

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Хабаров Андрей Игоревич

**АСИНХРОННЫЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ
ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ**

05.09.03 – Электромеханические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
БРАСЛАВСКИЙ Исаак Яковлевич

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент,
КОСТЫЛЕВ Алексей Васильевич

Официальные оппоненты: **КАРЯКИН Александр Ливиевич**,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, ФГБОУ ВО «Уральский
государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, заведующий кафедрой
«Электрификация горных предприятий»;
ЧЕРНЫХ Илья Викторович,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург,
профессор кафедры электротехники;
НИКОЛАЕВ Александр Аркадьевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск,
заведующий кафедрой «Автоматизированный
электропривод и мехатроника».

Защита состоится 18 ноября 2020 г. в 14:15 на заседании диссертационного совета УрФУ 05.01.02 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета) С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1407>

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Болотин Кирилл Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время наиболее широкое распространение получил частотно-регулируемый электропривод переменного тока на базе асинхронного короткозамкнутого двигателя. Главными достоинствами асинхронного электропривода, которые привели к его широкому распространению, являются надёжность и простота конструкции, минимальные требования к обслуживанию.

Повышение требований к энергетической и электромеханической эффективности электропривода, а также к его технологическим показателям таким, как нагрузочная способность, диапазон регулирования и ремонтпригодность определили основные направления развития асинхронных электроприводов, в том числе, создание энергоэффективных приводов.

Степень разработанности проблемы исследования. Вопросы энергоэффективного управления асинхронными электроприводами, получили значительное развитие в работах М.П. Костенко, А.А. Булгакова, А.С. Сандлера, Р.Т. Шрейнера и В.Н. Полякова, Филюшова Ю.П., а также других публикаций. В рамках этих работ получено комплексное решение энергетической и электромеханической задач оптимального (экстремального) управления. Подробно изложены вопросы многокритериальной оптимизации режимов работы асинхронного двигателя.

Практическое применение законы экстремального управления нашли в векторных системах управления. Необходимо отметить, что такие системы отличаются, как правило, высокой сложностью, чувствительностью к параметрам объекта регулирования. Так же известны решения экстремального управления стационарными режимами асинхронных электроприводов, характеризующихся постоянным моментом нагрузки.

Опираясь на опыт этих исследований можно сказать, что практическая реализация экстремальных систем регулирования требует дальнейшего


изучения. В связи с этим, *общим направлением* работы является поиск простого в реализации алгоритма оптимизации, доставляющего максимум выбранному показателю качества.

В данной работе, в качестве *объекта исследования*, выбран электропривод на базе полупроводникового преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией, с разомкнутой по скорости скалярной системой управления. В настоящее время электроприводы такого типа используются, преимущественно, в транспортных механизмах, таких как электропогрузчики, электрокары, самоходные вагоны, реже электротранспорт. Выполняемая ими технологическая задача характеризуется широким диапазоном изменения момента нагрузки при, как правило, фиксированном задании на скорость и независимым от данного электропривода значении скорости.

При такой постановке технологической задачи представляется целесообразным применение законов экстремального управления, в рамках комплексной оптимизационной задачи. С одной стороны, для выполнения технологической задачи требуется обеспечение максимально возможного момента электропривода на всем диапазоне изменения скоростей, с другой стороны при изменении момента нагрузки и задания на скорость требуется сохранение энергетических показателей на максимально возможном уровне.

Целью данной работы является внедрение закона экстремального управления моментом, сохраняющего энергетические показатели режимов работы асинхронных двигателей, в электропривод на базе полупроводникового преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией, с разомкнутой по скорости скалярной системой управления, режим работы которого характеризуется широким диапазоном изменения момента нагрузки.

Задачи исследования:

 *выбрать* показатель для оценки энергоэффективности применения законов частотного управления для скалярных разомкнутых по скорости

систем управления асинхронным электроприводом. Провести анализ законов частотного управления по выбранному показателю качества;

■ **постановка** комплексной оптимизационной задачи, на основе выбранного показателя, для скалярных разомкнутых по скорости систем управления асинхронным электроприводом;

■ **разработать** алгоритм комплексной оптимизации скалярных разомкнутых по скорости систем управления асинхронным электроприводом, обеспечивающий сохраняющий энергетические показатели электропривода в условиях переменной нагрузки. Провести анализ предложенного алгоритма управления по выбранному показателю качества;

■ **предложить** разомкнутую скалярную систему управления скоростью электропривода с комплексной оптимизацией режимов работы;

■ **численное** моделирование и экспериментальные исследования энергетических и динамических свойств асинхронного электропривода со скалярной системой управления с комплексной оптимизацией режимов работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан оригинальный алгоритм расчета законов экстремального управления, обеспечивающих оптимизацию по выбранному критерию в заданной области моментов двигателя, отличающийся автоматическим определением зон частотного регулирования.
2. Предложена концепция модернизации скалярной системы в виде двухканальной структуры, один из каналов которой предназначен для оптимизации процессов управления в установившихся режимах, другой в режимах работы при выходе тока или напряжения ПЧ на ограничение.
3. Разработана оригинальная система токоограничения, обеспечивающая четырехквadrантный режим работы электропривода, включающий рекуперативное электрическое торможение. Основной задачей системы токоограничения является удержание электропривода на экстремальном

законе управления, что обеспечивает оптимизацию режимов работы электропривода по электромеханическому показателю качества.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны условия определения зон работы электропривода, в которых условия достижения выбранного критерия оптимизации оказываются различными. Разработка таких условий позволяет создавать автоматические алгоритмы расчета экстремальных законов управления, по выбранному критерию оптимизации.
2. Введен электромеханический показатель качества, сформулирована математическая постановка комплексной оптимизационной задачи при использовании электромеханического показателя качества.
3. Разработана концепция модернизации скалярных систем управления, обеспечивающая комплексную оптимизацию режимов работы электропривода.
4. Разработана универсальная система токоограничения для электроприводов как со скалярной, так и с векторной системой управления.

Методология и методы исследования. В теоретическом исследовании использованы методы аналитической теории электрических машин переменного тока, преобразовательной техники, методы теории автоматизированного электропривода, теории систем автоматического регулирования, численные методы оптимизации, методы математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм расчета законов экстремального управления, с автоматическим определением зон частотного регулирования.
2. Электромеханический показатель качества и, сформулированная на его основе, постановка комплексной оптимизационной задачи.
3. Вариант реализации алгоритма комплексной оптимизации для скалярных, разомкнутых по скорости, систем управления электропривода.

4. Оригинальная система ограничения координат электропривода.

Достоверность полученных научных результатов подтверждается использованием апробированных аналитических и численных методов, физическим экспериментом, результатами внедрения.

Реализация результатов работы. Диссертационная работа выполнена на кафедре Электропривод и Автоматизация Промышленных установок Уральского Энергетического института Уральского Федерального Университета. Связана с проектом ЗАО «АСК». Результаты работы внедрены в производство серийного самоходного вагона В17К Копейского машиностроительного завода.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международной пятнадцатой научно-технической конференция ЭППТ-2012, Екатеринбург; 3-ей международной научно-практической конференции «Эффективное и качественное снабжение», 2013, Екатеринбург; международной двадцатой конференции «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» ПАЭП-2013, Харьков.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 3 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 2 публикации, индексируемые в реферативной базе Scopus; 2 тезисов докладов и 2 статьи в материалах международных конференций и научном журнале.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 93 источников. Работа изложена на 159 страницах, содержит 123 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость

полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации. Рассматриваются особенности и текущее состояние теории экстремального (энергоэффективного) управления асинхронными электроприводами.

В первой главе выполнен обзор вариантов реализации комплексной оптимизации режимов работы асинхронного электропривода. Показано, что

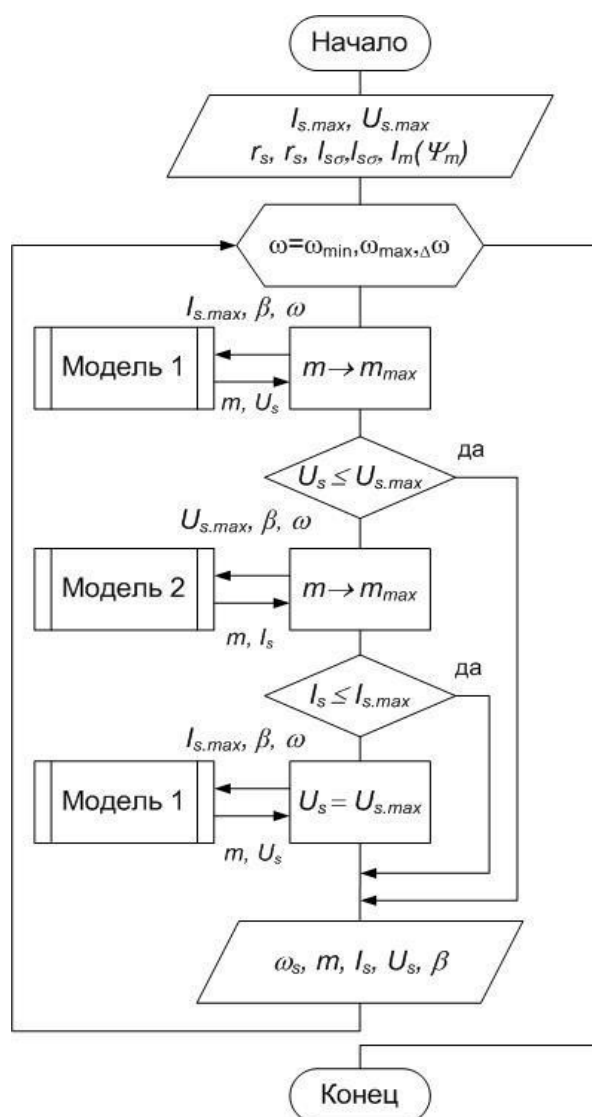


Рис.1. Блок-схема расчета оптимизированных законов частотного управления

данная задача решается введением в типовую структуру СУ электропривода, блока реализующего энергоэффективный алгоритм работы.

Во второй главе приводится математическое описание асинхронного электропривода.

Для моделирования процессов в асинхронном двигателе составлены его статическая и динамическая модели при питании двигателя от источника напряжения. Дополнительно, для решения задач оптимизации режимов работы электропривода, рассмотрена частотно-токовая статическая модель АД. В обеих моделях насыщение учитывается пересчетом зависящих от него параметров на каждом шаге расчета.

Предложен алгоритм расчёта законов оптимального управления, отличающийся автоматическим определением зон частотного регулирования. При решении задачи максимизации момента при ограничениях выделяют три зоны, условия достижения максимума в которых различны: **1 зона:** при $\omega \leq \omega_1$: $i_s =$

$i_{zp}; u_s \leq u_{zp}$; **2 зона:** при $\omega_1 \leq \omega \leq \omega_2$: $i_s = i_{zp}; u_s = u_{zp}$; **3 зона:** при $\omega > \omega_2$:
 $i_s \leq i_{zp}; u_s = u_{zp}$.

При вычислениях, в зависимости от условий работы привода, используются два варианта математической модели АД, для расчёта статических режимов работы: «напряжения статора - потокосцепления ротора» (Модель 1) и «токи статора - потокосцепления ротора» (Модель 2).

На рис. 1 представлен алгоритм расчета соответствующих законов частотного управления, отличающийся автоматическим определением границ зон и расчет результирующих оптимальных характеристик. В пределах цикла по скорости, первоначально рассчитываются

характеристики предположительно для первой зоны скоростей с использованием математической модели «напряжения статора - потокосцепления ротора» (Модель 1 на рис. 1) в рамках стандартного оптимизационного алгоритма, определяющего экстремальное значение момента двигателя при допустимом значении тока статора, а также соответствующие оптимальные значения абсолютного скольжения и напряжения статора. В случае нарушения условия $U_s \leq U_{s,max}$ производится новый оптимизационный расчет предположительно для третьей зоны с использованием математической модели «токи статора - потокосцепления ротора» (Модель 2 на рис. 1) в рамках оптимизационного алгоритма, определяющего экстремальное значение момента двигателя при допустимом

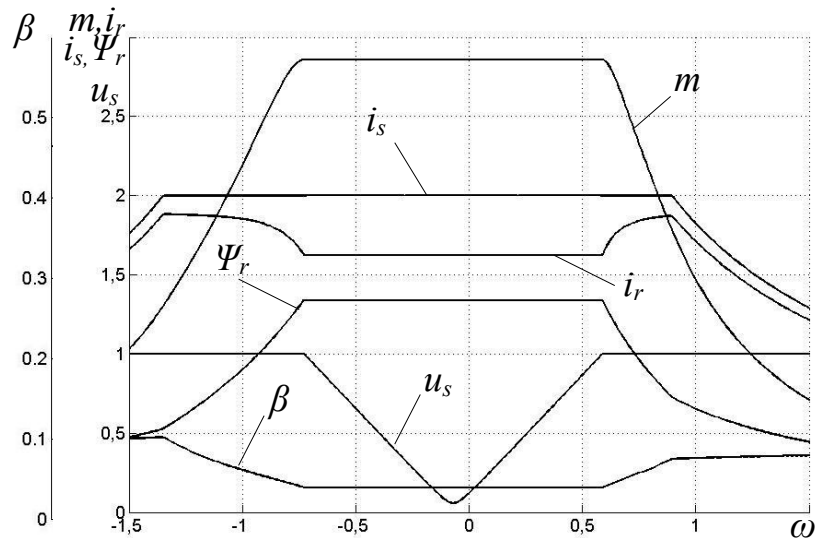


Рис.2. Законы оптимального частотного управления асинхронным двигателем АИУЕ225М6 ($P_N=40$ кВт), при ограничениях по току ($I_{s,доп}=2,0 I_N$) и напряжению ($U_{s,доп}=U_N$)

значении напряжения статора, а также соответствующие оптимальные значения абсолютного скольжения и тока статора. В случае нарушения условия $I_s \leq I_{s,max}$ производится расчет законов управления для второй зоны с использованием математической модели «напряжения статора - потокосцепления ротора» (Модель 1 на рис. 1) в рамках оптимизационного алгоритма, определяющего экстремальное значение момента двигателя при ограничениях по току и напряжению.

По результатам указанных выше проверок производится формирование результирующего закона управления в заданном диапазоне скоростей с автоматическим определением границ и стыковкой первой, второй и третьей зон регулирования. Пример такого расчета приведен на рис. 2.

В третьей главе для оценки качества управления по максимуму электромагнитного момента двигателя в скалярных системах введён **электромеханический показатель качества «электромагнитный момент/ток статора»**:

$$J_{m/i_s} = \frac{m}{i_s}, \quad (1)$$

где m - электромагнитный момент АД, i_s – модуль тока статора АД.

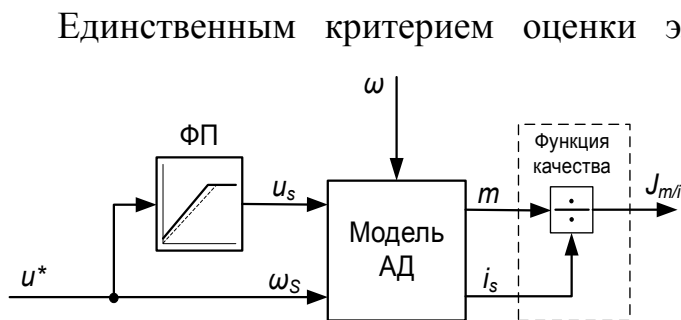


Рис.3. Модель расчета электромеханического показателя качества

качества является достижение им максимально возможных значений: $J_{m/i_s} \rightarrow \max$.

На рис. 3 представлена модель расчёта электромеханического

показателя качества. Расчёт электромеханического показателя производится по следующему алгоритму: при фиксированных значениях амплитуды U_m частоты ω_s напряжения статора, определяемых в соответствии с выбранным законом частотного управления, варьируется угловая скорость вращения ротора ω .

Рассмотрим природу изменения электромеханического показателя качества от момента нагрузки на валу АД, на примере пропорционального

закона частотного управления. На рис. 4 показаны пропорциональный закон частотного управления (зависимость 1) и два скорректированных закона частотного управления (зависимости 2 и 3).

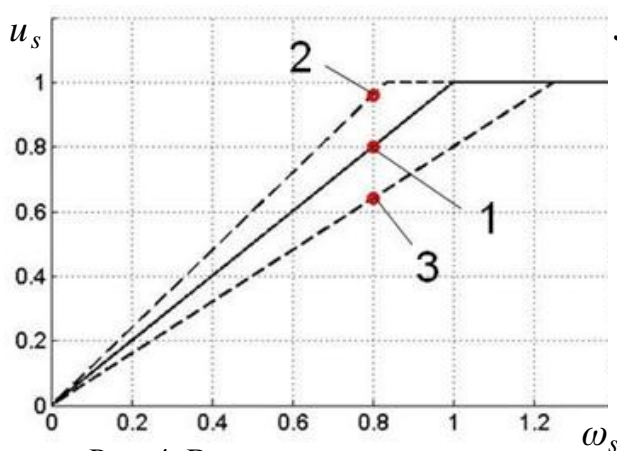


Рис. 4. Вариации закона частотного управления

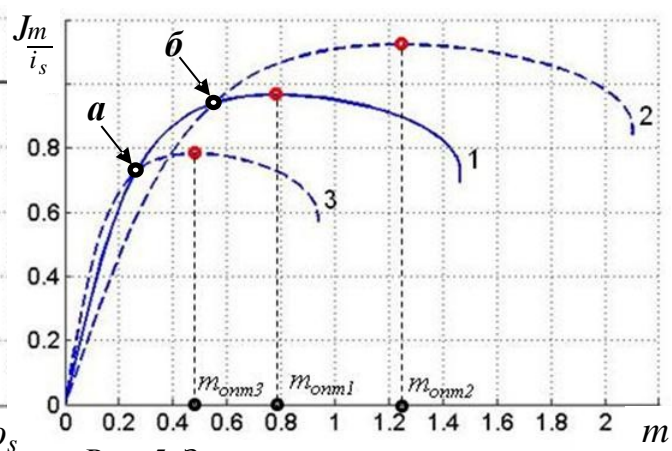


Рис. 5. Зависимость показателя качества при вариации закона управления

С помощью математической модели расчета электромеханического показателя рассчитаем его значения в функции нагрузки на валу двигателя при фиксированном задании на частоту и амплитуду напряжения статора АД (рис. 5). Как видно, при вариации закона пропорционального частотного управления в сторону увеличения амплитуды напряжения статора u_s (зависимость «2») электромеханический показатель возрастает, максимум его смещается в область больших моментов и, соответственно, больших токов. Однако, при уменьшении амплитуды напряжения статора (зависимость «3») электромеханический показатель падает, максимум его смещается в область меньших моментов и меньших токов. От начала оси координат, до точки «а» наибольшее значение электромеханического показателя имеет зависимость «3», от точки «а» до точки «б» наибольших значений достигает зависимость «1», в области, расположенной правее точки «б», наибольшее значение достигает зависимость «2».

Важный вывод заключается в том, что для каждого закона частотного управления максимум электромеханического показателя будет получен только при определенном значении нагрузки на валу двигателя. Для подтверждения этого вывода был проведен аналогичный анализ типовых законов скалярного управления.

Напомним формулировку комплексной оптимизационной задачи, известную из работ Р.Т. Шрейнера и В.Н. Полякова: *в рабочей области функционирования привода необходимо выбрать такое управление, которое доставит экстремум выбранному показателю качества, а при выходе тока или(и) напряжения статора на ограничение необходимо выбрать управление, обеспечивающее максимальную перегрузочную способность.*

В качестве показателя качества для рабочей области функционирования привода выберем электромеханический показатель качества J_{m-is} . При выходе на указанные ограничения, выберем управление доставляющее максимум электромеханическому показателю J_{m-is} , так как в этом случае обеспечивается максимум перегрузочной способности в первой зоне скоростей.

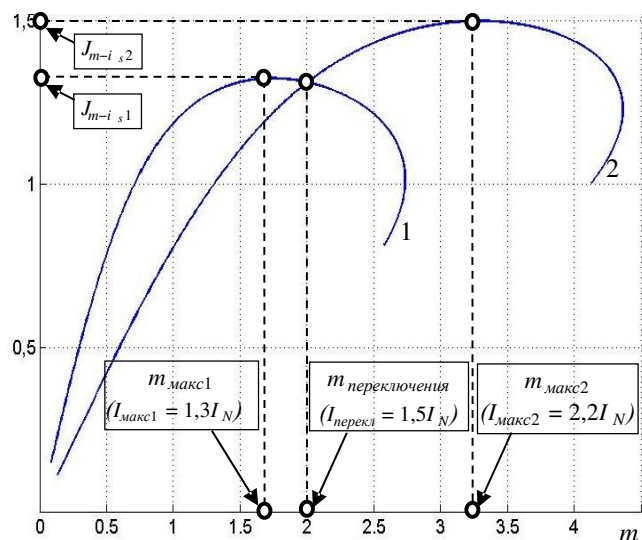


Рис. 6. К вопросу реализации

комплексного алгоритма оптимизации

На рис. 6 показаны зависимости электромеханического показателя от момента нагрузки. Значения электромеханического показателя для рабочей области функционирования (зависимость 1) рассчитаны для тока двигателя $I_{макс1} = 1,3I_N$ исходя из нагрузочной диаграммы. Значения электромеханического показателя

при ограничениях (зависимость 2) рассчитан для тока двигателя $I_{макс2} = 2,2I_N$ исходя из максимально допустимого тока ПЧ. В точке пересечения зависимостей 1 и 2 ток двигателя составляет $I_{перекл} = 1,5I_N$.

Как видно, слева от точки пересечения значения электромеханического показателя больше для зависимости 1, справа от точки пересечения значения электромеханического показателя больше для зависимости 2. Учитывая полученные результаты анализа, комплексная оптимизация режимов работы электропривода по электромеханическому показателю качества формулируется следующим образом: *в каждой рабочей точке привода*

необходимо выбрать такое управление, которое обеспечивает наибольшее значение электромеханического показателя качества J_{m-is} .

Математическая постановка такой задачи выглядит следующим образом:

$$\beta_{\varepsilon} = \begin{cases} \beta_{\varepsilon 1} \langle J_{m-is 1} (I_s) \geq J_{m-is \text{ пред.}} (I_s) \rangle, \\ \beta_{\varepsilon \text{ пред.}} \langle J_{m-is \text{ пред.}} (I_s) > J_{m-is 1} (I_s) \rangle, \end{cases} \quad (2)$$

где $\beta_{\varepsilon 1}$ оптимальное управление в рабочей области привода; $\beta_{\varepsilon \text{ пред.}}$ оптимальное управление при выходе на ограничения; $J_{m-is 1}$ значения электромеханического показателя для закона управления в рабочей области привода; $J_{m-is \text{ пред.}}$ значения электромеханического показателя для закона обеспечивающего максимальную перегрузочную способность; I_s ток статора АД. В качестве параметра, в функции которого происходит выбор между управлениями, возможно использовать **момент** или **ток статора** АД.

Предлагаемая концепция модернизации типовых скалярных систем состоит в том, что в них закладывается два варианта законов частотного управления, один из которых ориентирован на оптимальное функционирование двигателя в рабочей области, в зависимости от решаемой технологической задачи, а второй – на обеспечение максимальной перегрузочной способности привода.

Выбор закона частотного управления в процессе работы привода осуществляется по критерию наибольшего значения электромеханического

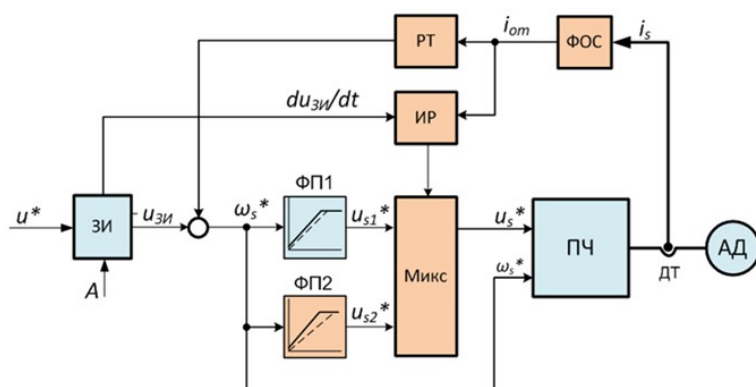


Рис.7. Структура модернизации скалярной системы управления

показателя качества J_{m-is} , что определяется с помощью текущего значения тока статора АД.

Для сопряжения соответствующих блоков, формирующих названные законы управления в

скалярной системе, предусматривается идентификатор режима, формирующий единое силовое управляющее воздействие, подводимое к

двигателю от преобразователя. Структура скалярной системы переменной структуры приведена на рис. 7. Модель содержит следующие блоки и переменные: u^* – задающее воздействие; ω_s^* – заданная частота напряжения статора; u_s^* – заданная амплитуда напряжения статора; u_{s1}^* – заданная амплитуда напряжения статора в статическом режиме работы; u_{s2}^* – заданная амплитуда напряжения статора в переходном режиме работы; $o\dot{m}$ – сигнал обратной связи по току; i_s – модуль тока статора; A – темп задатчика интенсивности; $u_{3И}$ – выход задатчика интенсивности; $du_{3И}/dt$ – скорость изменения задающего сигнала $u_{3И}$; $\PhiП1, \PhiП2$ – функциональные преобразователи напряжения; $3И$ – задатчик интенсивности; $РТ$ – регулятор тока отсечки; $\PhiОС$ – формирователь обратной связи; $ИР$ – идентификатор режима; $ПЧ$ – преобразователь частоты; $Микс$ – устройство выбора закона управления (микширующее); $АД$ – асинхронный двигатель.

Так как функциональные преобразователи $\PhiП1$ и $\PhiП2$ реализуют закон, максимизирующий момент при заданном токе, необходимо добавить в структуру контур токоограничения, в переходных режимах поддерживающий ток на заданном уровне. Идентификатор режима (ИР) формирует управляющее воздействие на микширующее устройство (Микс), реализуя требуемый закон управления в зависимости от режима работы электропривода и статической нагрузки на валу электродвигателя. Формирователь обратной связи (ФОС) синтезирует сигнал обратной связи, знак которого отражает знак активной мощности, потребляемой, либо генерируемой электроприводом, что необходимо для реализации четырехквadrантного режима работы. Система токоограничения, реализуемая регулятором тока (РТ), и функциональный преобразователь $\PhiП2$, реализующий закон частотного управления, максимизирующий момент при фиксированном токе, настроены на предельный ток преобразователя.

Используя, приведённый в главе 2 алгоритм расчёта оптимального закона управления, основываясь на концепции построения скалярных систем управления переменной структуры, были рассчитаны закон управления для

рабочих режимов работы привода (*статический закон управления*) и закон управления при выходе на ограничения по току и напряжению преобразователя, обеспечивающий максимальную перегрузочную способность (*предельный закон управления*).

Предельный закон управления. Синтезируется исходя из обеспечения максимально возможного электромагнитного момента двигателя в условиях ограниченных ресурсов источника питания двигателя по предельно допустимому току и напряжению. Как известно, теоретическое решение этой задачи дает три зоны скоростей, в первой (зона относительно малых скоростей) для достижения максимума момента необходимо поддерживать ток на предельно допустимом уровне при оптимальном значении скольжения, определяемом с учетом насыщения магнитной цепи. Во второй зоне (средней зоне скоростей) необходимо поддерживать на максимально допустимых уровнях и ток и напряжение. В третьей – максимум момента достигается при предельно допустимом значении напряжения и оптимальном значении скольжения, приближающемся к критическому значению.

Статический закон управления. При формировании оптимальных законов управления двигателем в установившихся режимах возможны различные подходы и соответствующие законы управления, включая простейший закон пропорционального частотного управления. Если же известна наиболее вероятная зона изменения статической нагрузки двигателя, тогда может быть использована описанная выше оптимизационная процедура получения законов управления двигателем в установившихся режимах при данных нагрузках на валу.

Для двигателя АИУЕ225М6 были построены *предельный закон управления* (рис. 8), рассчитанный на максимальный, допустимый в течение 60с., ток преобразователя частоты ($i_{max} = 1,5i_N$) и *статический закон управления* (рис. 9), рассчитанный на наиболее вероятный режим нагрузки, в данном случае на номинальный ток двигателя ($i_s = i_N$).

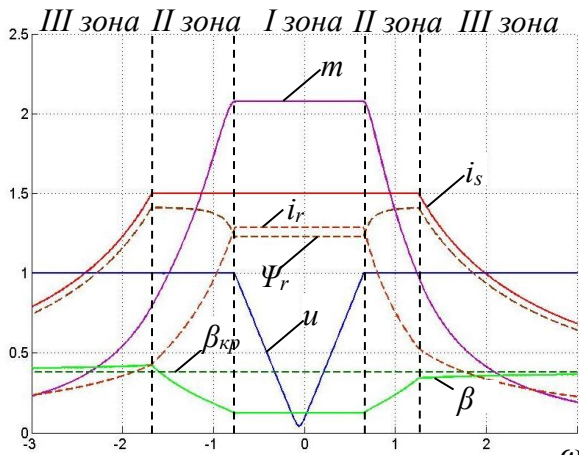


Рис.8. Предельный закон частотного управления

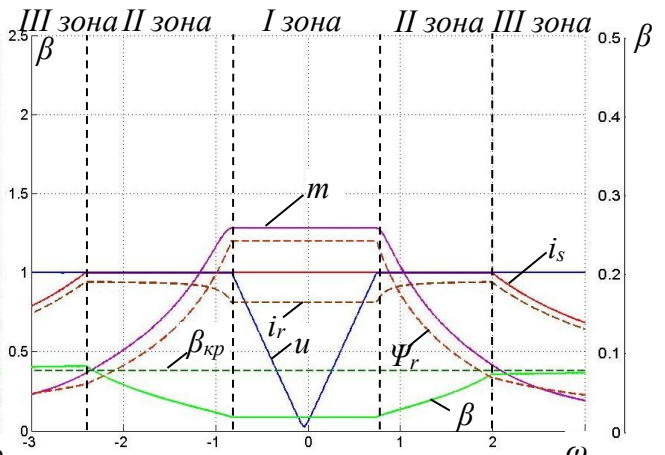


Рис.9. Статический закон частотного управления

Обратим внимание, что законы управления приведены в функции скорости, поэтому при синтезе модернизированной скалярной СУ сигнал задания представляет собой заданную скорость двигателя. Управляющие воздействия – амплитуда напряжения статора u_s и его частота ω_s – формируются с помощью соответствующих функциональных преобразователей.

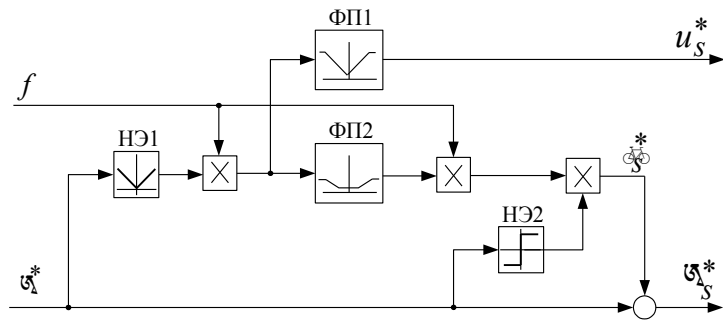


Рис. 10. Структурная схема преобразования сигнала задания скорости

Рассчитанные законы частотного управления содержат два управляющих воздействия: амплитуду напряжения статора u_s^* и величину абсолютного скольжения β_s^* . Поэтому при формировании заданных оптимальных амплитуды u_s^* и частоты ω_s^* напряжения статора для каждого закона необходимы два функциональных преобразователя. Соответствующая структурная схема представлена на рис. 10. Функциональные преобразователи ФП1 и ФП2 формируют, в функции модуля скорости, оптимальные значения амплитуды напряжения и величины абсолютного скольжения. Идентификатор $f = \pm 1$ определяет режим работы электропривода. Нелинейные элементы НЭ1 и НЭ2 обеспечивают корректную работу при отрицательных значениях сигнала задания.

закон управления, соответственно. При формировании логики работы данной системы было принято следующее допущение: при разгоне электропривода под действием управляющего сигнала G режим работы всегда считается двигательным ($f = +1$), при торможении – генераторным ($f = -1$). В установившемся режиме работы ($f = 0$) выбор режима (двигательного или генераторного) осуществляется посредством НЭ7.

Знак активного тока $i_{s,акт}$, формируемый элементом НЭ7, определяет квадрант работы электропривода в установившихся режимах. Отметим, что знак активного тока позволяет идентифицировать двигательный, либо генераторный режим работы двигателя, независимо от направления его вращения (в двигательном режиме $i_{s,акт} > 0$, а в генераторном $i_{s,акт} < 0$). Нелинейный элемент НЭ6 формирует сигнал, определяющий момент переключения между законами управления в функции разности между значением тока статора АД и тока переключения $i_{s,перекл}$ между законами управления. Значение тока переключения $i_{s,перекл}$ соответствует току статора АД, при котором зависимости электромеханического показателя для законов управления пересекаются. Для формирования плавного перехода между законами частотного управления на выходах данной системы *следует установить фильтры*.

В четвертой главе разработана оригинальная система ограничения координат электропривода. Предложена система токоограничения, обеспечивающая четырехквадрантный режим работы электропривода. На рис. 12 представлена структурная схема системы ограничения переменных.

Как видно, основным элементом контура ограничения переменных является Блок Управления (БУ) содержащий в себе элемент памяти, в данном случае это триггер, и два нелинейных элемента НЭ1 и НЭ2. БУ обеспечивает замыкание контура ограничения переменных при превышении регулируемой переменной допустимой величины и размыкание контура ограничения переменных в функции интегральной составляющей ПИ регулятора.

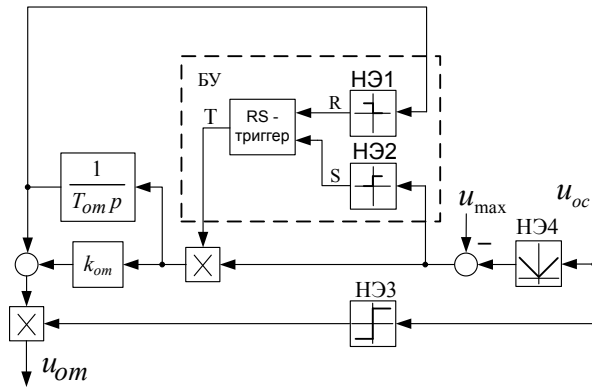


Рис. 12. Структура системы ограничения переменных

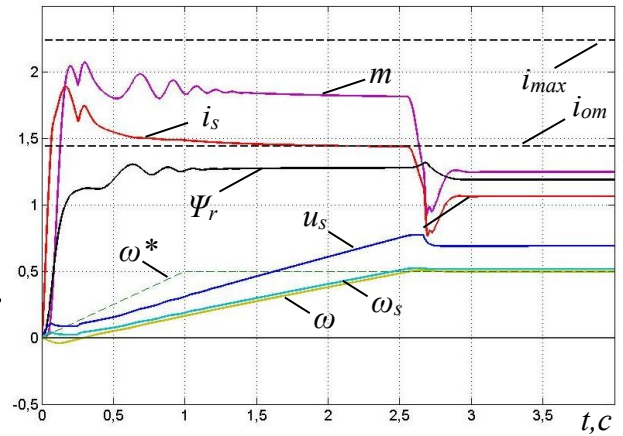


Рис. 13. Процессы пуска в модернизированной скалярной системе в первой зоне скоростей. $m_a = +1,25$; $J_\Sigma = J_{zp}$; $A = 0,5$.

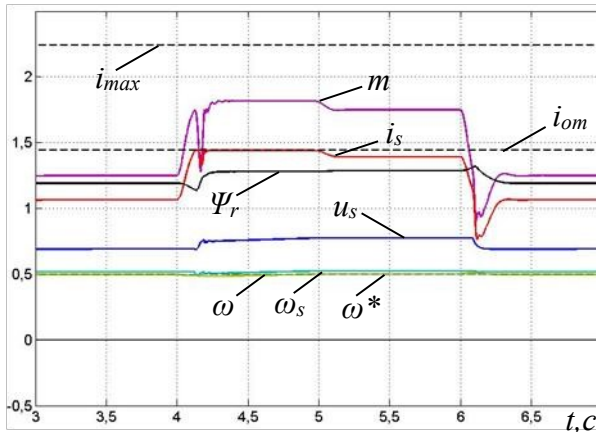


Рис. 14. Процессы при набросе активного момента в первой зоне скоростей $m_a = +1,25$; $m_{набр} = +0,5$; $J_\Sigma = J_{zp}$; $A = 0,5$

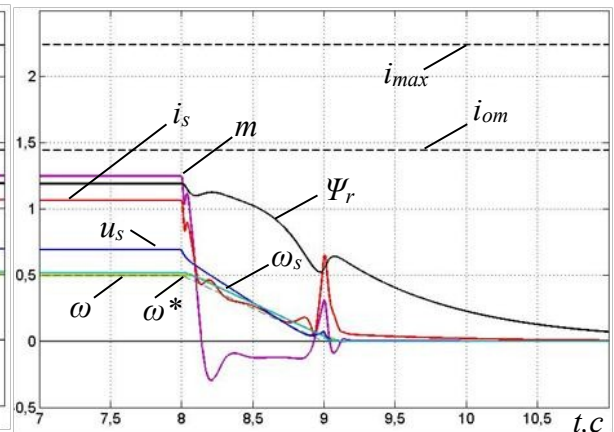


Рис. 15. Процессы торможения в модернизированной скалярной системе в первой зоне скоростей. $m_a = +1,25$; $J_\Sigma = J_{zp}$; $A = 0,5$

В пятой главе описываются результаты математического моделирования. На рис. 13–15 представлены результаты моделирования процессов пуска, торможения и наброса нагрузки в разработанной скалярной системе. Проводится тестирование работоспособности системы с разными видами нагрузки. Показано, что в модернизированной системе развиваемый момент примерно на 25% превышает момент в типовой скалярной системе для рассматриваемого типа двигателя. Аналогичные процессы получены при работе во второй и третьей зоне скоростей. Выполнено моделирование рассматриваемой системы с разными типами нагрузки (с реактивным и активным моментами, а также в двигательном и генераторном режимах). Рассмотрена работа при пониженном напряжении сети, подтверждена

работоспособность системы при просадке напряжения в пределах 10%. Рассмотрена работа системы при изменении активных сопротивлений статора и ротора.

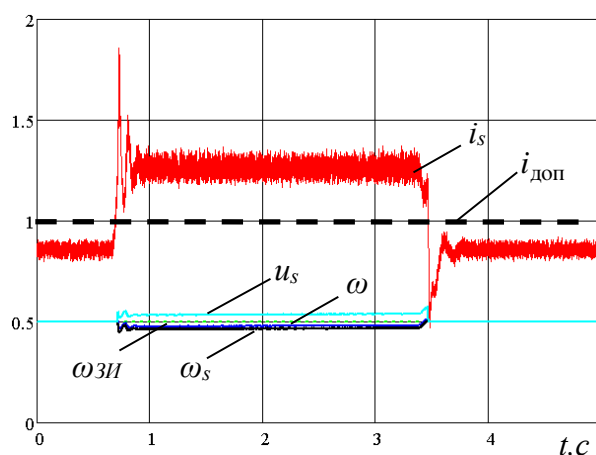


Рис. 17. Процессы наброса нагрузки в лабораторном варианте модернизированной скалярной системе в первой зоне скоростей

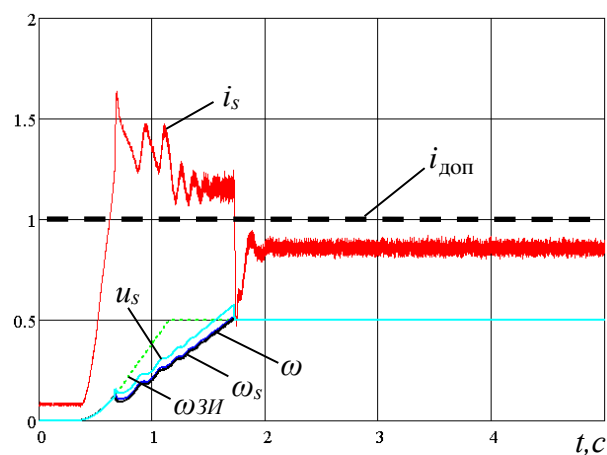


Рис. 18. Процессы пуска в лабораторном варианте модернизированной скалярной системе в первой зоне скоростей

В шестой главе приводятся результаты экспериментальных исследований. Для проверки достоверности полученных результатов были использованы опытные установки разной мощности: 4 кВт, 22 кВт и 40 кВт, эксперименты на которых подтвердили достоверность полученных результатов. В качестве объекта, для проверки полученных результатов, выбран самоходный вагон В17К Копейского машиностроительного завода, положительный опыт эксплуатации на котором позволил внедрить разработанную систему переменной структуры в промышленное производство.

Представлены результаты экспериментального исследования динамических режимов электропривода на шахтном самоходном вагоне с двигателем мощностью 40 кВт. На рис. 16 представлены осциллограммы пуска двигателя мощностью 4 кВт с разработанной системой. Приведённые процессы качественно совпадают с процессами, приведёнными в главе 4. Выполнена наладка в лабораторных условиях реального преобразователя частоты для двигателя 5A200M6 мощностью 22 кВт. На рис. 17-18 представлены графики процессов пуска, торможения и наброса нагрузки в

модернизированной скалярной системе управления для двигателя 5A200M6. На рис. 19 представлены результаты экспериментального исследования динамических режимов электропривода на шахтном самоходном вагоне, с двигателем мощностью 40 кВт. Приведенные графики подтверждают соответствие процессов в лабораторном стенде процессам в промышленном образце.

В заключении изложены основные выводы по научным и практическим результатам проведённых теоретических и экспериментальных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен оригинальный алгоритм расчёта оптимальных законов управления, отличающийся автоматическим определением границ зон работы электропривода. Введен электромеханический показатель качества, позволяющий наглядно сравнить энергоэффективность законов частотного управления.
2. Предложена оригинальная формулировка комплексной электромеханической задачи при использовании электромеханического показателя.
3. Для скалярных систем регулирования с фиксированным законом частотного управления подтверждена целесообразность применения нескольких законов частотного управления, выбираемых в зависимости от вероятной нагрузки на валу двигателя.
4. Разработана скалярная система управления частотным асинхронным электроприводом переменной структуры, обеспечивающая максимум электромагнитного момента при ограничении тока преобразователя во всех режимах работы. Данная система отличается использованием в своей структуре двух законов частотного управления, один из которых рассчитан на оптимальное функционирование системы при выходе на ограничения по току и напряжению статора АД, второй – на оптимальное функционирование в установившихся режимах работы. Переключение между законами

осуществляется по условию максимума электромеханического показателя в функции модуля тока статора АД.

5. Система управления электроприводом выполнена как многозонная система автоматического регулирования, где в первой зоне воздействие на двигатель осуществляется путем связанного определённым законом изменения амплитуды и частоты напряжения статора, а во второй зоне – путем изменения частоты, а амплитуда напряжения остается неизменной в соответствии с предельными возможностями преобразователя частоты.

6. Разработана численная математическая модель рассматриваемого электропривода со скалярной системой управления переменной структуры, что позволило исследовать динамические характеристики электропривода в различных режимах.

7. Выполнено сравнение с типовой скалярной системой. Подтверждено увеличение электромагнитного момента двигателя в модернизированной системе при ограничении по току преобразователя по сравнению со скалярной системой на 25% для рассматриваемого двигателя.

8. Показана работоспособность системы при работе с различными нагрузками электропривода: реактивным моментом сопротивления, активным двигательным и активным генераторным моментами.

9. Подтверждена работа электропривода в условиях изменения в пределах $\pm 40\%$ активных сопротивлений статора и ротора. Показано что при увеличении активных сопротивлений показатель качества уменьшается не более чем на 5%.

10. Разработанная система управления прошла тестирование на экспериментальной установке электропривода. В результате серии экспериментов были подтверждены основные теоретические положения работы.

11. Разработанная система управления апробирована на опытно-конструкторском образце шахтного самоходного вагона, успешно прошла испытания в условиях эксплуатации. Результаты работы внедрены в

производство серийного самоходного вагона В17К Копейского машиностроительного завода.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

1. Создание универсального алгоритма реализации экстремальных законов управления асинхронным двигателем, применимого как для скалярных, так и векторных систем управления.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. Shreiner R.T. Optimization of a variable-frequency induction motor drive with a scalar control system. Russian Electrical Engineering, 83(9), 2012. С. 490-493 4 с.\ Shreiner R.T., Shilin S.I., Kostylev A.V., **Khabarov A.I.** (Scopus). (0,26 п.л. /0,1 п.л.).
2. Браславский И. Я., Костылев А.В., Цибанов Д.В., **Хабаров А.И.** Оптимизация пусковых процессов в асинхронном частотном электроприводе со скалярной САР. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Челябинск, 2013, №2, с.69-74. (0,37 п.л. /0,1 п.л.).
3. Braslavskii I.Y. Dynamic-process optimization in an asynchronous electric drive with a scalar automatic control system. Russian Electrical Engineering, 85(9), 2014. С. 575-580. Braslavskii I.Y., Kostylev A.V., Tsibanov D.V., **Khabarov A.I.** (Scopus). (0,38 п.л. /0,12 п.л.).

Публикации в других изданиях:

4. Шрейнер Р.Т. Оптимизация асинхронного частотно-регулируемого электропривода со скалярной системой управления/ Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И., **Хабаров А.И.** //Труды международной пятнадцатой научно-технической конференции ЭПТТ-2012. 2012, С.113-115. (0,19 п.л. /0,1 п.л.).

5. Шрейнер Р.Т. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод самоходного вагона с оптимизированной скалярной системой управления/ Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И., **Хабаров А.И.** //Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск. 2012. С. 150-157. (0,6 п.л. /0,3 п.л.).
6. Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с модернизированной скалярной системой управления/ Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И., **Хабаров А.И.** // Эффективное и качественное снабжение: сборник докладов 3-й межд. научно-практ. конференции. Екатеринбург. 2013. С. 139-142. (0,25 п.л. /0,15 п.л.).
7. Браславский И. Я. Исследование экстремальной скалярной системы управления асинхронным электроприводом в условиях изменения параметров объекта/ Браславский И. Я., Костылев А.В., **Хабаров А.И.** // Вестник НТУ «ХПИ», серия: «Проблемы автоматизированного электропривода теория и практика», Харьков, 2013, с. 228-229. (0,125 п.л. /0,05 п.л.).