

На правах рукописи

Гельвер Фёдор Андреевич

**АЛГОРИТМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРЕБНОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ С МАШИНОЙ
ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2009

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и электрооборудование береговых установок» в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Самосейко Вениамин Францевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Соколовский Георгий Георгиевич

кандидат технических наук
Калачиков Павел Николаевич

Ведущая организация: Открытое акционерное общество
«Центральное морское конструкторское
бюро «Алмаз» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «____» _____ 2009 года в _____ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «____» _____ 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертации

М. П. Белов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время в качестве движительного комплекса судна широкое применение находят автоматизированные гребные электрические установки (ГЭУ), которые по ряду эксплуатационных параметров имеют преимущества по сравнению с установками, имеющими механическую передачу от теплового двигателя к валу винта. Вопросам проектирования и эксплуатации систем электродвижения уделяется большое внимание.

При создании судовых систем электродвижения возникает проблема обоснованного выбора типа передачи энергии к движителю и выбора типа электромеханического преобразователя электропривода гребного винта, а также алгоритмов управления ими. При этом одним из основных и важнейших критериев управления электрическими установками является показатель энергетической эффективности.

Повышение энергетической эффективности является одним из приоритетных направлений технической политики не только в области судостроения, но и в других областях науки и техники, и регламентируется Федеральным законом РФ "Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности". Повышение энергетической эффективности при управлении гребной электрической установкой ведет к уменьшению габаритов и массы источников электроэнергии, снижает потребление топлива, вызывает удешевление эксплуатации судна и увеличению автономности плавания. Побочным эффектом повышения энергетической эффективности становится снижение массы и занимаемой площади гребной электрической установки, что дополнительно обеспечивает увеличение используемой грузоподъемности.

Широкое использование регулируемых электроприводов в ГЭУ привело к тому, что современный электропривод является не только энергосиловой основой ГЭУ, позволяющей обеспечить движитель необходимой механической энергией, но и средством управления технологическими режимами работы ГЭУ, так как задачи по реализации качества работы электроустановок в настоящее время в большинстве случаев возлагаются на систему управления.

Целью работы является решение научно-технической задачи повышения энергетической эффективности и улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик ГЭУ на базе применения машин двойного питания, а также разработка алгоритмов управления ГЭУ с машиной двойного питания в режимах экономичного и полного хода.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие основные задачи:

1) Предложена методика оценки алгоритмов управления электромеханическими системами по критерию энергетической эффективности и показано, что существует управление, обеспечивающее максимальное значение показателя энергетической эффективности.

2) Выполнен поиск оптимального электромеханического преобразователя на множестве типов электрических машин, выпускаемых промышленностью при оптимальном управлении по критерию энергетической эффективности.

3) Синтезированы алгоритмы оптимального управления машиной двойного питания по критерию энергетической эффективности.

4) Выполнен анализ технологических режимов и конструктивных особенностей гребных электрических установок.

5) Разработана математическая модель автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания и синтезированы алгоритмы оптимального управления, обеспечивающие режимы экономичного и полного хода.

6) Синтезированы алгоритмы информационного обеспечения управления автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач использовались теория системного анализа, теория автоматического управления, теории электрических цепей и электрических машин. В качестве аппарата исследования использованы методы прикладной математики: векторное и матричное исчисления, дифференциальное исчисление, методы оптимизации и комплексного анализа. Численная реализация и анализ математических моделей выполнялся на ЭВМ с использованием пакета математических программ Simulink (приложения MatLab), Maple и MathCAD.

Научную новизну имеют следующие основные результаты и положения диссертационной работы:

1) Методика оценки алгоритмов управления электромеханическими системами по критерию энергетической эффективности.

2) Математическая модель машины двойного питания, отличающаяся тем, что исходные уравнения с периодическими коэффициентами преобразованы в уравнения с постоянными коэффициентами и выделены уравнения якоря и индуктора.

3) Синтез алгоритмов оптимального управления машиной двойного питания автоматизированной ГЭУ, обеспечивающих максимальное значение показателя энергетической эффективности.

4) Алгоритмы информационного обеспечения автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания.

Степень обоснованности и достоверности полученных научных результатов. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы теоретическими решениями и подтверждены результатами математического моделирования и базируются на строго доказанных выводах.

Практическая ценность полученных результатов:

1) Методика оценки качества алгоритмов управления электромеханическими системами по критерию электрических потерь.

2) Доказано, что асинхронный электродвигатель с идентичными параметрами статора и ротора при оптимальных алгоритмах управления обладает наилучшей энергетической эффективностью по сравнению с другими видами электромеханических преобразователей, и позволяет развивать двойную мощность при потерях энергии не превышающих номинальные.

3) Установлено, что использование машины двойного питания с идентичными параметрами статора и ротора позволит создать автоматизированную движительную установку с уменьшенными массогабаритными показателями и высоким показателем энергетической эффективности.

4) Создана информационная база данных составных элементов гребных электрических установок.

5) Возможность использования машины двойного питания не только при проектировании новых и модернизации существующих установок ГЭУ, но и применение в различных областях техники.

Реализация результатов работы. Научные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы использованы в разрабатываемых проектах и НИР одного из ведущих научно-исследовательских институтов России по созданию ГЭУ и судового электропривода ФГУП «ЦНИИ СЭТ».

Положения диссертационной работы, выносимые на защиту:

- 1) Методика оценки алгоритмов управления электромеханическими системами по критерию энергетической эффективности.
- 2) Математическая модель машины двойного питания, представленная в виде уравнений индуктора и якоря.
- 3) Алгоритмы оптимального управления машиной двойного питания автоматизированной ГЭУ в режимах экономичного и полного хода, обеспечивающие максимальные значения показателей энергетической эффективности и быстродействия соответственно.
- 4) Уравнения наблюдателей состояния машины двойного питания позволяющие строить системы управления без датчика частоты вращения.

Апробация работы. Основные результаты работы изложены: в трудах V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2007»; на ежегодных научно-технических конференциях молодых ученых сотрудников СПГУВК 2004-2009 гг.; на заседаниях секции НТС ФГУП «ЦНИИ СЭТ» в 2007 и 2008 гг.

Публикации. Основные положения работы опубликованы в 8 статьях, в том числе две из них опубликованы в издании, имеющимся в перечне научных журналов ВАК Министерства образования и науки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Работа изложена на 135 страницах основного текста, содержит 52 рисунка и 4 таблицы. Список литературы включает 105 наименования.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи, объект и предмет исследования. Показана научная новизна и практическая ценность выполненной работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту, и практическая ценность полученных результатов диссертационной работы.

В первой главе освещаются вопросы, связанные с анализом структурных схем гребных установок, приводятся достоинства и недостатки электрического привода. Приведены количественные оценки при сравнении редукторного и безредукторного приводов ГЭУ по критериям коэффициента полезного действия, массе и габариту. Рассматриваются различные виды электромеханических преобразователей, производится их сравнение по ряду показателей качества для привода ГЭУ и обосновывается целесообразность использования машины двойного питания. В завершении главы устанавливаются границы между двумя тенденциями построения ГЭУ и области применения машин двойного питания.

Гребная установка – комплекс, образованный первичным двигателем, движителем и системой их сопряжения. Наиболее простая технология передачи энергии от теплового двигателя к движителю состоит в прямом соединении их валом. Однако управляемость судном возрастает, если передача энергии осуществляется от первичного двигателя через энергосистему, образованную генератором электрической энергии и электродвигателем.

Важными факторами ГЭУ являются энергетические и массогабаритные показатели. Уменьшить габаритные размеры и стоимость электрических машин можно за счет повышения частоты их вращения. Но чем выше частота вращения двигателя и меньше масса, габаритные размеры и стоимость двигателя, тем больше редуктор - его масса, габаритные размеры и стоимость. Возникает конфликтная ситуация: электромашиностроитель, минимизируя собственные затраты (кг/кВт) и повышая КПД электродвигателя, увеличивает его частоту вращения, а это приводит к увеличению массы и стоимости редуктора. Максимальная же частота вращения гребного винта лежит в пределах 200÷300 оборотов в минуту и зависит от технических характеристик и параметров самого винта. При рассмотрении различных типов электромеханических преобразователей ГЭУ по ряду показателей качества установлено, что асинхронный электродвигатель с фазным ротором по сравнению с другими электромеханическими преобразователями обладает лучшей энергетикой, что особенно актуально для автономных систем, к которым относятся системы электродвижения. Применение электродвигателя двойного питания ведет к повышению частоты вращения и необходимости применения редуктора. Поэтому в данной главе устанавливаются границы между двумя тенденциями построения ГЭУ и области применения машин двойного питания.

Анализ редукторного и безредукторного ГЭУ направлен на определение областей их преимущественного применения. Для более наглядного сравнения в данной главе приведены графики сравнения вариантов безредукторного электропривода с низкооборотной электрической машиной и редукторного привода с асинхронным электродвигателем двойного питания. Сравнение производилось проектов разрабатываемых в ФГУП «ЦНИИ СЭТ» с альтернативными вариантами гребной электрической установки, в состав которой входит машина двойного питания и редуктор.

На рис.1 представлены зависимости относительной массы безредукторных и редукторных

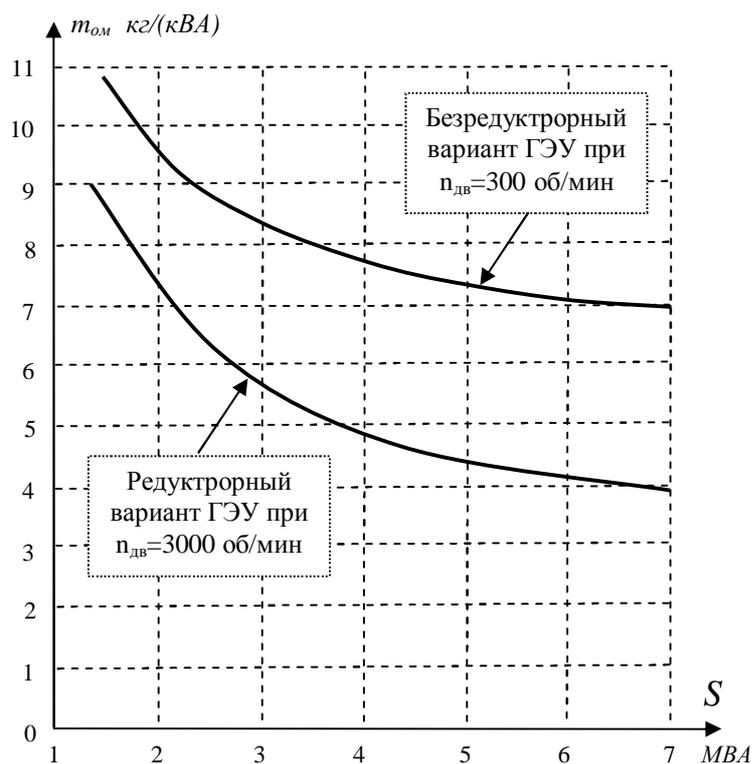


Рис. 1. Зависимости относительной массы безредукторных и редукторных ГЭУ

торных вариантов построения ГЭУ. Из данных графиков следует, что по массогабаритным показателям, безредукторные ГЭУ уступают редукторным. Особенно это проявляется у установок большой мощности. Следовательно, применение редукторного электропривода с машиной двойного питания в ГЭУ следует считать перспективным и более предпочтительным, так как он обладает более высокой удельной мощностью по массе (кВт/кг) и более высокой удельной мощностью по объему (кВт/м³).

Вторая глава посвящена вопросам математического описания асинхронной машины с фазным ротором при двойном

питании и синтезу алгоритмов управления автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания, по критериям энергетической эффективности и быстродействия.

Использование стандартной схемы подключения машины двойного питания не позволяет получить максимальной энергетической эффективности использования асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Поэтому предлагается модификация данной схемы позволяющая получить наилучшие показатели энергетической эффективности использования асинхронного электродвигателя, с фазным ротором, изображенная на рис.2.

Преобразователь частоты (ПЧ) позволяет синтезировать симметричные трехфазные синусоидальные напряжения:

$$\mathbf{U}_S = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = U_1 \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 \cdot t + j) \\ \cos(\omega_1 \cdot t + j - r) \\ \cos(\omega_1 \cdot t + j + r) \end{bmatrix},$$

где j - начальная фаза напряжения; $r=2\cdot p/3$; U_1 - амплитуда напряжения на выходе преобразователя частоты; ω_1 - угловая частота напряжения.

Последовательность чередования фаз обмотки статора будем считать прямой, а у ротора – обратной. Следует отметить, что если обмотки статора и ротора имеют одинаковую последовательность чередования фаз, то поля статора и ротора будут вращаться с одинаковой скоростью ω_1 в одном направлении, а ротор будет неподвижным. Если обмотки статора и ротора имеют различную последовательность чередования фаз, то поля статора и ротора будут вращаться с одинаковой скоростью ω_1 , но в различных направлениях, а ротор будет вращаться с двойной угловой скоростью $\omega = 2 \cdot \omega_1$.

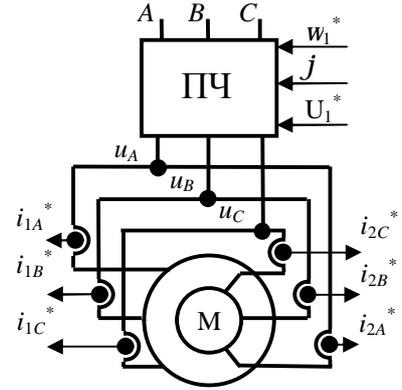


Рис. 2. Схема питания ротора и статора асинхронного электродвигателя от одного электрического преобразователя

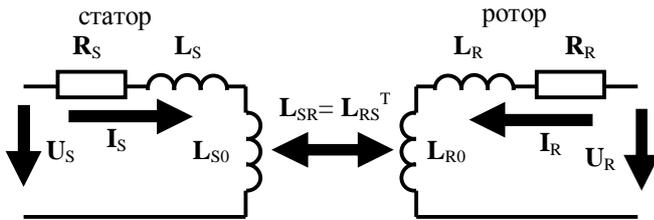


Рис. 3. Схема замещения обмоток статора и ротора асинхронной машины

Математическая модель асинхронного электродвигателя с магнитосвязанными обмотками статора и ротора может быть представлена схемой замещения представленной на рис.3. На данной схеме $\mathbf{R}_S = R_S \cdot \mathbf{1}$ и $\mathbf{R}_R = R_R \cdot \mathbf{1}$ - матрицы активных сопротивлений фаз статора и ротора соответственно; $\mathbf{L}_S = L_S \cdot \mathbf{1}$ и $\mathbf{L}_R = L_R \cdot \mathbf{1}$ - матри-

цы индуктивностей рассеяния фаз статора и ротора соответственно.

Матрицы основных и взаимных индуктивностей обмоток обобщенной машины, учитывая симметрию магнитной системы и обмоток, можно переписать в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L}_{SS} & \mathbf{L}_{SR}(g) \\ \mathbf{L}_{RS}(g) & \mathbf{L}_{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{SS} \cdot \mathbf{D}_S^T \cdot \mathbf{D}_S & L_{SR} \cdot \mathbf{D}_S^T \cdot \mathbf{V}(g) \cdot \mathbf{D}_R \\ L_{RS} \cdot \mathbf{D}_R^T \cdot \mathbf{V}(g)^T \cdot \mathbf{D}_S & L_{RR} \cdot \mathbf{D}_R^T \cdot \mathbf{D}_R \end{bmatrix}$$

где $L_{SS} = \omega_S^2 \cdot I_0$; $L_{SR} = L_{RS} = \omega_S \omega_R \cdot I_0$; $L_{RR} = \omega_R^2 \cdot I_0$; I_0 - основная магнитная проводимость; \mathbf{D}_S , \mathbf{D}_R - фазные матрицы обмоток статора и ротора; ω_S и ω_R - эквивалентное число витков фазных обмоток статора и ротора, равное произведению числа витков фазных обмоток на обмоточный коэффициент; $\mathbf{V}(g)$ - матрица вращения; $g = \omega t$ - угол поворота ротора, рад; ω - угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Используя второй закон Кирхгофа, запишем уравнения в естественной системе координат A, B, C

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_S &= \mathbf{R}_S \cdot \mathbf{I}_S + \mathbf{L}_{SS} \cdot p \mathbf{I}_S + p (\mathbf{L}_{SR} \cdot \mathbf{I}_R); \\ \mathbf{U}_R &= \mathbf{R}_R \cdot \mathbf{I}_R + \mathbf{L}_{RR} \cdot p \mathbf{I}_R + p (\mathbf{L}_{RS} \cdot \mathbf{I}_S), \end{aligned} \quad (1)$$

где p – оператор дифференцирования переменной по времени t .

Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя определяется выражением:

$$M = \mathbf{I}_S^T \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{g}} \mathbf{L}_{SR}(\mathbf{g}) \cdot \mathbf{I}_R = - \mathbf{I}_R^T \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{g}} \mathbf{L}_{RS}(\mathbf{g}) \cdot \mathbf{I}_S. \quad (2)$$

Получившиеся уравнения являются линейными с периодическими коэффициентами в виде матриц вращения. Для упрощения анализа и синтеза динамических процессов целесообразно произвести дальнейшие преобразования.

Токи и напряжения в системе координат u, v связаны с векторами в естественной системе координат соотношениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= 2/m \cdot \mathbf{V}(w_1 \cdot t)^T \cdot \mathbf{D}_S \cdot \mathbf{U}_S; & \mathbf{I}_1 &= 2/m \cdot \mathbf{V}(w_1 \cdot t)^T \cdot \mathbf{D}_S \cdot \mathbf{I}_S; \\ \mathbf{U}_2 &= 2/n \cdot (w_S/w_R) \cdot \mathbf{V}(w_2 \cdot t)^T \cdot \mathbf{D}_R \cdot \mathbf{U}_R; & \mathbf{I}_2 &= 2/m \cdot (w_R/w_S) \cdot \mathbf{V}(w_2 \cdot t)^T \cdot \mathbf{D}_R \cdot \mathbf{I}_R. \end{aligned}$$

Векторы $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ характеризуются двумя координатами на плоскости:

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} u_{1u} \\ u_{1v} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U}_2 = \begin{bmatrix} u_{2u} \\ u_{2v} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} i_{1u} \\ i_{1v} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} i_{2u} \\ i_{2v} \end{bmatrix}.$$

В результате замены переменных получим новую систему уравнений **в осях координат u, v** в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= R_1 \cdot \mathbf{I}_1 + w_1 \cdot L_{11} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_1 + L_{11} \cdot p \mathbf{I}_1 + w_1 \cdot L_0 \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_2 + L_0 \cdot p \mathbf{I}_2; \\ \mathbf{U}_2 &= R_2 \cdot \mathbf{I}_2 + w_2 \cdot L_{22} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_2 + L_{22} \cdot p \mathbf{I}_2 + w_2 \cdot L_0 \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_1 + L_0 \cdot p \mathbf{I}_1, \end{aligned} \quad (3)$$

где $L_{11} = L_0 + L_1$; $L_{22} = L_0 + L_2$.

Электромагнитный момент m - фазной асинхронной машины на пару полюсов в осях координат u, v определяется выражением:

$$M = (m/2) \cdot L_0 \cdot \mathbf{I}_1^T \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_2. \quad (4)$$

Уравнения, записанные для двумерных векторов в осях координат u, v , можно переписать в комплексной форме записи путем формальной замены \mathbf{E} на мнимую единицу j , а векторы $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ на комплексные переменные:

$$\underline{u}_1 = u_{1U} + j \chi_{1V}, \quad \underline{u}_2 = u_{2U} + j \chi_{2V}, \quad \underline{i}_1 = i_{1U} + j \chi_{1V}, \quad \underline{i}_2 = i_{2U} + j \chi_{2V}.$$

Тогда уравнения в осях координат u, v **в комплексной форме** записи:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot w_1 \chi_{11} \cdot \underline{I}_1 + L_{11} \cdot p \underline{I}_1 + j \cdot w_1 \chi_{01} \cdot \underline{I}_2 + L_0 \cdot p \underline{I}_2; \\ \underline{U}_2 &= R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot w_2 \chi_{22} \cdot \underline{I}_2 + L_{22} \cdot p \underline{I}_2 + j \cdot w_2 \chi_{02} \cdot \underline{I}_1 + L_0 \cdot p \underline{I}_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Электромагнитный момент в комплексных переменных определяется:

$$M = \frac{1}{2} \cdot j \cdot L_0 \cdot (\hat{\underline{I}}_1 \cdot \underline{I}_2 - \underline{I}_1 \cdot \hat{\underline{I}}_2) = L_0 \cdot [\text{Im}(\underline{I}_1) \cdot \text{Re}(\underline{I}_2) - \text{Re}(\underline{I}_1) \cdot \text{Im}(\underline{I}_2)], \quad (6)$$

где $\hat{\underline{I}}$ - сопряженное комплексное число \underline{I} ; $\text{Re}(\underline{I})$ - действительная часть числа \underline{I} ; $\text{Im}(\underline{I})$ - мнимая часть числа \underline{I} .

В матричной форме записи выражение для электромагнитного момента будет иметь следующий вид:

$$M = \frac{1}{2} \cdot j \cdot L_0 \cdot \underline{\mathbf{I}}^T \cdot \mathbf{E} \cdot \hat{\underline{\mathbf{I}}} = L_0 \cdot \text{Im}(\underline{\mathbf{I}}^T) \cdot \mathbf{E} \cdot \text{Re}(\underline{\mathbf{I}}).$$

Комплексные амплитуды напряжений обмоток статора и ротора можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= U_1 \cdot \exp(j \cdot \varphi) = U_d + j \cdot U_q; \\ \underline{U}_2 = \hat{\underline{U}}_1 &= U_1 \cdot \exp(-j \cdot \varphi) = U_d - j \cdot U_q, \end{aligned} \quad (7)$$

где $U_d = U_1 \cdot \cos(\varphi)$; $U_q = U_1 \cdot \sin(\varphi)$. Комплексная амплитуда U_1 связана с комплексом действующего значения U_1 соотношением: $U_1 = U_1 \cdot \sqrt{2}$.

Динамика электромагнитных процессов описывается дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega_1 \mathcal{X}_{L11} \cdot \underline{I}_1 + L_{11} \cdot p \underline{I}_1 + j \cdot \omega_1 \mathcal{X}_{L0} \cdot \underline{I}_2 + L_0 \cdot p \underline{I}_2; \\ \hat{\underline{U}}_1 &= R_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot \omega_2 \mathcal{X}_{L22} \cdot \underline{I}_2 + L_{22} \cdot p \underline{I}_2 + j \cdot \omega_2 \cdot L_0 \cdot \underline{I}_1 + L_0 \cdot p \underline{I}_1. \end{aligned}$$

Будем полагать, что обмотки статора и ротора имеют одинаковые параметры: $R_1 = R_2 = R$; $L_1 = L_2$; $L_{11} = L_{22}$. При равенстве параметров статора и ротора несложно установить, что токи статора и ротора связаны соотношениями $\underline{I}_1 = \hat{\underline{I}}_2$ и $\underline{I}_2 = \hat{\underline{I}}_1$. Тогда уравнения примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega_1 \mathcal{X}_{L11} \cdot \underline{I}_1 + L_{11} \cdot p \underline{I}_1 + j \cdot \omega_1 \cdot L_0 \cdot \hat{\underline{I}}_1 + L_0 \cdot p \hat{\underline{I}}_1; \\ \hat{\underline{U}}_1 &= R_1 \cdot \hat{\underline{I}}_1 - j \cdot \omega_1 \mathcal{X}_{L11} \cdot \hat{\underline{I}}_1 + L_{11} \cdot p \hat{\underline{I}}_1 - j \cdot \omega_1 \cdot L_0 \cdot \underline{I}_1 + L_0 \cdot p \underline{I}_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Первое уравнение напряжений является сопряженным уравнением по отношению ко второму уравнению. Комплексы токов статора и ротора:

$$\underline{I}_1 = I_d + j \mathcal{X}_{I_q}; \quad \underline{I}_2 = \hat{\underline{I}}_1 = I_d - j \mathcal{X}_{I_q}. \quad (9)$$

Графическая иллюстрация связей между векторами токов представлена на рис.4. Ток I_d будем называть током намагничивания, а ток I_q - током нагрузки.

В результате замены переменных (7) и (9) в уравнениях (8) получим новые уравнения с вещественными переменными:

$$U_d = R \cdot I_d - \omega_1 \cdot L_q \cdot I_q + L_d \cdot p I_d; \quad (10)$$

$$U_q = R \cdot I_q + \omega_1 \cdot L_d \cdot I_d + L_q \cdot p I_q, \quad (11)$$

где $L_q = L_1 = L_2$; $L_d = 2 \cdot L_0 + L_1 \approx 2 \cdot L_0$. При этом электромагнитный момент машины можно записать в следующем виде:

$$M = j \cdot (1/2) \cdot L_0 \cdot (\hat{\underline{I}}_1 \cdot \underline{I}_2 - \underline{I}_1 \cdot \hat{\underline{I}}_2) = 2 \cdot L_0 \cdot I_d \cdot I_q = (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q \approx L_d \cdot I_d \cdot I_q. \quad (12)$$

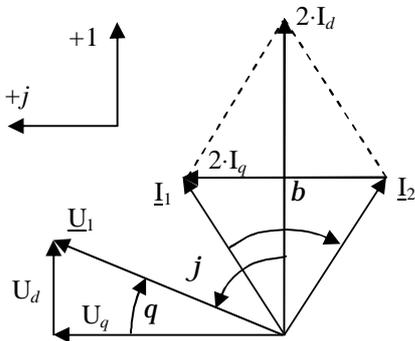


Рис. 4. Векторная диаграмма токов и напряжений

Новые уравнения записаны в скалярной форме и имеют второй порядок. Индуктивность L_q много меньше индуктивности L_d . Значение $L_q = L_1$ составляет всего около двух процентов от индуктивности $L_d \approx 2 \cdot L_0$. Полученные уравнения аналогичны уравнениям машины постоянного тока. Первое уравнение является уравнением индуктора и аналогично уравнению цепи обмотки возбуждения машины постоянного тока, а второе – обмотки якоря.

Алгоритм управления машиной двойного питания по критерию энергетической эффективности

Управление, обеспечивающее максимальный коэффициент энергетической эффективности $k_3=1$ заключается в обеспечении заданного электромагнитного момента с минимальными потерями энергии в обмотках статора и ротора.

Согласно уравнению электромагнитного момента (12) и условию $I_d^2 + I_q^2 = I_l^2$ в гл.3 показано, что для управления ГЭУ с машиной двойного питания с максимальным коэффициентом энергетической эффективности необходимо, чтобы выполнялись условия: $I_1 = I_2$, $b = p/2$ (или $I_d = I_q$). Добиться равенства $I_d = I_q$ можно путем воздействия на вектор напряжения \underline{U}_1 при $w_1 = w/2$.

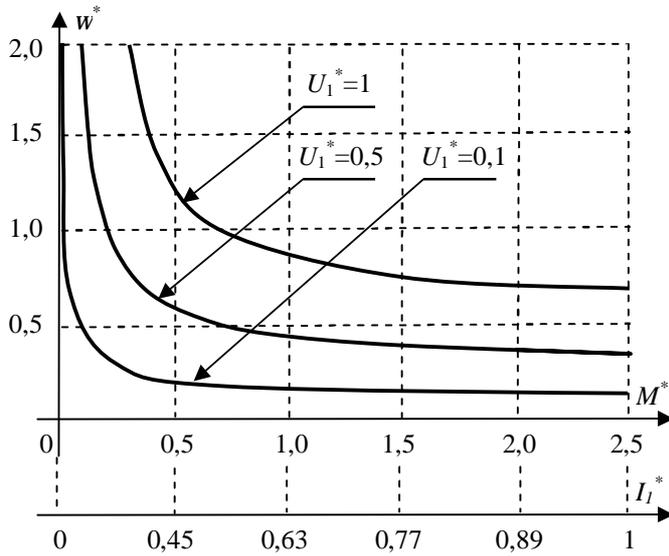


Рис. 5. Статические механические (электро-механические) характеристики при управлении с максимальным коэффициентом энергетической эффективности

Полагая в уравнениях (10) и (11) $p=0$, $I_d = I_q$, $w_1 = w/2$ и $M^* = L_d^* \cdot I_d^* \cdot I_q^*$, находим формулу для статической механической (электро-механической) характеристики машины двойного питания при управлении с максимальным коэффициентом энергетической эффективности:

$$M^* = U_1^{*2} \cdot L_d^* / [(R^* - L_q^* \cdot w^*/2)^2 + (R^* + L_d^* \cdot w^*/2)^2].$$

При управлении с максимальным коэффициентом энергетической эффективности статические механические характеристики электродвигателя при двойном питании (рис.5) аналогичны характеристикам электродвигателя постоянного тока с последовательной обмоткой возбужде-

ния. Область возможного управления асинхронным электродвигателем при двойном питании с минимальными потерями находится ниже кривой соответствующей напряжению $U_1^* = 1$ (рис.5).

Алгоритм управления машиной двойного питания по критерию быстродействия

Управление с постоянным током намагничивания заключается в поддержании постоянства модуля тока $I_d^* = 1/(2 \cdot L_0^*) \approx 1/L_d^*$. Такое значение тока намагничивания I_d выбирается исходя из значения тока холостого хода при $U_1 = U_n$, $w_1 = w_n$. При постоянстве тока намагничивания электромагнитный момент в соответствии с формулой (12), будет пропорционален, а в относительных единицах и равен току нагрузки I_q :

$$M^* = I_q^*. \quad (13)$$

Для статического режима работы уравнения (10) и (11) в относительных единицах приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} U_d^* &= (R^*/L_d^* - w_1^* \cdot L_q^* \cdot M^*); \\ U_q^* &= (R^* \cdot M^* + w_1^*). \end{aligned}$$

Первое уравнения характеризует контур намагничивания. Второе уравнение аналогично уравнению якоря машины постоянного тока. Используя второе уравнение можно построить статическую механическую (электромеханическую) характеристику асинхронного электродвигателя при постоянном токе намагничивания I_d^* .

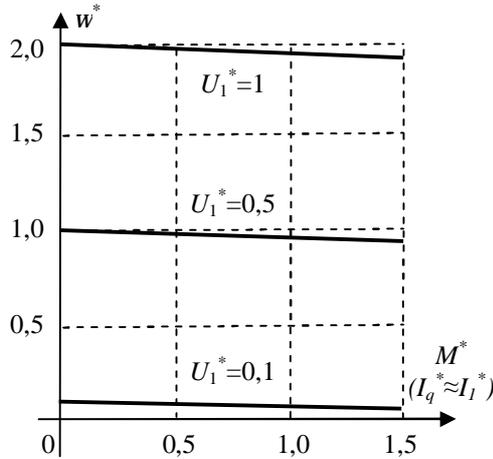


Рис. 6. Статические механические (электромеханические) характеристики при управлении с максимальным быстродействием

Данный алгоритм управления позволяет получить статические механические характеристики (рис.6) полностью аналогичные характеристикам электродвигателя постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения и обеспечивает высокое быстродействие регулирования электромагнитного момента, существенно превосходящее аналогичное регулирование двигателя постоянного тока.

Третья глава посвящена вопросам энергетической эффективности процесса передачи энергии в ГЭУ с машиной двойного питания. Предложен метод оценки электромеханических преобразователей и алгоритмов их управления по критерию энергетической эффективности. Приводятся количественные оценки сравнения различных видов электрических машин переменного тока по составляющим потерь энергии.

Потери мощности ΔP имеют достаточно сложную структуру и в подавляющем большинстве математических моделей учитываются лишь электрические потери в обмотках ΔP_3 .

Показатель энергетической эффективности электромеханического преобразователя. Так как электромеханический преобразователь предназначен для создания электромагнитного момента $M = L_0 \cdot I_I \cdot I_{II} \cdot \sin(b)$, то эффективность его работы удобно оценивать показателем энергетической эффективности равным отношению электромагнитного момента к потерям мощности в обмотках:

$$\mathcal{E} = \frac{M}{\Delta P_3} = \frac{L_0 \cdot I_I \cdot I_{II} \cdot \sin(b)}{R_1 \cdot I_I^2 + R_2 \cdot I_{II}^2} = T_0 \cdot \sqrt{c} \cdot \frac{g \cdot \sin(b)}{c + g^2},$$

где $T_0 = \frac{L_0}{\sqrt{R_1 \cdot R_2}}$ - основная постоянная времени; $g = I_{II}/I_I$; $c = R_1/R_2$.

Максимальные значения показателей энергетической эффективности различных видов электрических машин позволяют достаточно просто производить их сравнение по критерию электрических потерь энергии.

Коэффициент энергетической эффективности электромеханического преобразователя. Для оценки энергетической эффективности работы электромеханического преобразователя введен еще один показатель k_3 - коэффициент энергетической эффективности электромеханического преобразователя определяемый как отношение минимально возможных потерь $DP_{3, \text{опт}}$ к фактическим потерям DP_3 при создании одного и того же электромагнитного момента:

$$k_3 = DP_{3, \text{опт}}/DP_3; \quad \text{либо} \quad k_3 = \mathcal{E}/\mathcal{E}_{\text{опт}}.$$

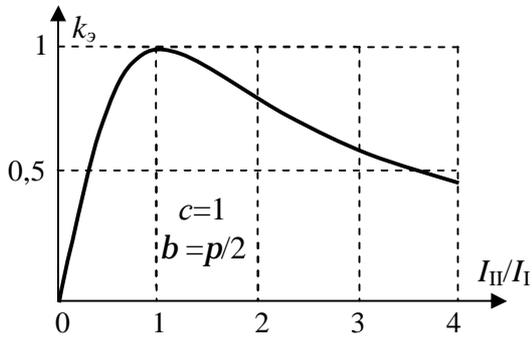


Рис. 7. Зависимость коэффициента энергетической эффективности от отношения токов статора и ротора

График зависимости коэффициента эффективности от отношения токов статора и ротора $g = I_{II}/I_I$ при $c = R_1/R_2=1$ и $\sin(b)=1$ приведен на рис.7. Из рисунка видно, что для работы асинхронного электродвигателя с фазным ротором с максимальной энергетической эффективностью необходимо выполнение следующих условий: $R_1=R_2$; $L_1=L_2$; $L_{11}=L_{22}$; $I_I=I_{II}$ и $\sin(b)=1$. Данные условия могут быть обеспечены конструкцией электрической машины, схемой ее соединения и соответствующими алгоритмами управления, рассмотренными в гл.2.

Таблица 1

Электрические потери энергии в различных типах машин переменного тока и их сравнительная оценка

Тип электрической машины	Среднестатистические параметры машины (приведены в о.е.)	Зависимость для определения электрических потерь / электромагнитного момента	Показатель энергетической эффективности	Максимальное значение показателя энергетической эффективности
Реактивный электродвигатель	$L_{dd}^* = 1,25$ $L_{qq}^* = 0,15$ $R_1^* = 0,04$ $L_1^* = 0,08$	$\Delta P = R_1 \cdot i_1^2$ $M = L_m \cdot i_1^2 \cdot \sin(2 \cdot b)$	$\mathcal{E} = \frac{L_m}{R_1} \cdot \sin(2 \cdot b)$ где $L_m = \frac{L_d - L_q}{2} = \frac{L_{dd} - L_{qq}}{2}$ $L_d = L_{dd} + L_1$; $L_q = L_{qq} + L_1$	$\mathcal{E}_{\max} = \frac{L_m}{R_1} = 13,8$
Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором	$R_1^* = R_2^* = 0,04$; $L_1^* = L_2^* = X_1^* = X_2^* = 0,1$; $L_0^* = X_0^* = 2,5$; $R_0^* = 0,25$	$\Delta P = R_1 \cdot i_1^2 + R_2 \cdot i_2^2$ $M = L_0 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \sin(b)$	$\mathcal{E} = \frac{L_0 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \sin(b)}{R_1 \cdot i_1^2 + R_2 \cdot i_2^2}$	$\mathcal{E}_{\max} = \frac{L_0}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_1 \cdot R_2}} = 22,1$
Синхронный электродвигатель	$L_{dd}^* = 1,35$; $L_{qq}^* = 0,8$; $L_1^* = 0,12$; $L_f^* = 0,22$; $L_{2d}^* = 0,1$; $L_{2q}^* = 0,075$; $R_1^* = 0,030$; $R_f^* = 0,020$; $R_{2d}^* = 0,04$; $R_{2q}^* = 0,03$	$\Delta P = R_1 \cdot i_1^2 + R_f \cdot i_f^2$ $M = L_m \cdot i_1^2 \cdot \sin(2 \cdot b) + L_{dd} \cdot i_f \cdot i_1 \cdot \sin(b)$ где $L_m = (L_d - L_q)/2$	$\mathcal{E} = \frac{L_m \cdot i_1^2 \cdot \sin(2 \cdot b)}{R_1 \cdot i_1^2 + R_f \cdot i_f^2} + \frac{L_{dd} \cdot i_f \cdot i_1 \cdot \sin(b)}{R_1 \cdot i_1^2 + R_f \cdot i_f^2}$	$\mathcal{E}_{\max} = \frac{L_0}{2 \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_f}} = 24,4$ для невнуполюсной синхронной машины имеющей симметричную магнитную систему где $L_0 = (L_d + L_q)/2$, $L_d = L_1 + L_{dd}$ и $L_q = L_1 + L_{qq}$
Асинхронный электродвигатель с фазным ротором	$R_1^* = R_2^* = 0,04$; $L_1^* = L_2^* = X_1^* = X_2^* = 0,1$; $L_0^* = X_0^* = 2,5$; $R_0^* = 0,25$	$\Delta P = R_1 \cdot i_1^2 + R_2 \cdot i_2^2$ $M = L_0 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \sin(b)$	$\mathcal{E} = \frac{L_0 \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \sin(b)}{R_1 \cdot i_1^2 + R_2 \cdot i_2^2}$	$\mathcal{E}_{\max} = \frac{L_0}{2 \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}} = 31,2$ при $b = p/2$, $i_1^2 \cdot R_1 = i_2^2 \cdot R_2$

На основе показателей, характеризующих эффективность работы электромеханического преобразователя, в таб.1 приводится сравнение электрических машин переменного тока по критерию потерь энергии.

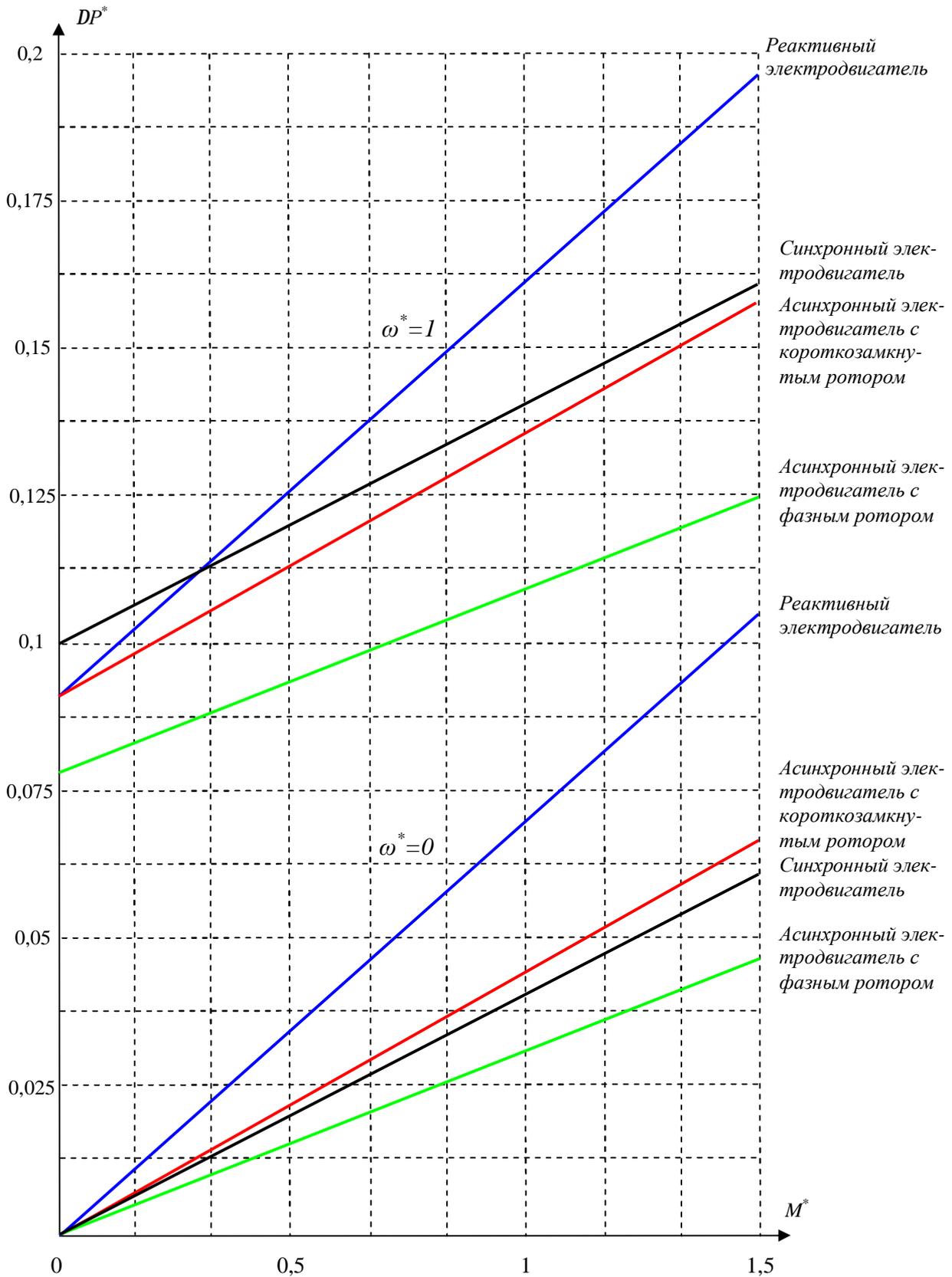


Рис. 8. Семейство зависимостей $DP^* = f(M^*)$ при различных ω^* для электрических машин переменного тока

На рис.8 приведены семейства зависимости полных потерь от значения электромагнитного момента при различных значениях частоты вращения для рассматриваемых электрических машин. Из приведенных зависимостей видно, что меньшие электрические потери на единицу электромагнитного момента у асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Таким образом, по критерию энергетической эффективности асинхронный электродвигатель с фазным ротором является лучшим.

Четвертая глава посвящена моделированию переходных и установившихся процессов автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания. В данной главе решается задача синтеза системы управления и осуществляется моделирование динамических процессов в автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания в различных режимах работы. Предложены рекомендации областей применения электропривода с машиной двойного питания.

Для движения судна в свободной воде используются два технологических режима работы автоматизированной ГЭУ: режим экономичного хода и режим полного хода. Основным режимом работы автоматизированной ГЭУ является режим экономичного хода, на скоростях вращения вала гребного электродвигателя от 0 до 60% от номинальной скорости.

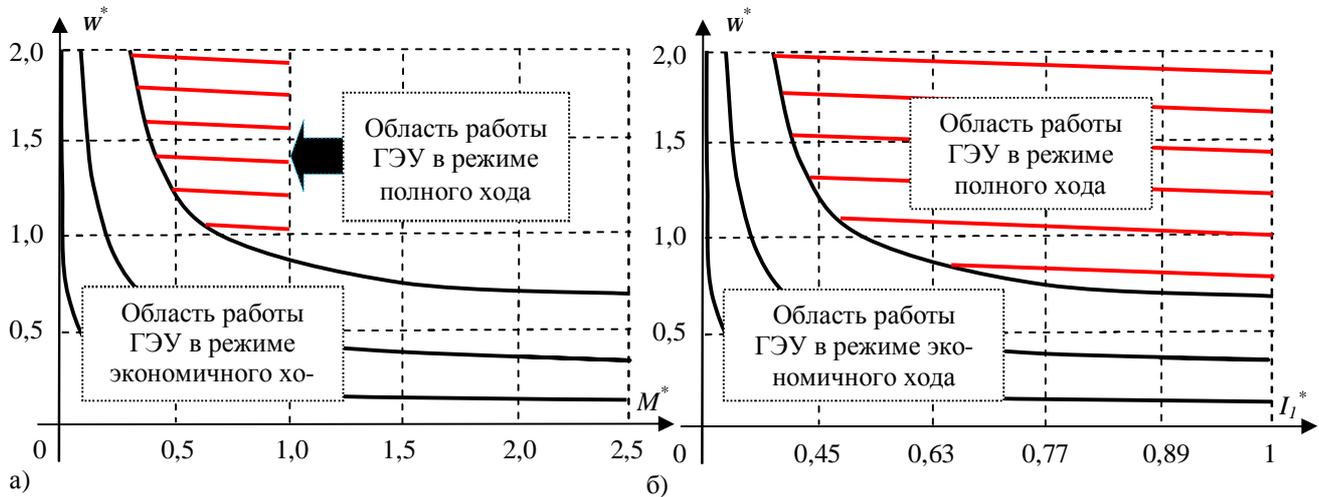


Рис. 9. Статические механические и электромеханические характеристики при работе автоматизированной ГЭУ в режимах экономичного и полного хода

Области работы автоматизированной ГЭУ в режиме экономичного хода и в режиме полного хода на механических и электромеханических характеристиках представлены на рис.9. Переход на технологический режим полного хода для ГЭУ с машиной двойного питания осуществляется автоматически в том случае, когда невозможно осуществить управление ГЭУ в режиме экономичного хода. Для швартовного режима, либо режима требующего быстрой отработки управляющего воздействия, используется режим “форсировки”.

На рис.10 представлены совместные механические характеристики машины двойного питания ГЭУ и приведенная к валу электродвигателя характеристика винта.

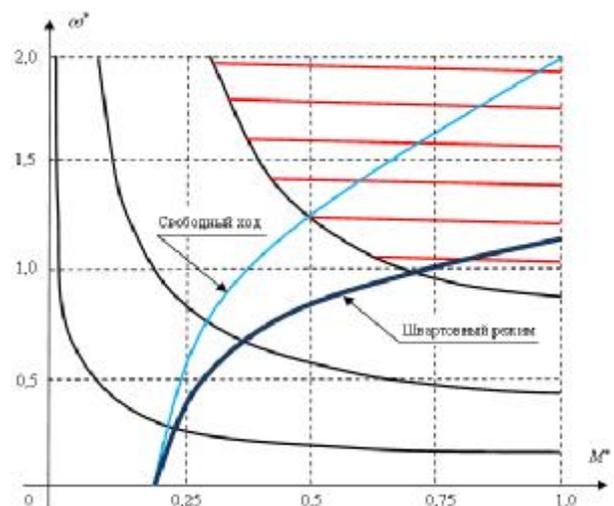


Рис. 10. Совместная механическая характеристика машины двойного питания ГЭУ и движителя (винта)

На рис.12 представлены результаты моделирования работы автоматизированной ГЭУ в режиме экономичного хода. Моделирование осуществляется во временной области, а все остальные параметры задаются в относительных единицах.

Синтез системы управления автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания по критерию быстродействия. Моделирование работы ГЭУ в режиме полного хода

Структурная схема системы управления автоматизированной ГЭУ с асинхронным электродвигателем при двойном питании с двумя контурами скорости и алгоритмом управления обеспечивающем максимальное быстродействие приведена на рис.13.

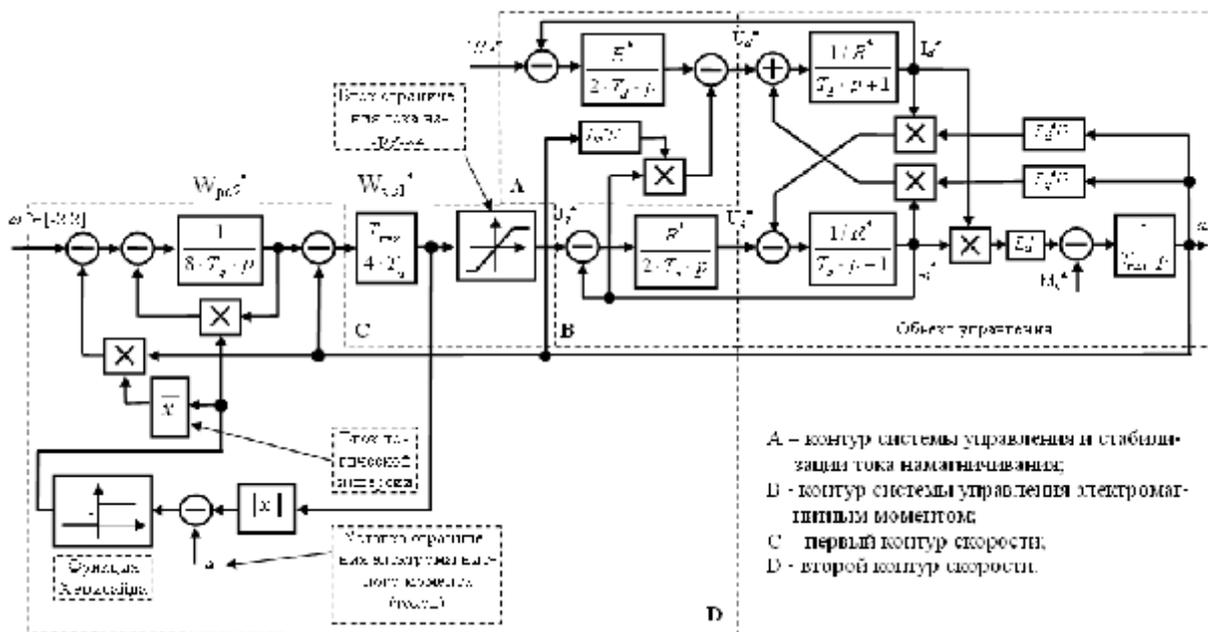


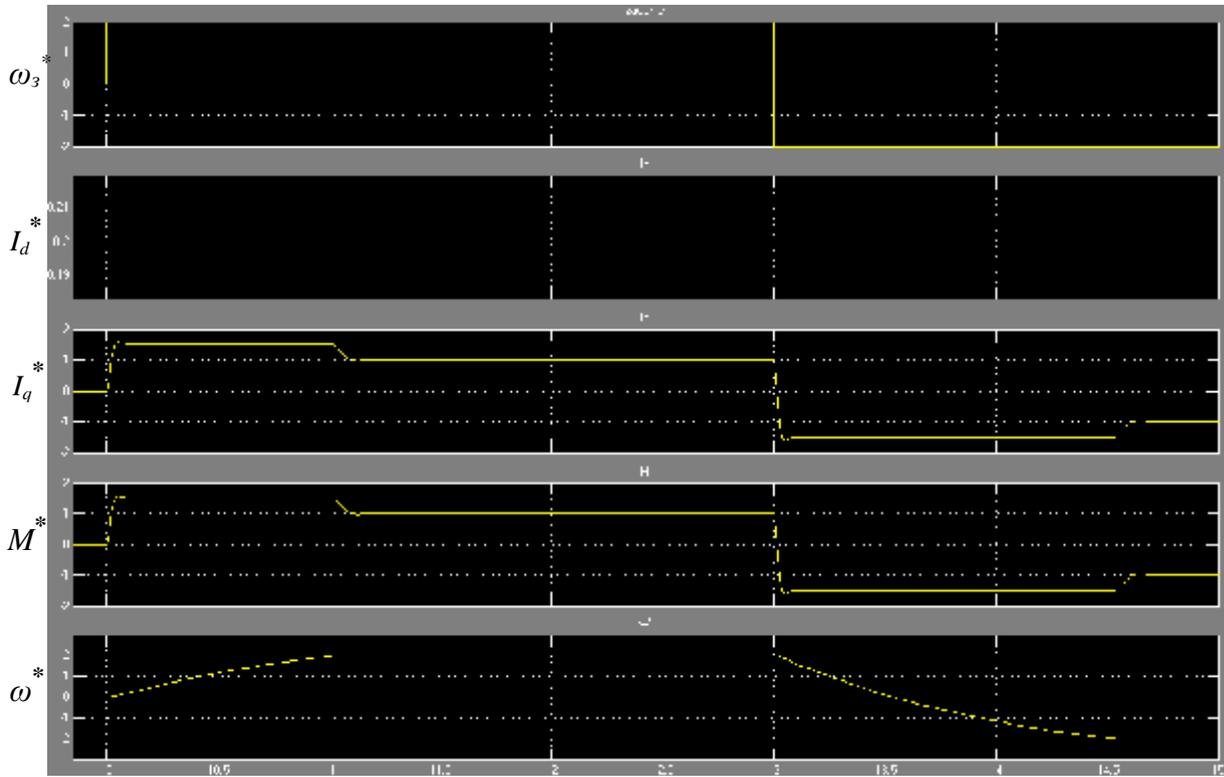
Рис. 13. Структурная схема системы управления автоматизированной ГЭУ с асинхронным электродвигателем при двойном питании с двумя контурами скорости и алгоритмом управления обеспечивающем максимальное быстродействие

Представленная система управления позволяет осуществлять управление автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания в режиме полного хода с максимальным быстродействием. Управление и динамические характеристики данного режима практически полностью аналогичны режиму “форсировки” рассмотренному далее.

Моделирование технологического режима работы автоматизированной ГЭУ – режима “форсировки” (режима полного хода)

На рис.14 представлены результаты моделирования работы автоматизированной ГЭУ в режиме “форсировки” (режиме полного хода). На представленных результатах моделирования (рис.12 и рис.14) видно, что процессы, протекающие при работе автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания, обладают желаемым динамическим поведением.

Синтез систем управления ГЭУ осуществлялся методом последовательной коррекции и подчиненного регулирования с настройкой на технический оптимум. Математическое моделирование выполнено в интерактивной среде *Simulink*.



t, (с)

Рис. 14. Временная диаграмма моделирования работы ГЭУ в режиме “форсировки” (режиме полного хода)

Информационное обеспечение системы управления

Рассматриваются уравнения наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя с фазным ротором, позволяющего по результатам наблюдения токов статора и ротора производить вычисление токов нагрузки, намагничивания и частоты вращения ротора.

По информации с датчиков токов находятся функции:

$$c_A = (i_{1A}^* + i_{2A}^*)/I_D^*; \quad c_B = (i_{1B}^* + i_{2B}^*)/I_D^*; \quad c_C = (i_{1C}^* + i_{2C}^*)/I_D^*;$$

$$s_A = (i_{1A}^* - i_{2A}^*)/I_Q^*; \quad s_B = (i_{1B}^* - i_{2B}^*)/I_Q^*; \quad s_C = (i_{1C}^* - i_{2C}^*)/I_Q^*,$$

где $I_D^* = \{2/3 \cdot [(i_{1A}^* + i_{2A}^*)^2 + (i_{1B}^* + i_{2B}^*)^2 + (i_{1C}^* + i_{2C}^*)^2]\}^{1/2}$;

$I_Q^* = \{2/3 \cdot [(i_{1A}^* - i_{2A}^*)^2 + (i_{1B}^* - i_{2B}^*)^2 + (i_{1C}^* - i_{2C}^*)^2]\}^{1/2}$.

Данные функции являются основой для формирования токов и скорости вращения:

$$I_d^* = 1/3 \cdot [(i_{1A}^* + i_{2A}^*) \cdot c_A + (i_{1B}^* + i_{2B}^*) \cdot c_B + (i_{1C}^* + i_{2C}^*) \cdot c_C];$$

$$I_q^* = 1/3 \cdot [(i_{1A}^* - i_{2A}^*) \cdot s_A + (i_{1B}^* - i_{2B}^*) \cdot s_B + (i_{1C}^* - i_{2C}^*) \cdot s_C];$$

$$\omega^* = 2 \cdot \omega_1^* = 4/3 \cdot (c_A \cdot p s_A + c_B \cdot p s_B + c_C \cdot p s_C).$$

Эти значения используются в алгоритме управления координатами, который синтезирует управляющие воздействия U_d^* и U_q^* .

Возможные области применения

Автоматизированный электропривод с машиной двойного питания может иметь большое практическое значение в следующих областях техники:

1. Для любых автономных объектов, в которых основными показателями качества выступают энергетическая эффективность и массогабаритные показатели.
2. Для нефтяной и газовой промышленности, позволяющая создать безредукторный, автоматизированный электропривод мощных центробежных компрессоров и насосов.

3. Для тягового электропривода, в котором необходимо быстрое и точное регулирование вращающего момента. Высокие динамические характеристики могут быть достигнуты применением алгоритма управления с максимальным быстродействием. Идеально подходит в качестве автоматизированного электропривода железнодорожного подвижного состава, который позволяет получать высокие динамические характеристики в переходных режимах, высокую экономичность при равномерном движении и реализовывать режим электрического торможения, как при осуществлении замедления, так и при стоянке состава.

4. Для модернизации и создания новых энергосберегающих, автоматизированных электроприводов основных механизмов шлюза, особенно для электропривода подъемно-опускных ворот.

5. Для привода черпаков земснаряда при работе с постоянной мощностью и высокой энергетической эффективностью с обеспечением высокой перегрузочной способности при низкой частоте вращения.

6. Для привода высокоскоростных центрифуг в ядерной энергетике.

Следует отметить, что при использовании в данном электроприводе в качестве электрического преобразователя – двухзвенного преобразователя частоты с активным преобразователем позволит создать высокоэффективный энергосберегающий частотно-регулируемый автоматизированный электропривод для многих производственных механизмов в различных отраслях промышленного хозяйства.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит существенный вклад в повышение эффективности управления технологическим процессом передачи энергии в автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания.

Повышение эффективности управления технологическим процессом передачи энергии, в силовом канале автоматизированной ГЭУ достигается благодаря выбору рационального типа электропривода и созданию оптимальных алгоритмов управления.

На основе выполненных в работе исследований получены следующие результаты:

1. Предложена методика оценки алгоритмов управления электромеханическими преобразователями по критерию энергетической эффективности и показано, что существует управление, обеспечивающее максимальное значение показателя энергетической эффективности.

2. Выполнен поиск оптимального электромеханического преобразователя на множестве типов электрических машин, выпускаемых промышленностью. Показано, что асинхронный электродвигатель при оптимальном алгоритме управления обладает наилучшей энергетической эффективностью по сравнению с другими видами электромеханических преобразователей. Доказана возможность получения двойной мощности от асинхронного электродвигателя двойного питания при потерях энергии не превышающих номинальные.

3. Предложена математическая модель автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания и синтезированы алгоритмы оптимального управления, обеспечивающие режимы экономичного и полного хода.

4. Получены уравнения наблюдателей состояния машины двойного питания автоматизированной ГЭУ, позволяющие синтезировать систему управления без датчика частоты вращения.

5. Показано что использование редукторной структуры автоматизированной ГЭУ с машиной двойного питания обладает лучшими массогабаритными и энергетическими показателями по сравнению с безредукторной.

6. Получена новая форма математического описания машины двойного питания с отдельным описанием частей индуктора и якоря.

7. Обоснована возможность использования машины двойного питания с оптимальным управлением не только при проектировании новых и модернизации существующих установок ГЭУ, но и применение в различных областях техники.

IV. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. *Гельвер Ф.А.*, Самосейко В.Ф. Алгоритмы управления асинхронным электродвигателем при двойном питании [Текст]//Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008, - №3. – С.32 - 36.
2. *Гельвер Ф.А.*, Самосейко В.Ф. Оценка энергетической эффективности работы электро-механического преобразователя [Текст]//Электроника и электрооборудование транспорта. – 2009, - №2-3. – С.44 - 46.

Научные статьи в других изданиях:

3. *Гельвер Ф.А.*, Самосейко В.Ф. Оптимальное управление асинхронным электродвигателем с фазным ротором [Текст]//Сб. “Труды V международной (XVI всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007”. - СПб.: СПГПУ, - 2007. - С.119 - 122.
4. *Гельвер Ф.А.* Активный преобразователь как средство повышения энергетической эффективности систем электропривода [Текст]//Труды научно-технической конференции молодых ученых сотрудников СПГУВК 1-7 июня 2005 г, Т. 1. - СПб.: СПГУВК, - 2005. - С.100 - 104.
5. *Гельвер Ф.А.* Уравнения индуктора и якоря асинхронной машины при питании статора и ротора от одного преобразователя частоты [Текст]//Труды научно-технической конференции молодых ученых сотрудников СПГУВК 1-7 июня 2006 г. Т. 1. - СПб.: СПГУВК, - 2006. - С.166 - 169.
6. *Гельвер Ф.А.* Применение активного преобразователя в системах регулируемого электропривода [Текст]//Труды научной конференции студентов и аспирантов - СПб.: СПГУВК, - 2004. - С.107 - 111.
7. *Гельвер Ф.А.* Синхронный режим работы асинхронного электродвигателя с фазным ротором [Текст]//Труды научно-технической конференции молодых ученых сотрудников СПГУВК 1-7 июня 2006 г. Т.1. - СПб.: СПГУВК, - 2006. - С.162 - 166.
8. *Гельвер Ф.А.*, Ногин Д.А. Т-параметры асинхронного двигателя [Текст]//Труды научно-технической конференции молодых ученых сотрудников СПГУВК 1-7 июня 2006 г. Т. 1. - СПб.: СПГУВК, - 2006. - С.170.