

### Сведения об авторах

Калмыков Андрей Николаевич, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, к.т.н., зам. руководителя НИЧ, e-mail: [kan@smtu.ru](mailto:kan@smtu.ru).

Рябов Алексей Александрович, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, аспирант, e-mail: [laxesra9v@mail.ru](mailto:laxesra9v@mail.ru).

Сеньков Андрей Алексеевич, ЦКБ МТ «Рубин», нач. сектора, e-mail: [norfa@mail.ru](mailto:norfa@mail.ru).

УДК 621.313

## ТРЕХЗОННАЯ СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Р.Т.ШРЕЙНЕР, д-р техн. наук, В.К. КРИВОВЯЗ, канд. техн. наук, С.И. ШИЛИН, канд. техн. наук, А.И. ХАБАРОВ, асп.

В докладе рассмотрены вопросы построения трёхзонной системы векторного частотного управления асинхронным электроприводом с глубоким ослаблением поля двигателя. Приводится описание функциональной схемы электропривода и взаимосвязи её основных элементов. Даются методики синтеза и структуры локальных САР для реализации ослабления поля. Приводятся результаты моделирования динамических режимов электропривода.

*Ключевые слова:* электропривод, асинхронный двигатель, векторное частотное управление, ослабление поля.

## THREE ZONE VECTOR FREQUENCY CONTROL SYSTEM OF INDUCTION DRIVE

R.T. SHREINER, Doctor of Engineering, V.K. KRIVOVIAZ, Candidate of Engineering, S.I. SHILIN, Candidate of Engineering, A.I. KHABAROV, Postgraduate Student

The Issues of implementing 3-zone vector frequency control system of induction drive with a significant weakening of the motor's field are considered in the report. Description of induction drive functional diagram and interaction of its basic elements are presented here. Design methodology and structure of local automatic control systems for field weakening are proposed. The results of modeling dynamic modes of the drive are given.

*Key words:* electric drive, induction motor, vector frequency control, field weakening.

**Введение.** Принципы построения векторных систем частотного управления электроприводами переменного тока с высококачественными электромеханическими характеристиками хорошо известны и освещены в литературе [1,2,3,4 и др.]. Важным практическим вопросом их построения является рациональное использование ограниченных энергетических ресурсов силовой части с позиций расширения диапазона регулирования скорости и обеспечения максимально возможной перегрузочной способности привода. Для расширения вверх диапазона регулирования скорости электроприводов постоянного и переменного тока используется известный принцип ослабления магнитного поля двигателя, реализуемый системами *двухзонного управления*. Однако, применительно к векторным системам частотного управления асинхронными электроприводами, этот принцип разработан недостаточно. Теоретической базой решения данного вопроса служат исследования экстремальных характеристик асинхронных электродвигателей при ограниченных ресурсах источников их питания [2, 5]. Показано, что для достижения максимальной перегрузочной

способности двигателя зону повышенных скоростей с ослаблением магнитного поля следует разделить на две зоны скоростей с различающимися алгоритмами управления. В результате система управления асинхронным электроприводом должна строиться как *трёхзонная*. В первой зоне скоростей (от минимальной вплоть до основной скорости) для достижения максимума перегрузочной способности необходимо поддерживать ток статора двигателя на предельно допустимом уровне, лимитируемом перегрузочной способностью преобразователя частоты. Алгоритм управления должен обеспечить работу двигателя при оптимальном значении скольжения, определяемом с учетом насыщения магнитной цепи. Во второй зоне (повышенных скоростей с ослаблением магнитного поля) необходимо поддерживать ток и напряжение статора на максимально допустимых уровнях. В третьей зоне (повышенных скоростей с глубоким ослаблением магнитного поля) максимум момента достигается при предельно допустимом значении напряжения и оптимальном значении скольжения, приближающемся к критическому скольжению.

Доклад посвящен вопросам приложения этой теории к построению трёхзонных систем векторного частотного управления асинхронными электроприводами с глубоким ослаблением поля двигателя.

**Функциональная схема трёхзонной векторной системы управления электроприводом.** Силовая часть электропривода содержит асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, питаемый от полупроводникового преобразователя частоты с ШИМ на базе автономного инвертора напряжения (АИН). Преобразователь получит питание от источника постоянного тока и работает в

режиме генератора переменного импульсного напряжения, управляемого по частоте и амплитуде основной гармоники. Система управления электроприводом построена по принципу подчинённого регулирования координат. При построении САР силовая часть электропривода представляется математической моделью, состоящей из последовательно соединённых звеньев напряжения, тока статора, потокосцепления обмотки ротора, электромагнитного момента и скорости вращения ротора [2]. Соответственно строится иерархия последовательно подчинённых локальных САР системы управления, представленной на рис. 1.

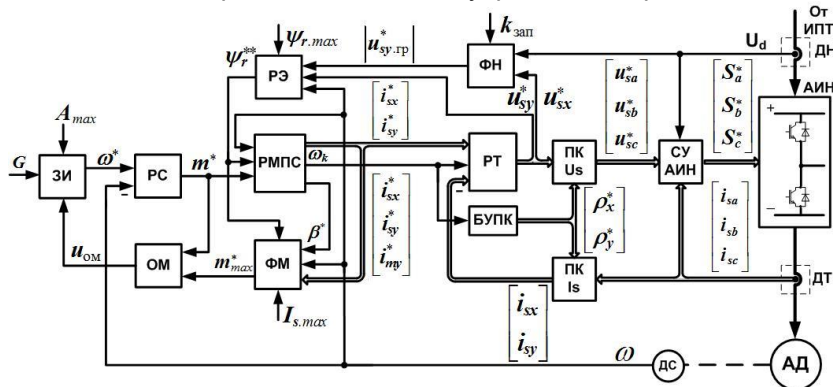


Рис. 1. Функциональная схема трёхзонной векторной системы управления электроприводом

Внутренней является локальная САР напряжения статора, основная функция которой состоит в обеспечении точности формирования полезных составляющих импульсных фазных напряжений на обмотках статора двигателя в соответствии с задающими воздействиями  $U_s^{F*} = [u_{sa}^* \ u_{sb}^* \ u_{sc}^*]^T$ . Для этого в систему управления инвертором (СУ АИН) введены компенсирующие связи по напряжению источника питания и фазным токам статора. Замкнутая комбинированная САР токов статора строится с использованием координатных преобразований, реализуемых блоками ПК  $U_s$  (в прямом тракте) и ПК  $I_s$  (в канале обратной связи). Регулирование по отклонению реализуется двухканальным регулятором преобразованных токов статора РТ, на входы которого поступают сигналы заданных преобразованных токов  $I_s^* = [i_{sx}^* \ i_{sy}^*]^T$  и сигналы отрицательных обратных связей по значениям преобразованных токов статора  $I_s = [i_{sx} \ i_{sy}]^T$ . В качестве элемента регулирования по возмущению предусмотрена компенсация внутренних межканальных обратных связей объекта регулирования по токам статора. Регулятор токов формирует вектор заданных значений компонент вектора напряжения статора  $U_s^* = [u_{sx}^* \ u_{sy}^*]^T$  во вращающейся системе координат. В результате их преобразования к заданным значениям фазных переменных формируются

задающие воздействия  $U_s^{F*} = [u_{sa}^* \ u_{sb}^* \ u_{sc}^*]^T$ , поступающие на вход системы управления инвертором СУ АИН. На выходе СУ АИН формируются дискретные управляющие воздействия  $[S_a^* \ S_b^* \ S_c^*]^T$ , определяющие состояние стоек инвертора. САР потокосцепления ротора и электромагнитного момента являются промежуточными и, в отличие от САР тока, выполняются в виде разомкнутых систем с регулированием по возмущению [2]. Структура регуляторов электромагнитного момента и потокосцепления ротора (РМПС) представлена на рис.2. Внешней является САР скорости, которая выполняется в виде замкнутой системы с регулированием по отклонению. Обратная связь реализуется с помощью датчика скорости. На входе САР скорости установлено командное устройство, формирующее сигнал задания с необходимым темпом. Предусмотрено ограничение заданного момента, формируемого регулятором скорости. Совокупность перечисленных выше локальных систем реализует алгоритм однозонной векторной САР с нормированными электромеханическими характеристиками. Верхняя граница диапазона регулирования скорости определяется максимальным напряжением преобразователя частоты. Принципы построения и методики синтеза отмеченных выше регуляторов описаны в [2,3,4].

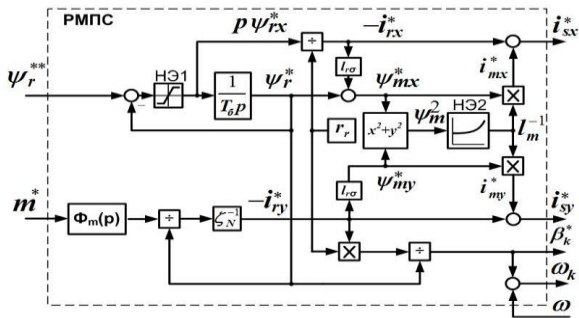


Рис. 2. Структура регуляторов потокоцепления ротора и электромагнитного момента

**Принципы синтеза САР с ослаблением магнитного поля двигателя.** Расширение диапазона регулирования скорости электропривода вверх в условиях ограниченных ресурсов преобразователя по максимальному напряжению объективно требует ослабления магнитного поля двигателя, и как следствие – введения дополнительных регуляторов в систему управления. В связи с этим структура однозонной САР дополняется системой регулирования напряжения статора, позволяющей автоматически переходить в режим ослабления поля (т.е. во вторую зону) в функции контроля текущего значения напряжения, формируемого регуляторами тока однозонной системы. Для автоматического перехода в третью, отмеченную выше, зону скоростей используется косвенный признак, а именно, контроль и ограничение абсолютного скольжения ротора двигателя на уровне, оптимальном для данной зоны. Рассмотрим принципы построения указанных выше дополнительных элементов САР электропривода с расширенным диапазоном регулирования скорости.

**Синтез системы автоматического регулирования напряжения статора для второй и третьей зон регулирования скорости.** В зоне повышенных скоростей основную долю напряжения статора составляет ЭДС вращения. Причем, в векторной системе частотного управления, прямо или косвенно ориентированной по вектору потокоцепления ротора, вектор ЭДС вращения оказывается практически ортогональным ориентирующему вектору, задающему направление оси  $Ox$  вращающейся системы координат. Наиболее значимой компонентой вектора ЭДС является его составляющая по оси  $Oy$ , т.е. компонента  $e_{sy}$ . Поэтому данная компонента используется в качестве основного инструмента регулирования напряжения статора в зоне ослабления поля. Расчетная схема системы регулирования  $e_{sy}$  представлена на рис.3. На входы регулятора ЭДС поступают сигналы задания и обратной связи по ЭДС от звена объекта. В заданную часть САР входят звено объекта, описываемое выражением

$$e_{sy} = -k_r \psi_r / \omega$$

и синтезированная ранее разомкнутая САР потокоцепления ротора АД. Её свойства приближённо описываются формулой

$$\Phi_\psi(p) = (T_\psi p + 1)^{-1},$$

где  $T_\psi$  – постоянная времени САР потока, выбираемая близкой к постоянной времени фильтра на входе регулятора момента (см.рис. 2).

В соответствии со стандартной методикой синтеза регуляторов систем подчинённого регулирования получаем в данном случае интегральный регулятор ЭДС с передаточной функцией:

$$R_e(p) = \frac{1}{k_r T_e p},$$

где  $T_e = 2T_\psi$  – по условию настройки САР ЭДС на модульный оптимум.

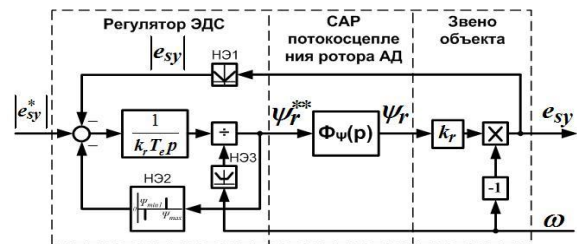


Рис. 3. Исходная структурная схема САР ЭДС вращения

Звено объекта подвержено влиянию не только контролируемого входного воздействия  $\Psi_r$ , но и возмущающего воздействия  $\omega$ . Его влияние компенсируется путём дополнения узла регулятора ЭДС блоком деления.

При внедрении данной системы в структуру многозонной САР электропривода учтены следующие обстоятельства.

1. Для регулирования ЭДС вращения по отклонению необходимо формирование соответствующего сигнала обратной связи, что представляет определённые трудности.
2. Формирование задающего воздействия должно быть подчинено главной причине введения данной САР, а именно – контролируемому ограничению напряжения статора на заданном предельно допустимом уровне, учитывающем наличие некоторого запаса «на регулирование».

Для этого оказалось целесообразным преобразование исходной структуры САР ЭДС вращения к виду, представленному на рис. 4. Данное преобразование, выполненное с учетом уравнений электрического равновесия статора, позволило заменить обратную связь по ЭДС вращения обратной связью по модулю компоненты заданного напряжения статора ( $u_{sy}^*$ ), формируемого регулятором тока статора. Задание для узла ограничения напряжения статора  $U_{s.rp}^*$  формируется с учетом текущего значения напряжения питания инвертора  $U_d$ . При этом используется коэффициент схемы, определяющий связь между амплитудой фазного выходного напряжения АИН с ШИМ

$U_{s,max}$  и напряжения питания  $U_d$  в режиме максимального выхода ( $k_{cx} = U_{s,max}/U_d$ ).

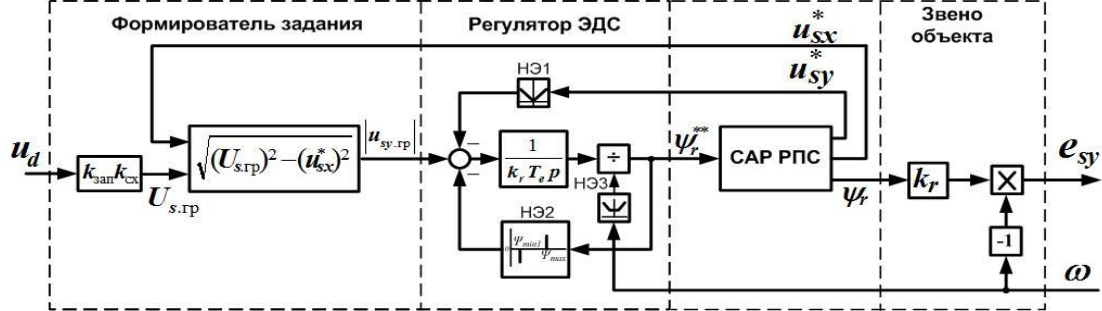


Рис. 4. Результат преобразования структурной схемы САР ЭДС вращения в САР напряжения статора

Кроме того, вводится коэффициент запаса на регулирование  $k_{зап} < 1$ , что обеспечивает работу регуляторов в линейной зоне и как следствие – прогнозируемые характеристики локальных контуров САР электропривода в режиме ограничения напряжения.

**Организация третьей зоны регулирования скорости.** Построение САР базируется на анализе соотношения переменных состояния электропривода в трёхзонной системе регулирования, иллюстрируемого графиками рис.5.

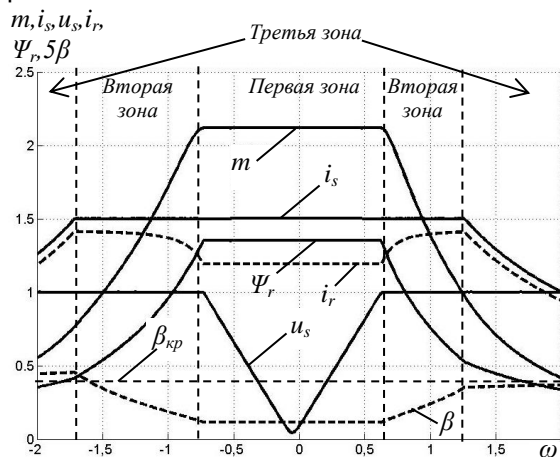


Рис. 5. Расчёт режимов работы двигателя АИУЕ225М6 40 кВт в системе с ослаблением поля

Здесь представлен результат расчёта режимов работы асинхронного двигателя АИУЕ225М6 мощностью 40 кВт, в системе с ослаблением поля при ограничении тока ( $i_{s,max} = 1.5$ ) и напряжения статора ( $u_{s,max} = 1$ ). Здесь и далее все переменные представлены в относительных единицах в базе, описанном в [2].

Как видно, во второй зоне регулирования  $\omega_{гр1}^+ < \omega \leq \omega_{гр2}^+$  и  $\omega_{гр2}^- \leq \omega < \omega_{гр1}^-$  напряжение и ток статора поддерживаются на максимально допустимых уровнях. С увеличением абсолютного значения скорости потокосцепление ротора и электромагнитный момент уменьшаются, а абсолютное скольжение возрастает.

В третьей зоне регулирования  $\omega > \omega_{гр2}^+$  и  $\omega < \omega_{гр1}^-$  напряжение статора остается неизменным, а магнитный поток и

электромагнитный момент продолжают уменьшаться. Причем, прежнее максимальное значение тока статора оказывается излишним для достижения максимума момента. Абсолютное скольжение здесь мало зависит от скорости и приближается к критическим значениям

$$\beta_{кр} \cong \pm \frac{r_r}{l_{\sigma} + l_{r\sigma}}$$

Это обстоятельство позволяет организовать близкое к оптимальному регулирование электропривода в третьей зоне путём ограничения скольжения на уровнях

$$\beta_1 = (1 - k)|\beta_{кр}|; \quad \beta_2 = (1 + k)|\beta_{кр}|,$$

где  $k$  – относительно малая величина, имеющая в данном примере значение 0,12.

**Ограничения момента в трёхзонной САР скорости.** Коррекция скольжения в третьей зоне осуществляется в рамках общей задачи ограничения момента в трёхзонной САР скорости.

С этой целью в структуре САР предусматривается нелинейный блок ограничения момента (ОМ), подключённый к выходу РС. Данный блок вступает действие в случае превышения модуля выходного сигнала РС  $m^*$  над уровнем сигнала уставки модуля максимально допустимого момента  $m_{max}^*$ . При этом на выходе ОМ формируется сигнал  $u_{ОМ}$ , поступающий на дополнительный вход ЗИ. В результате выходной сигнал ЗИ  $\omega^*$  и, соответственно, сигнал рассогласования на входе РС изменяются таким образом, что выходной сигнал РС поддерживается на уровне заданного ограничения. Уставка ограничения момента  $m_{max}^*$  формируется по двум каналам, выходные сигналы которых обозначаются как  $m_{max,1,2}^*$  и  $m_{max,3}^*$ . Структуры этих каналов соответствуют функциям:

$$m_{max,1,2}^* = f(\Psi_r^*, i_{sx}^*, i_{sy}^*, i_{my}^*, I_{s,max}); \quad (1)$$

$$m_{max,3}^* = f(\Psi_r^*, r_r, \beta_{k3}) \quad (2)$$

$$\text{где } \beta_{k3} = \begin{cases} \beta_1 & \text{при } u > 0 \\ \beta_2 & \text{при } u < 0 \end{cases}$$

$u = \text{sign}(\omega) \cdot \text{sign}(\beta_k^*)$  – функция, идентифицирующая двигательный либо генераторный режим работы реверсивного электропривода.

$I_{s,max}$  – заданное, максимально допустимое значение тока статора

Функция (1) сконструирована таким образом, что в первой зоне скоростей ее значение неизменно и определяет допустимое значение момента двигателя при допустимом значении тока статора  $I_{s,max}$ . Во второй зоне скоростей значение функции (1) уменьшается пропорционально уменьшению  $\Psi_r^{**}$ , формируемого регулятором ЭДС. Функция (2) сконструирована так, что в первой зоне скоростей ее значение также неизменно, однако превышает значение функции (1). Во второй зоне скоростей значение функции (2) снижается с ростом скорости, однако, по-прежнему превышает значение функции (1). В третьей зоне регулирования скорости значение функции (2) оказывается меньше, чем значение функции (1). Актуальная установка ограничения момента  $m_{max}^*$  формируется путем выборки наименьшего из значений двух названных функций.

Таким образом, в рамках общей задачи ограничения момента автоматически реализуется изменение алгоритма управления в третьей зоне регулирования скорости.

### Результаты математического моделирования векторной многозонной САР скорости.

На рис.7 представлены результаты математического моделирования динамических режимов (пуска и наброса нагрузки) электропривода с разработанной векторной многозонной САР скорости. Здесь значения всех переменных выражены в относительных единицах в соответствии с [2].

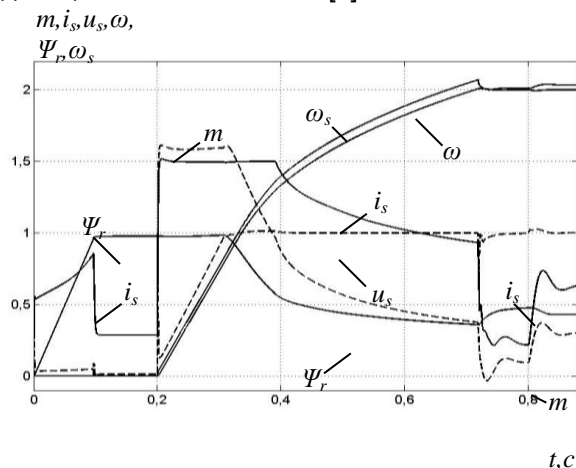


Рис.7. Динамические режимы электропривода с векторной многозонной САР скорости

### Сведения об авторах

*Шрейнер Р.Т.*, заведующий сектором ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», г.Екатеринбург, доктор технических наук. E-mail: [r\\_shreiner@mail.ru](mailto:r_shreiner@mail.ru).

*Кривовяз В.К.*, технический директор ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», кандидат технических наук. E-mail: [kvk@asc-ural.ru](mailto:kvk@asc-ural.ru).

*Шилин С.И.*, начальник научно-инженерного центра ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», кандидат технических наук. E-mail: [shilin@asc-ural.ru](mailto:shilin@asc-ural.ru)

*Хабаров А.И.*, инженер-проектировщик ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», аспирант. E-mail: [khabarov@asc-ural.ru](mailto:khabarov@asc-ural.ru).

Этап 1 ( $t = 0 \dots 0.2$  с) иллюстрирует включение системы в работу и установку заданного начального значения потокосцепления ротора. Процесс регламентируется нелинейным фильтром в структуре САР потокосцепления.

Этап 2 ( $t = 0.2 \dots 0.7$  с) – это разгон электропривода под действием ступенчатого сигнала задания скорости с прохождением первой, второй и переходом в третью зону регулирования скорости с ослаблением поля двигателя.

Этап 3 ( $t = 0.7 \dots 1$  с) иллюстрирует процесс выхода электропривода в установившийся режим работы и наброс нагрузки на валу двигателя в третьей зоне.

Как видно, разработанная трёхзонная САР скорости обеспечивает процессы регулирования скорости и электромагнитного момента, близкие к типовым процессам систем подчинённого регулирования. При этом в динамических режимах обеспечивается эффективное ограничение электромагнитного момента и тока статора на заданных допустимых уровнях.

Результаты математического моделирования подтверждают справедливость изложенных выше положений теории построения трёхзонных систем векторного частотного управления асинхронными электроприводами с ослаблением магнитного поля двигателя.

### Библиографический список

1. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens-Zeitschrift, 1971, Bd. 45, P. 757-760.

2. Шрейнер Р.Т. Оптимальное частотное управление асинхронным электроприводом / Р.Т. Шрейнер, Ю.А. Дмитренко. Кишинев: Штиинца, 1982. 234 с.

3. Козярук А.Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков. Под редакцией А.Г. Народицкого. Санкт-Петербург: ООО НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания», 2002, 90с.

4. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2008. 298 с.

5. Поляков В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер; под общ. ред. Р. Т. Шрейнера. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. 420 с.