

МАКАРЕНКО
Андрей Александрович

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕМ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ
РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Политехническом институте
ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет"

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Иванчура Владимир Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Ловчиков Анатолий Николаевич

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник
Лыков Николай Борисович

Ведущая организация: Обособленное подразделение
"Научно-исследовательский институт
автоматики и электромеханики
Томского государственного
университета систем управления
и радиоэлектроники" (г. Томск)

Защита состоится "27" марта 2009 г. в 14 часов на заседании диссертационно-го совета ДМ 212.099.06 при ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет" по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. УЛК-115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО "Сибирского федерального университета" по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г-274.

Автореферат диссертации размещен на сайте Сибирского федерального университета.

Ваш отзыв, заверенный печатью, просьба направлять по адресу: 660074, ул. ак. Киренского, 26, Красноярск, ауд. УЛК 319, ученому секретарю диссертационного совета Цареву Роману Юрьевичу.

Автореферат разослан " __ " _____ 2009

Ученый секретарь
диссертационного совета

Р. Ю. Царев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На современных предприятиях разделительного производства (РП) для электроснабжения многодвигательного синхронно-гистерезисного электропривода (МСГЭП) применяются системы электропитания (СЭП) на базе преобразователей частоты с микропроцессорным управлением. Система электропитания и МСГЭП образуют сложную многосвязную электротехническую систему разделительного производства (ЭТС РП), обеспечивающую стабилизированное электропитание группы синхронно-гистерезисных двигателей (ГСГД). Каждый из синхронно-гистерезисных двигателей (СГД) является приводом газовой центрифуги (ГЦ).

Исследованиями в управляемом синхронно-гистерезисном электроприводе ранее установлено, что нестабильность тока, момента и мощности СГД, а также устойчивость процессов в системе электропитания взаимосвязаны. Исследованиям процессов в управляемом синхронно-гистерезисном электроприводе посвящены работы Б. А. Делекторского, В. Н. Тарасова, Н. З. Мастяева, В. Б. Никанорова, В. А. Лифанова, А. А. Ефимова, Р. Т. Шрейнера, А. И. Калыгина и др. Тем не менее, вопросы, связанные с управлением электропитанием в ЭТС РП большой мощности в основном, длительном режиме работы освещены недостаточно.

В этом режиме в системе наблюдаются субгармонические колебания питающего напряжения (СКН). При этом качество напряжения значительно ухудшается и не соответствует техническим условиям эксплуатации СГД. При переключениях в силовой цепи в присутствии колебаний, происходят отключения электропитания. Это ведет к сбоям и нарушениям сложных технологических процессов и выходу электрооборудования из строя. Поэтому, проблема повышения качества процессов управления электропитанием в ЭТС РП с целью исключения СКН является актуальной.

Работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Политехнического института ФГОУ ВПО "Сибирского федерального университета".

Объектом исследования является электротехническая система разделительного производства, состоящая из преобразователя частоты – питающей подсистемы, многодвигательного синхронно-гистерезисного электропривода газовых центрифуг – подсистемы нагрузки, подсистемы компенсации реактивной энергии и управляющей подсистемы.

Предмет исследования представляют процессы управления электропитанием в основном режиме работы ЭТС РП и электромагнитные процессы в МСГЭП.

Цель диссертационной работы состоит в разработке математической модели ЭТС РП и методов коррекции процессов управления электропитанием, обеспечивающих требуемое качество выходного напряжения, необходимые запасы устойчивости, а также предупреждение развития нестабильных режимов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка математической модели ЭТС РП, обеспечивающей численное моделирование процессов коммутации в силовой цепи и субгармонических колебаний напряжения в подсистеме нагрузки в основном режиме работы.
2. Исследование процессов и устойчивости в ЭТС РП с учетом взаимного влияния подсистем при переключениях в подсистеме компенсации реактивной энергии и изменениях параметров подсистемы нагрузки.
3. Коррекция системы регулирования с целью повышения устойчивости и эффективности подавления субгармонических колебаний напряжения. Совершенствование алгоритмов управляемых переключений в силовой цепи для предупреждения развития нестабильных режимов работы.

4. Проведение экспериментальных исследований для проверки адекватности принятых допущений и разработанных математических моделей системы.

Методы исследований. Теория управляемого гистерезисного привода, теория электрических цепей, теория автоматического управления. Численное моделирование в программных средах MathCAD и Mat lab (Simulink). Экспериментальные исследования на специализированных испытательных стендах и на действующем оборудовании.

Результаты, выносимые на защиту и представляющие научную новизну:

1. Математическая модель ЭТС РП в основном режиме работы, позволяющая исследовать процессы управления электропитанием, обусловленные изменениями параметров подсистем и переключениями в силовых цепях подсистем компенсации реактивной энергии и нагрузки.
2. Установлено взаимное влияние величины и однородности намагниченности ферромагнитного слоя роторов синхронно-гистерезисных двигателей в подсистеме нагрузки, переключений в подсистеме компенсации реактивной энергии автономного инвертора тока, а также падения напряжения на переходных сопротивлениях модулей в подсистеме нагрузки.
3. Метод коррекции структуры и параметров регуляторов и алгоритм управления переключениями емкости в подсистеме компенсации реактивной энергии, обеспечивающие эффективное демпфирование СКН, предупреждение развития нестабильных режимов работы синхронно-гистерезисных двигателей при различных параметрах и конфигурации МСГЭП.
4. Метод расчета параметров усредненного модуля ГСГД по обратным связям системы, с учетом параметров линии подключения.

Значение для теории состоит в расширении методов исследования причин возникновения и развития нестабильных режимов работы гистерезисного привода, а также методов повышения качества управления электропитанием в ЭТС РП с МСГЭП большой мощности.

Значение для практики:

1. Разработанная математическая модель позволяет исследовать электромагнитные процессы при различных параметрах и конфигурации МСГЭП без проведения натуральных экспериментов.
2. Предложен метод коррекции системы регулирования и алгоритм управления переключениями компенсирующей емкости, обеспечивающие эффективное демпфирование СКН, предупреждение развития нестабильных режимов синхронно-гистерезисных двигателей при различных параметрах и конфигурации многодвигательного синхронно-гистерезисного электропривода газовых центрифуг.
3. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть применены при создании новых ЭТС РП для последующих поколений газовых центрифуг на предприятиях разделительного производства.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением результатов имитационного моделирования с данными экспериментов на специализированных лабораторных стендах и действующем оборудовании, а также положительными результатами внедрения на ОАО «Производственное объединение «Электрохимический завод» г. Зеленогорск.

Результаты работы используются на ОАО «Производственное объединение «Электрохимический завод» г. Зеленогорск в электротехнических системах разделительного производства с многодвигательным синхронно-гистерезисным электроприводом газовых центрифуг.

Апробация работы. Основные положения диссертации были представлены на:

- II Всероссийской Научно-Практической Конференции АЭПЭ`2004 Автоматизированный Электропривод и Промышленная Электроника в металлургической и горно-топливной отраслях «Особенности микропроцессорной системы регулирования выходного напряжения статического преобразователя частоты» (Новокузнецк 18-20.05.2004),
- второй научно-технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2005» «Определение характеристик многодвигательного синхронно-гистерезисного электропривода методом пассивного эксперимента» (Новосибирск 25-26.10.2005),
- XVII научно технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», «О выборе метода оптимизации микропроцессорной системы регулирования многодвигательного синхронно-гистерезисного электропривода» («НПЦ «Полус» г. Томск 20-21.04.2006),
- третьей научно-технической конференции с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2007», «Влияние падения напряжения на качество регулирования в многодвигательном синхронно-гистерезисном электроприводе», (г. Новосибирск, 26.10.2007).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в числе которых: 1 научная статья по списку ВАК РФ; 8 научных статей в сборниках научных трудов; 4 доклада на научных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 103 наименований и 1 приложения. Общий объем работы составляет 162 страницы, в том числе 69 рисунков, 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, перечислены основные результаты, выносимые на защиту, определена их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрена электротехническая система разделительного производства на базе тиристорного преобразователя частоты и многодвигательного синхронно-гистерезисного электропривода газовых центрифуг. Дана характеристика рассматриваемой системы. Проанализированы проблемы электромеханических колебаний в системе, влияющих на качество питающего напряжения и снижающих устойчивость процессов в системе. Произведен обзор литературы в области управляемого синхронно-гистерезисного электропривода. Выбраны основные направления аналитических и экспериментальных исследований процессов управления электропитанием в электротехнической системе разделительного производства в основном режиме работы. Сформулированы решаемые задачи.

ЭТС РП состоит из силовой и управляющей подсистем (рис.1). В силовую подсистему входят питающая подсистема, подсистема нагрузки и подсистема компенсации реактивной энергии. В питающую подсистему входят: питающая сеть, управляемый выпрямитель (УВ), звено постоянного тока (ЗПТ) и автономный инвертор тока (АИТ). Подсистема нагрузки включает в себя многодвигательный синхронно-гистерезисный электропривод газовых центрифуг. В подсистему компенсации реактивной энергии входят конденсаторы с постоянной и переключаемой с помощью тиристорных контакторов переменной емкостями.

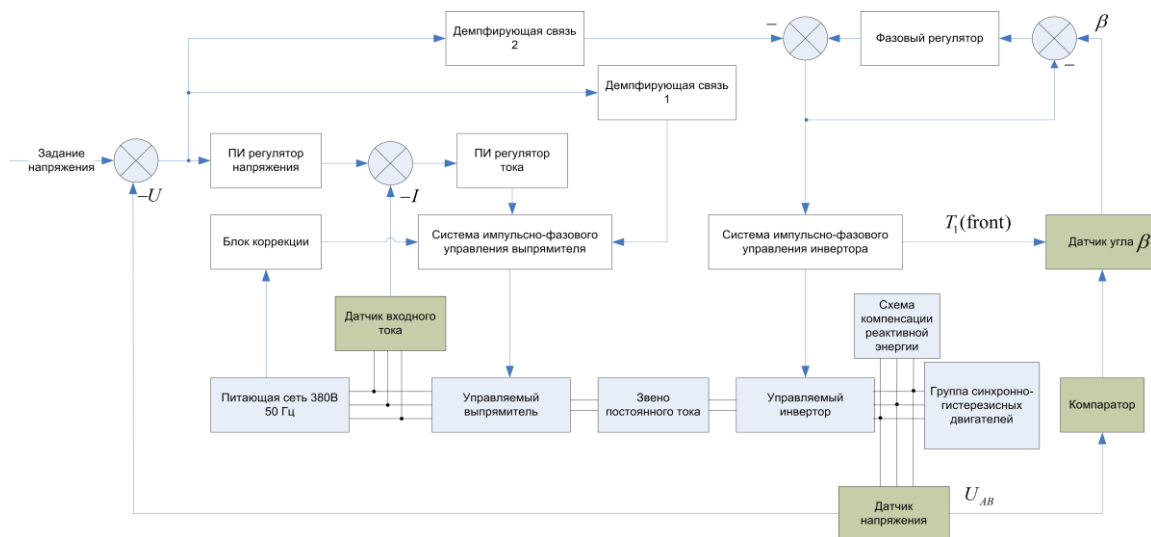


Рисунок 1. Структура ЭТС РП

Подсистема управления обеспечивает стабилизацию выходного напряжения, автоматический контроль и управление режимами работы силовой подсистемы. Она состоит из программного и аппаратного модулей. В программном модуле осуществляется регулирование выходного напряжения и формируются сигналы управления УВ и АИТ. В аппаратном модуле обеспечивается управление УВ и АИТ, синхронизация программного модуля и формируются обратные связи системы по выходному напряжению АИТ и входному току УВ. Разность фаз обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока обозначена β . Величина β вычисляется по разности фаз фронта импульса управления тиристора фазы "А" анодной группы АИТ и сигнала компаратора, формируемого в момент перехода выходного линейного напряжения $U_{AB}(t)$ из отрицательной области в положительную. В блоке коррекции (БК) формируется дифференцированный сигнал компенсации задания УВ по просядкам входного напряжения.

Присутствие колебаний роторов ГСГД проявляется в виде СКН, что влияет на качество электропитания и устойчивость процессов в системе. Повышенный износ вращающихся частей газовой центрифуги и выход ее из строя происходит в результате изменения текучести материала ротора под воздействием высших гармоник (ВГ), присутствующих в питающем напряжении. При исследовании качества электропитания ГСГД, осуществляемого ЭТС РП, установлено, что появление ВГ связано с СКН. Качество электропитания электропривода регламентируется техническими условиями (ТУ). Требования ТУ при наличии СКН для основного режима работы системой не обеспечиваются.

Обзор литературы показал, что исследования процессов управления электропитанием в электротехнических системах с МСГЭП большой мощности не проводились. В настоящей работе предполагается, что в основном режиме работы ЭТС РП с СКН, неоднородность намагниченности активного слоя роторов СГД в группе изменяется, что приводит к нестабильности работы двигателей, расположенных в различных подгруппах подсистемы нагрузки. Динамические и статические характеристики СГД зависят от намагниченности активного слоя ротора.

Вопросы управления электропитанием в системах многодвигательного гистерезисного электропривода большой мощности и разветвленной конфигурации освещены не достаточно. В связи с этим, основными направлениями исследований в работе являются процессы управления электропитанием в основном режиме работы системы.

Во второй главе проведено математическое моделирование силовой и информационной подсистем электротехнической системы разделительного производства в основном режиме работы. Установлены зависимости процессов управления электропитанием от параметров подсистем нагрузки и компенсации реактивной энергии. С использованием методики приведения цепей переменного тока к цепи звена постоянного тока разработаны передаточные функции силовой подсистемы и построена математическая модель системы. В модели используются передаточные функции, моделирующие субгармонические колебания напряжения и его нелинейную зависимость от параметров подсистемы нагрузки и компенсации реактивной энергии.

При разработке математической модели подсистемы нагрузки использованы математические модели идеализированного симметричного СГД (рис.2), предложенные в работе Б. А. Делекторского. В синхронном режиме работы СГД часть магнитного потока Φ_2 , равная Φ_r и определяемая намагниченностью ротора, рассматривается как постоянная величина. МДС от магнитного потока в роторе F_r соответствует ЭДС остаточной намагниченности E_r . Произведение $jx_r I_2$, соответствует реакции якоря. ЭДС E_δ – идентична МДС F_δ ; ЭДС E_h – идентична МДС F_h ; токи I_1 , I_δ и I_2 , идентичны магнитным потокам Φ_1 , Φ_δ и Φ_2 ; ток I_2 имеет активную $I_{2a} = E_h/r_h$ и реактивную $I_{2\mu} = E_h/jx_h$ составляющие; при $r_\delta = 0$ ток воздушного зазора $I_\delta = E_\delta/jx_\delta$; ток статора $I_1 = I_2 + I_\delta$; напряжение U – идентично МДС F , на выводах статора $U = E_\delta + jx_1 I_1 + r_1 I_1$.

Комплексное сопротивление СГД в синхронном режиме определяется выражением (1), а в асинхронном – (2).

$$Z = jx_1 + r_1 + \frac{(jx_r + r_r + jx_2) jx_\delta}{jx_r + r_r + jx_2 + jx_\delta} \quad (1)$$

$$Z = r_1 + jx_1 + \frac{jx_\delta jx_2 (r_h + jx_h) + r_h jx_h}{(jx_\delta + jx_2)(r_h + jx_h) + r_h jx_h} \quad (2)$$

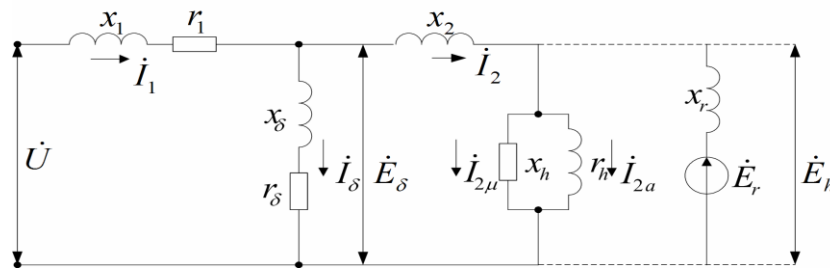


Рисунок 2. Электрическая схема замещения СГД

Электрическая схема замещения позволяет исследовать изменения тока и мощности двигателя, в зависимости от величины намагниченности активного слоя ротора, которая влияет на индуктивные сопротивления ротора и воздушного зазора СГД.

С использованием идеи В. А. Лифанова проанализирована приближенная математическая модель колебаний:

$$T^2 \frac{d^2 \Delta\theta}{dt^2} + 2\zeta T \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = 0 \quad (3),$$

где $T = (J/(p \cdot k))^{1/2}$ – период колебаний ротора; $\zeta = Xh/((J \cdot k)/p)^{1/2}$ – приведенный коэффициент гистерезисного демпфирования; J – момент инерции; p – число пар полюсов; $\Delta\theta$ – угол поворота ротора при колебаниях относительно состояния синхронного равновесия; $k = dM/d\theta$ – крутизна угловой характеристики при постоянном значении намагниченности; M – момент СГД. Коэффициент гистерезисного демпфирования для различной амплитуды колебаний может быть описан с помощью выражения (4).

$$X_h = \begin{cases} 2 \frac{M_{i \dot{i} D}}{n_B^2 \omega_0} \left(\frac{\Delta \theta_{p \max}}{\Delta \theta_{\max}} \right)^2 \Delta \theta \\ 17 \frac{M_{i \dot{i} D}}{n_B^3 \omega_0} \left(\frac{\Delta \theta_{p \max}}{\Delta \theta_{\max}} \right)^3 \Delta \theta \end{cases} \quad (4),$$

где $M_{\text{ОПР}}$ – предельный синхронный момент СГД; $n_B = B_{\text{IV}}/B_{\text{И}}$ – кратность снижения индукции при перевозбуждении относительно исходной; $\Delta \theta_{\max}$ – угол поворота ротора относительно вектора напряжения при холостом ходе и моменте $M_{\text{ОПР}}$; $\Delta \theta_{p \max}$ – аналогичный угол относительно ЭДС воздушного зазора.

На рис. 3 приведена схема замещения силовой цепи исследуемой системы и представлена конфигурация силовой цепи подсистемы нагрузки. Связь между напряжениями и токами подсистемы нагрузки устанавливается методом контурных токов. Например, для цепи, состоящей из трех элементов, расчет осуществляется по выражениям (5).

$$ZV = \begin{pmatrix} Z_{sm} + Z_m & -Z_m & 0 \\ -Z_m & Z_{sm} + 2Z_m & -Z_m \\ 0 & -Z_m & Z_{sm} + 2Z_m \end{pmatrix}, U = \begin{pmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, Ik = ZV^{-1} \times U \quad (5)$$

Здесь Z_m – сопротивление усредненного модуля ГСГД, Z_{sm} – сопротивление модульных стыков.

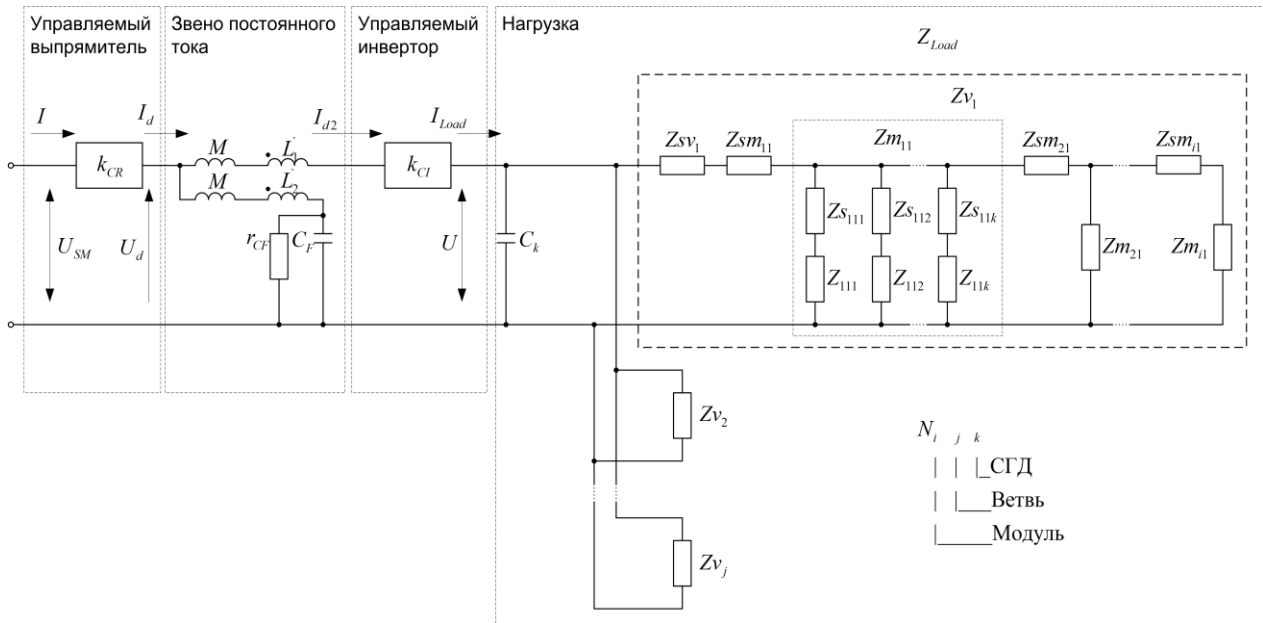


Рисунок 3. Схема замещения силовой цепи системы

На рисунке 3: U_{SM} – напряжение питающей сети; k_{CR} – коэффициент передачи УВ; M – взаимная индуктивность обмоток дросселя ЗПТ; L_2 – индуктивность обмотки фильтра ЗПТ; L_1 – индуктивность силовой обмотки ЗПТ; C_F – конденсатор фильтра ЗПТ; R_{CF} – разрядное сопротивление конденсатора фильтра ЗПТ; k_{CI} – коэффициент передачи АИТ; C_k – емкость подсистемы компенсации реактивной энергии. ГСГД разделяется на секции, секции на j параллельных ветвей, ветви на i последовательных модулей, модули состоят из k параллельно подключенных СГД. Между собой модули соединены перемычками. Подсистема нагрузки может быть представлена комплексным сопротивлением Z_{Load} .

На графике, рис. 4, показаны результаты расчета падения напряжения вдоль линии на примере подключения восьми модулей ГСГД. В работе проанализировано влияние падения напряжения на статические характеристики СГД. Величина и одно-

родность остаточной намагниченности СГД в подсистеме нагрузки зависят в частности от величины падения напряжения.

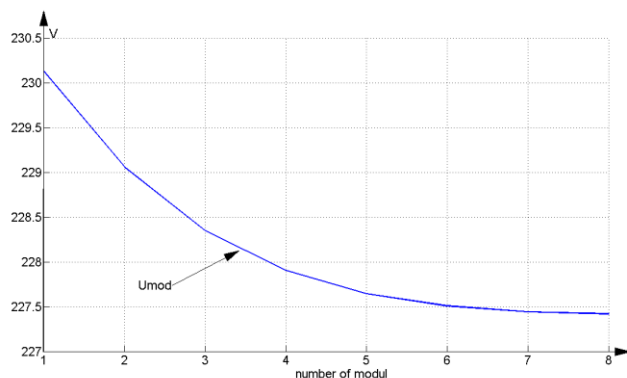


Рисунок 4. Напряжение вдоль линии подключения ГСГД

По результатам расчета падения напряжения вдоль линии подключения ГСГД выполнен расчет и построены векторные диаграммы для СГД, подключенных в начале и в конце линии (рис.5). По векторным диаграммам проанализированы процессы в двигателях.

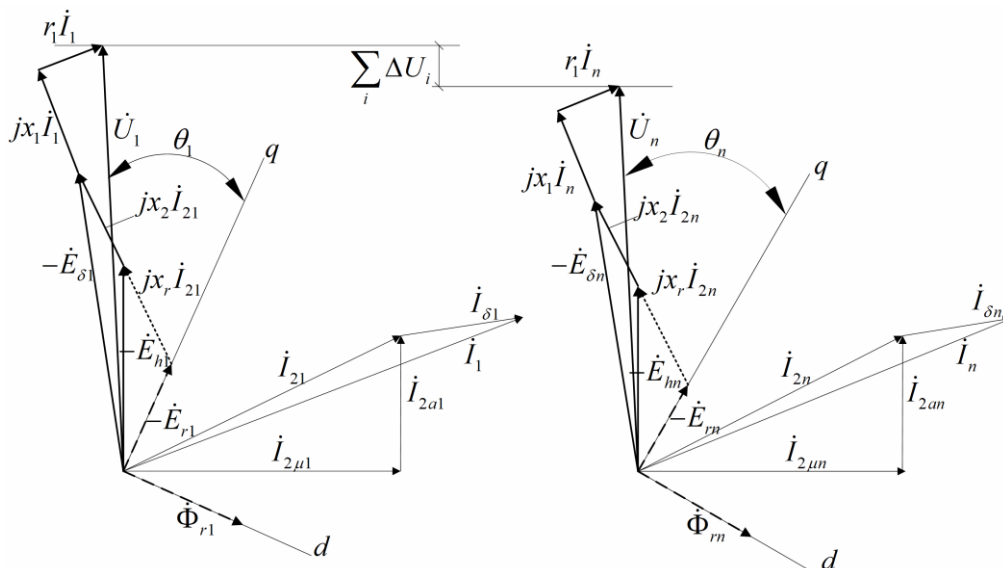


Рисунок 5. Расчетные векторные диаграммы СГД в начале и в конце линии подключения ГСГД

В асинхронном режиме всей группы СГД перемагничивание активной части ротора происходит в каждом из СГД группы, поэтому, параметры группы остаются однородными. Но поскольку часть группы, расположенная в начале линии с наименьшим падением напряжения, а значит и с наибольшим вращающим моментом, быстрее достигает синхронизма, чем группа, расположенная дальше от источника питания, то в этот момент неоднородность параметров группы увеличивается.

Падение напряжения вдоль линии подключения ГСГД влияет на ток, момент и мощность одиночных СГД в составе группы таким образом, что СГД, расположенные в начале линии быстрее войдут в синхронизм и приобретут большую остаточную намагниченность, чем СГД, расположенные в конце. Подгруппа, расположенная в начале линии, вошедшая в синхронизм раньше и приобретшая большую остаточную намагниченность, имеет меньшую реакцию якоря и больший вращающий момент, чем подгруппа, расположенная в конце линии.

Возникновение синхронных колебаний в подгруппах происходит не одновременно, колебания продолжают не синхронно и с различными субгармоническими частотами. Не смотря на практически не изменяющуюся в зависимости от величины

напряжения ЭДС E_r , ЭДС воздушного зазора E_δ изменяется значительно. Это отражается в первую очередь на изменении коэффициента гистерезисного демпфирования χ_h в выражении (4).

Изменение E_δ , влияет на амплитуду напряжения U , по которой осуществляется обратная связь в контуре регулирования напряжения. В подгруппе СГД, подключенной к той части линии, где падение напряжения составляет, как показывает расчет 7 В, при амплитуде ЭДС воздушного зазора $E_\delta = 154,29$ В. Стабилизация напряжения осуществляется для СГД, имеющих параметры отличные от параметров СГД, расположенных в начале линии, где ЭДС воздушного зазора $E_\delta = 161,54$ В.

Рассматривая эти различия, можно сделать вывод, что индуктивность СГД в начале линии будет больше, чем индуктивность СГД в конце, тогда как активные сопротивления будут одинаковыми. Это значит, что СГД как объект регулирования приобретает неоднородность, которая при регулировании в исходной системе не учитывается.

С учетом приведенных обозначений, комплексное сопротивление подсистемы нагрузки представляется в виде:

$$Z_{Load} = R_{Load} + j\omega_{nom}L_{Load} \quad (6),$$

где R_{Load} и L_{Load} – активная и индуктивная составляющие соответственно, ω_{nom} – частота в основном режиме.

При описании питающей подсистемы передаточная функция (ПФ) преобразователя получена в виде:

$$W_c(p) = \frac{k_c}{1 + p \cdot T_c} = \frac{I_{d2}(p)}{U_d(p)} \quad (7)$$

где $\frac{M + L_1}{\frac{3}{2} \cdot \Phi_T^2 \cdot \text{Re}(Z_{Load}^*)} = T_c$ – постоянная времени, $k_c = \frac{1}{\frac{3}{2} \Phi_T^2 \cdot \text{Re}(Z_{Load}^*)}$ – коэффициент передачи; Φ_T – коммутационная функция инвертора для приведения цепи инвертора по первой гармонике к звену постоянного тока определяется выражением:

$$\Phi_T(t) = 2\sqrt{3}/\pi \cdot e^{i\omega_k t} = \Phi_T|_{t=0} = 1.103 \quad (8)$$

Напряжение на выходных шинах и выходной ток автономного инвертора тока (АИТ) связаны полученным отношением:

$$W_L(p) = \frac{k_L(T_{3L}p + 1)}{T_{1L}^2 p^2 + T_{2L}p + 1} = \frac{U_U(p)}{I_{Load}(p)} = Z_{Load}^*(p) \quad (9)$$

где $T_{1L} = \sqrt{L_{Load} \cdot C_k}$, $T_{2L} = C_k \cdot R_{Load}$, $T_{3L} = L_{Load}/R_{Load}$, $k_L = |Z_{Load}^*| \cdot 3\sqrt{3}/\pi \cos(\beta)$.

При приведении параметров цепи переменного тока к цепи ЗПТ, силовая подсистема представлена передаточными функциями (7) и (9), коэффициенты передачи которых и постоянные времени, зависят от параметров силовой подсистемы. В табл. 1 представлен диапазон их изменения.

Таблица 1

Значения	Преобразователь		Нагрузка			
	k_c (S)	T_c [$10^{-3} s$]	k_L (Ohm)	T_{1L} [$10^{-4} s$]	T_{2L} [$10^{-4} s$]	T_{3L} [$10^{-5} s$]
Максимальное	30,825	37	0,506	1,735	9,327	3,229
Минимальное	3,589	4,343	0,129	0,777	2,742	2,206

Коэффициент обратной связи по току:

$$k_{CFB} = 0,817 \quad (10)$$

Блок вычисления β сформирован в соответствии с выражением:

$$\beta(p) = a \tan\left(\frac{I_a(p)}{I_m(p)}\right) \quad (11)$$

где I_a и I_m – суммарный активный и реактивный ток силовой подсистемы соответственно.

Сигнал, моделирующий синхронные качания, предложено формировать звеном с ПФ вида:

$$W_h(p) = \frac{\beta_h(p)}{\beta(p)} = \frac{k_h}{T_h^2 p^2 + 2\xi T_h p + 1} \quad (12)$$

где k_h , T_h и ξ – параметры определенные экспериментально и с учетом (4).

На рис.6 приведена трехконтурная структурная схема разработанной математической модели ЭТС РП.

В первом контуре, регулирования тока, учитываются параметры цепей УВ и АИТ, приведенные к цепи ЗПТ, которые представлены звеном (7). Регулирование в этом контуре осуществляется пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором тока Н7, сложность выбора параметров которого обусловлена изменением параметров подсистем нагрузки и компенсации реактивной энергии (см. табл.1).

Второй контур, регулирования напряжения, включает в себя первый контур, звено нагрузки (9) и ПИ регулятор напряжения Н6. Звено Н5 является фильтром, ограничивающим высокочастотные (ВЧ) помехи.

В третьем контуре, регулирования разности фаз β , величина β вычисляется косвенно из отношения суммарных активного и реактивного токов подсистем нагрузки и компенсации реактивной энергии (11). С помощью вычислительного модуля $3\sqrt{3}/\pi \cdot \cos(\beta)$ моделируется нелинейная зависимость выходного напряжения АИТ от параметров подсистем нагрузки и компенсации реактивной энергии. Фазовый регулятор (ФР) состоит из параллельных звеньев Н1 и Н2. Н1 – интегрирующее звено, обеспечивающее соответствие базовой части сигнала задания АИТ – β_{task} углу β . Звено Н2 – фильтр ВЧ, в совокупности с действием единичной отрицательной обратной связи ФР, это звено обеспечивает необходимую точность задания β_{task} .

Четвертый контур является разомкнутым, ступенчатое переключение компенсирующей емкости в котором, оказывает возмущающее воздействие.

Демпфирующая связь 1 между контурами регулирования тока и напряжения (звенья Нк1 и Нк2), предназначена для создания опережающего сдвига угла управления выпрямителем α_{task} по ошибке в контуре напряжения для подавления пульсаций 100 и 300 Гц.

Демпфирующая связь 2 (звенья Н3 и Н4) между контурами регулирования напряжения и угла β предназначена для демпфирования СКН. ДС2 создает фазовый сдвиг β_{task} на выходе контура регулирования β , корректируя ток заряда конденсаторов при коммутации в цепи АИТ. При этом формируется такое корректирующее воздействие на мгновенное значение выходного напряжения, которое минимизирует ошибку в контуре регулирования напряжения.

Субгармонические колебания в системе имитируются с помощью звена (12), и связей $k_{\beta i}$ и $k_{\beta u}$. Ввод колебаний осуществляется в контур напряжения суммированием выходного сигнала звена (12) с входным и выходным сигналами звена нагрузки (9).

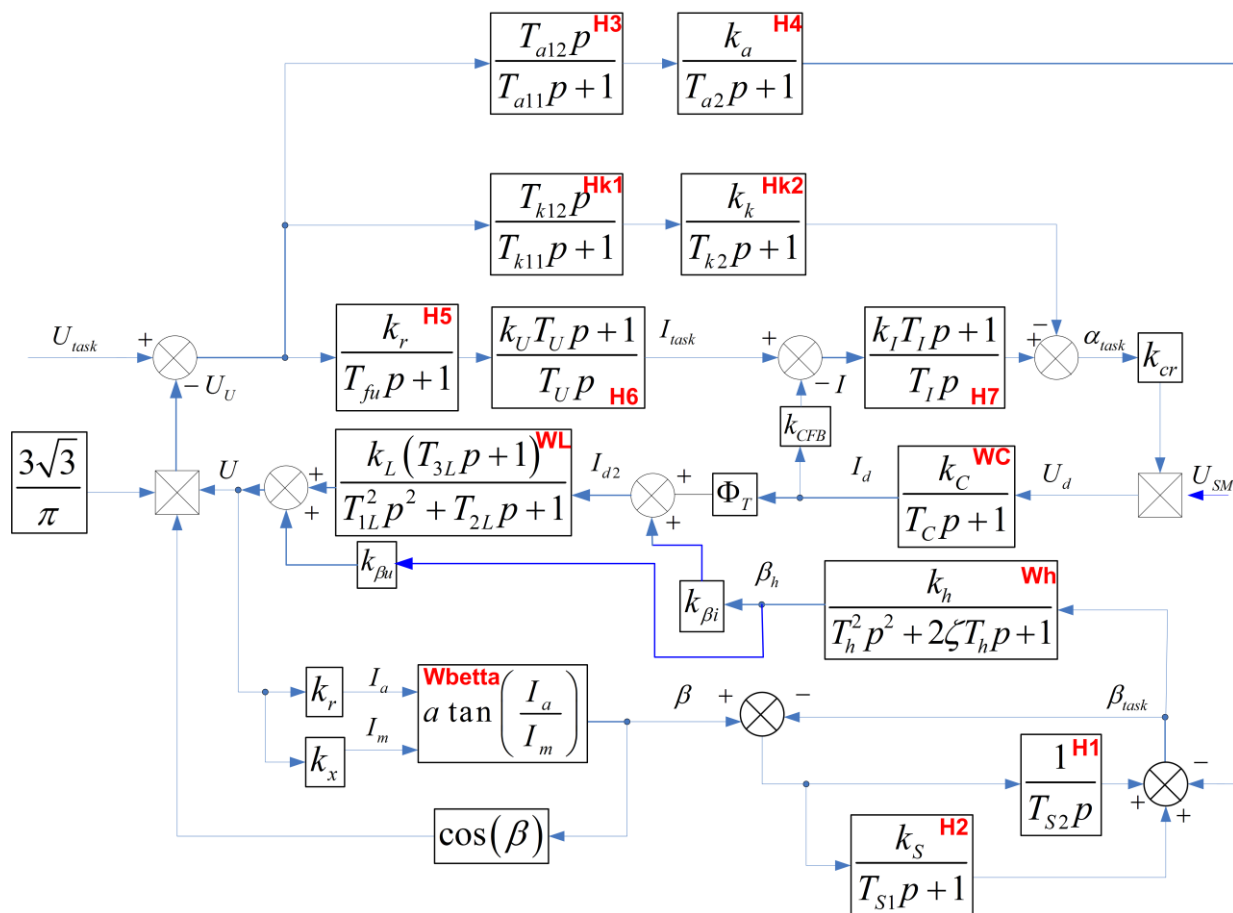


Рисунок 6. Структурная схема математической модели ЭТС РП

В третьей главе проанализированы структура, связи и процессы управления в ЭТС РП. Установлено взаимное влияние величины и однородности намагниченности ферромагнитного слоя роторов СГД в подсистеме нагрузки, переключений в подсистеме компенсации реактивной энергии АИТ, а также падения напряжения на переходных сопротивлениях модулей в подсистеме нагрузки. Проанализированы причины возникновения и развития СКН, влияющих на режим работы СГД в подсистеме нагрузки. Определены основные критерии для повышения качества процессов управления электропитанием в системе. Выполнена коррекция СР. Предложен новый алгоритм управления переключениями в силовой цепи. Проведен сравнительный анализ работы системы при исходных и скорректированных настройках.

На основе разработанной математической модели системы, рис.5, построена имитационная модель в среде Mat lab, с помощью которой исследованы процессы переключений в подсистеме компенсации реактивной энергии, а также процессы подключения (отключения) секций ГСГД в подсистеме нагрузки.

Таблица 2

Параметры модели						Параметры схемы		
T_{L1} ($10^{-4} C$)	T_{L2} ($10^{-4} C$)	T_{L3} ($10^{-5} C$)	T_C ($10^{-3} C$)	k_C (S)	k_L (Ohm)	L (μH)	R (ohm)	C_k (μF)
1,305	5,275	3,229	23	19,198	0,155	24,671	0,764	690,4
1,064	3,932	2,877	19	15,750	0,138	14,683	0,510	770,4

Для параметров силовых подсистем, табл. 2, на рис. 6 представлены результаты численного моделирования переходного процесса подключения дополнительной секции ГСГД. На рисунках 6 а, б и в – переходный процесс; 6 г – ЛАЧХ системы после под-

ключения; U_u – напряжение инвертора (В); I – входной ток (А); U_d (В) I_d (А) – выпрямленные ток и напряжение; β и β_{task} (градусы).

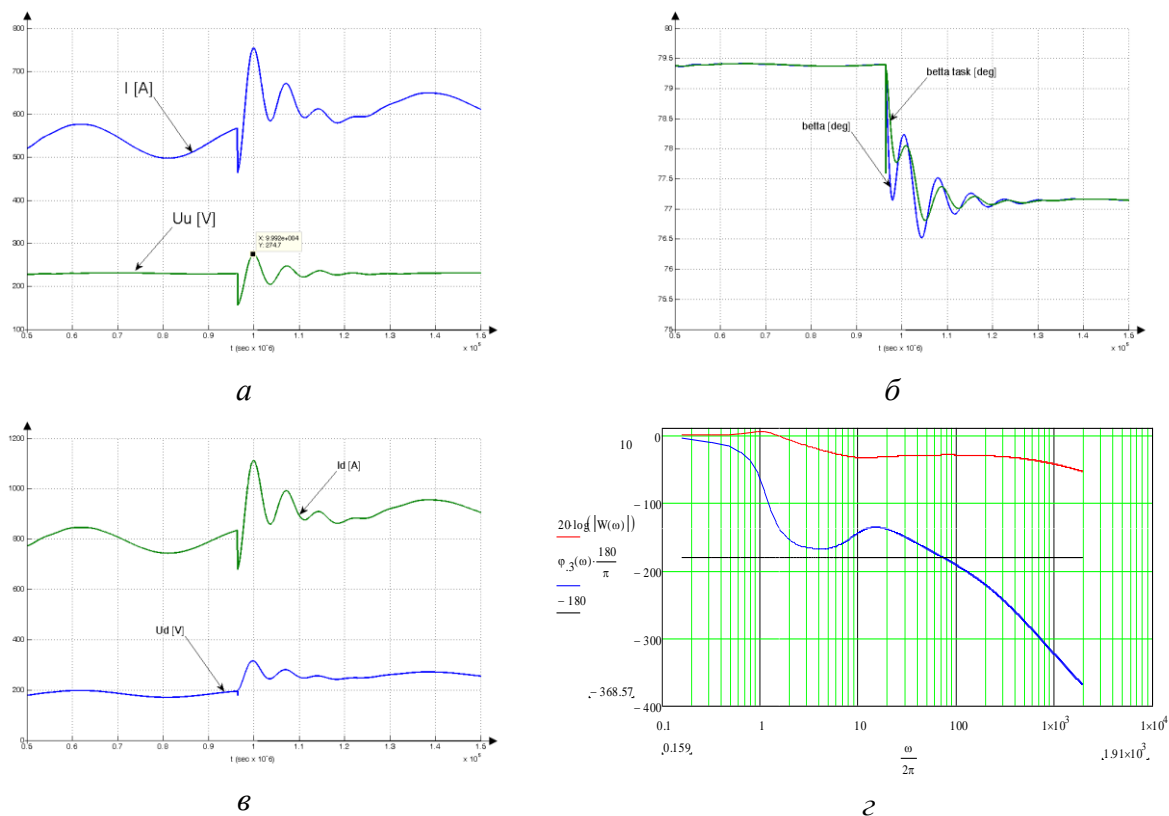


Рисунок 7. Подключение дополнительной секции ГСГД

Полагая, что система имеет один вход – одну известную переменную U_{task} и один выход U_U с помощью формулы Мейсона определена передаточная функция исходной разомкнутой системы. В работе исследована устойчивость системы с исходными настройками. Запасы устойчивости с учетом присутствия СКН недостаточны (см. табл.3, ст.8).

Для повышения устойчивости процессов переключений в силовой цепи и эффективности демпфирования СКН выполнена коррекция системы. Демпфирующую связь между контуром регулирования напряжения и контуром β предложено выполнить в виде звена с передаточной функцией W_{51} , параметры которой определяются по результатам имитационного моделирования.

$$W_{51}(p) = \frac{k_{51}}{T_{51}p + 1} \quad (13)$$

Предлагается производить суммирование выходного сигнала W_{51} в отдельном сумматоре (рис.8). В результате обеспечено эффективное демпфирование СКН. Этой коррекцией также обеспечивается снижение мгновенного значения выходного напряжения и скачка угла β во время переходного процесса. Установлено, что от увеличения запаса по фазе в контуре регулирования напряжения, демпфирование СКН зависит слабо, но существенно более эффективно воздействие W_{51} . Граф предлагаемой системы представлен на рис. 8.

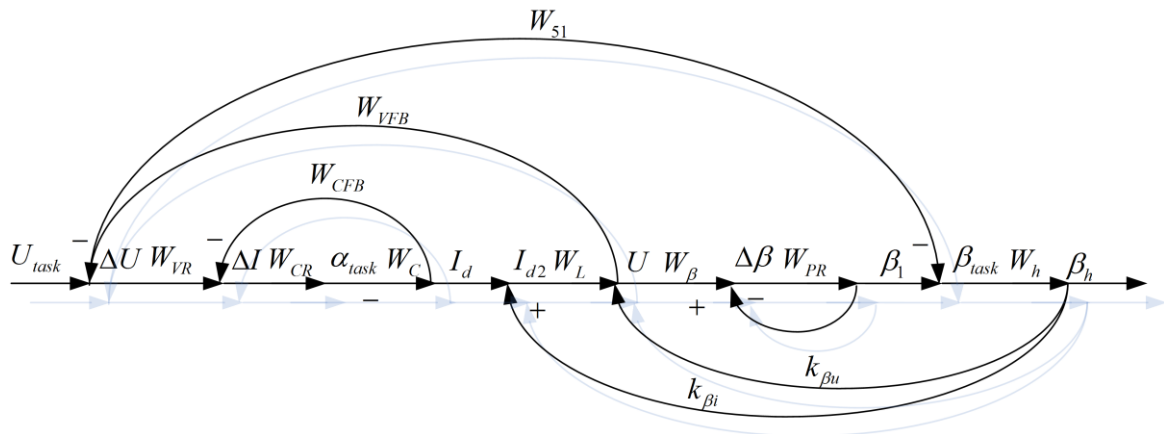


Рисунок 8. Граф скорректированной ЭТС РП

Система уравнений для графа системы, изображенного на рис. 8:

$$\begin{aligned}
 \Delta U &= U_{task} - U_U \\
 \Delta I &= \Delta U \cdot W_{VR} - I_d W_{CFB} \\
 \alpha_{task} &= \Delta I \cdot W_{CR} \\
 I_d &= \alpha_{task} \cdot W_C \\
 I_{d2} &= I_d + k_{\beta i} \beta_h \\
 U &= I_{d2} \cdot W_L + k_{\beta u} \beta_h \\
 \Delta \beta &= U \cdot W_{\beta} - \beta_1 \\
 \beta_1 &= \Delta \beta \cdot W_{PR} \\
 \beta_{task} &= \beta_1 - \Delta U \cdot W_{51} \\
 \beta_h &= \beta_{task} W_h
 \end{aligned} \tag{14}$$

По формуле Мейсона определена передаточная функция системы после коррекции. Запасы устойчивости по сравнению с запасами исходной системы повышены на 50% (см. табл.3, ст.9). В табл. 3 представлены параметры, использованные при численном моделировании процесса, представленного на рис.9.

Таблица 3

Алгоритм	T_{1L} [$10^{-4} s$]	T_{2L} [$10^{-4} s$]	T_{3L} [$10^{-5} s$]	k_C (S)	k_L (Ohm)	T_C [$10^{-3} s$]	Исх. система [deg]	Скорр. система [deg]
$2s, Cc_3$	0,941	2,742	3,229	5,133	0,299	6,2	24,71	33,45
$2s, Cc_5$	0,984	2,995		6,108	0,274	7,4	25,91	33,68
$2ds, Cc_3$	0,889	2,742	2,879	5,160	0,296	6,2	26,12	33,61
$2ds, Cc_5$	0,929	2,995		6,127	0,271	7,4	26,35	33,77

Численное моделирование процессов в скорректированной системе подтвердило отсутствие СКН в основном режиме работы ЭТС РП в различных параметрах подсистем нагрузки и компенсации реактивной энергии.

На рис.9 представлены результаты численного моделирования переходного процесса переключения в схеме компенсации реактивной энергии в системе с исходными и скорректированными настройками.

Анализ результатов численного моделирования показал эффективность подавления СКН, снижение перерегулирования напряжения и сокращение времени переходных процессов.

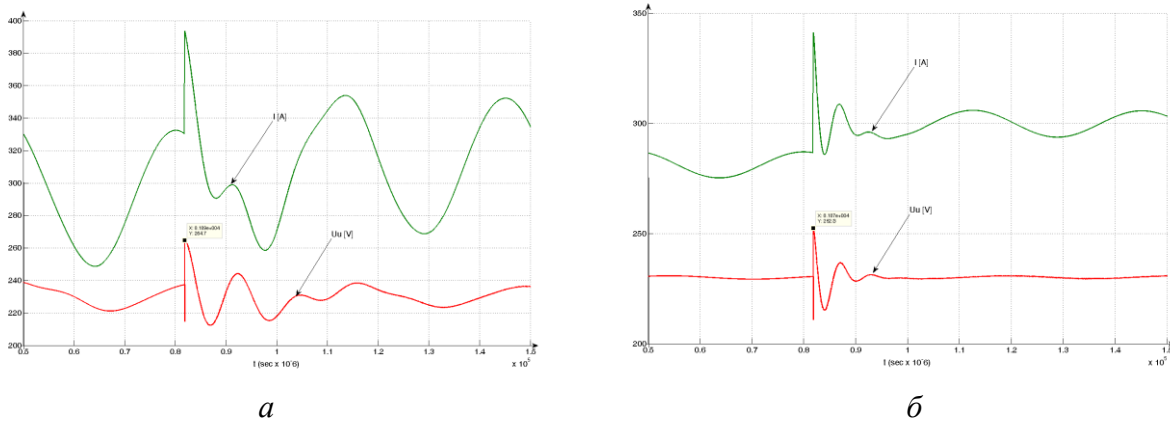


Рисунок 9. Переходный процесс при подключении переменной емкости

На рис.9 *а* – в системе с исходными настройками, *б* – с предложенными.

Рассмотрены алгоритмы управления переключениями в подсистеме компенсации реактивной энергии. При исследованиях приняты обобщённые состояния подсистем. В этих состояниях индуктивность подсистемы нагрузки пропорционально зависит от величины намагниченности активного слоя роторов, а активное сопротивление обратно пропорционально зависит от момента и соответствует номинальному моменту. Пример обозначения обобщенного состояния приведен в таблице 3. Здесь $2s$ – соответствует намагниченному состоянию двух секций, $2ds$ – соответствует размагниченному состоянию двух секций. Подсистема компенсации реактивной энергии, характеризуется величиной регулируемой емкости. Вектор значений компенсирующей емкости задан следующим образом:

$$C_c = C_v + C_{c1} + n \cdot C_{c2} \quad (15)$$

где: C_{c1} – вектор-столбец размерности 1×12 постоянно подключенной емкости инвертора; C_{c2} – вектор-столбец размерности 1×12 постоянно подключенной емкости щита подключения секции ГСГД, значения элементов которых соответственно равны $C_{c1} = 99,45 \times 10^{-6} \text{ Ф}$; $C_{c2} = 80 \times 10^{-6} \text{ Ф}$; $n = 1, 2, 3, 4$. Вектор переменной емкости задан следующим образом:

$$C_v^T = (C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_5 \ C_6 \ C_7 \ C_8 \ C_9 \ C_{10} \ C_{11} \ C_{13} \ C_{14} \ C_{15}) \quad (16)$$

Определены 265 промежуточных значений, соответствующих учитываемым в работе обобщенным состояниям намагниченности активного слоя роторов СГД в группе и всем возможным состояниям схемы компенсации реактивной энергии.

В связи с тем, что подсистема нагрузки обладает достаточно большим запасом инерции, рассмотрена возможность плавного снижения задания напряжения при переключениях в подсистеме компенсации реактивной энергии с целью снижения перерегулирования. Предложен алгоритм переключения с плавным снижением задания напряжения на 40 Вольт в течение 1,6 секунд. Результат работы алгоритма со снижением напряжения на действующем оборудовании представлен на рис.10.

Снижение напряжения при переключениях в схеме компенсации реактивной энергии позволило снизить коммутационные перенапряжения на 100 В и уменьшить количество кратковременных отключений электропитания на 80%.

Предложен метод расчета параметров усреднённого модуля ГСГД. При известном токе подсистемы нагрузки $I_{0,0}$, выходном напряжении $U_{0,0}$ и среднем измеренном сопротивлении модульных стыков Z_s , может быть найдено комплексное сопротивление усреднённого модуля – Z_m .

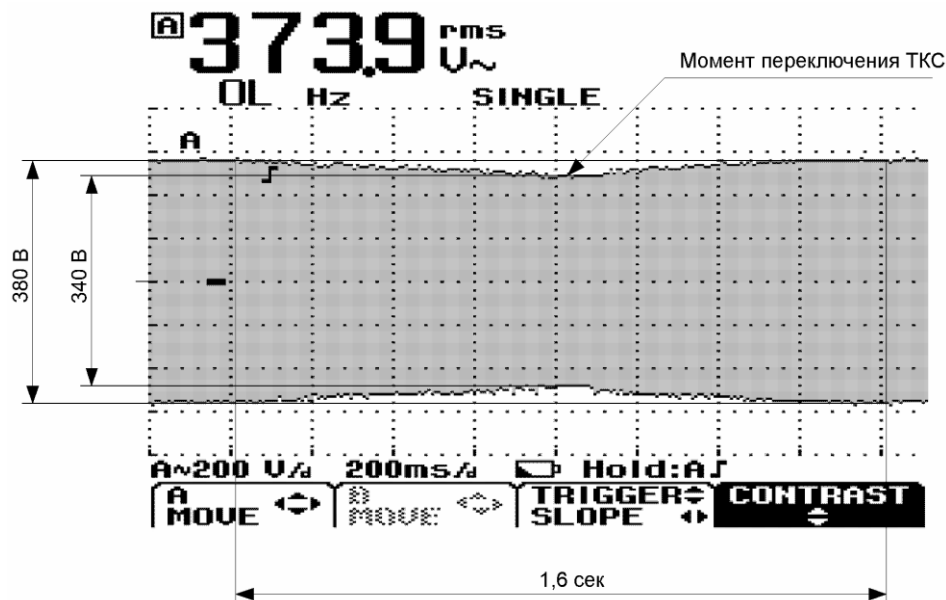


Рисунок 10. Переключение емкости со снижением напряжения

Так для восьми модулей уравнение для нахождения Z_m получено в виде:

$$\frac{I_{0,0}}{U_{0,0}} = \frac{8Zm^7 + 84Zm^6Zs + 252Zm^5Zs^2 + 330Zm^4Zs^3 + 220Zm^3Zs^4 + 78Zm^2Zs^5 + 14ZmZs^6 + Zs}{Zm^8 + 36Zm^7Zs + 210Zm^6Zs^2 + 462Zm^5Zs^3 + 495Zm^4Zs^4 + 286Zm^3Zs^5 + 91Zm^2Zs^6 + 15ZmZs^7 + Zs^8} \quad (17)$$

В качестве решения принимаются только значения Z_m с положительным знаком действительной части. По величине сопротивления модуля оцениваются предпосылки развития нестабильных режимов работы подсистемы нагрузки.

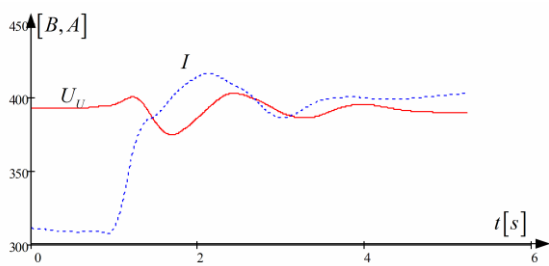
Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям.

Определены цели и методы экспериментальных исследований. Проанализированы используемая при исследованиях аппаратура, измерительные средства, возможности контроллера системы по считыванию данных. Представлены результаты спектрального анализа напряжения питания ГСГД. Определены параметры СКН. Приведены данные экспериментов по исследованию динамики процессов при переключениях в силовой цепи. Выполнен анализ полученных результатов, который показал адекватность разработанных математической и имитационной модели.

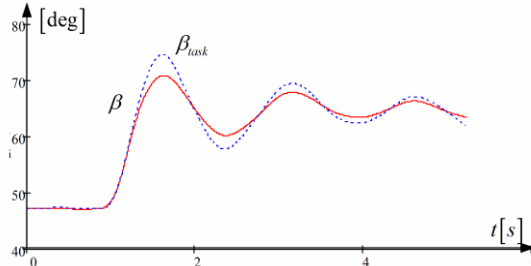
Доказана справедливость допущения о достаточности рассмотрения процессов в системе по первой гармонике. Исследован спектр гармоник выходного напряжения и показано, что коэффициент гармонических искажений не превышает 3,39%.

Представлены результаты экспериментов по исследованию динамики процессов при переключениях в силовой цепи. На рис.11 показаны диаграммы выходного напряжения и входного тока питающей подсистемы (рис.11 а, б), а также измеряемая и задаваемая величины угла β (рис.11 в, г) полученные при моделировании процесса переключения в Mat lab.

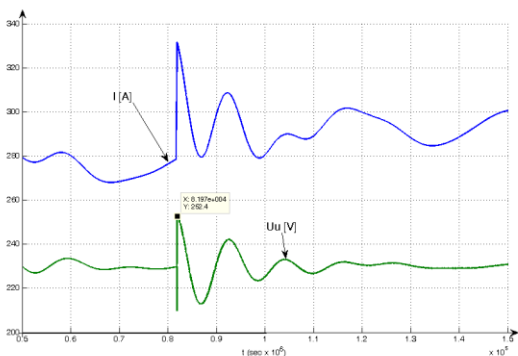
При определении параметров СКН в системе до коррекции получены предельные значения: амплитуда до 20 В, период от 1 С до 5 С, форма колебаний огибающей несинусоидальная и несимметричная. Что не удовлетворяет техническим условиям эксплуатации МСГЭП.



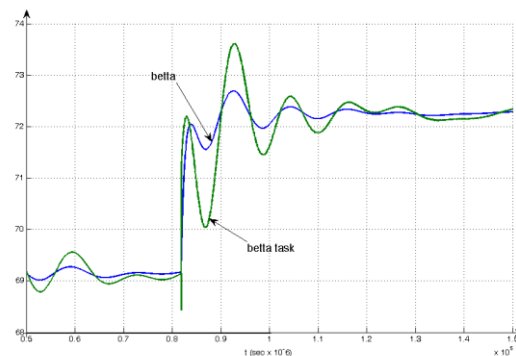
a



б



в



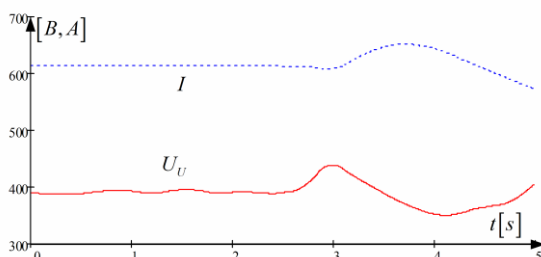
г

Рисунок 11. Динамика процесса подключения переменной емкости

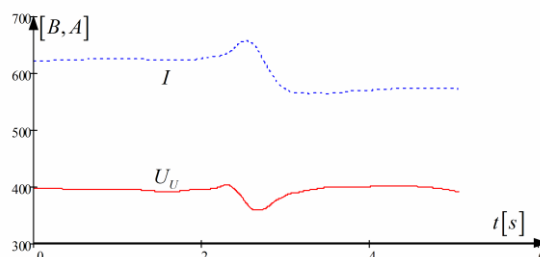
На рис. 12, представлены результаты опытов после коррекции системы регулирования. Рассмотрен алгоритм:

$$C_{c_3} \rightarrow C_{c_5} \rightarrow \dots \rightarrow C_{c_{15}} \rightarrow 1, C_{c_{15}} \rightarrow 2, C_{c_{15}} \rightarrow 2, C_{c_{14}} \rightarrow \dots, C_{c_8} \rightarrow 2, C_{c_7} \rightarrow \dots, C_{c_3}$$

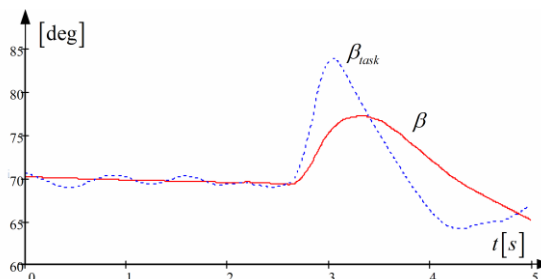
í aónoí é :-è aî noú



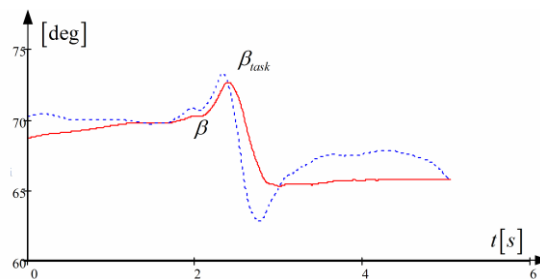
a



б



в



г

Рисунок 12. Переключение емкости при различной намагненности ГСГД 12 *a* и *в* с намагненной ГСГД 2s, на рис. 12 *б* и *г* – с размагненной ГСГД 2ds.

В скорректированной системе произведено экспериментальное исследование устойчивости процессов при максимально допустимом в основном режиме работы пе-

перыве электропитания штатной и резервируемой ГСГД. Рассмотрен переходный процесс в выходном напряжении и входном токе преобразователя при подключении дополнительных секций с использованием и без использования дополнительной емкости, при различной индуктивности подсистемы нагрузки (рис.13). Установлено, что после коррекции, система обеспечивает подключение штатных секций после перерыва электропитания до 10 минут, штатных и дополнительных после перерыва до 8 минут. Устойчивость процессов обеспечивается системой регулирования, это позволяет отказаться от дополнительной емкости в щите подключения секции и свидетельствует о возможности увеличения мощности подсистемы нагрузки.

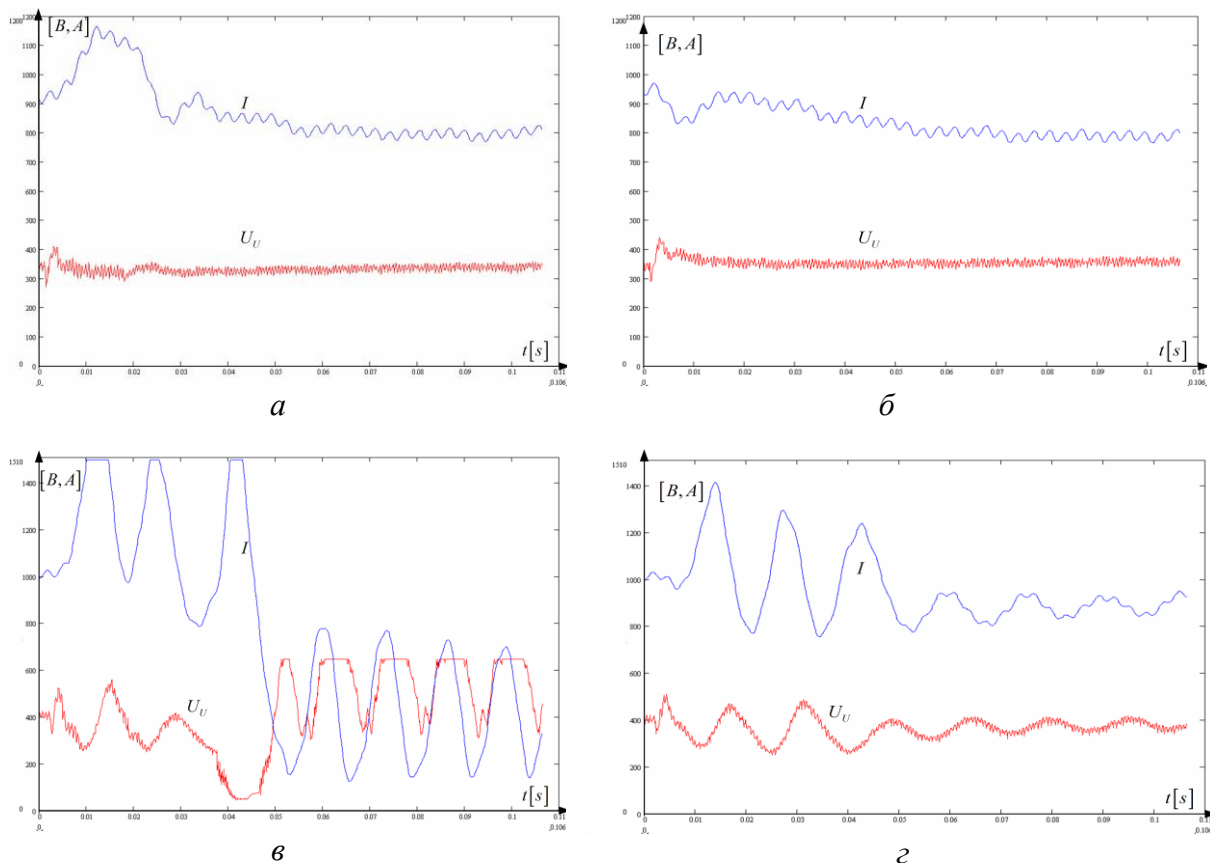


Рисунок 13. Переходный процесс в выходном напряжении и входном токе преобразователя при подключении дополнительной секции ГСГД после перерыва электропитания штатных и дополнительных секций ГСГД

13 а – после перерыва 8 минут с дополнительной емкостью в ЩПС; 13 б – после перерыва 8 минут без емкости в ЩПС; 13 в – после перерыва 10 минут с дополнительной емкостью в ЩПС; 13 г – после перерыва 10 минут без емкости в ЩПС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель электротехнической системы разделительного производства в основном режиме работы, включающая в себя математические модели основных элементов системы в среде MathCAD и имитационную модель в среде Matlab. Модель позволяет исследовать процессы управления электропитанием, связанные с переключениями в силовой подсистеме при различных параметрах входящих в нее подсистем, обеспечивая возможность коррекции системы регулирования и разработки алгоритмов управления переключениями в силовой цепи. Определены 265 промежуточных значений, соответствующих учитываемым в работе обобщенным состояниям намагниченности активного слоя роторов СГД в группе и всем возможным состояниям схемы компенсации реактивной энергии.

2. Установлено, что причинами снижения качества выходного напряжения и развития нестабильных процессов в подсистеме нагрузки, выражающихся в продолжительных субгармонических колебаниях выходного напряжения, являются возмущения напряжения и тока, обусловленные неоднородностью намагниченности активного слоя роторов синхронно-гистерезисных двигателей группы достигающей 8,9% от влияния перенапряжений до 100 В при коммутации в силовой цепи, а также до 1,6% от влияния падения напряжения на 10 В вдоль линии подключения группы СГД.

3. Предложенным методом выполнена коррекция структуры и параметров системы регулирования, которая позволила повысить запас по фазе в среднем на 8°, что на 50% больше запаса по фазе системы с исходными настройками, а также исключить субгармонические колебания напряжения в системе за счет коррекции действия демпфирующей связи контура регулирования напряжения с контуром регулирования разности фаз обобщенного вектора напряжения и обобщенного вектора тока.

4. Внедрен на действующем оборудовании предложенный алгоритм управляемых переключений в силовой цепи с плавным снижением задания по напряжению на 40 В в течение 1,6 С, для предотвращения неуправляемого намагничивания активного слоя роторов группы синхронно-гистерезисных двигателей при переключениях. Сокращены интервалы времени работы системы с повышенным потреблением электроэнергии. Снижение напряжения при переключениях в схеме компенсации реактивной энергии позволило снизить коммутационные перенапряжения на 100 В и уменьшить количество кратковременных отключений электропитания на 80%, а также устранить субгармонические колебания напряжения в основном режиме работы, что удовлетворяет ТУ эксплуатации синхронно-гистерезисных двигателей.

5. Экспериментальные исследования на специализированных стендах и на действующем оборудовании подтвердили адекватность разработанных математических моделей, метода коррекции системы регулирования и эффективность ввода нового алгоритма управления переключениями в силовой цепи.

6. Опыты после коррекции системы регулирования и ввода скорректированных алгоритмов показали, что система обеспечивает подключение штатных секций группы синхронно-гистерезисных двигателей после перерыва электропитания до 10 минут, дополнительных секций после перерыва до 8 минут. Интервалы времени увеличены соответственно, в 2 и в 4 раза по сравнению с системой с исходными настройками.

7. Предложен метод расчета параметров усредненного модуля группы синхронно-гистерезисных двигателей по обратным связям системы и параметрам модульных стыков шин для системы регулирования в электротехнической системе разделительного производства. По результатам оцениваются предпосылки развития нестабильных режимов работы синхронно-гистерезисных двигателей в подсистеме нагрузки.

Таким образом, цель диссертационной работы достигнута.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Иванчура В. И. Особенности микропроцессорной системы регулирования выходного напряжения статического преобразователя частоты / В. И. Иванчура, А. А. Макаренко // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды Второй Всероссийской науч. пр. конф. / Под общей редакцией В. Ю. Островляничка. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2004 г. С. – 20-22.

2. Иванчура В. И. Особенности микропроцессорной системы регулирования выходного напряжения статического преобразователя частоты / В. И. Иванчура, А. А.

Макаренко // Оптимизация режимов работы электротехнических систем: Межвуз. сб. науч. тр. / Отв. ред. С. Р. Залялеев. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004 г. С. – 175-185.

3. Иванчура В. И. К исследованию динамических процессов в синхронно-гистерезисном электроприводе / В. И. Иванчура, **А. А. Макаренко** // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. С. И. Лукьянова. – Магнитогорск: МГТУ, 2005 г. С. – 37-45.

4. Иванчура В. И. Определение характеристик многодвигательного синхронно-гистерезисного электропривода методом пассивного эксперимента / В. И. Иванчура, **А. А. Макаренко** // Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2005: Материалы второй науч. техн. конф. с межд. уч. / Под ред. Н. И. Щурова. – Новосибирск: НГТУ, 2005 г. С. – 75-78.

5. Иванчура В. И. О выборе метода оптимизации микропроцессорной системы регулирования многодвигательного синхронно-гистерезисного электропривода / В. И. Иванчура, **А. А. Макаренко** // Электронные и электромеханические системы и устройства: Материалы XVII науч. техн. конф. Тезисы докладов. – Томск: ФГУП "НПЦ "Полюс", 2006 г. С. – 240-242.

6. Иванчура В. И. Построение математической модели многодвигательного синхронно-гистерезисного электропривода с преобразователем частоты / В. И. Иванчура, **А. А. Макаренко** // Электронные и электромеханические системы и устройства: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В. Н. Гладушенко. – Новосибирск: "Наука", 2007 г. С. – 383-397.

7. Иванчура В. И. Причины субгармонических колебаний напряжения в многодвигательном синхронно-гистерезисном электроприводе / В. И. Иванчура, **А. А. Макаренко** // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды II Всероссийской науч. техн. конф. с межд. уч. 16-18 мая ч.2 / Отв. В. К. Шакурский. – Тольятти: ТГУ, 2007 г. С. – 236-239.

8. Иванчура В. И. Влияние падения напряжения на качество регулирования в многодвигательном синхронно-гистерезисном электроприводе / В. И. Иванчура, **А. А. Макаренко** // Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2007: Материалы III науч. техн. конф. с межд. уч. / Под ред. В. В. Панкратова. – Новосибирск: НГТУ, 2007 г. С. – 92-96.

9. **Макаренко А. А.** Математическое моделирование многодвигательной синхронно-гистерезисной нагрузки электропривода / **А. А. Макаренко**, В. И. Иванчура. // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева / Гл. ред. Г. П. Беляков. – Красноярск: СибГАУ, 2008 г. С. – 18-23.

Макаренко Андрей Александрович

Управление электропитанием в электротехнической системе разделительного производства

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 04.02.2009. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИПК ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет"