

На правах рукописи

Таран Александр Александрович



ОПТИМИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА БАЗЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ
МОДУЛЯЦИЕЙ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации и на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2006

Работа выполнена в Российском государственном профессионально-педагогическом университете

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор Шрейнер Р.Т.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Носырев М.Б.,
кандидат технических наук, доцент Бородин М.Ю.

Ведущая организация - ОАО УПП «Вектор»

Защита состоится « 26 » апреля 2006 г. в 14 ч. 15 мин. в аудитории Э-406 на заседании диссертационного совета Д.212.285.03 при Уральском государственном техническом университете по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, ул. Мира, 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « 20 » марта 2006 г.

Уч
ди

етарь
го



А.В. Паздренин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап развития автоматизированного электропривода характеризуется широким применением частотно-регулируемого электропривода переменного тока, в особенности асинхронного. Эта тенденция напрямую связана с совершенствованием технологических процессов, ростом требований к электроприводу в отношении технического уровня, энергетических и технологических показателей. Основными преимуществами асинхронного привода по сравнению с приводом постоянного тока являются надежность двигателя, меньшая металлоемкость и стоимость. Современные полупроводниковые преобразователи частоты обеспечивают экономичное управление скоростью этих машин. Современная микропроцессорная база позволяет реализовать практически любые, самые сложные алгоритмы управления, что дает возможность программными средствами решать ряд насущных задач развития электропривода.

В настоящее время одной из актуальных задач является обеспечение оптимальных энергетических режимов работы электропривода, что связано с высокой стоимостью электроэнергии. За последние несколько лет стоимость электроэнергии для промышленных предприятий выросла в несколько раз.

Другой актуальной задачей является обеспечение максимального использования ресурсов силовой части современного электропривода переменного тока в связи с относительно высокой стоимостью полупроводникового преобразователя, входящего в его состав (100-120 Евро за кВт, в диапазоне мощностей 10-200 кВт), и относительно низкой его перегрузочной способностью (по току 1.5 в течение 1с) по сравнению с асинхронным двигателем. Решение этой задачи позволяет улучшить такие важные технические характеристики, как перегрузочная способность и диапазон регулирования скорости привода.

Задачи оптимального управления рассматривались многими отечественными и зарубежными учеными. Большой вклад в их решение внесли работы - М.П. Костенко, А.А. Булгакова, А.М. Вейнгера, В.А. Мищенко, Г.Б. Онищенко, Ю.П. Петрова, А.С. Сандлера, Р.С. Сарбатова, О.В. Слежановского, Ю.Г. Шакаряна, Р.Т. Шрейнера, В.А. Шубенко, А. Schonung, Н. Stemmler, К.Г. Jordan, К. Neuman и др. Как показало исследование, решение каждой из двух отмеченных выше задач в отдельности приводит к разноречивым результатам. Обе задачи имеют важное практическое значение, в связи с чем важно их комплексное решение, сочетающее цели достижения предельной перегрузочной способности электропривода в условиях ограничений и оптимизацию энергетических режимов его работы. Этим вопросам уделяется должное внимание ведущими фирмами-производителями преобразовательной техники. Вместе с тем, существуют малоизученные аспекты этой проблемы, которые требуют специальных исследований.

Целью диссертационной работы является разработка комплексного подхода к решению задачи оптимизации стационарных режимов работы асинхронных электроприводов (ЭП) на базе полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией по электромеханическому и энергетическому показателям с учётом ограничений на выходной ток и напряжение ПЧ.

В работе сформулированы следующие задачи исследований:

1. Постановка комплексной оптимизационной задачи, сочетающей выявление предельно-допустимых границ рабочей области функционирования электропривода в координатах "момент-скорость" при соблюдении ограничений на выходной ток и напряжение ПЧ с оптимизацией режимов работы электропривода в данной рабочей области по энергетическому критерию.
2. Анализ задачи управления по максимуму момента с учётом ограничений на ток и напряжение ПЧ. Выявление условий разрешимости и достоверности решения данной задачи. Разработка алгоритма её решения с учётом насыщения главной магнитной цепи машины. Анализ решения задачи управления по максимуму момента с позиции определения предельно-допустимой рабочей области функционирования электропривода в координатах "момент-скорость" при ограничениях на ток и напряжение ПЧ. Оценка влияния ограничений на границу рабочей области. Анализ форм выражения закона управления, с точки зрения удобства практической реализации.
3. Разработка алгоритмов определения предельно-допустимых рабочих областей функционирования электропривода, обеспечиваемых известными законами управления при ограничениях на ток и напряжение преобразователя. Сопоставление эффективности этих законов по перегрузочной способности электропривода.
4. Разработка общей стратегии и алгоритма решения комплексной оптимизационной задачи при различных критериях, используемых в рамках этой стратегии. Разработка вопросов реализации алгоритма комплексной оптимизации в структурах систем скалярного и векторного управления асинхронным электроприводом на базе полупроводниковых преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией.
5. Экспериментальные исследования свойств асинхронного электропривода с алгоритмом комплексной оптимизации на базе полупроводникового преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией.

Объектом исследования в данной работе является электропривод переменного тока на базе асинхронного короткозамкнутого двигателя и полупроводникового преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией.

Методы исследования. В теоретическом исследовании использованы методы аналитической теории электрических машин переменного тока, преобразовательной техники, методы теории автоматизированного электропривода, теории систем автоматического регулирования, а также методы математического моделирования исследуемых объектов на ЭВМ. Использовался математический аппарат функционального анализа, дифференциального и интегрального исчисления. Для проверки результатов теоретического анализа и расчётов были проведены экспериментальные исследования на математических моделях и лабораторной установке.

Достоверность полученных научных результатов подтверждается использованием апробированных аналитических и численных математических методов, результатами компьютерного моделирования и физического эксперимента.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена постановка задачи комплексной оптимизации, сочетающей выявление предельно-допустимых границ рабочей области функционирования асинхронного электропривода в координатах “момент-скорость” при соблюдении ограничений на выходной ток и напряжение ПЧ с оптимизацией режимов работы электропривода в данной рабочей области по энергетическому критерию. Дана математическая модель электропривода как объекта комплексной оптимизации в условиях ограничений на выходной ток и напряжение ПЧ.
2. Разработан алгоритм численного решения экстремальной задачи управления по максимуму момента, позволяющий без предварительного анализа определять предельно-достижимые границы рабочей области и доминирующие ограничения на её различных участках.
3. Выявлено влияние уровней ограничения тока и напряжения на граничную механическую характеристику. Дан сравнительный анализ эффективности известных законов управления (с постоянством потокосцепления ротора, при постоянстве ЭДС ротора, по минимуму тока статора) по предельно-допустимой области состояний при ограничениях на ток и напряжение.
4. Разработана общая стратегия и алгоритм решения комплексной задачи оптимизации. Рассмотрены особенности применения различных критериев в рамках этой стратегии.

Практическая ценность работы заключается в следующем.

1. Решение комплексной оптимизационной задачи обеспечивает предельную перегрузочную способность и высокие энергетические показатели асинхронных электроприводов на базе полупроводниковых преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией, что

отвечает требованиям, предъявляемым к современным системам электромеханического преобразования энергии.

2. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для определения перегрузочной способности двигателя при законах управления с постоянством потокосцепления ротора, по минимуму тока статора, по максимуму момента, при постоянстве ЭДС ротора с учётом ограничений на ток и напряжение статора. Учёт насыщения главной магнитной цепи двигателя позволяет получить достоверные исходные данные для выбора мощности АД и ПЧ на этапе проектирования, оценки перегрузочной способности и динамических характеристик привода.
3. Выявленные законы оптимального управления реализуемы в рамках известных структур систем автоматического регулирования путём дополнения их интеллектуальным блоком. Разработанный алгоритм оптимизации адаптирован для систем скалярного и векторного управления асинхронным электроприводом и обеспечивает их комплексную оптимизацию без изменения силовой части и установки дополнительных датчиков.
4. Представленные алгоритмы оптимального управления мало чувствительны к изменениям параметров силовой части привода.

На защиту выносятся:

1. Постановка комплексной оптимизационной задачи, сочетающей выявление предельно-допустимых границ рабочей области функционирования электропривода в координатах “момент-скорость” при соблюдении ограничений на выходной ток и напряжение ПЧ, и оптимизацию режимов работы электропривода в данной рабочей области по энергетическому критерию.
2. Алгоритм численного решения задачи экстремального управления моментом АД при ограничении тока и напряжения с учётом насыщения главной магнитной цепи машины. Результаты исследования предельно-допустимой рабочей области функционирования электропривода в координатах “момент-скорость” при экстремальном управлении с ограничением тока и напряжения.
3. Алгоритмы определения предельно-допустимых рабочих областей функционирования электропривода, обеспечиваемых законами управления при постоянстве потокосцепления ротора, по минимуму тока статора, с постоянством ЭДС ротора. Результаты сопоставления эффективности этих законов по перегрузочной способности ЭП.
4. Алгоритм решения комплексной задачи оптимизации режимов работы электропривода по электромеханическому и энергетическому критериям при ограничениях на ток и напряжение. Реализация алгоритма комплексной оптимизации в структурах систем скалярного и векторного

управления асинхронным электроприводом на базе полупроводниковых преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией.

5. Результаты исследования статических и динамических характеристик асинхронного электропривода на базе полупроводниковых преобразователей частоты с алгоритмом комплексной оптимизации.

Реализация результатов работы. Теоретические выводы диссертации по построению оптимизированных систем управления электроприводами в условиях ограничений на ток и напряжение использованы в производственной и научно-исследовательской деятельности ЗАО "Автоматизированные системы и комплексы" г. Екатеринбург при разработке систем регулирования электроприводов на базе асинхронного двигателя. Математические модели и методики анализа оптимизированных систем управления использованы в учебном процессе Российского государственного профессионально-педагогического университета при подготовке студентов электроэнергетического факультета, обучающихся по специальности 030500.19 - профессиональное обучение, специализации - электротехника, электротехнология и технологический менеджмент.

Апробация. Основные материалы работы были представлены: на XII научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока" 13-16 марта 2001г. в г. Екатеринбурге; VII региональной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов "Инновационные технологии в педагогике и на производстве" 24-25 апреля 2001г. в Екатеринбурге; III Международной (XIV Всероссийской) НТК по автоматизированному электроприводу "АЭП-2001", 12-14 сентября 2001г. в Нижнем Новгороде; III межотраслевой научно-технической конференции, 11-13 ноября 2002г. в г. Новоуральске; Научно-технической конференции "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" 27-29 октября 2003г. в г. Новосибирске; Международной конференции "Электромеханические преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы" 2003г. в г. Екатеринбурге.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 9 печатных трудов, из них 7 статей и тезисы к 2-м докладам на научно-технических конференциях.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Основная часть работы изложена на 165 страницах машинописного текста. Работа содержит 78 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, отражена научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор современного состояния асинхронного электропривода, основных этапов его развития и вопросы оптимизации режимов работы асинхронного электропривода при ограничениях. На основе проведённого анализа определены цель и основные задачи исследования.

Во второй главе рассмотрена математическая модель силовой части электропривода для решения задачи оптимального управления при наличии ограничений на ток и напряжение преобразователя частоты. Дана математическая постановка задачи комплексной оптимизации режимов частотно-регулируемого электропривода.

На рис.1 в обобщённом виде представлена математическая модель силовой части, использованная в работе для анализа и решения задачи комплексной оптимизации. Независимыми внешними воздействиями модели являются заданные значения скорости (ω^*) и момента нагрузки (m^*), определяющие технологическую цель управления, а также ограничения на ток ($i_{s\text{макс}}^*$) и напряжение ($u_{s\text{макс}}^*$), характеризующие энергетические ресурсы преобразователя частоты. Абсолютное скольжение (β) в этой модели используется в качестве варьируемого управления для оптимизации режимов привода. Выбор β для поиска оптимального режима обоснован двумя основными причинами: удобством решения задачи оптимизации и возможностью непосредственного формирования оптимального управления (β) в скалярных и векторных САР с управляемым скольжением.

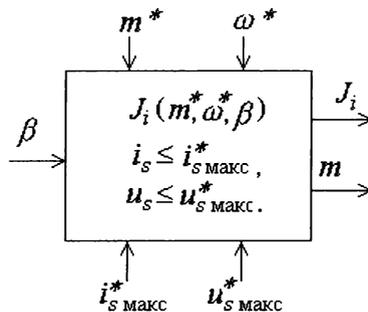


Рис.1. Математическая модель электропривода как объекта комплексной оптимизации при ограничениях

Выходными величинами модели являются показатели качества, характеризующие энергетику (J_i) и перегрузочную способность (m) привода. В качестве J_i в работе принят ток статора, а критерием перегрузочной способности – относительный электромагнитный момент асинхронного двигателя.

Задача комплексной оптимизации заключается в поиске управления, обеспечивающего максимальную рабочую область функционирования электропривода в координатах “момент-скорость” и нижнюю грань (*inf*)

энергетического показателя качества в каждой её точке при ограничениях на ток ($i_s = i_{s \text{ макс}}^*$) и напряжение ПЧ ($u_s = u_{s \text{ макс}}^*$).

Формализованная постановка задачи комплексной оптимизации имеет следующий вид:

$$\beta_3 = \begin{cases} \arg m(\omega^*, i_{s \text{ макс}}^*, \beta) \rightarrow \max, & \beta \in \Omega_{\beta 1} \\ \arg m(\omega^*, u_{s \text{ макс}}^*, \beta) \rightarrow \max, & \beta \in \Omega_{\beta 2} \\ \arg J_i(\omega^*, m, \beta) \rightarrow \inf, & \beta \in \Omega_{\beta 3} \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \Omega_{\beta 1} &= \left\{ \beta \mid i_s(m, \omega^*, \beta) = i_{s \text{ макс}}^*, u_s(m, \omega^*, \beta) \leq u_{s \text{ макс}}^* \right\}; \\ \Omega_{\beta 2} &= \left\{ \beta \mid u_s(m, \omega^*, \beta) = u_{s \text{ макс}}^*, i_s(m, \omega^*, \beta) < i_{s \text{ макс}}^* \right\}; \\ \Omega_{\beta 3} &= \left\{ \beta \mid i_s(m, \omega^*, \beta) < i_{s \text{ макс}}^*, u_s(m, \omega^*, \beta) < u_{s \text{ макс}}^* \right\}. \end{aligned}$$

Для описания функции качества, характеризующей перегрузочную способность, использовались зависимости экстремального момента от абсолютного скольжения β , скорости ω , а также тока i_s и напряжения u_s статора:

$$\begin{aligned} m &= i_s^2 \varepsilon^{-1}(\beta); \\ m &= u_s^2 \xi^{-1}(\omega, \beta); \\ m &= \psi_m^2 \delta^{-1}(\beta). \end{aligned} \quad (2)$$

В (2) функции $\varepsilon(\beta)$, $\xi(\beta)$ и $\delta(\beta)$ определяются следующими выражениями

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{r_r}{l_m^2 \beta} + \left(1 + \frac{l_{r\sigma}}{l_m}\right)^2 \frac{\beta}{r_r}; \quad \delta = \frac{r_r}{\beta} + l_{r\sigma}^2 \frac{\beta}{r_r}; \\ \xi &= 2r_s(\omega + \beta) + \left[r_s^2 \left(1 + \frac{l_{r\sigma}}{l_m}\right)^2 + (l_{r\sigma} + \left(1 + \frac{l_{r\sigma}}{l_m}\right)l_{s\sigma})^2 (\omega + \beta)^2 \right] \frac{\beta}{r_r} + \\ &+ \left[\frac{r_s^2}{l_m^2} + \left(1 + \frac{l_{s\sigma}}{l_m}\right)^2 (\omega + \beta)^2 \right] \frac{r_r}{\beta}; \quad \omega = \omega^*, \end{aligned}$$

где $r_s, r_r, l_{s\sigma}, l_{r\sigma}$ и l_m – параметры схемы замещения АД.

Насыщение машины в (2) учитывалось путём изменения I_m в зависимости от главного потокосцепления ψ_m :

$$I_m = I_m(\psi_m).$$

Система уравнений (2) записана в относительных единицах. В качестве базовых приняты следующие величины: $M_\delta = M_{\text{ном}}$ – номинальный электромагнитный момент машины; $I_\delta = \sqrt{2} I_{\text{ном}}$ – амплитуда номинального фазного тока; $\Omega_\delta = \Omega_{\text{шном}} = 2\pi f_{\text{ном}}$ – номинальная угловая частота напряжения статора; $U_\delta = 2P_\delta / (m_c I_\delta)$ – напряжение (m_c – число фаз двигателя); $\Psi_\delta = U_\delta / \Omega_\delta$ – потокосцепление; $Z_\delta = U_\delta / I_\delta$ – сопротивление; $L_\delta = \Psi_\delta / I_\delta$ – индуктивность.

Для описания энергетического критерия качества (тока статора) в работе использованы известные из технической литературы зависимости справедливые для насыщенных неявнополюсных машин переменного тока.

Модель идеализированного преобразователя представлена в виде элемента, обладающего линейной зависимостью частоты и амплитуды выходного напряжения от управляющих воздействий. Несмотря на упрощённое представление, модель ПЧ позволяет учесть главную особенность задачи комплексной оптимизации, связанную с ограничением выходного тока и напряжения.

В третьей главе рассматривается задача экстремального управления моментом асинхронного двигателя с учётом ограничений на ток и напряжение статора. Она сформулирована в виде

$$\beta_\gamma = \begin{cases} \arg m(\omega^*, i_{s\text{макс}}^*, \beta) \rightarrow \max, & \beta \in \Omega_{\beta 1} \\ \arg m(\omega^*, u_{s\text{макс}}^*, \beta) \rightarrow \max, & \beta \in \Omega_{\beta 2} \end{cases} \quad (3)$$

$$m_\gamma = m(\omega^*, \beta_\gamma) = \max_{\beta \in \Omega_\beta} m(\omega^*, \beta);$$

$$\Omega_{\beta 1} = \left\{ \beta \mid i_s(m, \omega^*, \beta) = i_{s\text{макс}}^*, u_s(m, \omega^*, \beta) \leq u_{s\text{макс}}^* \right\};$$

$$\Omega_{\beta 2} = \left\{ \beta \mid u_s(m, \omega^*, \beta) = u_{s\text{макс}}^*, i_s(m, \omega^*, \beta) \leq i_{s\text{макс}}^* \right\},$$

где β_γ – значение абсолютного скольжения, доставляющее экстремум моменту; $\Omega_\beta = \Omega_{\beta 1} \cap \Omega_{\beta 2}$.

В связи с тем, что функции качества $m(\omega, i_{s\text{макс}}, \beta)$, $m(\omega, u_{s\text{макс}}, \beta)$ и функции ограничений $u_s(m, \omega, \beta)$, $i_s(m, \omega, \beta)$ являются нелинейными, для решения задачи (3) выбран численный метод. С целью обоснования алгоритма численного решения проведено исследование экстремальных характеристик $m(\omega, i_{s\text{макс}}, \beta)$ и $m(\omega, u_{s\text{макс}}, \beta)$. При этом использовались модели, представленные на рис.2. В качестве примера на рис.3 приведены

экстремальные характеристики АД, выражающие зависимости электромагнитного момента от β (либо β и ω) при заданных ограничениях $i_{s \text{ макс}}^*$ и $u_{s \text{ макс}}^*$. Показано, что координаты $\beta_{\partial 1}$ и $\beta_{\partial 2}$, доставляющие экстремумы функциям $m(\omega, i_{s \text{ макс}}^*, \beta)$ и $m(\omega, u_{s \text{ макс}}^*, \beta)$ соответственно как в двигательном (∂), так и в генераторном (∂) режимах, зависят от ограничений $i_{s \text{ макс}}^*$ и $u_{s \text{ макс}}^*$. Координата точки, удовлетворяющая решению задачи (3), в общем случае, не совпадает с координатами точек частных экстремумов $\beta_{\partial 1}$ и $\beta_{\partial 2}$.

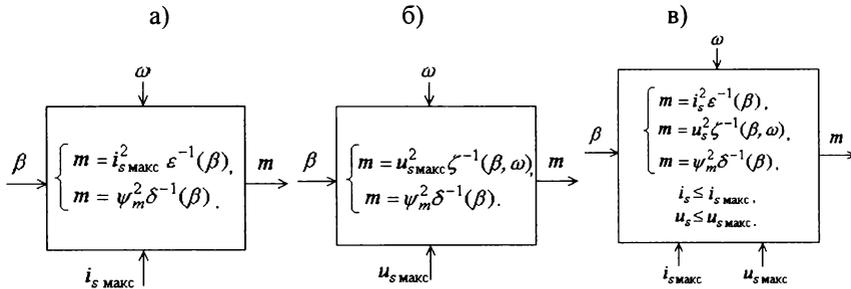


Рис.2. Математические модели электропривода как объекта экстремального управления моментом:

- а – при ограничении на ток;
- б – при ограничении на напряжение;
- в – при ограничении тока и напряжения

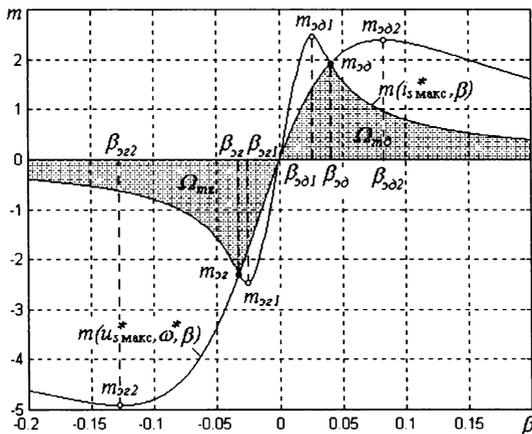


Рис.3. К определению области допустимых моментов, в условиях ограничений на ток и напряжение

Проведенный анализ экстремальных характеристик $m(\omega, i_{s \text{ макс}}^*, \beta)$ и $m(\omega, u_{s \text{ макс}}^*, \beta)$ подтвердил важность учёта насыщения машины,

целесообразность и эффективность решения задачи оптимизации режимов АД численными методами.

Помимо оптимизации перегрузочной способности совокупное рассмотрение характеристик момента в функции ограничений позволяет обоснованно решать задачи оптимизации системы ЭП внутри области допустимых состояний привода Ω_m , ограниченной предельными механическими характеристиками $m_{\text{макс}}(\omega)$, $m_{0\text{макс}}(\omega)$. При этом возможно оптимальное управление с использованием различных энергетических показателей (суммарные потери, ток статора, КПД и т.д.). На рис.4 показана графическая интерпретация решения подобной задачи. Как видно, если при заданной скорости технологического процесса фиксированной скорости $\omega = \omega^*$ требуемое значение момента АД $m = m_{\text{ст}}$ меньше, чем предельно-допустимое $m < m_{\text{макс}}(\omega^*)$, то имеется возможность вариации значения функции качества $i_s(\beta)$, оптимизируя выбранный энергетический показатель (ток статора) при выполнении цели управления.

Для определения закона оптимального управления $\beta_3(m, \omega)$, обеспечивающего максимальный момент АД и предельно-допустимую механическую характеристику $m_3 = m_3(\omega_3)$ при ограничении тока и напряжения, разработан численный алгоритм, блочная схема которого приведена на рис.5. Здесь m_0 - значение момента, определяющего верхнюю границу зоны поиска экстремального значения m_3 ; $\Delta\beta$ и $\Delta\omega$ - шаг по абсолютному скольжению и угловой скорости; d - вспомогательный параметр численного алгоритма, задающий точность вычисления невязки между заданным и фактическим значениями электромагнитного момента. Для поиска экстремума момента в алгоритме использован метод дихотомии.

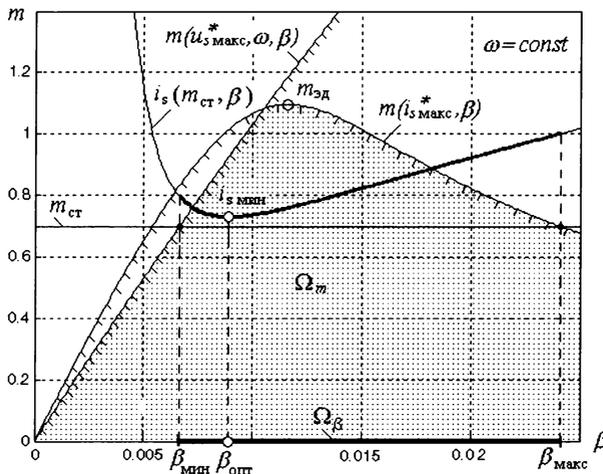


Рис.4. Оптимизация режима работы ЭП по энергетическим критериям

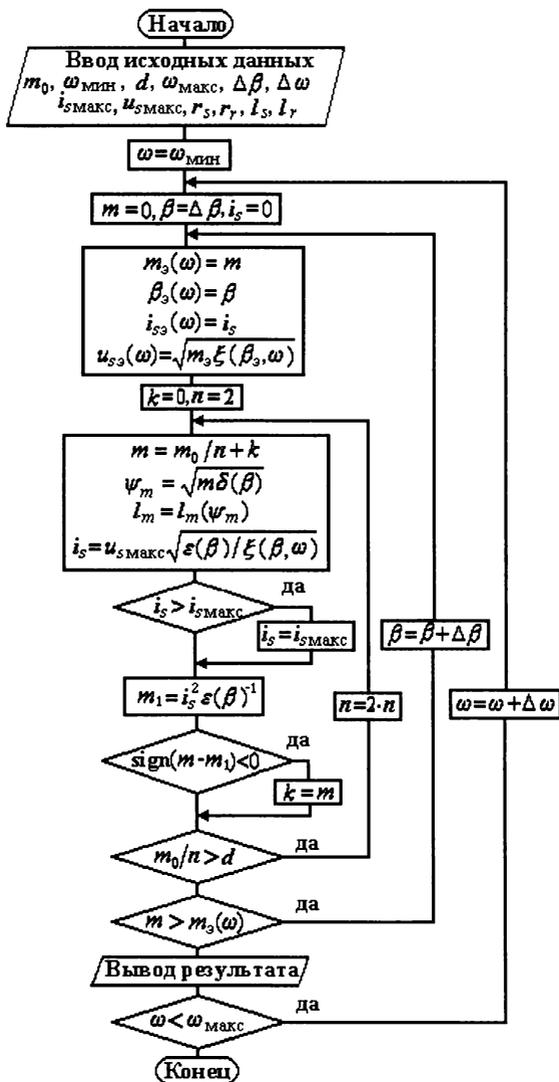


Рис.5. Алгоритм численного расчета экстремального управления $\beta_3(m, \omega)$ и предельно допустимой механической характеристики $\omega_s(m_3)$

С помощью численного алгоритма получена предельная механическая характеристика $m_3 = m_3(\omega_3)$, которая при заданных ограничениях определяет границу предельно – допустимой рабочей области привода $\Omega_0(m, m_{\text{макс}})$.

Для оценки эффективности экстремального управления по максимуму момента при ограничениях на ток и напряжение разработаны численные

алгоритмы расчёта перегрузочной способности электроприводов, в которых реализуются режимы постоянства потокосцепления ротора ($\psi_r = const$), минимума тока статора ($i_s = i_{s\min}$), постоянства ЭДС вращения ротора ($e_r = const$) при тех же ограничениях. Из сравнения предельно-допустимых областей состояний электропривода, обеспечиваемых рассмотренными законами управления в условиях ограничений (рис.6.), следует важный вывод о том, что наиболее полное использование потенциальной перегрузочной способности обеспечивает лишь закон частотного управления по максимуму момента. В случае использования иных законов управления, в частности закона управления по минимуму тока или с постоянством потокосцепления ротора, в пределах максимально-достижимой области состояний возникает область $\Delta\Omega$, которая не может быть реализована в рамках этих законов:

$$\Delta\Omega = \Omega_0(m = m_{\max}) \setminus \Omega_1 = \{(m, \omega) : (m, \omega) \in \Omega_0(m = m_{\max}) \text{ и } (m, \omega) \notin \Omega_1\}.$$

В случае использования закона $\psi_r = const$ (рис.6,а) недоиспользованная область делится на Ω_2 и Ω_3 . Область Ω_3 возникает вследствие влияния доминирующего ограничения по току статора $i_s^*_{\max}$, а Ω_2 - по напряжению $u_s^*_{\max}$. При использовании закона частотного управления по минимуму тока статора (рис.6,б) недоиспользованная область является единой и определяется ограничением на напряжение статора. Размеры этих областей зависят от закона частотного управления и уровня ограничений. Например, при допустимой перегрузке по току $i_{s\max} = 2$, перегрузочная способность электропривода по моменту при использовании закона управления по максимуму момента на 12-18% выше, чем при законе управления $\psi_r = \psi_{r\text{ном}}$.

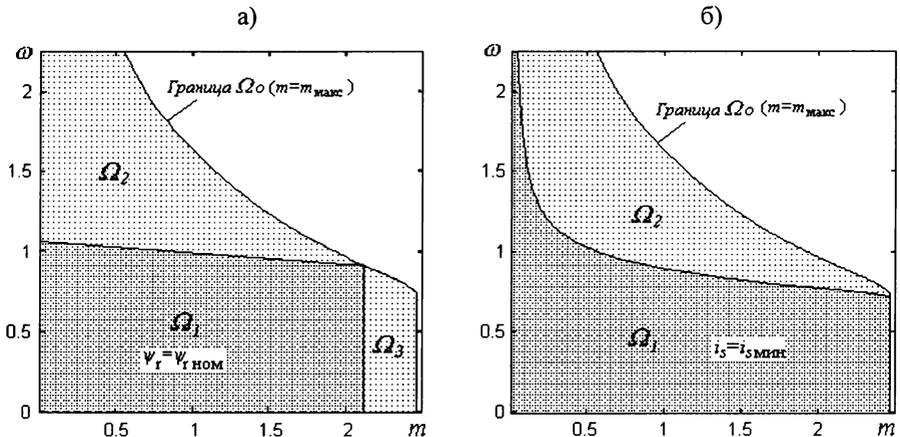


Рис.6. Предельно-допустимые области состояний электропривода Ω_1 :

а – при $\psi_r = \psi_{r\text{ном}}$; б – при $i_s = i_{s\min}$

Использование закона экстремального управления по минимуму тока статора позволяет обеспечить максимальный момент привода только в первой зоне регулирования. Наиболее полное использование потенциальной перегрузочной способности электропривода обеспечивает лишь закон частотного управления по максимуму момента.

В четвёртой главе рассмотрена задача оптимизации режимов работы электропривода по энергетическим критериям при ограничении тока и напряжения. Задача формулируется в следующем виде:

$$\beta_{\gamma} = \arg J_i(\omega^*, m^*, \beta) \rightarrow \inf_{\beta \in \Omega_{\beta}} ; \quad (4)$$

$$\Omega_{\beta} = \left\{ \beta \mid i_s(m^*, \omega^*, \beta) \leq i_{s, \text{макс}}^*, u_s(m^*, \omega^*, \beta) \leq u_{s, \text{макс}}^* \right\}.$$

Особенностью задачи (4) является то, что её решение может находиться как внутри, так и на границе допустимой по условиям ограничений области управлений Ω_{β} . Поэтому в общем случае управление β_{γ} , обеспечивает нижнюю грань энергетического показателя качества. Область управлений Ω_{β} зависит от заданных значений m^* и ω^* , определяемых условиями технологической задачи и ограничениями $i_{s, \text{макс}}^*$, $u_{s, \text{макс}}^*$. При увеличении m^* и ω^* область допустимых управлений сужается и при определённых их значениях вырождается в точку, которой соответствует максимальный момент двигателя. Таким образом, решение задачи комплексной оптимизации позволяет сочетать достижение предельной перегрузочной способности и нижней грани значения энергетического показателя.

На практике используется ряд законов частотного управления, напрямую не связанных с энергетическими критериями. К таким относятся, например, законы $\psi_s = \text{const}$, $\psi_r = \text{const}$ и др. В этих случаях для обеспечения максимальной перегрузочной способности задача оптимизации сформулирована в виде

$$\beta_{\gamma} \Rightarrow F(\beta) = |q^* - q(\beta)| \rightarrow \inf_{\beta \in \Omega_{\beta}} , \quad (5)$$

$$\Omega_{\beta} : \begin{cases} u_s(m^*, \omega^*, \beta) \leq u_{s, \text{макс}}^* , \\ i_s(m^*, \beta) \leq i_{s, \text{макс}}^* . \end{cases}$$

где $F(\beta)$ – показатель качества; q^* – заданное значение показателя, определяемое законом управления, а $q(\beta)$ – его допустимое значение, удовлетворяющее ограничениям на ток и напряжение.

Управление в этом случае должно минимизировать функцию вынужденного отклонения от заданного значения критерия качества $F(\beta)$, обусловленного наличием ограничений. Данное отклонение зависит от координат рабочей точки и введённых ограничений. Использование предложенного показателя качества позволяет расширить оптимизированную область возможных состояний привода, а в пределе достичь предельной механической характеристики, определяемой законом управления по максимуму момента.

Предложена общая стратегия поиска решения задачи комплексной оптимизации $\beta_{\text{опт}}(m^*, \omega^*)$ по различным критериям в виде суммы двух составляющих β_3 и $\Delta\beta$. Первая составляющая β_3 представляет собой экстремальное управление, полученное в результате решения задачи без учёта ограничений, а вторая $\Delta\beta$ - коррекция β_3 в тех случаях, когда ограничение на ток или напряжение не позволяют реализовать данное управление:

$$\beta_{\text{опт}} = \beta_3 + \Delta\beta, \quad (6)$$

$$\Delta\beta = \begin{cases} 0 & \text{при } i_s < i_{s\text{макс}} \text{ и } u_s < u_{s\text{макс}}, \\ \Delta\beta(m^*, \omega^*, i_s) & \text{при } u_s = u_{s\text{макс}}^*, i_s < i_{s\text{макс}}^*, \\ \Delta\beta(m^*, \omega^*, u_s) & \text{при } i_s = i_{s\text{макс}}^*, u_s < u_{s\text{макс}}^*. \end{cases}$$

В развёрнутом виде алгоритм расчёта (6) представлен на рис.7. В основе алгоритма лежит ряд процедур:

- определение управления β_3 , являющегося решением задачи экстремального управления без ограничений;
- проверка возможности реализации β_3 при заданных ограничениях $i_{s\text{макс}}^*$, $u_{s\text{макс}}^*$;
- формирование корректирующего воздействия $\Delta\beta$.

При реализации предложенного алгоритма возможно его упрощение на основе анализа особенностей конкретной системы и выбранного критерия оптимизации. Например, при использовании закона управления по минимуму тока статора в представленном алгоритме нет необходимости вычисления составляющей корректирующего воздействия, обусловленной ограничением по току.

В пятой главе освещены вопросы реализации алгоритма комплексной оптимизации в рамках известных систем управления асинхронным электроприводом с подчинённым регулированием параметров. Алгоритм предлагается реализовать в системах с управляемым скольжением путём модернизации функционального преобразователя, формирующего закон

управления и определяющего режим работы привода, преобразовав его в интеллектуальный блок (ИБ).

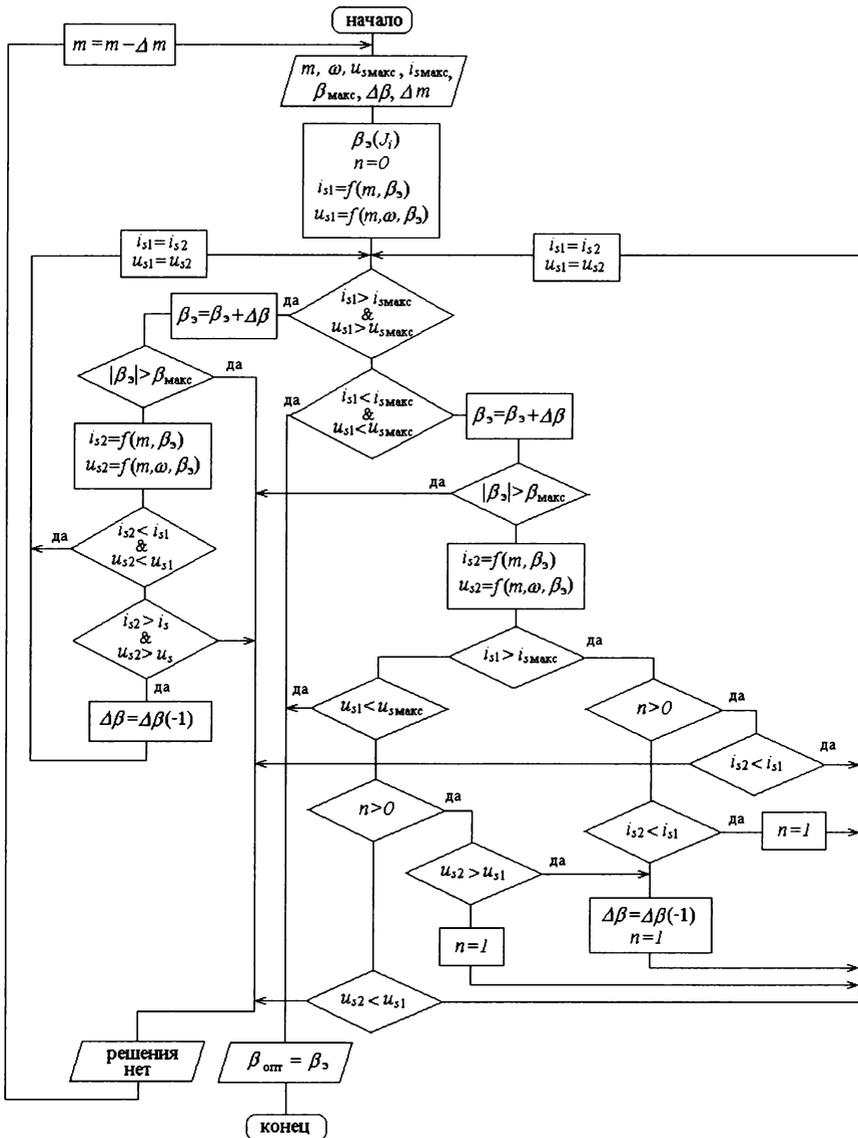


Рис.7. Алгоритм формирования оптимального управления при ограничениях на ток и напряжение

Реализация алгоритма комплексной оптимизации в интеллектуальном блоке предлагается в двух вариантах:

Первый - в виде численной процедуры, формирующей закон управления на основе информации о параметрах математической модели машины (рис.8,а). Входными данными процедуры, помимо параметров двигателя, коррекция которых осуществляется вспомогательными алгоритмами, являются заданные технологическим процессом скорость и момент привода, а также ограничения на ток и напряжение статора АД.

По второму варианту организуется контур коррекции закона управления в условиях ограничений на ток и напряжение с соответствующим регулятором в ИБ, что исключает необходимость информации о параметрах модели АД. В этом случае (рис.8,б.) интеллектуальному блоку, помимо технологических параметров скорости ω^* , момента m^* и заданных ограничений $i_{s\text{макс}}$, $u_{s\text{макс}}$, необходима информация о токе статора i_s и задании на напряжение преобразователя u_s^* .

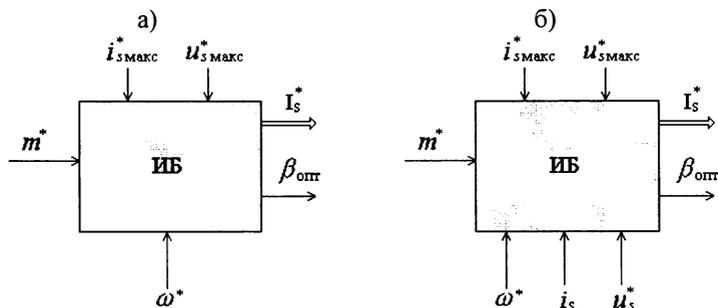


Рис.8. Интеллектуальный блок формирования закона оптимального управления

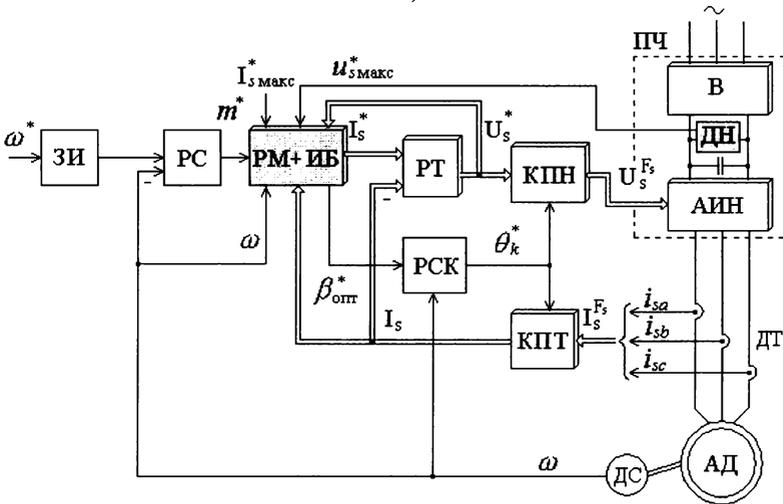
а - с использованием математической модели машины;

б - без использования математической модели машины

Структурная схема векторной САУ с интеллектуальным блоком приведена на рис.9,а. Она представляет собой систему автоматического управления с косвенной ориентацией системы координат по вектору потокосцепления ротора. В этой структуре ИБ совмещён с регулятором момента. Синтез регуляторов скорости и составляющих тока статора производился по известным методикам.

Интеллектуальный блок формирования закона оптимального управления без существенных изменений может быть также использован в скалярных системах автоматического управления (рис.9,б).

а)



б)

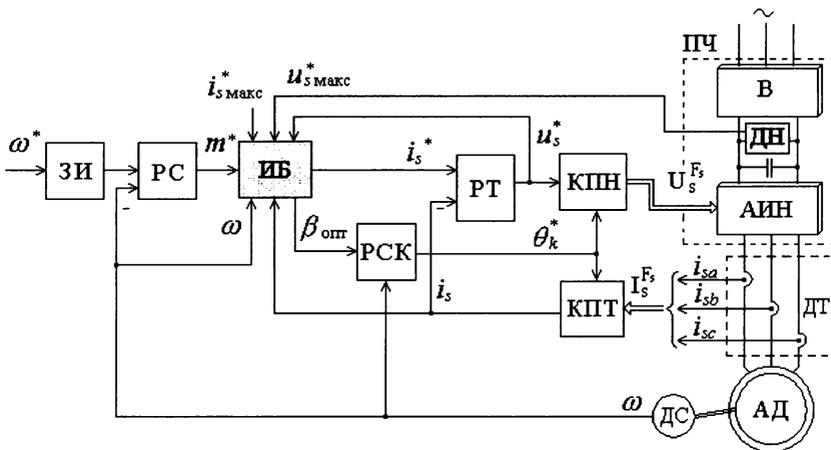


Рис.9. Блок-схема САУ с интеллектуальным блоком
а - векторная; б - скалярная

ПЧ – преобразователь частоты; АД – асинхронный двигатель; КПН и КПТ – преобразователи координат напряжения и тока; ДТ, ДН и ДС – датчики тока, напряжения и скорости; ЗИ – задатчик интенсивности; РТ, РМ, РС и РСК – регуляторы тока, электромагнитного момента, скорости и абсолютного скольжения, ИБ – интеллектуальный блок

В шестой главе приведены результаты расчёта характеристик и компьютерного моделирования режимов работы асинхронного электропривода при комплексной оптимизации.

Математическое моделирование векторной и скалярной систем проведено с использованием законов управления по минимуму тока статора и с постоянством потокоцепления ротора. Показано, что предложенный алгоритм формирования оптимального закона управления работоспособен, обеспечивает максимальную перегрузочную способность привода и оптимизацию процессов функционирования электропривода внутри рабочей зоны по выбранному критерию. Применение коррекции закона управления положительно влияет не только на статические характеристики, но и улучшает динамику системы в условиях проявления ограничений. При этом, в той части рабочей области, где оптимальное управление по выбранному критерию не стеснено ограничениями, интеллектуальный блок не вырабатывает корректирующих воздействий, полностью сохраняя динамические свойства системы в открытой области управлений.

На рис. 10 представлены полученные на компьютерной модели реакции электропривода со скалярной САР скорости на ступенчатое управляющее и возмущающее воздействие. В качестве базового закона управления использован закон $\psi_r = \psi_{ном}$. Здесь показаны процессы изменения координат, полученные с использованием алгоритма комплексной оптимизации ($\omega_1(t)$, $m_1(t)$, $i_{s1}(t)$, $u_s(t)$, $\beta_1(t)$), и графики изменения тех же переменных без оптимизации процессов в условиях ограничений ($\omega_2(t)$, $m_2(t)$, $i_{s2}(t)$, $\beta_2(t)$). Как следует из рис.9,а, в условиях ограничения напряжения ИБ позволяет снизить время реакции системы на аналогичное возмущение в 2 раза. Реакция на возмущающее воздействие (рис.10,б.) иллюстрирует динамические процессы в приводе при выходе тока статора на ограничение. Оптимизация закона управления в условиях ограничений позволила обеспечить максимальный динамический момент 2,3 о.е. и отработать данное возмущение, что не позволяет система без алгоритма комплексной оптимизации. Отмеченный выше положительный эффект введения комплексной оптимизации имеет место и в векторных системах, что иллюстрируют осциллограммы, приведённые на рис.11.

Седьмая глава посвящена экспериментальным исследованиям разработанных алгоритмов формирования закона управления в условиях ограничения на ток и напряжение. Для проведения эксперимента была создана опытная установка, состоящая из преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией, выполненного на серийных полупроводниковых модулях фирмы *Semikron*, асинхронного короткозамкнутого двигателя мощностью 7.5кВт, соединённого с нагрузочной машиной. Система цифрового управления выполнена на базе микроконтроллера *TMS320LF2407* фирмы *Texas Instruments*.

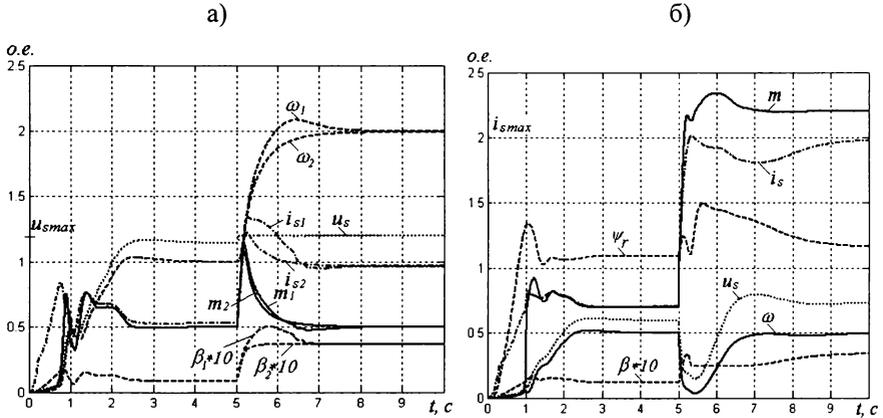


Рис.10. Реакция привода со скалярной САУ на воздействия
а - управляющее; б – возмущающее

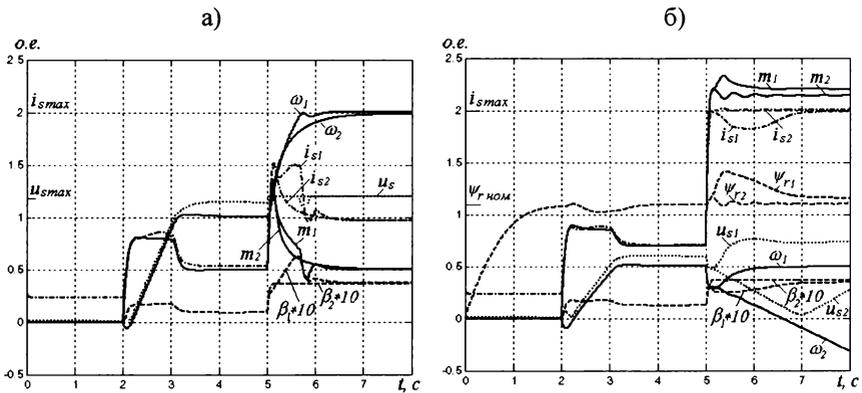


Рис11. Реакция привода с векторной САУ на воздействия
а) управляющее; б) возмущающее

Исследования проводились на приводе со скалярной системой управления. Базовыми критериями оптимизации являлись постоянство потокосцепления ротора и минимум тока статора. При заданных ограничениях на ток и напряжение предельная механическая характеристика привода (рис.12) совпала с расчётной зависимостью, что свидетельствует о достоверности расчётных данных и использованных алгоритмов. На предельной характеристике привод максимально использовал ресурсы по току и напряжению. Реализация оптимального закона управления позволила при номинальном токе увеличить момент привода на 7% по отношению к номиналу.

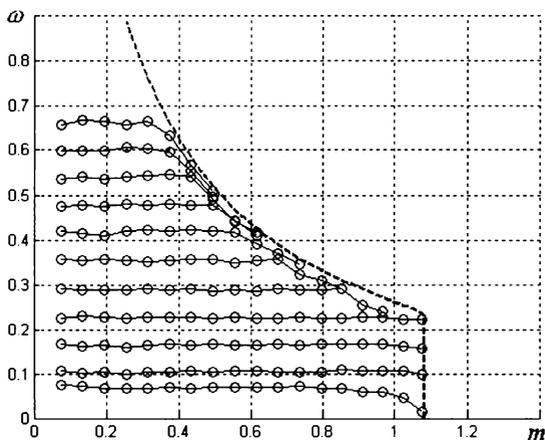


Рис.12. Механические характеристики привода

о -экспериментальные точки;

--- -расчётная предельная механическая характеристика

Зависимости оптимального значения скольжения от момента при фиксированных значениях скорости приведены на рис.13.

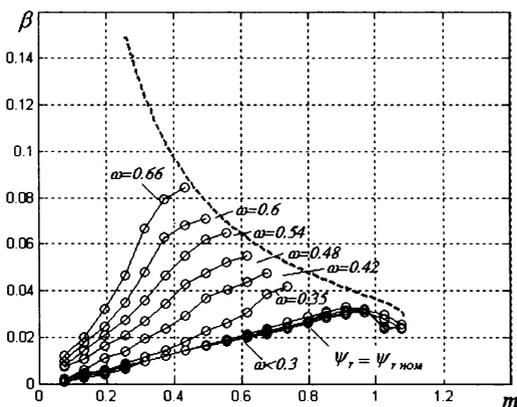


Рис.13. Зависимости оптимального значения скольжения от момента при фиксированных значениях скорости

--- закон управления на предельной механической характеристике;

-о- экспериментальные зависимости

Основное внимание при исследовании динамики привода с алгоритмом комплексной оптимизация уделялось его работе в условиях ограничений по

току и напряжению, накладываемых на систему со стороны источника питания АД. Реакция скалярной САР скорости на ступенчатое управляющее воздействие приведена на рис.14. Как видно, при пуске привод выходит на ограничение по напряжению $u_s = u_{s \text{ макс}}$, что при отсутствии коррекции закона управления ограничивает максимальную скорость привода значением 0.42о.е. вместо заданного уровня в 0.5о.е. Реализация оптимального закона позволяет при данных ограничениях обеспечить заданное значение скорости (эффективность в этом случае составила 19%).

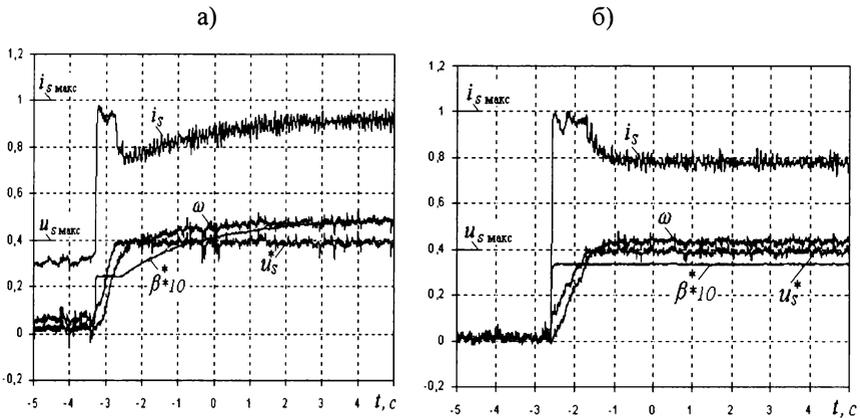


Рис.14. Осциллограммы реакции привода на управляющее воздействие в при ограничении на ток и напряжение
а - с алгоритмом коррекции; б - без коррекции

На рис.15 приведены характеристики в приводе при ступенчатом изменении нагрузки с $m_c=0.26$ до 0.92. При этом привод выходит на ограничение по току. Как видно, оптимизация закона управления позволила задействовать дополнительное напряжение статора и сократить время переходного процесса по скорости с 3 с до 1.5 с, т.е. в два раза.

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность скалярных систем регулирования с алгоритмом комплексной оптимизации. Оптимизация закона управления при ограничении напряжения и тока статора обеспечила максимальный момент привода в статических и повышенный в динамических режимах. Результаты экспериментов с достаточной инженерной точностью совпали с результатами расчётов, что позволяет рекомендовать предложенные численные алгоритмы расчёта и модели привода для решения поставленной задачи, а также использовать их при анализе и синтезе экстремальных систем.

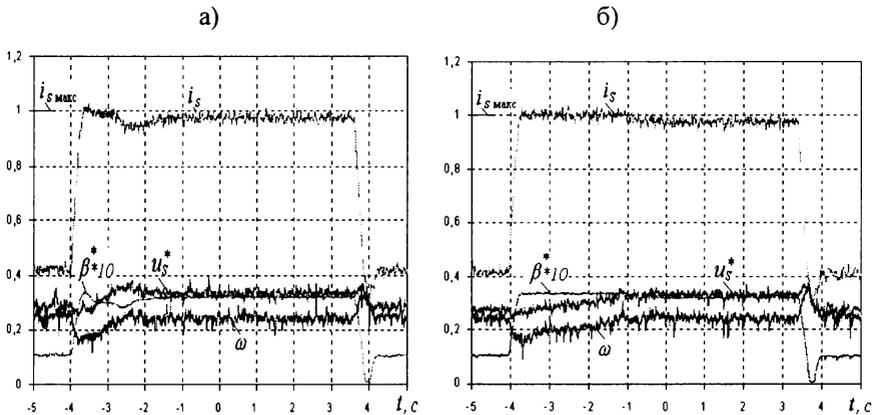


Рис.15. Осциллограммы переходных процессов в приводе при ступенчатом набросе нагрузки
 а - при оптимальном управлении;
 б - при управлении по закону $\psi_r = \psi_{r ном}$

В заключении сформулированы основные научные результаты работы, рекомендации по их применению, новизна и практическая значимость.

В приложениях приведены сведения о внедрении результатов исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы:

1. На основе анализа современного состояния и перспектив развития асинхронного частотно-регулируемого электропривода определены актуальные направления по его дальнейшему совершенствованию. Дана постановка комплексной оптимизационной задачи, сочетающей достижение предельно-допустимой рабочей области функционирования электропривода в координатах “момент-скорость” с оптимизацией режима работы электропривода по энергетическому критерию внутри рабочей области.
2. Разработан алгоритм численного решения задачи экстремального управления моментом при ограничении тока и напряжения с учётом насыщения главной магнитной цепи машины, позволяющий без предварительного анализа границ рабочей области рассчитать перегрузочную способность привода в любой точке.
3. Проведен анализ решения задачи оптимизации момента с позиции определения предельно-допустимой рабочей области функционирования электропривода в координатах “момент-скорость” при ограничениях на

ток и напряжение. Дана оценка влияния ограничений на границу рабочей области.

4. Разработаны алгоритмы численного определения предельно-допустимых рабочих областей функционирования электропривода при известных законах управления (с постоянством потокосцепления ротора, по минимуму тока, с постоянством ЭДС ротора) при ограничениях на ток и напряжение. Сопоставлена эффективность этих законов по перегрузочной способности.
5. Разработан алгоритм решения комплексной задачи, сочетающей оптимизацию режима работы электропривода по энергетическому критерию с обеспечением максимальной области состояний в координатах "момент-скорость" при ограничениях на ток и напряжение ПЧ.
6. Решены вопросы реализации алгоритма комплексной оптимизации в структурах систем скалярного и векторного управления асинхронным электроприводом на базе полупроводниковых преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией.
7. На основе проведённых теоретических исследований создана экспериментальная установка асинхронного электропривода на базе преобразователя частоты с ШИМ и цифровой системой управления. Выполнены экспериментальные исследования свойств асинхронного электропривода с алгоритмом комплексной оптимизации на базе полупроводникового преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией. Подтверждена работоспособность алгоритмов комплексной оптимизации в скалярных САУ.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т., Таран А.А. Экстремальные характеристики системы АД-ПЧ с ШИМ // Электромеханические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 5. / Под ред. А.С. Сарварова.- Магнитогорск: МГТУ, 2000.- С. 201-208.
2. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т., Таран А.А. Экстремальные характеристики электромеханических систем с двухзвенными преобразователями частоты // Электромеханика и управляемые электромеханические системы: Вестник Уральского государственного технического университета – УПИ. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. - С. 316-325.
3. Поляков В.Н., Таран А.А., Шрейнер Р.Т. Алгоритмы численного решения задачи экстремального управления асинхронным электроприводом при ограничениях по току и напряжению // Труды Двенадцатой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока" Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. - С. 121-124.

4. Поляков В.Н., Таран А.А., Шрейнер Р.Т. Алгоритм численного решения задачи экстремального управления асинхронным электроприводом при ограничениях по току и напряжению // Электротехника. 2001. №11. - С. 45-48.
5. Таран А.А., Шрейнер Р.Т., Поляков В.Н. Экстремальное управление асинхронным электроприводом при ограничениях по току и напряжению Тезисы докладов VII региональной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов 24-25 апреля 2001г Екатеринбург “Инновационные технологии в педагогике и на производстве” Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2001. 152 с. - С. 147-148.
6. Шрейнер Р.Т., Таран А.А., Поляков В.Н. Увеличение перегрузочной способности частотно-регулируемого электропривода при ограничении мощности преобразователя // Труды III Международной (XIV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу “АЭП-2001” (Нижний Новгород 12-14 сентября 2001)/Под ред. С.В. Хватова. Нижний Новгород: ”Вектор-Тис”, 2001. -С. 105-106.
7. Поляков В.Н., Таран А.А., Шрейнер Р.Т. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод с повышенной перегрузочной способностью // Автоматизация и прогрессивные технологии: Труды III межотраслевой научно-технической конференции (11-13 ноября 2002г.). – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2002. –С. 226-230.
8. Кривовяз В.К., Шрейнер Р.Т., Маевский В.В., Рудницкий О.М., Костылев А.В., Таран А.А. Энергосберегающий частотно-регулируемый электропривод трамвая “Спектр” // Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Сборник статей. Ч. 1: Общие вопросы электрических машин и трансформаторов. Машинно-вентильные системы. Вопросы диагностики. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. № 5 (25). 457 с. -С. 227-233.
9. Поляков В.Н., Таран А.А., Шрейнер Р.Т. Экстремальное управление асинхронным электроприводом при ограничении тока и напряжения // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: Материалы научно-технической конференции с международным участием / Под ред. В.А.Тюкова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.-276 с.

Подписано в печать 16.03.06 г. Формат 60x84x1/16. Бумага офсетная.
Тираж 100 экз. Печ. л. 1.0. Заказ № 11.

Отпечатано на ризографе НИЧ ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ»
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

