

На правах рукописи



**Евстратов Андрей Эдуардович**

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРНЫХ МАШИН**

Специальность 05.09.03 —  
«Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск — 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Завьялов Валерий Михайлович**

Официальные оппоненты: **Сарваров Анвар Сабулханович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО "Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова",  
профессор кафедры автоматизированного электротропривода и мехатроники

**Иванов Александр Сергеевич**,  
кандидат технических наук,  
ФГБОУ ВО "Сибирский государственный индустриальный университет", и.о. заведующий кафедрой электромеханики

Ведущая организация: ФГБОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет" (национальный исследовательский университет)

Защита состоится 29 декабря 2016 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова дом 7, в ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 или на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.269.11,  
доцент, кандидат технических наук



Дементьев Юрий Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Надежность и эффективность электроприводов, участвующих в производственном процессе, в значительной степени определяют эффективность работы предприятий в целом.

При этом машины, участвующие в разрушении, перемещении пород или материалов, работают в тяжелых условиях эксплуатации, обусловленных спецификой их использования в технологическом процессе. Электропривод в таких установках подвержен частым пускам под нагрузкой, перегрузкам и случайно распределенным нагрузкам, носящим резкопеременный характер. Это служит причиной высокодинамичных переходных процессов в электродвигателях, которые ухудшают состояния изоляции обмотки статора и снижению механической прочности основных элементов механической подсистемы горных машин (ГМ). Одним из наиболее часто используемых решений в таких условиях эксплуатации является использование нерегулируемого асинхронного электропривода. В настоящее время наиболее перспективными направлениями повышения эксплуатационной надежности являются:

- Применение электропривода на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами;
- Использование регулируемого асинхронного электропривода;
- Применение автоматизированных систем контроля, функционального диагностирования и защиты.

Первые два направления основываются на управлении состоянием электродвигателей, которое заключается в изменении их фазовых координат при помощи управляющих воздействий.

До сих пор одним из наиболее распространенных систем являются системы подчиненного регулирования координат, настраиваемые на модульный или симметричный оптимумы, и системы с суммирующим усилителем. Такие системы просты в настройке и позволяют достичь требуемого движения исполнительного органа. Однако каждый настраиваемый контур должен представлять линейную систему, что, как показывает практика, не всегда так. Поэтому, при настройке контуров, влиянием дополнительных воздействий пренебрегают, что позволяет линеаризовать систему. Тем не менее такое допущение ведет к снижению качества регулирования, в особенности точности. Для того, чтобы повысить точность работы, увеличивают порядок астатизма системы или настраивают на симметричный оптимум. Такой способ позволяет решить проблему точности, однако также повышает колебательность системы и длительность переходного процесса.

Возможности таких систем при постоянном росте объемов производства практически исчерпали себя, и замена их на современные методы позволит не только повысить эксплуатационную надежность, но и успешно решать вопросы ресурсосбережения и энергосбережения.

Третье направление является отдельной актуальной научной задачей и не является темой этой работы. Известно значительное количество публикаций по управлению состоянием электродвигателей, а также технических решений для их реализации. Однако, в основном они предназначены для использования в составе конкретных систем управления электроприводов. В то же время существует необходимость произвести декомпозицию задачи управления состоянием электродвигателя.

Как известно, выходными величинами любого электропривода являются электромагнитный момент и скорость вращения ротора.

Если первая величина является следствием взаимодействия двух полей, то вторая получается в результате силового воздействия на механическую систему электромагнитным моментом. Таким образом, повышения эксплуатационной надежности можно добиться двумя путями: совершенствованием механических преобразователей или совершенствованием алгоритмов управлений состояния электрического двигателя. При этом второе направление позволяет сохранить в эксплуатации ранее использовавшиеся машины без существенных конструктивных изменений.

Это является важной научной задачей и ее актуальность определяется как потребностями практики, так и необходимостью использования результатов для научных исследований.

Решению этой научной задачи посвящена данная диссертация. Особое внимание в работе уделено разработке методов управления электромагнитным моментом электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) и синхронным двигателем с постоянными магнитами (СДПМ).

Актуальность работы подтверждается интересом ученых всего мира, таких как К. Хасс (K. Hasse), Ф. Блашке (F. Blaschke), М. Депенброк (M. Depenbrock), Т. Ногучи (T. Noguchi), И. Такахаша (I. Takahashi), С. Рывкин (S. Ryvkin), В. Уткин, В. Панкратов, А.А. Булгаков, А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов, Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов, И.Е. Овчинников, Г.Г. Соколовский и т.д. Тем не менее, несмотря на большое количество проведенных исследований, вопрос создания систем управления для электроприводов горных машин с высокой динамической нагрузкой до сих пор до конца не решен.

**Цель работы** — Разработка высокودинамичных алгоритмов управления электромагнитным моментом горных машин.

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

1. Выявить закономерности процессов протекающих в электромеханическом преобразователе, позволяющие сформировать целевые функции управления, обеспечивающие максимальное быстродействие.

2. Разработать алгоритмы управления электроприводом с АДКЗ и СДПМ, обеспечивающие высокое быстродействие и низкие пульсации электромагнитного момента.
3. Создание имитационных моделей регулируемого привода с АДКЗ и СДПМ.
4. Анализ динамических характеристик электроприводов горных машин с разработанными алгоритмами управления.
5. Провести экспериментальную проверку разработанных алгоритмов управления.

### **Научная новизна:**

1. Разработана математическая модель электропривода ГМ отличающаяся от известных тем, что в ней описаны условия формирования производных регулируемых переменных состояния
2. Установлена закономерность между знаком производной регулируемой величины и электромагнитным состоянием электрической машины, отличающиеся учетом производной величины задающего воздействия.
3. Разработаны новые способы управления электромагнитным моментом АДКЗ и СДПМ основанные на формировании знаков производных регулируемых величин с учетом ограничений, учитывающих конечное количество возможных состояний вектора напряжения статора.

**Теоретическое и практическое значение работы** заключается в разработке алгоритмов управления динамическим состоянием электроприводов горных машин, обеспечивающих улучшенные характеристики их работы; в обобщении подхода к управлению состоянием ЭМП; в разработке теоретического материала и программного обеспечения, которые возможно использовать в обучении студентов динамическим процессам в ЭП.

**Методология и методы исследования.** Теория обобщенной электрической машины, второй метод Ляпунова, метод максимума Понтрягина, координатные и фазные преобразования, методы аналитического и численного решения систем дифференциальных уравнений, компьютерное моделирование и экспериментальные исследования динамических процессов в электродвигателях при реализации разработанных методов управления.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Взаимное расположение результирующих векторов ЭДС и потокосцеплений статора и ротора для АДКЗ и СДПМ определяет знаки производных электромагнитного момента и модуля вектора потокосцепления.
2. Выполнения условия  $sign\left(\frac{dy^*}{dt}\right) = -sign(y^* - y)$  обеспечивает асимптотическую устойчивость управления электроприводом на ба-

зе АДКЗ и СДПМ на основании знака производных электромагнитного момента и вектора потокосцепления.

3. Максимальное быстродействие при формировании электромагнитного момента двигателя достигается при формировании максимальных по величине составляющих вектора ЭДС статора

**Достоверность** подтверждается корректностью поставленных задач, адекватностью принятых решений и допущений при исследовании математической модели объекта, корректностью проведения экспериментов с использованием широко применяемой программной среды Matlab, а также собственных программных разработок численных решений дифференциальных уравнений с помощью методов Рунге-Кунты 4 порядка и метода Эйлера.

**Апробация работы.** Основное содержание работы, ее отдельные положения и результаты докладывались и получили одобрение на следующих конференциях:

“Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в образовании, науке и производстве: труды V Всероссийской научно-практической конференции” (Новокузнецк 2012); VII Международной научно-практической конференции: “Инновации и технология и образования” (Белово 2014); Международная межвузовская студенческая научная техническая конференция: “Вклад молодежи науки в реализации стратегии Казахстана 2050” (Казахстан 2014); Всероссийской научно-практической конференции: “Россия молодая” (Кемерово 2014-2015); Всероссийской конференции “Энергетика и энергосбережение” (Кемерово, 2014).

**Личный вклад** состоит в непосредственном участии на всех этапах процесса. В получении исходных данных и экспериментах, участии в апробации результатов исследования, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

**Публикации.** По результатам проведенных исследований опубликовано 9 печатных работ, 3 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе 1 в издании входящем в международную систему цитирования Scopus.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и содержит 127 страниц текста, 43 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 103 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приведен обзор научной литературы по изучаемой проблеме, сформулирована цель, поставлены задачи работы, сформулированы научная новизна и научные положения представляемой работы.

В **первой главе** проанализированы фактические режимы работы электропривода горных машин и приведен обзор работ, направленных на снижение динамической нагруженности за счет повышения качества работы контура электромагнитного момента.

Анализ технической литературы показал, что самыми распространенными вариантами управления, применяемыми в горных машинах (ГМ), являются полеориентированное управление (ВУ) и прямое управление моментом (ПУМ). Помимо анализа технической литературы проведено компьютерное моделирование, при помощи которого были проанализированы динамические характеристики электроприводов с данными системами управления. В результате этого были выявлены достоинства и недостатки выделенных методов.

Достоинствами ПУМ являются: быстродействие контура регулирования электромагнитного момента, высокая точность управления в динамических и статических режимах. Недостатки ПУМ: большая величина пульсации электромагнитного момента, алгоритм управления зависит от структуры преобразователя, необходима переменная частота переключения ключей автономного инвертора напряжения. Достоинствами ВУ являются: высокая точность в динамических и статических режимах, низкая величина пульсаций электромагнитного момента. Недостатки ВУ: низкое быстродействие по сравнению с ПУМ, необходимость оценивания угла полеориентирования.

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

Во **второй главе** предложены математические модели асинхронного двигателя, синхронного двигателя с постоянными магнитами, электрического преобразователя и механического преобразователя с учетом общепринятых допущений. Изложены основные особенности электромеханического преобразования энергии.

Приведены модели АД и СДПМ в двухфазной ортогональной системе координат с учетом общепринятых допущений, которые имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{U}_s = \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + \vec{i}_s R_s + j\omega_k \vec{\Psi}_s; \\ 0 = \frac{d\vec{\Psi}_r}{dt} + \vec{i}_r R_r + j(\omega_k - \omega_e) \vec{\Psi}_r; \\ M = 1.5p_n L_m \text{Im}(\vec{i}_s \vec{i}_r^*) \\ \frac{J}{p_n} \frac{d\omega_e}{dt} = M - M_c; \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} U_{sd} = \frac{d\Psi_{sd}}{dt} + i_{sd} R_s + p_n \omega \Psi_{sq}; \\ U_{sq} = L_{sq} \frac{di_{sd}}{dt} + i_{sd} R_s - \\ - p_n \omega (L_{sd} i_{sd} + \lambda); \\ \Psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \lambda; \\ \Psi_{sq} = L_{sq} i_{sq}; \\ M = 1.5p_n (i_{sq} i_{sd} (L_{sd} - L_{sq}) + \lambda); \\ \frac{J}{p_n} \frac{d\omega_e}{dt} = M - M_c, \end{array} \right.$$

где:  $\vec{\Psi}_s, \vec{\Psi}_r$  — обобщенные результирующие векторы потокосцеплений статора и ротора, Вб;  $\vec{i}_s, \vec{i}_r$  — мгновенные значения обобщенных результиру-

ющих векторов токов статора и ротора,  $A$ ;  $\vec{U}_s$  — обобщенный результирующий вектор напряжения статора,  $B$ ;  $R_s, R_r$  — активные сопротивления обмоток статора и ротора, Ом;  $L_m$  — взаимная индуктивность между статорными и роторными обмотками, Гн;  $p_n$  — число пар полюсов;  $M$  — электромагнитный момент, развиваемый электродвигателем, Нм;  $J$  — момент сил сопротивления на валу электродвигателя, Нм;  $J$  — суммарный момент инерции ротора кгм<sup>2</sup>;  $\omega_e$  — электрическая частота вращения ротора, рад/с;  $\lambda$  — потокосцепление магнитов ротора, Вб;  $\Psi_{sd}, \Psi_{sq}$  — составляющие потокосцепления статора по осям  $d, q$  соответственно, Вб;  $i_{sd}, i_{sq}$  — составляющие тока статора по осям  $d, q$  соответственно, А;  $L_{sd}, L_{sq}$  — индуктивность статора по осям  $d, q$  соответственно, Гн.

Рассмотрены особенности описания механического и электрического преобразователей, поскольку они являются неотъемлемыми частями электропривода горных машин. Таким образом, при питании асинхронного двигателя или синхронного двигателя от автономного инвертора напряжения (АИН), на симметричную обмотку статора двигателя воздействует несимметричная система напряжений, в результате чего возникает напряжение нулевой последовательности. Для учета этого явления при компьютерном моделировании процессов, протекающих в асинхронном двигателе, математическую модель АД и СДПМ необходимо рассматривать совместно с моделью автономного инвертора напряжения.

Математическое описание АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) представляет собой уравнения для определения интервалов времени, в течение которых обмотка двигателя подключена к плюсу или минусу источника питания при помощи силовых ключей.

Математическое описание механической подсистемы горной машины состоит в решении уравнения Лагранжа второго рода. При постоянстве параметров механического преобразователя с неразветвленной кинематической схемой, к которым относятся массы, моменты инерции и коэффициенты жесткости, при приведении всех элементов к вращательному движению решение уравнения Лагранжа можно представить в матричном виде:

$$J\ddot{\phi} + C\dot{\phi} + B\phi = M,$$

где  $\phi = [\phi_1, \dots, \phi_n]^T$  — вектор угловых положений;  $\phi_i$  — угловое положение  $i$ й сосредоточенной массы;  $M = [M_{\Delta 1}, \dots, M_{\Delta n}]^T$  — вектор моментов;  $M_{\Delta i}$  — сумма внешних моментов, приложенных к  $i$ й сосредоточенной массе;

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & \cdots & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & \cdots & J_n \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,2} & -b_{1,2} & & & & \\ -b_{1,2} & b_{1,2} + b_{2,3} & -b_{2,3} & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & -b_{n-2,n-1} & b_{n-2,n-1} + b_{n-1,n} & -b_{n-1,n} \\ & & & & -b_{n-1,n} & b_{n-1,n} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{1,2} & -C_{1,2} & & & & \\ -C_{1,2} & C_{1,2} + C_{2,3} & -C_{2,3} & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & -C_{n-2,n-1} & C_{n-2,n-1} + C_{n-1,n} & -C_{n-1,n} \\ & & & & -C_{n-1,n} & C_{n-1,n} \end{bmatrix},$$

где  $J_i$  — момент инерции  $i$ й сосредоточенной массы;  $b_{i,i+1}$  — коэффициент жесткости внутреннего трения упругой связи между  $i$ й и  $i+1$  массами;  $i, i+1$  — коэффициент жесткости безынерционной упругой связи между  $i$ й и  $i+1$  массами.

В заключение главы была проанализирована физика электромеханического преобразования энергии. На основании анализа была выдвинута основная гипотеза о том, что для достижения поставленных задач управления достаточно выполнить следующую зависимость:

$$\text{sign}\left(\frac{dy^*}{dt} - \frac{dy}{dt}\right) = -\text{sign}(y^* - y).$$

Также было установлено, что для достижения поставленной цели достаточно использовать целевые функции:  $\Psi_s^{ref} - \Psi_s \rightarrow 0$  и  $M_{ref} - M \rightarrow 0$ .

**Третья глава** посвящена разработке алгоритмов формирования электромагнитного момента, обеспечивающих его максимальное быстроедействие в электроприводе горных машин с высокой динамической нагруженностью.

На первом этапе разработки была проверена устойчивость систем управления, основанных на принципе  $\text{sign}\left(\frac{dy^*}{dt} - \frac{dy}{dt}\right) = -\text{sign}(y^* - y)$ . при условии, что ЭМП (объект управления) является линейным по входам. Также на основании знаков производной регулируемой величины и ошибки регулирования был синтезирован подход определения весовых коэффициентов применительно к АДКЗ, выражение управляющего воздействия которого имеет вид:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = 0.5(-h_1 \Psi_{r\beta} \text{sign}(\dot{M}_{ref}) + h_3 \Psi_{s\alpha} \text{sign}(\dot{\Psi}_s^{ref})) + I_{s\alpha} R_s; \\ U_{s\beta} = 0.5(h_1 \Psi_{r\alpha} \text{sign}(\dot{M}_{ref}) + h_3 \Psi_{s\beta} \text{sign}(\dot{\Psi}_s^{ref})) + I_{s\beta} R_s. \end{cases}$$

В ходе исследования производилось сравнение подходов нахождения весовых коэффициентов, в результате чего было установлено, что наилуч-

шими характеристиками обладает метод, в котором  $h_1$  и  $h_3$  находятся как:

$$h_1 = \frac{0.5h_3a_1b + a_1(0.5h_3)^2 - b0.5h_3n - (0.5h_3)^2n - (y - \frac{m + a_0}{0.5h_3})^{-\frac{b+0.5h_3}{0.5h_3}}}{a_0b + bm + bcy} \cdot \frac{1}{2 \left( 1 - \frac{0.5h_3a_0 + 0.5h_3m + by}{a_0 + bm - 0/5h_1by} \right)},$$

где  $a, b, n, m$  – коэффициенты, зависящие от параметров и переменных двигателя.

Для полученного выражения была проведена серия вычислительных экспериментов для асинхронных двигателей мощностью 1-110 кВт. Полученные таким способом семейства точек были аппроксимированы, в результате чего была найдена линейная зависимость между значениями, которая позволила найти обобщенное решение для АДКЗ:

$$U_s = 0.5 \left( h_1 \Psi_r^* \text{sign} \dot{M}_{ref} + h_3 \Psi_s \text{sign}(\dot{\Psi}_s^{ref}) \right) + I_s R_s + \omega_e \Psi_s^*.$$

Ввиду необходимости использования высококачественных наблюдателей скорости и магнитного состояния АД, был пересмотрен подход к разработке управляющих воздействий.

Для синтеза алгоритма управления использован второй метод А.М.Ляпунова. В качестве кандидата функции Ляпунова была взята квадратичная форма:

$$f_v(Y) = Y^T E Y = (M_{ref} - M)^2 + (\Psi_s^{ref} - \Psi_s)^2,$$

где  $Y = [(M_{ref} - M)(\Psi_s^{ref} - \Psi_s)]^T$  – вектор-функция рассогласований заданных и действительных значений регулируемых координат электропривода;  $E$  – единичная матрица.

При постоянных значениях  $M_{ref}$  и  $\Psi_s^{ref}$  достаточными условиями, при которых производная кандидата функции Ляпунова будет меньше нуля во всем диапазоне, являются следующие выражения:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dt} (M_{ref} - M) &> 0, \\ \frac{d\Psi_s}{dt} (\Psi_s^{ref} - \Psi_s) &> 0. \end{aligned}$$

Существует множество возможных решений предложенной системы неравенств. В связи с этим для доопределения задачи управления было введено условие минимального времени перехода регулируемых координат электропривода к заданным значениям:

$$\frac{dM}{dt} (M_{ref} - M) + \frac{d\Psi_s}{dt} (\Psi_s^{ref} - \Psi_s) \rightarrow \max_{u \in U},$$

где  $U$  – множество допустимых значений составляющих результирующего вектора напряжения статора  $U_{s\alpha}$  и  $U_{s\beta}$ ;  $u = [U_{s\alpha} \ U_{s\beta}]$  – вектор управляющих воздействий. Таким образом, получен алгоритм разрывного управления для АДКЗ:

$$U_{s\alpha} = \begin{cases} U_{smax}, & \frac{M_{ref} - M}{M_{nom}} 1.5\sigma\psi_{r\beta} - k \frac{\Psi_s^{ref} - \Psi_s}{\Psi_s \Psi_{snom}} + i_{s\alpha} R_s < 0; \\ -U_{smax}, & \frac{M_{ref} - M}{M_{nom}} 1.5\sigma\psi_{r\beta} - k \frac{\Psi_s^{ref} - \Psi_s}{\Psi_s \Psi_{snom}} + i_{s\alpha} R_s > 0; \end{cases}$$

$$U_{s\beta} = \begin{cases} U_{smax}, & -\frac{M_{ref} - M}{M_{nom}} 1.5\sigma\psi_{r\alpha} - k \frac{\Psi_s^{ref} - \Psi_s}{\Psi_s \Psi_{snom}} + i_{s\beta} R_s < 0; \\ -U_{smax}, & -\frac{M_{ref} - M}{M_{nom}} 1.5\sigma\psi_{r\alpha} - k \frac{\Psi_s^{ref} - \Psi_s}{\Psi_s \Psi_{snom}} + i_{s\beta} R_s > 0. \end{cases}$$

Также было установлено, что при постановке задачи предложенным способом приоритет регулирования принадлежит регулированию потокосцепления статора, поэтому был введен знакопостоянный весовой коэффициент  $k$ .

Таким образом получен алгоритм разрывного управления для СДПМ:

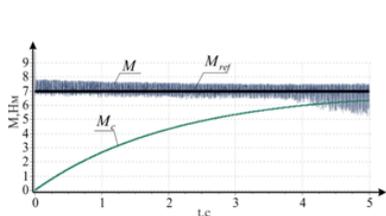
$$U_{sq} = \begin{cases} U_{sqmax}, & \frac{M_{ref} - M}{M_{nom}} 1.5 \frac{\lambda}{L} + \frac{(\Psi_s^{ref} - \Psi_s) Li_{sq}}{\Psi_s \Psi_{snom}} > 0; \\ -U_{sqmax}, & \frac{M_{ref} - M}{M_{nom}} 1.5 \frac{\lambda}{L} + \frac{(\Psi_s^{ref} - \Psi_s) Li_{sq}}{\Psi_s \Psi_{snom}} < 0; \end{cases}$$

$$U_{sd} = \begin{cases} U_{sdmax}, & \frac{\Psi_s^{ref} - \Psi_s}{\Psi_{snom}} \frac{Li_{sd} + \lambda}{\Psi_s} > 0; \\ -U_{sdmax}, & \frac{\Psi_s^{ref} - \Psi_s}{\Psi_{snom}} \frac{Li_{sd} + \lambda}{\Psi_s} < 0. \end{cases}$$

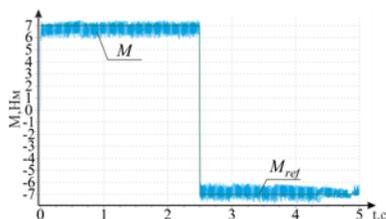
Поскольку в реальной системе управления электроприводом управляющие воздействия имеют более чем два фиксированных значения ( $U_{smax}$  и  $-U_{smax}$ ), использование представленного алгоритма управления приведет к неоправданным колебаниям электромагнитного момента и магнитного потока. Так как при разрывном управлении движение точки в фазовой плоскости приближается сколь угодно близко к фазовой траектории, получающейся при применении эквивалентного управления, в случае, когда частота переключения управляющих воздействий  $f \rightarrow \infty$ , значения управляющих воздействий, изменяющихся со сколь угодно высокой частотой, пропущенные через фильтры нижних частот, также будут сколь угодно близко приближаться к эквивалентному управлению.

В **четвертая глава** посвящена исследованию разработанных алгоритмов управления путем компьютерного моделирования, включая исследования проходческого комбайна ПК-9Р.

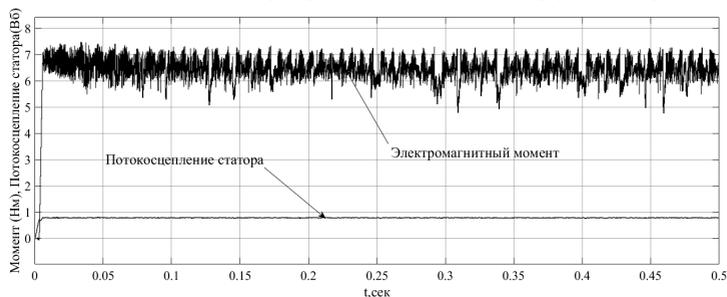
Разработанные алгоритмы формирования управляющего воздействия были проверены на компьютерных моделях АДКЗ с параметрами:  $R_s = 8.66$  Ом,  $R_r = 10.82$  Ом,  $L_s = 0.508$  Гн,  $L_r = 0.501$  Гн,  $L_m = 0.477$  Гн,  $p_n = 2$ ,  $J = 0.0035$  кгм<sup>2</sup> и на компьютерных моделях СДПМ ДСМ-71-2.2-1500-У3 с параметрами:  $P_n = 2.2$  кВт,  $L = 4.5$  мГн,  $J = 0.055$  кгм<sup>2</sup>,  $\lambda = 0.393$  Вб,  $R_s = 2.7$  Ом.



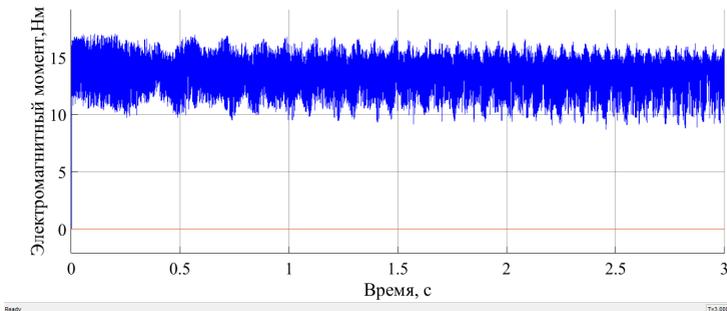
а) Непосредственное управление ключами инвертора



б) взаимосвязанные коэффициенты



в) Ляпунов АДКЗ



г) Ляпунов СДПМ

Рис. 1 — Переходные процессы электромагнитного момента

В результате моделирования было выявлено, что предложенные алгоритмы имеют высокое быстродействие при ступенчатом изменении управляющего воздействия, а также нечувствительны к изменениям момента сопротивления. В то же время алгоритмы, синтезированные с использованием весовых коэффициентов, требуют в своем составе высококачественных наблюдателей магнитного состояния и оценки угловой скорости вращения. Также они требуют высокой частоты коммутации ключей инвертора (10 кГц). Наилучшими характеристиками в этом плане обладают алгоритмы, синтезированные на основе второго метода Ляпунова.

Результаты компьютерного моделирования являются следующие временные зависимости, показанные на рис.1

Сравнительный анализ первоначального алгоритма прямого управления моментом с предложенным алгоритмом (рис.1в) при частоте коммутации ключей инвертора на уровне 20 кГц показал, что разработанная система управления обеспечивает более высокое быстродействие электропривода и меньший уровень пульсаций электромагнитного момента в диапазоне частот до 5 кГц (см. амплитудные спектры на рис.2).

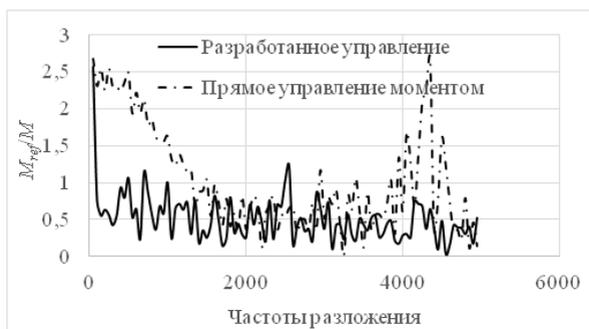
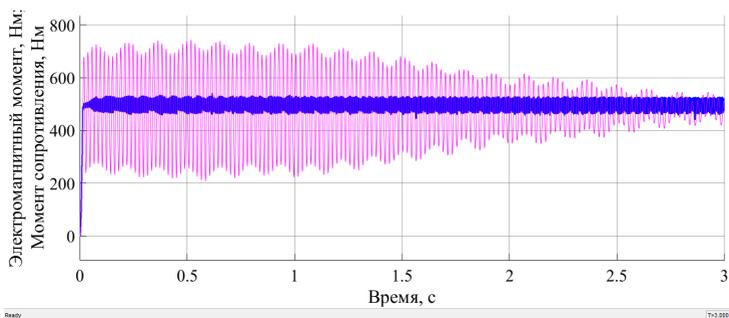


Рис. 2 — Гармонический анализ

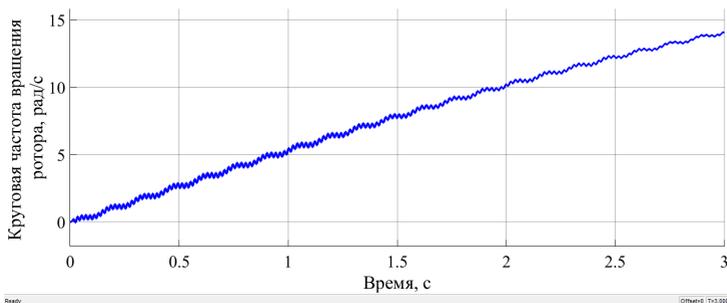
Результаты вычислительных экспериментов подтвердили возможность управления технологическими переменными электропривода, поэтому была проведена серия экспериментов с предложенным управлением моделью ГМ, где для моделирования был выбран проходческий комбайн ПК-9Р. В результате были получены следующие временные зависимости на рис. 3.

Аналогичные исследования проведены для СДПМ.

Сравнительный анализ первоначального алгоритма прямого управления моментом с алгоритмом, синтезированным на основе второго метода Ляпунова, при частоте коммутации ключей инвертора на уровне 10 кГц показал, что разработанная система управления обеспечивает более высокое быстродействие электропривода и схожий уровень пульсаций электромагнитного момента в диапазоне частот до 2,5 кГц. (см. рис. 4).



а) Момент



б) скорость

Рис. 3 — Переходные процессы электромагнитного момента

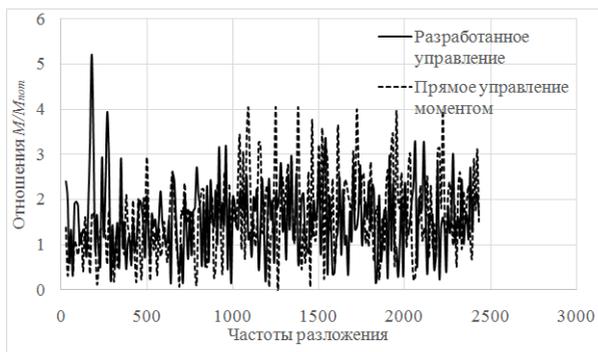
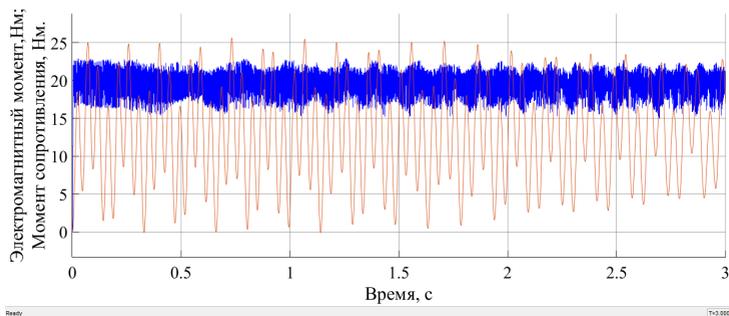


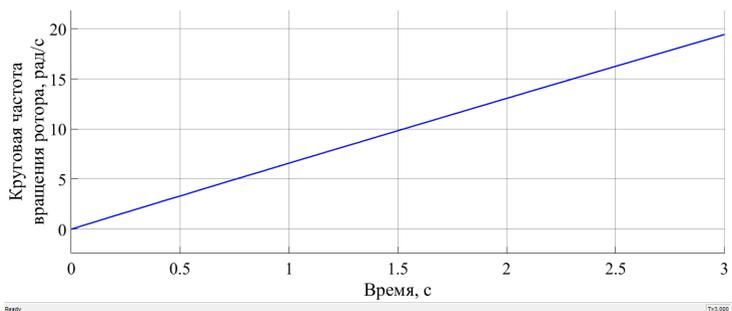
Рис. 4 — Гармонический анализ

Аналогично электроприводу на базе АДКЗ, для СПДМ было произведено моделирование системы электропривода проходческого комбайна ПК-9Р.

Полученные в результате временные характеристики показывают низкий уровень пульсаций электромагнитного момента СДПМ и незначительные колебания угловой скорости вращения ротора.



а) Момент



б) скорость

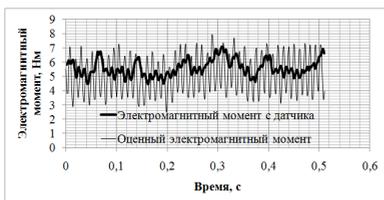
Рис. 5 — Переходные процессы электромагнитного момента

**Пятая глава** посвящена экспериментальным исследованиям электропривода. Основным объектом для исследования был выбран привод на базе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. Для подтверждения работоспособности предложенных алгоритмов управления был собран испытательный стенд. Стенд состоял из двигателя СДПМ ДСМ-71-2.2-1500-У3, нагрузочного генератора постоянного тока, защитно-коммутационного оборудования, датчика момента TRB-5K фирмы dacell и преобразователя частоты MBS-FC01.

Устройство MBS-FC01 представляет собой бескорпусный преобразователь частоты с открытой программной платформой на базе микроконтроллера TMS320F28335 производства Texas Instruments и силового интеллектуального модуля.

Программное обеспечение преобразователя частоты построено на базе предустановленной во Flash-памяти процессора операционной среды реального времени MexBIOS и графической среды программирования MexBIOS Development Studio.

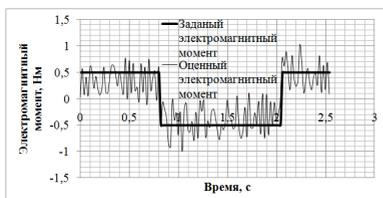
В результате проведенных экспериментов получены следующие временные зависимости, показанные на рис.6.



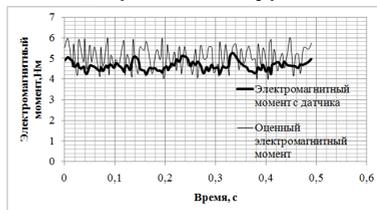
а) Работа под нагрузкой



б) пуск под нагрузкой



в) Реверс



г) работа при высоких скоростях

Рис. 6 — Переходные процессы электромагнитного момента

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача: разработка алгоритмов управления электромагнитным моментом, обеспечивающих его максимальное быстродействие в электроприводе горных машин с высокой динамической нагруженностью; и предложены теоритические подходы к созданию нового способа построения систем управления ЭП ГМ, имеющего существенное значение для развития горнодобывающей отрасли.

Основные результаты выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Разработана математическая и компьютерная модель электропривода на базе синхронного и асинхронного двигателя в составе электропривода проходческого комбайна ПК-9Р, учитывающая особенности несимметричного напряжения, создаваемого АИН, и особенности механической подсистемы.
2. Выдвинуты и подтверждены научные гипотезы о существовании для АДКЗ и СДПМ такого управления, при котором ошибка регулируемой величины стремится к нулю при  $t \rightarrow \infty$ , если знак производной регулируемой величины равен знаку ошибки регулирования.
3. Разработан алгоритм формирования управляющих воздействий для электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, обладающий уровнем пульсаций электромагнитного момента 6.79 процентов и быстродействием 0.002 с. при питании от

- автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией с частотой коммутации ключей инвертора 5 кГц.
4. Разработан алгоритм формирования управляющих воздействий для электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, обладающий сравнительно невысоким уровнем пульсаций электромагнитного момента 24.52 процентов и сравнительно высоким быстродействием 0.005 с. при питании от автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией с частотой коммутации ключей инвертора 2.5 кГц.
  5. Проведены экспериментальные исследования разработанного алгоритма управления формирования управляющего воздействия для электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами на лабораторном стенде. По результатам проведенных экспериментов было установлено соответствие компьютерного моделирования реальной установки. Расхождение составило 11.43 процентов.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях из перечня ВАК**

1. Исследование многокритериальной системы автоматического управления шахтным вентилятором местного проветривания / Семькина И. Ю. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 9. — С. 3—12.
2. *Завьялов В.М., Григорьев А.В., Евстратов А.Э.* Управление электромагнитным моментом синхронного двигателя с постоянными магнитами // Известия вузов. Электромеханика. — 2016. — 3(545). — С. 43—47.

### **Публикации в изданиях Scopus**

3. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short-circuited rotor / Evstratov A.E [и др.] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2016. — Т. 11, № 7. — С. 4391—4398.

### **Прочие публикации**

4. *Евстратов А.Э., Завьялов В.М., Кольцов Р.А.* Дифференциальное управление моментом асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // Автоматизированный электропривод и промышленная электро-

ника в образовании, науке и производстве: труды V Всероссийской научно-практической конференции. — 2014.

5. *Евстратов А.Э.* Исследования вариантов дифференциального управления моментом применительно к асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором // Труды VII Международной научно-практической конференции: “Инновации и технология и образования”. — 2014.
6. *Евстратов А.Э.* Метод нахождения весовых коэффициентов при дифференциальном управлении асинхронным двигателем // Международная межвузовская студенческая научная техническая конференция: “Вклад молодежи науки в реализации стратегии Казахстана 2050”. — 2014.
7. *Евстратов А.Э.* Дифференциальное управление асинхронным двигателем с непосредственной коммутацией инвертора // Труды 59 Всероссийской научно-практической конференции: “Россия молодая”. — 2014.
8. *Евстратов А.Э.* Обзор возможных систем управления электроприводом на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами // I всероссийской конференции “Энергетика и энергосбережение”. — 2014.
9. *Григорьев А.В., Евстратов А.Э.* Скользящее управление электромагнитным моментом и потока статора асинхронного электродвигателя // I всероссийской конференции “Энергетика и энергосбережение”. — 2014.

**Личный вклад** автора в работах, выполненных в соавторстве:

- [1,2,9] — разработка компьютерных программ, проектирование технических решений;
- [3,4] — формулировка идеи публикации, разработка основных теоретических положений, выполнение расчетов, разработка компьютерных программ.

*Евстратов Андрей Эдуардович*

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ГОРНЫХ МАШИН

Автореф. дис. на соискание ученой степени к.т.н

Подписано в печать 24.10.2016. Заказ №359  
Формат 60×94/16. Усл. печ. л. 1.1 Тираж 100 экз.  
Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ.  
650000, Кемерово, ул.Д.Бедного, 4А.

