

На правах рукописи

Безденежных Даниил Владимирович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ  
МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С ПОДКЛЮЧЕНИЕМ ОБМОТОК  
СТАТОРА И РОТОРА К ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМ ЧАСТОТЫ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Липецк – 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Мещеряков Виктор Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ  
Литвиненко Александр Михайлович

кандидат технических наук Аргентов Сергей Геннадьевич

Ведущая организация:

ООО «Промэлектроника» (г. Липецк)

Защита диссертации состоится 29 апреля 2011 года в 14<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398600, г. Липецк, Московская 30, административный корпус, ауд. 601

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет».

Автореферат разослан «                      » марта 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

В.И. Бойчевский

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы определяется переходом современного промышленного производства к применению энергосберегающих технологий. Одним из основных направлений перехода является замена существующих регулируемых электроприводов (ЭП) постоянного тока на электроприводы переменного тока, обладающие лучшими массогабаритными, энергетическими и динамическими характеристиками. Наибольшее распространение среди электроприводов переменного тока получил ЭП на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) с преобразователем частоты в статорной цепи. Использование в данном ЭП режима векторного регулирования позволяет разделить каналы управления потоком сцеплением и электромагнитным моментом, что дает возможность строить системы подчиненного регулирования аналогично ЭП постоянного тока. Однако электропривод на базе АДКЗ обладает рядом недостатков, такими как: низкая перегрузочная способность на частотах вращения ротора выше номинальной, невысокий диапазон регулирования скорости вниз от номинальной без датчика скорости на валу двигателя и невозможность управления энергией скольжения.

Электроприводы моталок и размотывателей стальной полосы листовых прокатных станов характеризуются широким диапазоном регулирования скорости вращения приводного двигателя как вниз, так и вверх от номинальной. Применение в таких механизмах ЭП на базе АДКЗ приводит к завышению требуемой мощности двигателя и преобразователя по причине низкой перегрузочной способности двигателя на скоростях вращения выше номинальной. Диапазон регулирования скорости вниз от номинальной без датчика на валу двигателя обычно не превышает 1:50, что связано со сложностью обеспечения работы векторной системы управления на низких частотах тока статора. Для обеспечения глубокого регулирования скорости вниз от номинальной необходимо использовать датчик на валу, который снижает надежность электропривода. Устранение указанных выше недостатков возможно в электроприводе на базе машины двойного питания (МДП) с подключением обмоток статора и ротора к отдельным силовым преобразователям.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по теме: «Проведение научных исследований в области создания энергосберегающих систем автоматизированного электропривода переменного тока» (шифр заявки «2010-1.2.1-101-009-030»).

Цель работы – совершенствование систем электроприводов на базе машины двойного питания путем разработки новых алгоритмов управления.

Идея работы заключается в разработке электропривода на базе асинхронного двигателя с фазным ротором с подключением обмоток статора и ротора к отдельным силовым преобразователям, осуществляющего регулирование магнитного потока двигателя в функции момента нагрузки и частоты вращения ротора, что обеспечивает высокие энергетические показатели электропривода и

позволяет осуществлять регулирование скорости вращения вала выше двойной синхронной с сохранением постоянства электромагнитной мощности.

Задачи:

- построение математической модели асинхронного двигателя с фазным ротором в системе электропривода с одновременным управлением по статорной и роторной цепям;
- исследование системы электропривода с МДП по критерию минимума потерь энергии;
- разработка энергосберегающей векторной системы управления электроприводом на базе МДП с преобразователями в статорной и роторной цепи, позволяющей осуществлять регулирование скорости в широком диапазоне без датчика на валу двигателя;
- сравнительная оценка энергетических и массогабаритных показателей электроприводов на базе МДП и АДКЗ;
- разработка и математическое моделирование автоматизированного электропривода моталки стальной полосы на базе МДП с преобразователями в статорной и роторной цепи.

Научная новизна:

- предложены алгоритмы управления МДП с преобразователями в цепях статора и ротора по критерию минимума суммарной мощности потерь в меди и в стали двигателя, отличающиеся от известных оптимальным распределением намагничивающих токов между обмотками статора и ротора и получением аналитической зависимости оптимального значения главного потокосцепления от электромагнитного момента и скорости вращения ротора;
- предложен способ вычисления вектора главного потокосцепления МДП, управляемой по статорной и роторной цепям, отличающийся от известных инвариантностью к изменению значения взаимной индуктивности, работоспособный при всех скоростях вращения ротора и при регулировании магнитного потока в широких пределах;
- разработана система двухзонного регулирования МДП, управляемой по статорной и роторной цепям, с ограничением значения главного потокосцепления во второй зоне, отличающаяся возможностью регулирования скорости вращения вала выше двойной синхронной с сохранением постоянства электромагнитной мощности;
- предложен способ управления частотой тока статора МДП, управляемой по статорной и роторной цепям, отличающийся возможностью осуществления рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть через управляемый выпрямитель преобразователя частоты ротора.

Практическая значимость:

- разработанный электропривод обладает лучшими массогабаритными и энергетическими показателями по сравнению с существующими ЭП на базе машины двойного питания и на базе асинхронного двигателя с КЗ ротором;
- предложенный способ вычисления вектора главного потокосцепления МДП обеспечивает регулирование скорости в широком диапазоне, включая ну-

левую, что позволяет отказаться от использования датчика скорости/положения на валу двигателя.

Объект и методы исследования:

Объектом исследования являлась система электропривода на базе МДП с силовыми преобразователями в цепях статора и ротора. При решении поставленных в диссертационной работе задач использовались теория автоматического управления, теория электрических машин, а также методы математического моделирования и экспериментального подтверждения. Численное решение уравнений математических моделей выполнялось на ЭВМ с помощью пакета математических программ Simulink.

Достоверность результатов и выводов подтверждается хорошей сходимостью результатов теоретических исследований с результатами математического моделирования и экспериментальными данными, а также сопоставимостью полученных результатов с положениями общей теории электропривода.

Реализация результатов работы. Полученные в результате исследований результаты используются при проведении перспективных разработок в УАСУТП ЦАТП ОАО «НЛМК» и внедрены в учебный процесс специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» Липецкого государственного технического университета (ЛГТУ).

На защиту выносятся:

- результаты исследования МДП с подключением обмоток статора и ротора к преобразователям частоты по критерию минимума потерь энергии;
- математическая модель разработанной векторной системы управления МДП, позволяющая поддерживать требуемое соотношение между переменными двигателя по условию минимума потерь энергии;
- способы двухзонного управления МДП, позволяющие осуществлять регулирование скорости вращения вала выше двойной синхронной с сохранением постоянства электромагнитной мощности;
- уравнения вычислителя вектора главного потокосцепления двигателя, позволяющие осуществлять регулирование скорости вращения ротора без датчика на валу двигателя.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на научно-технической конференции посвященной 35-летию кафедры электропривода (Липецк 2009); на региональной научно-технической конференции «Автоматизация и роботизация технологических процессов» (Воронеж 2009); на VI Международной (XVII Всероссийская) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2010» (Тула 2010); на VII Международной научно-технической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (Липецк 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 4 опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 99 наименова-

ний, и 6 приложений. Общий объем работы – 200 страниц. Основная часть изложена на 147 страницах текста, содержит 63 рисунка, 1 таблицу.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены решаемые в диссертационной работе научно-технические проблемы и задачи, обоснована актуальность, показаны новизна и практическая значимость работы, выделены основные защищаемые положения.

В первой главе проведен анализ современного состояния электроприводов на базе асинхронного двигателя с фазным ротором. Проведенный анализ показал, что наиболее экономичными из них являются системы, в которых асинхронный двигатель с фазным ротором включается по схеме двойного питания.

Наиболее распространенной схемой машины двойного питания является схема с преобразователем частоты в роторной цепи и подключением статора к сети. При этом используются различные типы преобразователей, такие как: непосредственный преобразователь частоты (НПЧ), автономный инвертор тока (АИТ), автономный инвертор напряжения (АИН). Рассмотрены особенности применения преобразователей данных типов в системе электропривода на базе машины двойного питания.

Показаны недостатки машины двойного питания, управляемой только по роторной цепи, среди которых можно выделить сложность плавного реверсирования направления вращения ротора без коммутатора в статорной цепи, ограничение на возможность регулирования в широких пределах магнитного потока двигателя, необходимость поддержания повышенного значения тока ротора для компенсации реактивной мощности в статорной цепи, а также снижение КПД на низких скоростях вращения вала вследствие высоких потерь в стали электродвигателя.

Рассмотрены существующие варианты управления асинхронным двигателем с фазным ротором с силовыми преобразователями в цепях статора и ротора, отмечается перспективность такого способа управления. В то же время в них не используются возможности, получаемые при регулировании магнитного потока двигателя, связанные с оптимизацией электропривода по энергетическим критериям, а также с обеспечением регулирования скорости вращения вала в двух зонах: зоне постоянства электромагнитного момента и зоне постоянства электромагнитной мощности.

В заключении отмечается необходимость совершенствования электроприводов на базе машины двойного питания с преобразователями в статорной и роторной цепях.

Во второй главе проведено исследование машины двойного питания, управляемой по статорной и роторной цепям, математическими методами. Для математического описания асинхронного двигателя была выбрана векторно-ориентированная модель в ортогональной системе координат  $x$ - $y$  с ориентацией оси  $x$  по вектору главного потокосцепления двигателя  $\dot{\psi}_m$ . Поскольку в рас-

смаатриваемой машине предполагается регулирование магнитного потока в широком диапазоне, то необходимо учитывать нелинейность кривой намагничивания. Уравнения двигателя в этом случае имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{1x} &= r_1 i_{1x} + L_{1s} \frac{d}{dt} i_{1x} + \frac{d}{dt} \psi_m - \omega_1 L_{1s} i_{1y}; \\ u_{1y} &= r_1 i_{1y} + L_{1s} \frac{d}{dt} i_{1y} + \omega_1 L_{1s} i_{1x} + \omega_1 \psi_m; \\ u'_{2x} &= r'_2 i'_{2x} + L'_{2s} \frac{d}{dt} i'_{2x} + \frac{d}{dt} \psi_m - \omega_2 L'_{2s} i'_{2y}; \\ u'_{2y} &= r'_2 i'_{2y} + L'_{2s} \frac{d}{dt} i'_{2y} + \omega_2 L'_{2s} i'_{2x} + \omega_2 \psi_m; \\ \psi_m &= f(I_m) = f(i_{1x} + i'_{2x}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $u_{1x}$ ,  $u_{1y}$  – напряжения статора по осям  $x$ ,  $y$ ;  $u'_{2x}$ ,  $u'_{2y}$  – приведенные напряжения ротора по осям  $x$ ,  $y$ ;  $i_{1x}$ ,  $i_{1y}$  – токи статора по осям  $x$ ,  $y$ ;  $i'_{2x}$ ,  $i'_{2y}$  – приведенные токи ротора по осям  $x, y$ ;  $r_1$  – активное сопротивление обмотки статора;  $r'_2$  – приведенное активное сопротивление обмотки ротора;  $L_{1s}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора;  $L'_{2s}$  – приведенная индуктивность рассеяния обмотки ротора;  $\omega_1$  – частота вращения электромагнитного поля статора;  $\omega_2$  – частота вращения электромагнитного поля ротора;  $I_m$  – ток намагничивания;  $\psi_m = f(I_m)$  – функция, реализующая кривую намагничивания.

Использование двух управляемых силовых преобразователей в статорной и роторной цепях обеспечивает управление 4-мя переменными двигателя, следовательно, возникает вопрос об оптимальном соотношении между ними в зависимости от скорости вращения вала и момента нагрузки на валу. За основу определения оптимального режима было выбрано соотношение, минимизирующее электромагнитные потери мощности двигателя, которые имеют вид:

$$\Delta P_{эм} = \Delta P_m + \Delta P_{ст}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_m$  – потери в меди обмоток двигателя;  $\Delta P_{ст}$  – потери в стали двигателя.

Потери меди, в свою очередь, равны:

$$\Delta P_m = 3I_1^2 r_1 + 3(I'_2)^2 r'_2, \quad (3)$$

где  $I_1$ ,  $I'_2$  – действующие значения токов статора и ротора.

Потери в стали равны:

$$\Delta P_{ст} = \psi_m^2 k_c \left( |\omega_1|^\beta + |\omega_2|^\beta \right), \quad (4)$$

где  $k_c$  – постоянный коэффициент, характеризующий удельный вес потерь в стали статора и ротора;  $\beta \approx 1,4$ .

Минимизация проводилась в 3 этапа, на первом были определены требуемые намагничивающие токи статора и ротора  $i_{1x}$ ,  $i'_{2x}$  при заданном электромагнитном моменте в зависимости от суммарного тока намагничивания по критериям

$$\frac{\partial(\Delta P_m)}{\partial i_{1x}} = 0, \quad \frac{\partial(\Delta P_m)}{\partial i'_{2x}} = 0:$$

$$\left. \begin{aligned} i_{1x} &= I_m \frac{r'_2}{r_1 + r'_2}; \\ i'_{2x} &= I_m \frac{r_1}{r_1 + r'_2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

На втором этапе были определены требуемые частоты вращения электромагнитных полей статора и ротора в зависимости от скорости вращения ротора  $\omega$  по критериям

$$\frac{\partial(\Delta P_{ст})}{\partial \omega_1} = 0, \quad \frac{\partial(\Delta P_{ст})}{\partial \omega_2} = 0:$$

$$\omega_1 = -\omega_2 = \frac{\omega}{2}. \quad (6)$$

На третьем этапе было определено оптимальное значение главного потокосцепления  $\psi_{m \text{ опт}}$  в зависимости от момента и скорости вращения ротора при

условиях (5), (6) по критерию  $\frac{\partial(\Delta P_{эм})}{\partial \psi_m} = 0$ . При этом использовалась следующая

аппроксимация функции  $I_m^2 = f(\psi_m)$ , входящую в выражение  $\Delta P_{эм}$ , на разных участках кривой намагничивания (I-III):

$$\begin{aligned} \text{I:} \quad I_m^2 &= a_1 \psi_m^2; \\ \text{II:} \quad I_m^2 &= a_2 \psi_m^6 + a_3 \psi_m^2 + a_4; \\ \text{III:} \quad \psi_m &= a_5, \end{aligned} \quad (7)$$

где I – линейный участок кривой намагничивания; II – нелинейный участок; III – участок насыщения;  $a_1.. a_5$  – коэффициенты аппроксимации.

Использование данного способа аппроксимации позволило аналитически определить оптимальное значение главного потокосцепления  $\psi_{m \text{ опт}}$  на разных участках кривой намагничивания:

$$\text{I:} \quad \psi_{m \text{ опт}} = \sqrt{\frac{M}{\sqrt{A + 2KB}}};$$



$$\text{II: } \psi_{m \text{ опт}} = \sqrt[4]{\frac{-(C+2K) + \sqrt{(C+2K)^2 + DM^2}}{E}}; \quad (8)$$

$$\text{III: } \psi_{m \text{ опт}} = a_5 \psi_{m \text{ ном}},$$

где  $M$  – электромагнитный момент;  $K = k_c \left( \frac{P_n}{2\pi} \right)^\beta (|\omega_1|^\beta + |\omega_2|^\beta)$ ;  $A, B, C, D, E$  – константы, зависящие от параметров двигателя.

На рис. 1 изображены графики  $\psi_{m \text{ опт}}$  в зависимости от электромагнитного момента при разных скоростях вращения ротора  $\omega$ .

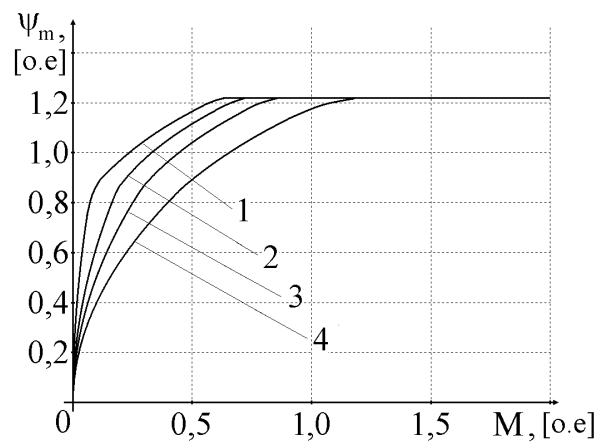


Рис. 1. Зависимости  $\psi_{m \text{ опт}} = f(M)$  для двигателя 4АНК280М8У3:

1 –  $\omega=0$ ; 2 –  $\omega=\omega_0$ ; 3 –  $\omega=2\omega_0$ ; 4 –  $\omega=4\omega_0$

Рассмотрены энергетические характеристики электропривода на базе машины двойного питания с двумя преобразователями (2ПЧ-МДП) в оптимальных режимах работы. При расчете характеристик в математической модели учитывались как потери в электродвигателе, так и потери в силовых преобразователях. На рис. 2, а-в изображены зависимости КПД от полезной мощности на валу  $P_2$  для рассматриваемой схемы электропривода с двигателем 4АНК280М8У3 мощностью 90 кВт в режимах поддержания главного потокосцепления равным номинальному значению  $\psi_{m \text{ ном}}$  и при его регулировании на уровне  $\psi_{m \text{ опт}}$ . Для сравнения здесь также изображены характеристики широко распространенной схемы машины двойного питания с преобразователем в роторной цепи и подключением статора к сети (ПЧ-МДП) в режиме поддержания реактивной мощности статора на нулевом уровне.

Одним из основных достоинств схемы 2ПЧ-МДП является возможность регулирования магнитного потока двигателя в широком диапазоне и управление соотношением частот токов в зависимости от скорости вращения вала. Это позволяет повысить КПД электропривода при моменте нагрузки ниже номинального и скорости вращения ниже двойной синхронной по сравнению со схемой ПЧ-МДП.

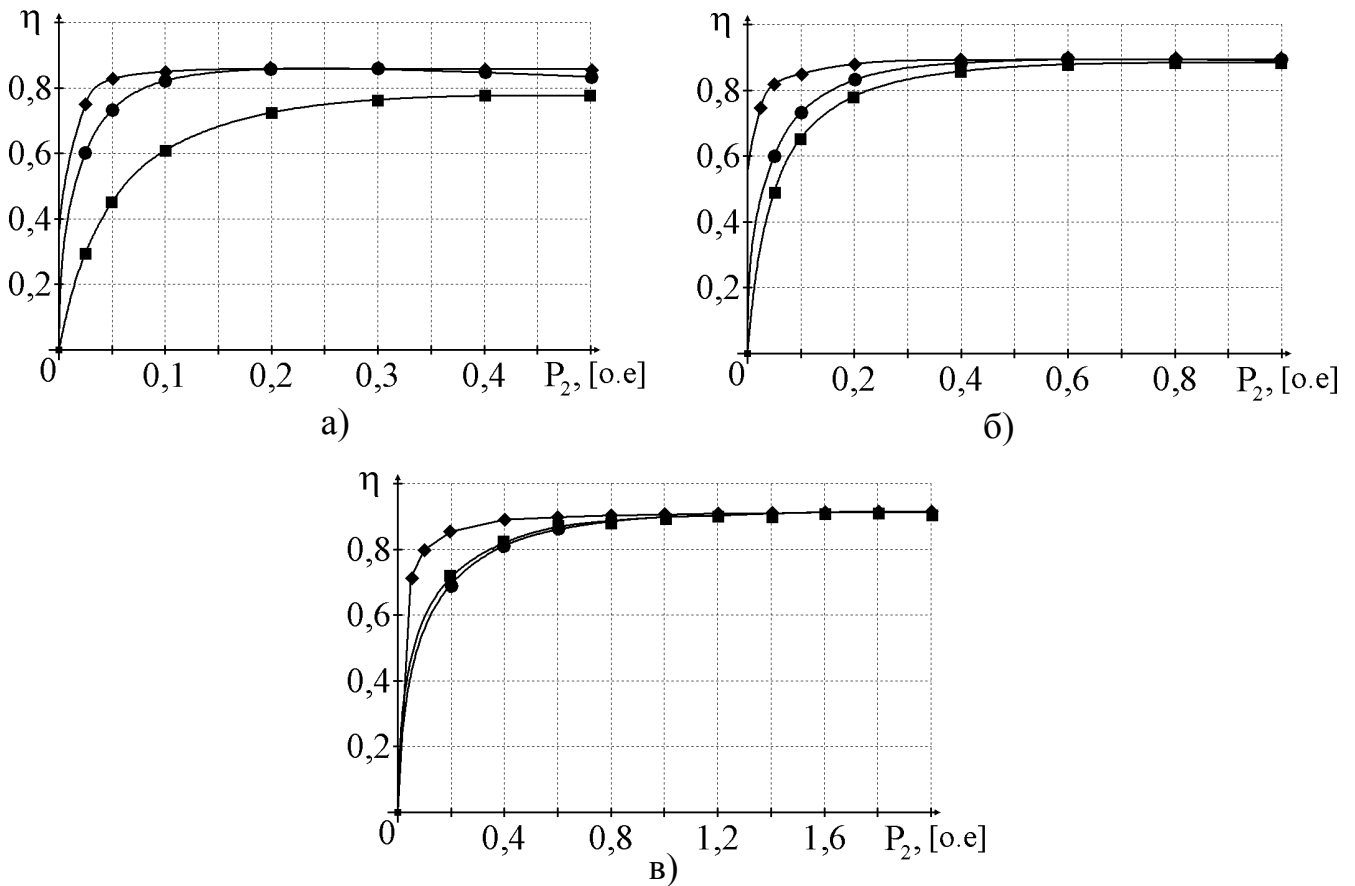


Рис. 2. Зависимости  $\eta = f(P_2)$  при  $\omega = 0,5\omega_0$  (а),  $\omega = \omega_n$  (б),  $\omega = 2\omega_0$  (в):

—■— ПЧ-МДП; —●— 2ПЧ-МДП  $\psi_{m \text{ ном}}$ ; —◆— 2ПЧ-МДП  $\psi_{m \text{ опт}}$

В третьей главе рассмотрено построение векторной системы управления машиной двойного питания с преобразователями в статорной и роторной цепях.

Применение двух преобразователей частоты в статоре и роторе позволяет осуществлять управление четырьмя координатами электродвигателя. Следовательно, система управления с опорным вектором главного потокосцепления  $\psi_m$  была синтезирована четырехканальной, где регулируемые переменными являются:

- намагничивающий ток статора  $i_{1x}$ ;
- намагничивающий ток ротора  $i'_{2x}$ ;
- моментобразующий ток ротора  $i'_{2y}$ ;
- частота вращения электромагнитного поля статора  $\omega_1$ .

Одновременное управление намагничивающими токами статора и ротора позволяет управлять главным потокосцеплением. При этом путем умножения заданных значений намагничивающих токов на соответствующий коэффициент обеспечивается условие минимизации потерь в меди (5). Управление моментобразующим током ротора, при известном значении главного потокосцепления, обеспечивает управление электромагнитным моментом двигателя. Управление частотой вращения электромагнитного поля статора позволяет обеспечить условие минимизации потерь в стали (6) и осуществлять управление потреблени-

ем/отдачей активной мощности через цепь статора или ротора в двигательном и тормозном режимах работы.

Для работы рассмотренной векторной системы управления машиной двойного питания необходимо вычислять амплитуду и углы поворота вектора главного потокосцепления  $\psi_m$  в статорной и роторной системах координат. Возможны варианты вычисления как с использованием датчика положения ротора на валу двигателя, так и без него. Использование датчика на валу двигателя снижает надежность электропривода и, в ряде случаев, неприемлемо по условиям эксплуатации. Следовательно, рассматривается вариант бездатчикового управления машиной двойного питания.

В настоящее время существует большое количество методов вычисления вектора потокосцепления для бездатчикового управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Основными недостатками этих методов являются значительные погрешности в вычислениях при малых частотах тока в статорной обмотке. Отличительной особенностью машины двойного питания с ПЧ в статорной и роторной цепях является возможность управления соотношением частот токов статора и ротора в зависимости от скорости вращения вала, а также возможность непосредственного измерения токов статора и ротора с помощью датчиков. На рис. 3 изображен предложенный вариант вычислителя вектора потокосцепления.

Проекция вектора главного потокосцепления  $\psi_{m\alpha}$ ,  $\psi_{m\beta}$  в системе координат  $\alpha$ - $\beta$ , жестко связанной со статором, находятся путем интегрирования проекции ЭДС взаимной индукции  $E_{m\alpha}$ ,  $E_{m\beta}$  в статорной цепи:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{m\alpha} &= \int E_{m\alpha} dt; \\ \psi_{m\beta} &= \int E_{m\beta} dt, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $E_{m\alpha}$ ,  $E_{m\beta}$  – проекции ЭДС взаимной индукции в статорной цепи по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ .

Проекция вектора главного потокосцепления в системе координат d-q, жестко связанной с ротором, вычисляются без операции интегрирования, через ток ротора и проекции потокосцепления в системе  $\alpha$ - $\beta$ . Следовательно, ограничивая минимальную частоту тока статора значением в 10 Гц (рис. 4, а), обеспечивается приемлемый уровень погрешности вычислителя на всех скоростях вращения ротора, включая нулевую. На рис. 5 изображены графики ошибок вычислителя  $\Delta\varphi_m^{ab}$ ,  $\Delta\varphi_m^{dq}$  в вычислении углов поворота вектора главного потокосцепления в статорной и роторной системах координат и графики ошибок  $\Delta\psi_m$  в вычислении амплитуды главного потокосцепления, возникающие при увеличении активных сопротивлений статора и ротора на 50 %. Из графиков следует, что значение ошибок невелико на всех частотах вращения ротора, включая нулевую. Следует отметить, что при вычислении вектора главного потокосцепления не используется значение взаимной индуктивности  $L_m$ , что позволяет избежать погрешностей при работе с переменным магнитным потоком.

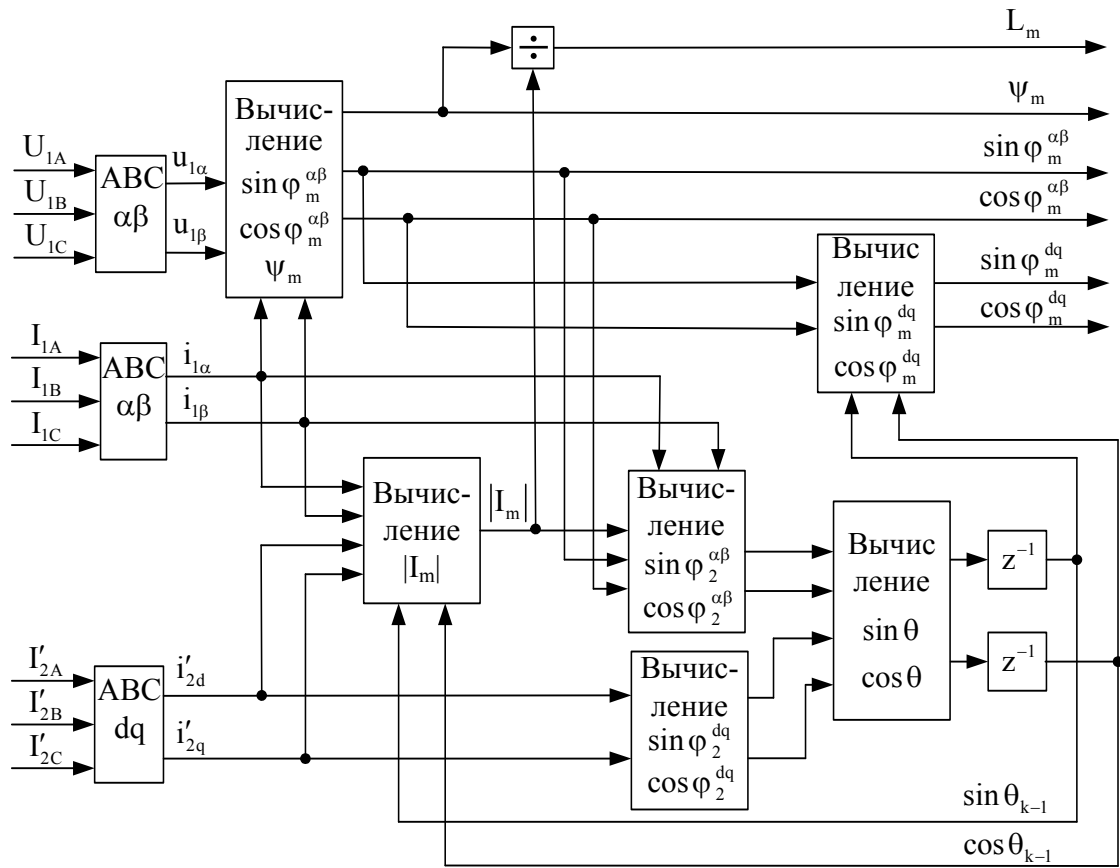
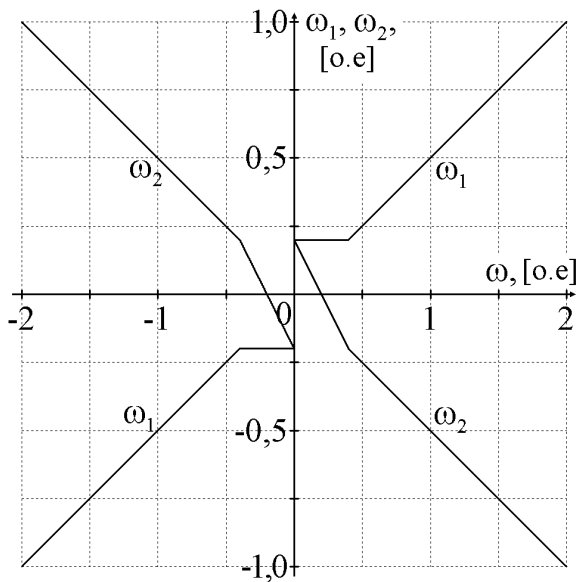
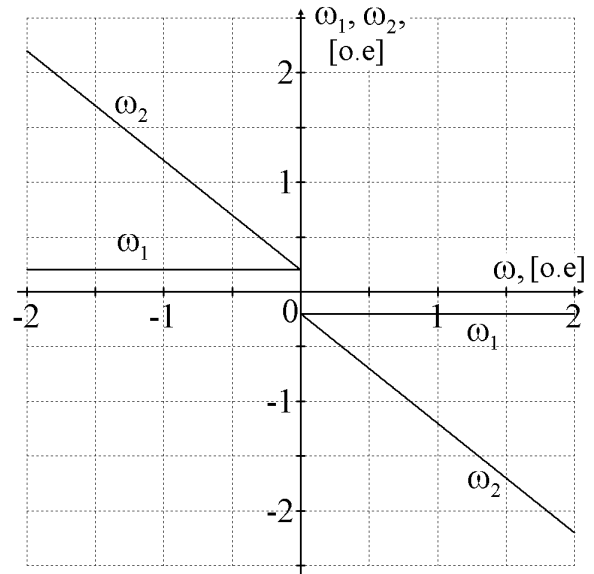


Рис. 3. Структурная схема вычислителя



а)



б)

Рис. 4. Соотношение частот токов статора и ротора:  
 а – двигательный режим;  
 б – генераторный режим

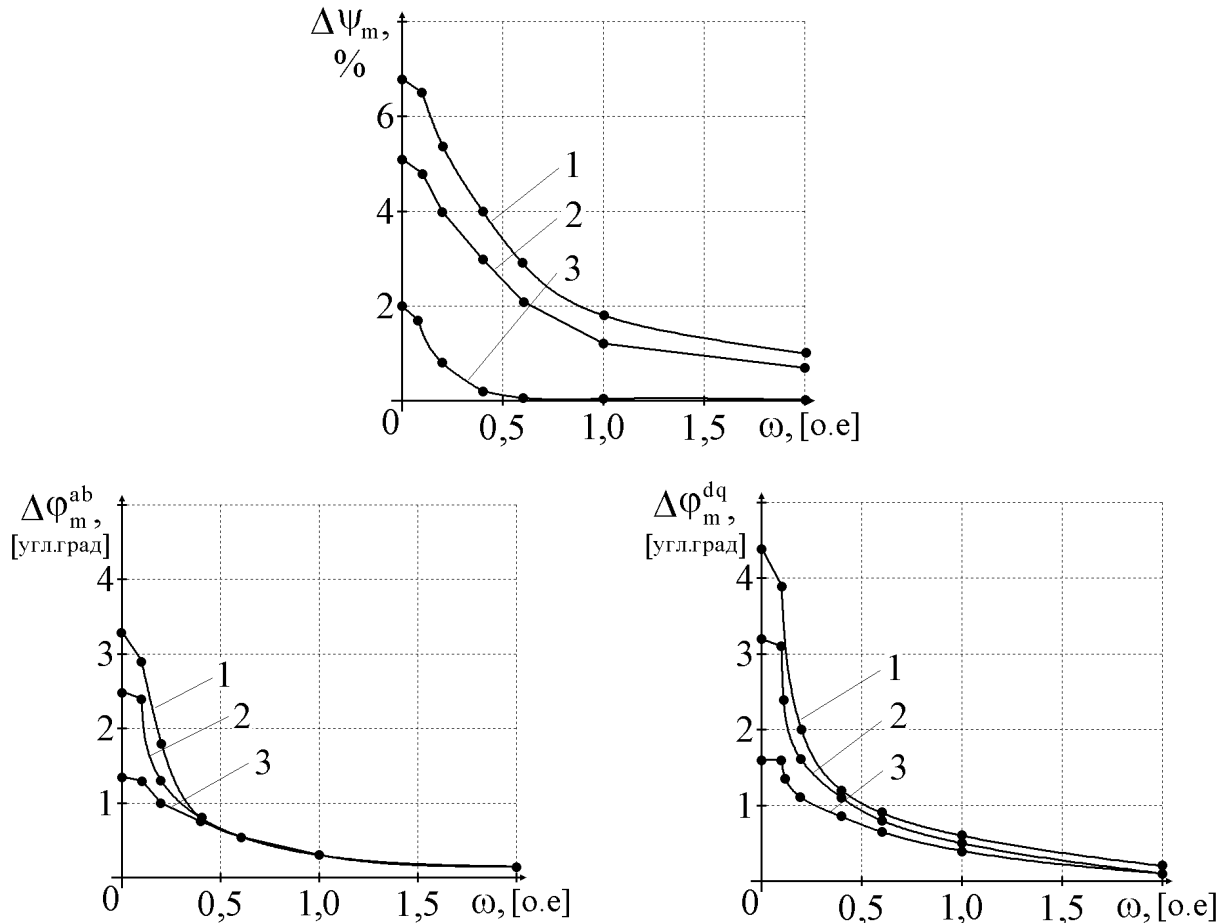


Рис. 5. Графики ошибок вычислителя:  
 1 –  $M = M_n$ ; 2 –  $M = 0,5M_n$ ; 3 –  $M = 0$

Для возможности увеличения скорости вращения двигателя выше двойной синхронной была разработана система двухзонного управления. Во второй зоне задаваемое значение главного потокосцепления должно корректироваться с целью ограничения напряжений статора и ротора. Наиболее простым способом ограничения потокосцепления во второй зоне является поддержание номинального значения ЭДС взаимоиндукции  $E_{mn}$ :

$$\Psi_{m \text{ огр}} = \frac{2E_{mn}}{\omega}, \quad (10)$$

где  $\Psi_{m \text{ огр}}$  – потокосцепление ограничения.

Однако такой способ не позволяет сохранить постоянство электромагнитной мощности во второй зоне, так как выходные напряжения силовых преобразователей ограничены номинальными значениями. Постоянство электромагнитной мощности во второй зоне в условиях достижения максимального выходного напряжения силового преобразователя статора обеспечивается ограничением главного потокосцепления следующим значением:

$$\psi_{m \text{ орп}} = \sqrt{\frac{U_{1н}^2 - A_2 \omega M}{0,5 \omega^2 A_3^2}} + \sqrt{\left[ \frac{U_{1н}^2 - A_2 \omega M}{0,5 \omega^2 A_3^2} \right]^2 - \frac{M^2 (A_2^2 + 0,25 \omega^2 A_1^2)}{0,25 \omega^2 A_3^2}}, \quad (11)$$

где  $U_{1н}$  – номинальное выходное напряжение инвертора статора;  $A_1, A_2, A_3$  – константы, зависящие от параметров двигателя. При данном способе управления во второй зоне поддерживается постоянство выходного напряжения силового преобразователя статора равного  $U_{1н}$ .

На рис. 6 показаны графики длительно допустимого  $M_H$  и максимального  $M_m$  моментов в зависимости от скорости вращения ротора  $\omega$  для двух способов управления потокосцеплением во второй зоне. Для сравнения здесь также показаны графики электромагнитного момента того же двигателя при его работе с ротором, замкнутым накоротко, при поддержании постоянства  $\psi_m$  в первой зоне регулирования и постоянства  $E_{mn}$  во второй зоне. Из графиков следует, что включение асинхронного двигателя с фазным ротором по схеме МДП с двумя преобразователями частоты позволяет значительно увеличить длительно допустимый и максимальный моменты на высоких скоростях вращения вала.

Для осуществления рекуперативного торможения электропривода был предложен способ управления частотами токов статора и ротора, обеспечивающий возврат энергии торможения только через роторную обмотку. Указанный способ целесообразен при подключении инвертора в статорной цепи к неуправляемому диодному выпрямителю, а инвертора ротора – к выпрямителю на полностью управляемых силовых ключах. На рис. 4, б изображено соотношение частот токов статора и ротора в генераторном режиме в зависимости от скорости вращения ротора.

На рис. 7 приведена общая структурная схема синтезированной системы управления электроприводом.

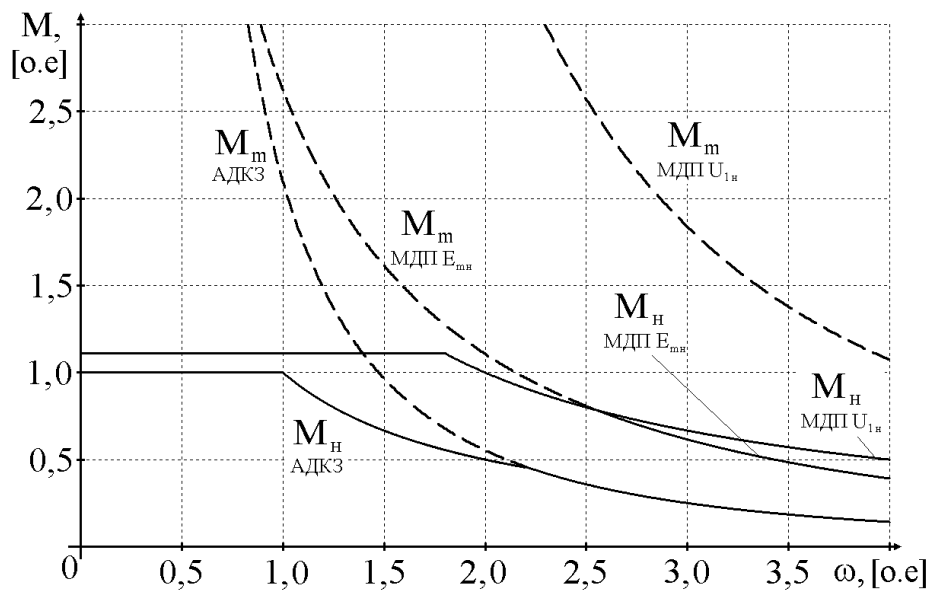


Рис. 6. Зависимости электромагнитного момента от скорости вращения ротора



В четвертой главе предлагается одно из возможных применений электропривода на базе МДП с двумя преобразователями частоты в механизме моталки стальной полосы, а также показаны результаты исследования МДП на лабораторной установке.

Приводится кинематическая схема электропривода моталки и схема задания электромагнитного момента двигателя в зависимости от требуемого натяжения полосы. Разработана система управления моталки на базе МДП, которая осуществляет часть цикла намотки, от начального радиуса рулона  $r_0$  до некоторого промежуточного  $r_n$  – во второй зоне регулирования скорости, а другую часть, от промежуточного  $r_n$  до максимального диаметра  $r_{max}$  – в первой зоне. Показано, что требуемая мощность двигателя в электроприводе на базе МДП в 2 раза ниже по сравнению с электроприводом на базе асинхронного двигателя с КЗ ротором.

Для экспериментального подтверждения результатов, полученных в ходе диссертационной работы, был разработан лабораторный стенд. Результатами эксперимента являются зависимости КПД электропривода от полезной мощности на валу, а также зависимости длительно допустимого момента нагрузки от скорости вращения вала. Указанные характеристики получены как для схемы МДП с двумя преобразователями частоты, так и для стандартной схемы МДП с подключением статора к сети. Полученные экспериментальные данные позволили подтвердить результаты, полученные посредством компьютерного моделирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных в диссертационной работе исследований была решена актуальная научная задача, заключающаяся в разработке электропривода, включенного по схеме машины двойного питания с подключением обмоток статора и ротора к отдельным силовым преобразователям, осуществляющего регулирование магнитного потока двигателя в функции момента нагрузки и частоты вращения ротора, что обеспечивает высокие энергетические показатели электропривода и позволяет осуществлять регулирование скорости вращения вала выше двойной синхронной с сохранением постоянства электромагнитной мощности.

Основные результаты, полученные в диссертации, позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Определены энергосберегающие режимы работы машины двойного питания при одновременном управлении по статорной и роторной цепям как при поддержании главного потокосцепления равным номинальному значению, так и при его регулировании на оптимальном уровне по критериям минимума электромагнитных потерь двигателя.

2. Проведенный сравнительный анализ энергетических характеристик электроприводов на базе машины двойного питания показал, что использование МДП с двумя преобразователями частоты позволяет улучшить энергетические



характеристики по сравнению с МДП с преобразователем в роторной цепи при нагрузках на валу ниже номинальной и при скоростях вращения вала ниже двойной синхронной. Потери энергии электропривода по схеме с двумя преобразователями частоты в номинальном режиме ниже на 7 %.

3. Разработана векторная система управления машиной двойного питания на основе принципа подчиненного регулирования, позволяющая поддерживать оптимальное соотношение между переменными МДП по критериям минимума электромагнитных потерь двигателя как в статических, так и в динамических режимах работы. Постоянная времени контура момента в такой системе при частоте коммутации ключей инверторов 5 кГц составляет 0,004 с.

4. Предложенный способ вычисления положения вектора главного потокосцепления и скорости вращения ротора МДП, управляемой по статорной и роторной цепям, обеспечивает приемлемую точность вычислений без датчика на валу двигателя во всем диапазоне скоростей вращения ротора, включая нулевую. Величина погрешностей в вычислениях углов поворота вектора потокосцепления при этом не превышает 5 %. Способ не зависит от значения взаимной индуктивности, что позволяет избежать погрешностей, связанных с изменением магнитного состояния двигателя при работе с переменным магнитным потоком.

5. Рассмотренная система двухзонного регулирования МДП дает возможность увеличить длительно допустимый и максимальный электромагнитный момент двигателя в 2-4 раза по сравнению со схемой работы с закороченным ротором на скорости выше номинальной. При этом во второй зоне целесообразно использовать закон управления с ограничением напряжений статора и ротора, что обеспечивает сохранение постоянства электромагнитной мощности в условиях достижения максимума по выходным напряжениям силовых преобразователей статора и ротора.

6. Рекуперативное торможение электропривода с отдачей энергии в сеть только через роторную обмотку возможно осуществить при регулировании частоты тока статора по предложенному алгоритму. Данный способ целесообразен при подключении инвертора статора к неуправляемому диодному выпрямителю, обладающему односторонней проводимостью, а инвертора ротора – к реверсивному выпрямителю на полностью управляемых силовых ключах.

Работы, опубликованные по теме диссертации:

**1. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Возможности машины двойного питания в отношении двухзонного регулирования // Электротехнические комплексы и системы управления, 2010. №1. С. 26-29.**

**2. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Электропривод на базе машины двойного питания с минимизацией потерь электроэнергии // Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки, 2010. №3. Ч. 4. С. 108-114.**

**3. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Электропривод на основе машины двойного питания с минимизацией потерь электроэнергии // Электротехника, 2010. №10. С. 2-8.**

**4. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Наблюдатель потокосцепления для машины двойного питания, управляемой по статорной и роторной цепям // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2010. №11. С. 170-173.**

5. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Электропривод на базе машины двойного питания с подключением обмоток статора и ротора к преобразователю частоты // Сборник статей научно-технической конференции, посвященной 35-летию кафедры электропривода Липецкого государственного технического университета. Липецк: ЛГТУ, 2009. С. 29-32.

6. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Способы управления асинхронным двигателем с фазным ротором по статорной и роторной цепям // Материалы региональной научно-технической конференции «Автоматизация и роботизация технологических процессов». Воронеж: ВГТУ, 2009. С. 68-72.

7. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Электропривод моталки стальной полосы по схеме машины двойного питания с подключением обмоток статора и ротора к преобразователям частоты // Сборник научных трудов научно-технической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия». Липецк: ЛГТУ, 2010. Ч. 2. С. 69-74.

8. Способ регулирования частоты вращения двигателя двойного питания: пат. 2393623 Рос. Федерация. № 2008147604/09; заявл. 02.12.08; опубл. 27.06.10. Бюл. № 18. 7 с.

9. Устройство для управления двигателем двойного питания: пат. на полез. модель № 99671 Рос. Федерация. №2010119758/07; заявл. 17.05.2010; опубл. 20.11.2010. Бюл. № 32. 3 с.

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, заключается в следующем: в [1] были разработаны законы управления МДП во второй зоне и определены длительно допустимые и максимальные моменты двигателя; в работах [2,3] определены оптимальные режимы электродвигателя в системе МДП по критерию минимума потерь энергии; в [4] предложены способы бездатчикового управления машиной двойного питания; в [5] рассмотрена возможность подключения обмоток статора и ротора к одному преобразователю частоты; в [6] предложена схема МДП с АИН в статорной и роторной цепях; в [7] предложено применение электропривода с МДП в механизме моталки стальной полосы и разработаны законы управления; в [8] предложено схемное решение электропривода с МДП, обеспечивающее поддержание встречного вращения магнитных полей и равенства частот токов статора и ротора; в [9] предложена энергосберегающая векторная система управления электроприводом на базе двигателя двойного питания.