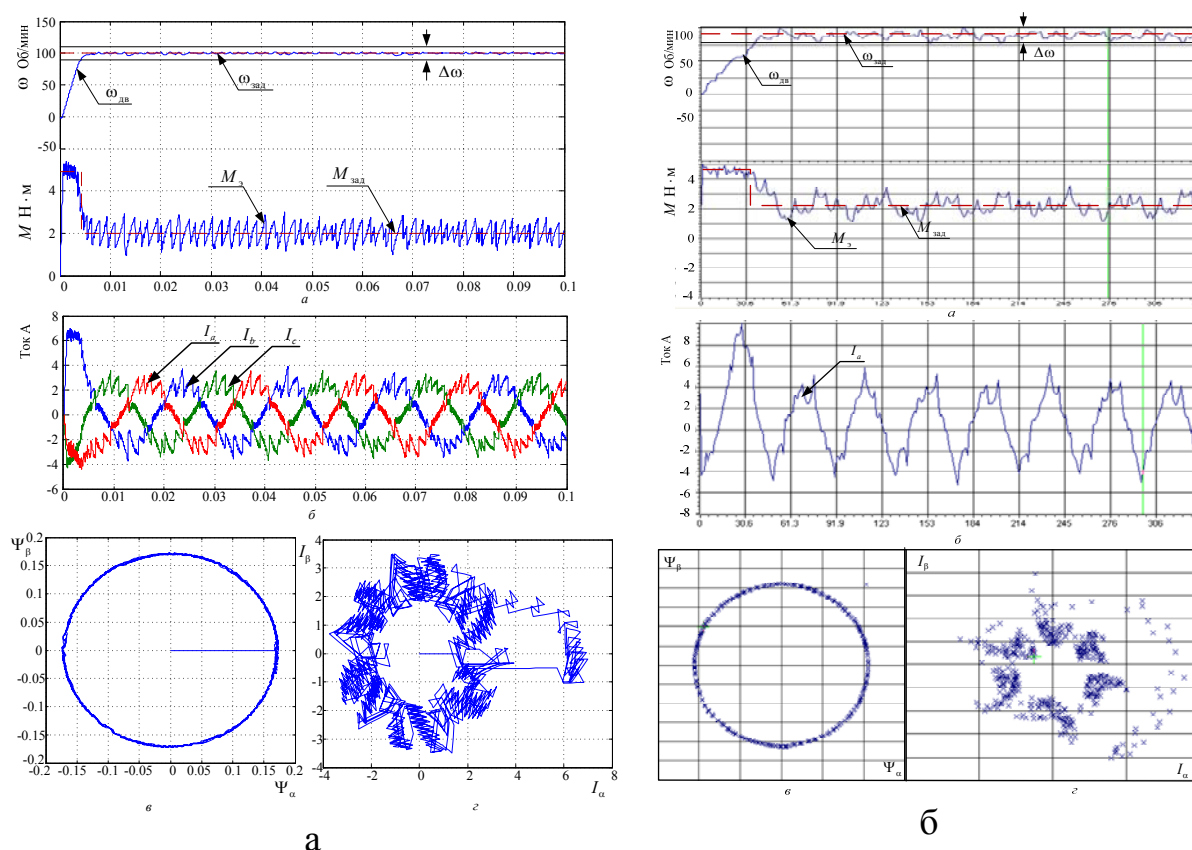
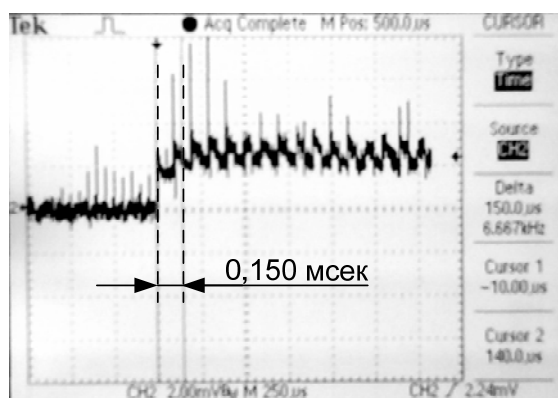
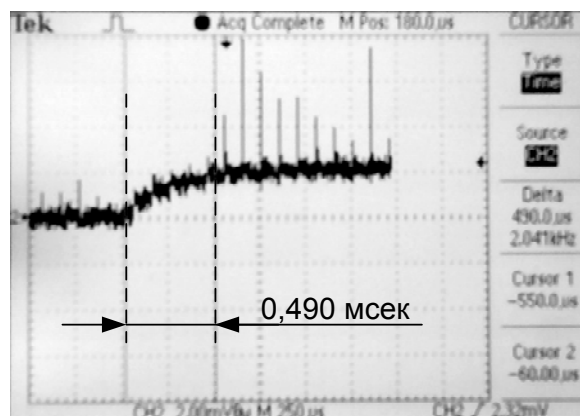


Рис. 13. Пуск с нагрузкой электропривода при прямом управлении, а) полученный на имитационной модели, б) полученный на экспериментальной установке.

В процессе проведения экспериментальных исследований было установлено существенное влияние скажкности питающего напряжения на величину постоянной времени статора двигателя. В качестве примера, на рис. 14 приведены графики переходных процессов при разных значениях скажкности.



$$U_{dc} = 300 \text{ В}, \gamma = 8\%$$



$$U_{dc} = 75 \text{ В}, \gamma = 28$$

Рис. 14. Переходные процессы тока статора для различных значений скважности

Анализируя полученные графики можно заключить, что при уменьшении скважности ШИМ преобразователя системы управления происходит уменьшение времени переходного процесса. Несмотря на постоянство величин сопротивлений и индуктивности двигателя, при его рассмотрении как объекта управления со стороны системы регулирования, уменьшение времени переходного процесса свидетельствует об уменьшении эквивалентной постоянной времени. Таким образом, в случае использования метода подчинённого регулирования при оптимизации контура тока следует обязательно учитывать данную важную особенность.

Для обеспечения качественной работы контура тока во всём рабочем диапазоне, включая «малые» токи, необходимо использовать корректировку параметров регулятора тока при работе в зоне «малых» напряжений. Корректировка должна выполнять пересчёт параметров регулятора тока с учётом изменения эквивалентной постоянной времени двигателя на основе информации о текущей скважности ШИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача управления электроприводом на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающая улучшение его динамических характеристик и имеющая существенное значение для повышения эффективности работы электроприводов.

Основные результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель электропривода на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, учитывающая такие особенности функционирования инвертора, как «мертвое время», и частота дискретизации системы управления электроприводом.
2. В результате выявленных закономерностей процессов, протекающих в синхронных электродвигателях с постоянными магнитами при управлении их состоянием, получены области взаимного расположения векторов

потокосцеплений статора и ротора, обеспечивающие требуемые знаки производных регулируемых величин.

3. Разработаны новые алгоритмы управления электромагнитным моментом и потокосцеплением статора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. Установлено, что при всех разработанных алгоритмах управления электропривод имеет одинаковое быстродействие, сопоставимое с быстродействием электропривода при классическом прямом управлении моментом, и превосходящее примерно в 10 раз быстродействие электропривода с полеориентированным управлением.

4. Определена функциональная зависимость между временем дискретизации системы управления электроприводом с синхронным двигателем с постоянными магнитами, его параметрами и требуемым уровнем пульсаций электромагнитного момента. Выявлено, что электропривод с точки зрения пульсаций момента, при дифференциальном управлении при частоте ШИМ 10 кГц имеет примерно в 1.35 раз меньшие пульсации, чем при полеориентированном управлении, и в 3.35 раз меньшие пульсации по сравнению с прямым управлением моментом при частоте дискретизации 100 кГц.

5. Определено влияние «мертвого времени» инвертора на полосу пропускания тока (момента) электропривода на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. Установлено, что при частоте ШИМ в 5 кГц верхний порог полосы пропускания при векторном управлении ограничен частотой в 400 Гц, а повышение частоты ШИМ до 10 кГц увеличивает верхнюю границу полосы пропускания до 800 Гц.

6. Выявлено влияние величины напряжения в звене постоянного тока инвертора и скважности широтно-импульсной модуляции на постоянную времени обмотки статора синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. Получена расчётная зависимость эквивалентной постоянной времени двигателя от скважности ШИМ при работе в зоне «малых» напряжений, позволяющая сравнить между собой значения минимальной и реальной электромагнитной постоянной времени двигателя.

7. Проведенные экспериментальные исследования электропривода на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами разработанных алгоритмов системы управления на лабораторном стенде показали работоспособность и эффективность работы электропривода по быстродействию и пульсациям момента в динамических режимах.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Абд Эль Вхаб Амр Рефки, Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. // Известия Томского политехнического университета Энергетика. – 2011. – Т. 319. – № 4.С – 93–99.

2. **Абд Эль Вхаб** Амр Рефки, Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Микропроцессорная система прямого управления моментом электроприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами. // Известия высших учебных заведений «Электромеханика» научно-технический и учебно-образовательный журнал. – 2011. - № 6. – С. 62 – 67.
3. Каракулов А.С., **Абд Эль Вхаб** Амр Рефки, Гусев Н.В., Родионов Г.В. Мехатронный редуктор. // Известия высших учебных заведений «Электромеханика» научно-технический и учебно-образовательный журнал. – 2011. - № 6. – С. 42 – 46.
4. Завьялов В.М., **Абд Эль Вхаб** А. Р. Влияние времени дискретизации на величину пульсаций при прямом управлении моментом. // Современные проблемы науки и образования. - 2012. - № 1. URL: www.science-education.ru/101-5405 (дата обращения: 02.02.2012).

Другие научные публикации по теме диссертации:

5. **Абд Эль Вхаб** Амр Рефки Али. Математическое описание прямого управления моментом электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов Российских вузов». Томск, 24 – 26 мая. 2011 г. – С 20 – 23.
6. **Абд Эль Вхаб** А. Р., Каракулов А.С. Реализация цифровой системы прямого управления моментом электропривода для синхронного двигателя с постоянными магнитами. // V Юбилейная международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» имени Г.А. Сипайлова, ТПУ, г. Томск, 12 – 14 октября 2011 г. – С. 133 – 136.
7. **Абд Эль Вхаб** А. Р. Моделирование и исследование электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами при прямом управлении моментом. // Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011». Одесса: Черноморье – 2011 – Выпуск 4. Т. 9. – С. 71. – 79.

Патенты и свидетельства о регистрации:

8. Программа расчета переходных процессов синхронного электропривода с прямым управлением моментом / Дементьев Ю.Н., Каракулов А.С., **Абд Эль Вхаб** А Р // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011610285 от 11.11.2010.

Личный вклад автора

Две работы [5, 7] написаны автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: в публикациях [1, 2, 8] – разработка имитационной модели систем управления СДПМ (50 %); в [3] – формулирование требований к электроприводу без редуктора (40 %); в [4, 6] – реализация систем управления (60 %); [5, 6, 8] – формулирование требований к электроприводу, схема организации электропривода, программное обеспечение (60 %).