

На правах рукописи



Терещина Олеся Геннадьевна

**ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ
РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОЗОННЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ
РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2007

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Южно-Уральский государственный университет.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Цытович Леонид Игнатьевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Осипов Олег Иванович;
доктор технических наук,
профессор Сарваров Анвар Сабулханович.

Ведущая организация – Уфимский государственный авиационный
технический университет, г.Уфа.

Защита состоится «___» мая 2007 г., в ___ часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2007 г.

Отзывы на автореферат, в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, диссертационный совет Д212.298.05, тел./факс 8 (351) 267-96-90, E-mail: tsli@susu.ac.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Среди исполнительных турбомеханизмов, оснащенных асинхронным электроприводом, особое место занимают водяные насосы, вентиляторы и дымососы, так как от их надежной и бесперебойной работы зависит не только ритмичность технологического процесса, но и комфортность и безопасность жизнедеятельности человека, как на производстве, так и в быту. При этом электроприводы турбомеханизмов в общем случае представляют собой системы с n -м числом ($n \geq 2$) идентичных параллельных каналов регулирования (ЭППК), из которых k – число каналов ($k < n$) выполняют функции «холодного» резерва. Несмотря на различия в принципах управления исполнительными электродвигателями (прямой или плавный пуск, частотное регулирование) и различное функциональное назначение, системы управления турбомеханизмами имеют ряд объединяющих их свойств: низкая (реже – средняя) требуемая точность регулирования; относительная простота алгоритма управления; функциональная и аппаратурная идентичность рабочих и резервных каналов регулирования; требование простоты технической реализации системы управления и ее высокой надежности; наличие резервных каналов регулирования с малым для целого ряда технологических объектов интервалом времени на включение (от десятков секунд до единиц минут).

Несмотря на достаточно жесткие требования по времени для перехода на резервный канал регулирования, в подавляющем числе ЭППК ввод в работу резерва производится вручную за недопустимо большое время, что влечет за собой срыв технологического процесса и экономические потери для предприятия.

Применение для диагностики работоспособности ЭППК известных аналоговых или цифровых методов тестового воздействия с последующим анализом отклика системы и его сравнением с эталонным «портретом» нельзя считать приемлемым для данного класса электроприводов, так как система диагностирования и автоматического включения резерва нередко оказывается намного сложнее непосредственно объекта диагностирования, и требует по этой причине тест-проверки собственной работоспособности. Поэтому задача диагностирования и автоматического включения резерва в ЭППК в настоящее время остается практически нерешенной.

Очевидно, что оптимальным вариантом решения данной проблемы следует считать создание для ЭППК такой системы управления, которая при простоте технической реализации обладала бы необходимой точностью, а также свойством самодиагностирования и автоматического включения резервного канала регулирования, и не требовала бы введения дополнительных средств диагностики, ключевых коммутаторов и т.д., приводящих к значительной структурной избыточности всего комплекса электронного оборудования.

В этом плане перспективными являются методы интегрирующего развертывающего преобразования, которым посвящены работы Темникова Ф.Е., Смолова В.Б., Шляндина В.М., Мартяшина А.И., Шахова Э.К., Угрюмова В.К.,

Гусева В.Г., Колюхова Н.Е, Кобзева В.А, Осипова О.И., Цытовича Л.И. и многих других ученых.

Развертывающие преобразователи, в силу свойств, дарованных им природой, позволяют при минимуме аппаратных затрат получать высокую точность процесса регулирования, помехоустойчивость, и решать целый комплекс вопросов, связанных как с диагностикой, так и резервирование отдельных элементов и систем управления в целом.

Целью и задачами диссертационной работы являются: создание высоконадежной, простой, с точки зрения технической реализации, обладающей свойством самодиагностирования и автоматического включения резерва, системы управления ЭППК, а также других объектов с идентичными структурными признаками, на основе принципа многозонного интегрирующего развертывающего преобразования с частотно-широотно-импульсной модуляцией (ЧШИМ).

Методы исследования. Для анализа статических и динамических показателей МРП использовались системы трансцендентных уравнений с их решением на ЭВМ и представлением результатов в виде пространства статического и динамического состояния МРП и их проекций на плоскость переменных, а также метод логарифмических частотных характеристик. Анализ показателей надежности МРП производился классическими методами теории надежности. Исследования переходных процессов в ЭППК с управлением от МРП осуществлялись с помощью пакетов прикладных программ MathCad и MatLab+Simulink.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Статические с учетом различных дестабилизирующих факторов и динамические характеристики МРП при различном числе его релейных элементов в широком частотном диапазоне входного гармонического сигнала, включая область частот замедленной дискретизации сигнала управления.

2. Статические и динамические характеристики МРП при катастрофических отказах активных компонентов схемы и его показатели надежности.

3. Метод самодиагностирования и автоматического резервирования ЭППК с введением в замкнутый контур МРП стробирующих логических переменных от селективных защит силового электрооборудования и исполнительных механизмов, а также автоматическое резервирование источников электропитания информационных элементов ЭППК.

4. Элементы и устройства на базе МРП для информационной части систем управления электроприводами и технологической автоматикой.

5. Структуры ЭППК с различным числом каналов регулирования и с управлением от тиристорных регуляторов напряжения и преобразователей частоты, включая ЭППК с автоматическим включением «горячего» и «холодного» резервов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием методов расчета статических и динамических процессов в математических и компьютерных моделях при общепринятых допущениях, удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных результатов, а также результатами промышленного внедрения и эксплуатации ЭППК с управлением от МРП.

Научное значение результатов работы

1. В результате разработки математического описания для статических и динамических характеристик МРП, их теоретического и экспериментального анализа получила дальнейшее развитие теория нового класса многозонных интегрирующих развертывающих преобразователей с частотно-широотно-импульсной модуляцией, а также систем управления ЭППК на их основе.

2. Впервые исследованы статические и динамические характеристики МРП при влиянии основных дестабилизирующих факторов, включая катастрофические отказы активных компонентов его структуры, а также переходные процессы в МРП с различным числом релейных элементов.

3. Предложен новый способ блокировки дополнительных переключений каналов регулирования в ЭППК с МРП, имеющего четное число релейных элементов, а также автоматического резервирования источников электропитания информационных элементов системы ЭППК.

4. Впервые предложены и, на основе разработанных компьютерных моделей, исследованы структуры ЭППК на базе МРП с различным числом каналов регулирования с управлением исполнительными электродвигателями от тиристорных регуляторов напряжения и преобразователей частоты, включая ЭППК с самодиагностированием и автоматическим включением «горячего» и «холодного» резервов.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– получены рекомендации по рациональному выбору параметров элементов схем МРП, обеспечивающие минимизацию результирующей статической и динамической погрешности работы многозонного преобразователя;

– разработаны структурные и принципиальные схемы элементов и устройств систем управления электроприводами и технологической автоматики на основе МРП;

– разработаны структурные и принципиальные схемы МРП и ЭППК с самодиагностированием катастрофических отказов и автоматическим включением резервного канала регулирования;

– разработаны компьютерные модели ЭППК с управлением от МРП, позволяющие исследовать различные режимы работы электроприводов с параллельными каналами регулирования.

Реализация результатов работы. Системы управления ЭППК на базе МРП внедрены на ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» в шлакоплавильном цехе при автоматизации комплекса оборудования гран-бассейна и в цехе № 6 в системе управления электроприводами газоотсосов линии плазменной резки труб

большого диаметра. Результирующий годовой экономический эффект от реконструкции технологических объектов составил более 700 тыс. руб. По результатам исследований разработан учебно-лабораторный стенд по курсу «Элементы систем автоматики» и «Теория развертывающих систем» для студентов специальности 140604. Результаты работы используются также в рамках проекта «Развитие научного потенциала высшей школы (2006 – 2008 годы) НИОКР» по заданию Рособразования по аналитической ведомственной целевой программе. Регистрационный номер 01.2006 10696.

Апробация работы. Основные вопросы диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

– XXXIV Уральский семинар «Механика и процессы управления». Екатеринбург, 2004;

– VII Всероссийская научно-технической конференции «Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования». Тамбов, 22 – 29 апреля 2004;

– научно-техническая конференция «Электроприводы переменного тока», Екатеринбург, 15 – 18 марта 2005;

– международная научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития энерготехнологий» (XII Бенардосовские чтения), Иваново, 2005;

– XXVI семинар «Российская школа по проблемам науки и технологии». Екатеринбург, 2006;

– XI международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Крым, Алушта, 18 – 23 сентября 2006.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения, библиографического списка из 251 наименования, четырех приложений. Общий объем диссертации 235 страниц, включая 116 рисунков и 28 таблиц.

Публикации. Основные положения, выводы и практические результаты изложены в 11 статьях в журналах и сборниках научных трудов, 7 материалах конференций и тезисов докладов. На оригинальные технические решения получены 3 патента на изобретения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность выполненной научной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научные положения, выносимые на защиту, отмечена практическая значимость и научная ценность работы.

В первой главе дана классификация электроприводов с параллельными каналами регулирования, и обозначены основные задачи их управления.

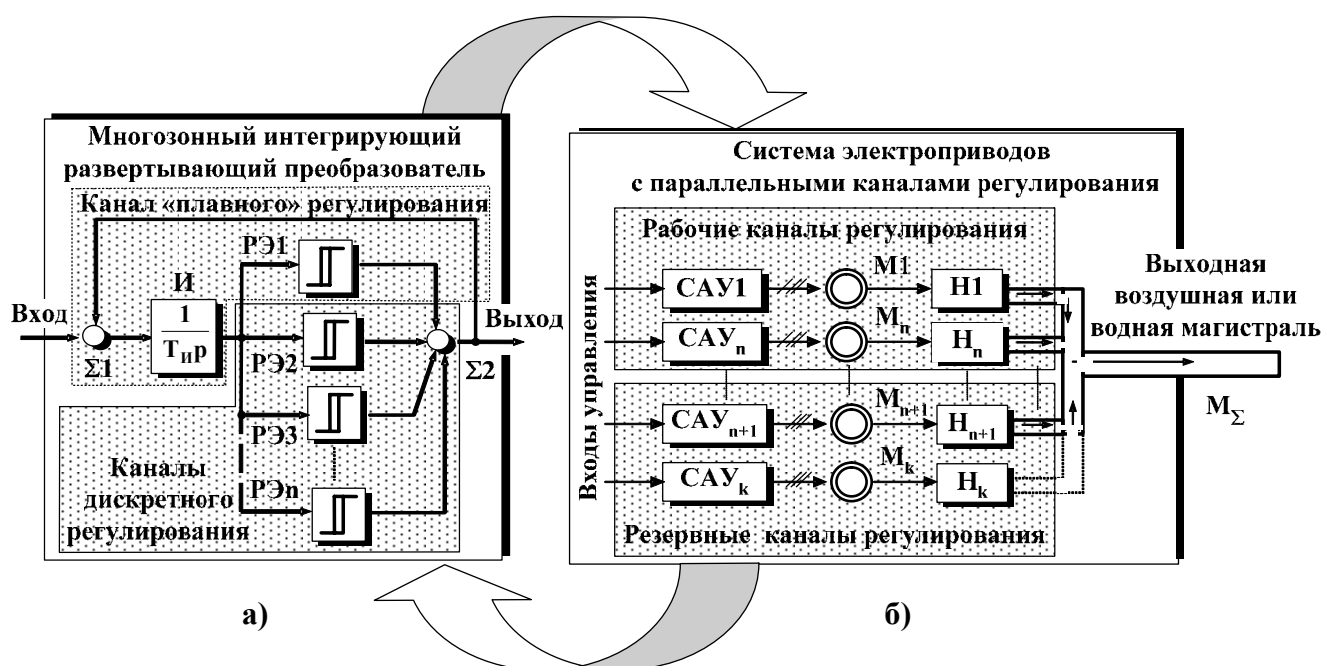
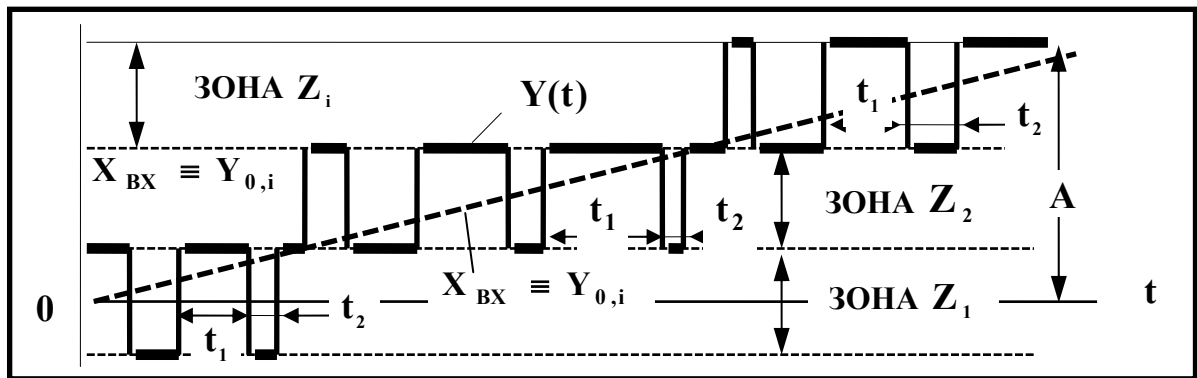


Рис. 1. К сравнению структурной и функциональной идентичности МРП и ЭПК (И – интегратор; РЭi – релейный элемент; Σi – сумматор; М – исполнительный электродвигатель; Н – насос; САУ – система автоматического управления)

Рассмотрена обобщенная структурная схема ЭПК (рис. 1), сформулированы базовые технические требования к системам подобного класса. Приведены основные способы диагностирования аналоговых и цифровых систем управления электроприводами, включая тестовые, мажоритарные и параметрические методы. Отмечается целесообразность поиска путей построения элементной базы систем с многократным резервированием и автоматическим диагностированием на основе методов интегрирующего развертывающего преобразования.

Приведена классификация способов развертывающего преобразования, рассмотрена базовая структура МРП с частотно-нулевым сопряжением модуляционных зон (рис. 1, а), получены аналитические соотношения для его амплитудной и модуляционной характеристик (рис. 2). Установлено, что пороги переключения РЭ должны удовлетворять условию $|\pm b_1| < |\pm b_2| < \dots < |\pm b_n|$, где индекс при «b» соответствует порядковому номеру РЭ (рис.1 а), а выходные сигналы каждого из «n» релейных элементов изменяются в пределах $\pm A/n$. При этом в режиме автоколебаний с ЧШИМ всегда работает РЭ1, а статическое состояние остальных РЭ определяется знаком и уровнем входного сигнала МРП.

Дан сравнительный анализ структурной и функциональной идентичности МРП и ЭПК (рис. 1), и установлено, что решение основных проблем управления ЭПК следует искать в направлении МРП. Отмечается необходимость проведения комплекса исследований в области теории и практики МРП применительно к их тактико-техническим возможностям в области ЭПК, формулируются цель и основные задачи исследований.



Модуляционная зона	Модуляционная и амплитудная характеристики МРП	Допустимый диапазон изменения входного сигнала МРП
Z_i	$t_1 = \frac{2 \bar{b}_1 T_{\text{И}}}{(2z_i - 1)n^{-1} - \bar{X}_{\text{ВХ}}};$ $t_2 = \frac{2 \bar{b}_1 T_{\text{И}}}{\bar{X}_{\text{ВХ}} - (2z_i - 3)n^{-1}};$ $Y_{0,i} = (-1)A [(2Z_i - 3) + 2\gamma] n^{-1} = -X_{\text{ВХ}}$	$(2Z_i - 3)n^{-1} < \bar{X}_{\text{ВХ}} \leq (2Z_i - 1)n^{-1}$
<p>$\bar{b}_1 = b_1 / A$ – нормированное значение порога переключения b_1;</p> <p>$\bar{X}_{\text{ВХ}} = X_{\text{ВХ}} / A$ – нормированная величина входного сигнала МРП;</p> <p>n – количество релейных элементов, причем $n \geq 3$ – нечетное число;</p> <p>$Z_i = 1; 2; 3 \dots$ порядковый номер модуляционной зоны;</p> <p>$\gamma = t_1 / (t_1 + t_2)$ – скважность выходных импульсов МРП;</p> <p>$\pm A$ – максимальная амплитуда выходного сигнала МРП;</p> <p>$T_{\text{И}}$ – постоянная времени интегратора.</p>		

Рис. 2. Модуляционная и амплитудная характеристики базовой структуры МРП с частотно-нулевым сопряжением модуляционных зон и их взаимосвязь с уровнем сигнала управления

Во второй главе на основе разработанной методики проводится анализ статических характеристик МРП. Приведена классификация основных источников статической ошибки разветвляющих преобразователей, и из их числа выбраны наиболее значимые для систем ЭППК составляющие.

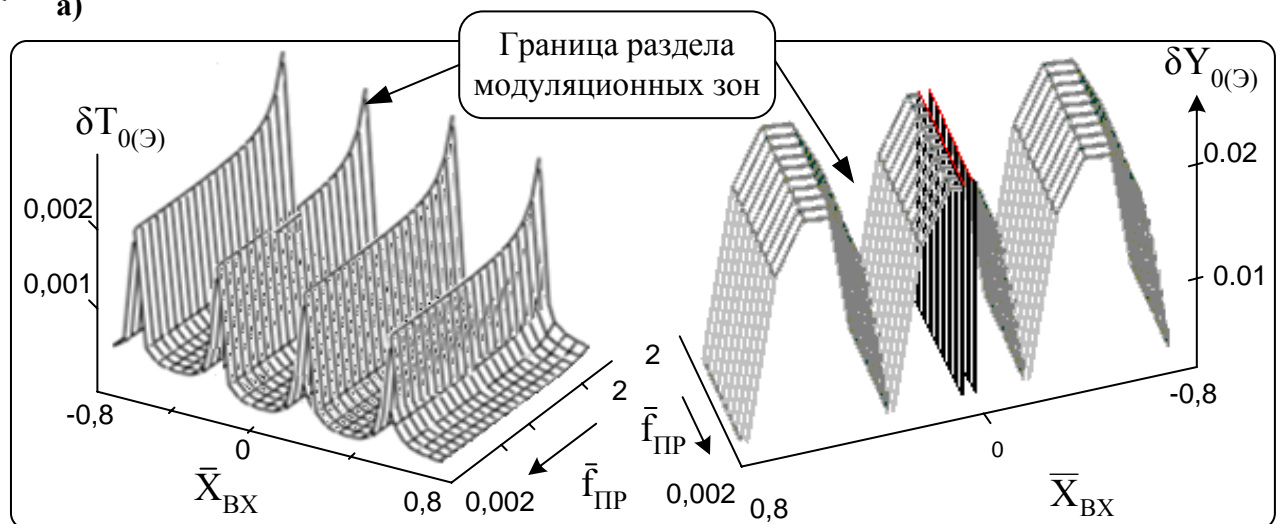
На основе полученных обобщенных для произвольного числа модуляционных зон МРП аналитических выражений рассмотрено влияние на его статические характеристики экспоненциального характера изменения сигнала развертки (рис. 3) и эффекта адсорбции в канале интегрирования (рис. 4), а также дрейфовых параметров усилителя интегратора, конечного значения времени переноса сигнала в тракте релейных элементов (РЭ), дискретного изменения порогов переключения РЭ с учетом порядка модуляционной зоны и асимметрии порогов переключения и амплитуд выходных сигналов РЭ.

Показано, что наибольшее влияние на статические характеристики МРП оказывают источники аддитивной ошибки усилителя интегратора вида э.д.с. смещения «нуля» и разности входных токов.

$$\left\{ \begin{array}{l} t^{(i)}_{1(\Theta)} = -k_{\Theta}(\omega_0) \cdot T_{И} \cdot \ln \left[1 - \frac{2 \cdot \bar{b}_1}{k_{\Theta}(\omega_0) \cdot \left(\frac{2Z_i - 1}{n} - \bar{X}_{ВХ} \right)} \right]; \\ t^{(i)}_{2(\Theta)} = -k_{\Theta}(\omega_0) \cdot T_{И} \cdot \ln \left[1 - \frac{2 \cdot \bar{b}_1}{k_{\Theta}(\omega_0) \cdot \left(\bar{X}_{ВХ} - \frac{2Z_i - 3}{n} \right)} \right]; \\ T_{0(\Theta)}^{(i)} = t^{(i)}_{1(\Theta)} + t^{(i)}_{2(\Theta)}; \quad \delta T_0^{(i)} = 1 - \frac{T_{0(\Theta)}^{(i)}}{T_0}; \\ Y_{0(\Theta)}^{(i)} = -A \left(\frac{2t^{(i)}_{1(\Theta)}}{T_{0(\Theta)}^{(i)}} - 1 \right); \quad \delta Y_0^{(i)} = 1 - \frac{Y_{0(\Theta)}^{(i)}}{Y_0}. \end{array} \right.$$

а)

Рис. 3. Система уравнений (а) и пространства статического состояния МРП $|\delta T_0| = f(\bar{X}_{ВХ}, \bar{f}_{ПР})$ (б) и $|\delta Y_0| = f(\bar{X}_{ВХ}, \bar{f}_{ПР})$ (в) с учетом экспоненциального характера изменения сигнала развертки (где $k_{\Theta}(\omega_0)$ – эквивалентный коэффициент усиления канала интегрирования)



б)

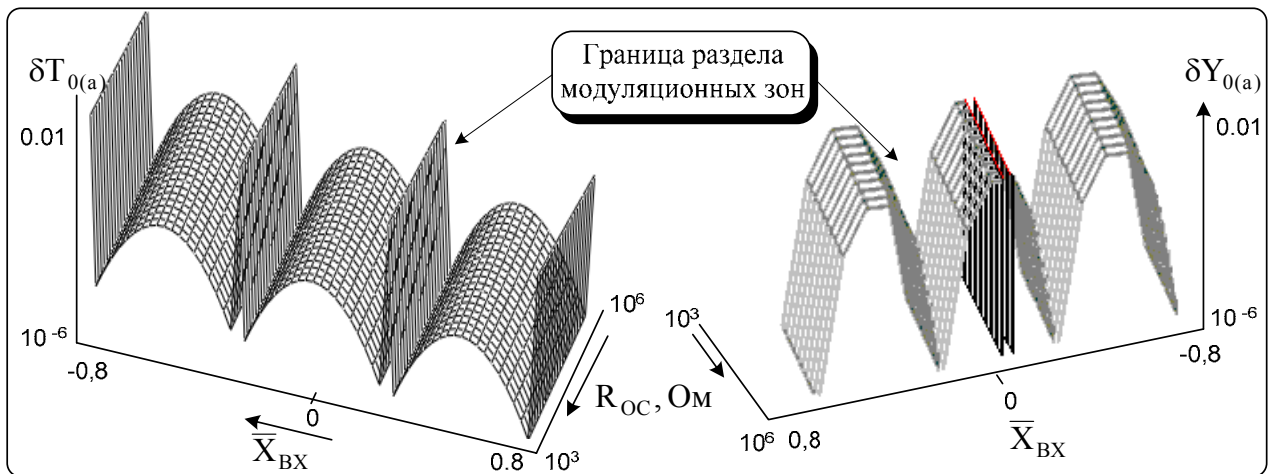
в)

Ступенчатое изменение сигнала дрейфа «нуля» вызывает появление в МРП дополнительной динамической ошибки, которая существует только в пределах одного интервала дискретизации, и, с позиции статической точности многозонного преобразователя, может не учитываться. Даны рекомендации по выбору параметров РЭ, при которых в результате дрейфа порогов переключения РЭ исключается передача режима автоколебаний смежному релейному элементу, и тем самым обеспечивается устойчивая работа каналов ЭПК.

Проведенный анализ установил взаимосвязь статических и динамических характеристик МРП, зависимость характеристик МРП от полосы пропускания усилителя канала интегрирования, позволил сформулировать требования к

элементам схем многозонного преобразователя, при соблюдении которых минимизируется его статическая погрешность, а также позволил утвердительно ответить на вопрос о возможности реализации на основе МРП основных типов регуляторов для систем электропривода и уровне их временной и температурной нестабильности характеристик в реальных условиях промышленной эксплуатации.

$$\left. \begin{aligned}
 & t_{1(a)}^{(i)} = \frac{2\bar{b}_1 \cdot T_{\text{И}}}{\frac{2Z_i - 1}{n} - \bar{X}_{\text{ВХ}}} \left(1 + \frac{T_1}{T_{\text{И}}}\right) - \frac{T_a \cdot T_1}{T_{\text{И}} + T_1} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{1(a)}^{(i)}}{T_a^{\ominus}}\right)\right]; \\
 & t_{2(a)}^{(i)} = \frac{2\bar{b}_1 \cdot T_{\text{И}}}{\bar{X}_{\text{ВХ}} - \frac{2Z_i - 3}{n}} \left(1 + \frac{T_1}{T_{\text{И}}}\right) - \frac{T_a \cdot T_1}{T_{\text{И}} + T_1} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{2(a)}^{(i)}}{T_a^{\ominus}}\right)\right]; \\
 & T_{0(a)}^{(i)} = t_{1(a)}^{(i)} + t_{2(a)}^{(i)}; \quad \delta T_{0(a)}^{(i)} = 1 - \frac{T_{0(a)}^{(i)}}{T_0}; \\
 & Y_{0(a)}^{(i)} = -A \left(\frac{2t_{1(a)}^{(i)}}{T_{0(a)}^{(i)}} - 1\right); \quad \delta Y_{0(a)}^{(i)} = 1 - \frac{Y_{0(a)}^{(i)}}{Y_0}.
 \end{aligned} \right\} \text{ а) }$$



б)

в)

Рис. 4. Система уравнений (а) и пространства статического состояния МРП

$|\delta T_0| = f(\bar{X}_{\text{ВХ}}, \bar{f}_{\text{ПР}})$ (б) и $|\delta Y_0| = f(\bar{X}_{\text{ВХ}}, \bar{f}_{\text{ПР}})$ (в) с учетом адсорбции канала интегрирования

(где $T_a = R_a C_a$, $T_1 = R_{\text{OC}} C_a$, $T_{\text{И}} = R_{\text{OC}} C_{\text{И}}$ – постоянные времени интегрирования МРП;

$$T_a^{\ominus} = T_a \cdot T_{\text{И}} / (T_{\text{И}} + T_1))$$

Третья глава диссертационной работы посвящена анализу динамических характеристик МРП при дискретных изменениях входного воздействия, а также при гармоническом входном сигнале в широком частотном диапазоне, включая область частот, выходящую за пределы несущей частоты МРП. Показано, что в МРП с четным числом релейных элементов (РЭ) при дискретном изменении

входного сигнала возможен кратковременный переход разворачивающегося преобразователя в смежную модуляционную зону. Аналитически определены параметры переходных процессов, и рассмотрены пути блокировки дополнительных переключений МРП в составе электропривода. Показано, что МРП с двумя релейными звеньями не может использоваться для управления ЭППК ввиду периодических переключений всех РЭ. Установлено, что минимальным нечетным числом РЭ для МРП, используемого в системах ЭППК, является « $n = 4$ », а четным – « $n = 3$ ».

Динамика МРП при гармоническом входном воздействии анализировалась с использованием систем трансцендентных уравнений и представлением результатов исследований в виде пространств динамических состояний МРП (табл. 1).

Доказана высокая помехоустойчивость МРП в области частот замедленной дискретизации входного динамического воздействия. Даны рекомендации по выбору параметров МРП при известном частотном спектре сигналов помех. В частности установлено, что полоса равномерного пропускания частот МРП при воздействии гармонического сигнала на информационный вход составляет 5 – 10% от частоты несущих колебаний при нулевом уровне сигнала управления (табл. 1, рис. 2), и зависит от уровня сигнала рассогласования на границе раздела модуляционных зон МРП.

При воздействии гармонического сигнала на информационный вход с частотой превышающей частоту несущих автоколебаний в МРП формируются сигналы замедленной дискретизации вида низкочастотных биений или дрейфа «нуля» выходной координаты.

Уровень подобных ошибок МРП мал, и снижается по мере роста частоты сигнала высокочастотной помехи. Это является существенным преимуществом частотно-широко-импульсного способа интегрирующего преобразования по сравнению с другими видами модуляции.

Рассмотрена динамика МРП при гармонической девиации порогов переключения РЭ1 (табл. 2) сформулированы требования к уровню стабильности его параметров, требования к источнику электропитания МРП и соотношению частот пульсаций питающего напряжения с частотой несущих колебаний МРП, при котором достигается наибольшая помехоустойчивость разворачивающегося преобразователя к помехам со стороны источника электропитания системы управления.

МРП в области частот $\bar{F} \leq 5 \cdot 10^{-2}$ обладает свойствами линейного дифференцирующего звена по отношению к гармоническому воздействию, поступающим на вход РЭ1 (табл. 2, рис. 2). Поэтому частоту автоколебаний МРП желательно выбирать из расчета $T_0^{-1} \Big|_{\bar{X}_{\text{вх}}=0} \geq 20 \cdot T_{\text{п}}^{-1}$, что исключает появление в выходном сигнале субгармонических составляющих, вызываемых эффектом замедленной дискретизации сигнала помехи. Получены приближенные соотношения для оценки отклонения выходных координат МРП от заданных

К анализу динамических характеристик МРП при воздействии гармонического сигнала на информационный вход

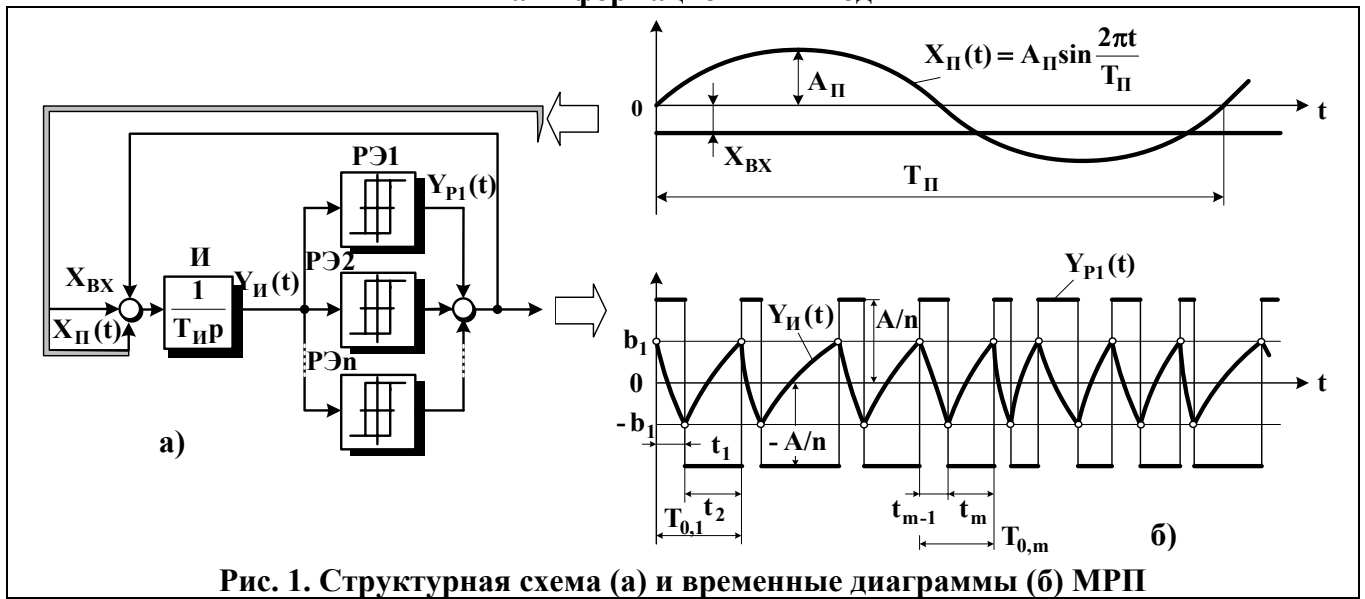


Рис. 1. Структурная схема (а) и временные диаграммы (б) МРП

$$t_{m-1} = \frac{2\bar{b}_1 T_{И} + \bar{A}_{П} \frac{T_{П}}{2\pi} \sin^2\left(\pi \frac{t_{m-1}}{T_{П}}\right)}{n - \bar{X}_{ВХ}}; \quad t_m = \frac{2\bar{b}_1 T_{И} - \bar{A}_{П} \frac{T_{П}}{\pi} \cdot \sin\left(\pi \frac{t_m + 2t_{m-1}}{T_{П}}\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{t_m}{T_{П}}\right)}{-\frac{2Z_i - 3}{n} + \bar{X}_{ВХ}}$$

$T_{0,m} = t_{m-1} + t_m$ – интервал дискретизации МРП; $\bar{Y}_0(m) = \frac{Y_0}{A} = (-1)^{\left(\frac{2t_{m-1}}{T_{0,m}} - 1\right)}$ – нормированное среднее значение выходных импульсов МРП за интервал $T_{0,m}$;

$$k_{П}(m) = \frac{|\bar{Y}_0(m) - \bar{X}_{ВХ}|}{\bar{A}_{П}} \text{ – коэффициент передачи МРП; где } \bar{A}_{П} = A_{П} / A, \quad T_{П} \text{ –}$$

нормированная амплитуда и период гармонического сигнала $X_{П}(t)$; $\bar{F} = \frac{T_0|_{(X_{ВХ}=0)}}{T_{П}}$ –

относительная частота гармонического сигнала $X_{П}(t)$.

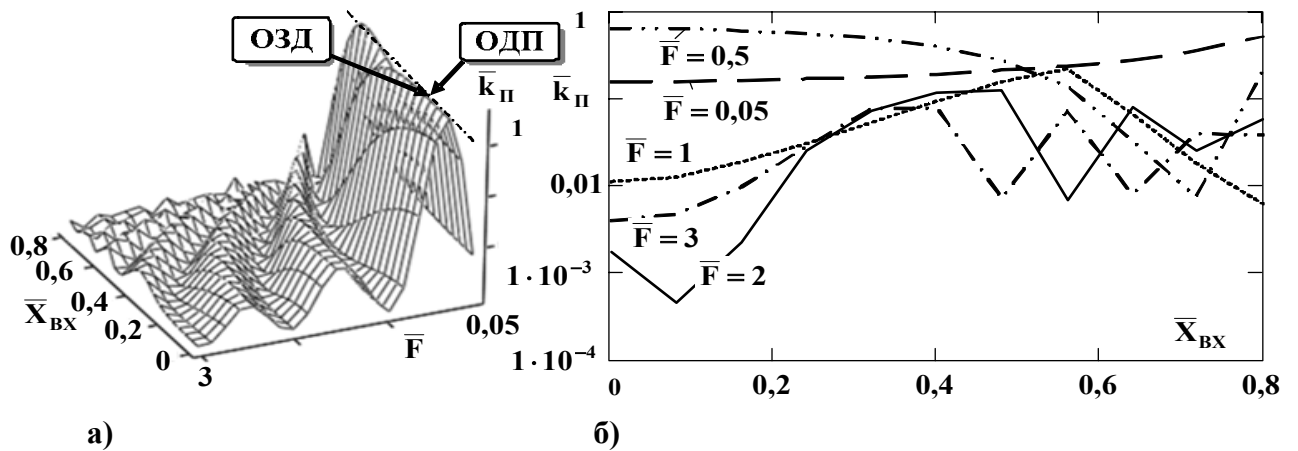


Рис. 2. Пространство динамического состояния МРП (а) и зависимость $k_{П}(1) = f(\bar{X}_{ВХ})$ (б) при фиксированных частотах гармонического сигнала \bar{F} (ОДП, ОЗД – область достоверной передачи частот и область замедленной дискретизации $X_{ВХ}$)

К анализу динамических характеристик МРП при воздействии гармонического сигнала на вход релейного элемента

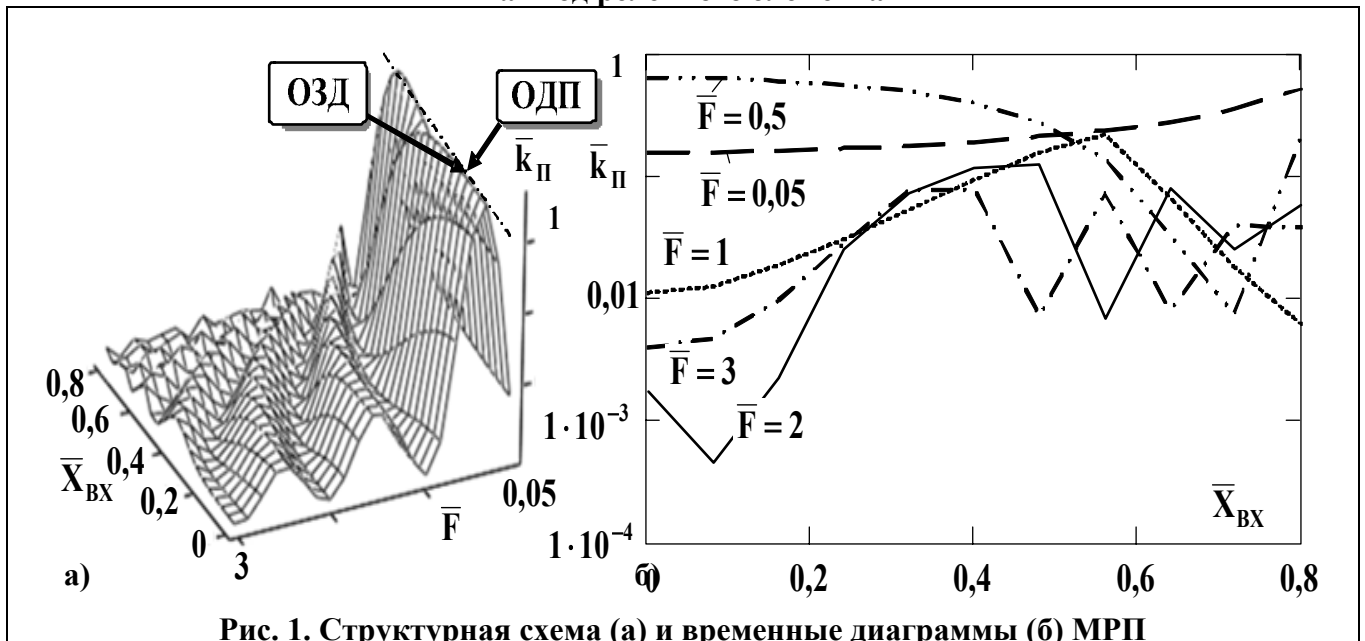


Рис. 1. Структурная схема (а) и временные диаграммы (б) МРП

$$t_{m-1} = \frac{(2\bar{b}_1 + \bar{A}_\Pi \cdot \sin 2\pi \frac{t_{m-1}}{T_\Pi}) \cdot T_{\Pi}}{2Z_i - 1 - \bar{X}_{\text{BX}}}; \quad t_m = \frac{\left(2\bar{b}_1 + \bar{A}_\Pi \cdot (\sin 2\pi \frac{t_{m-1}}{T_\Pi} - \sin 2\pi \frac{t_{m-1} + t_m}{T_\Pi})\right) \cdot T_{\Pi}}{\bar{X}_{\text{BX}} - \frac{2Z_i - 3}{n}};$$

$T_{0,m} = t_{m-1} + t_m$ – интервал дискретизации МРП; $\bar{Y}_0(m) = (-1) \left(\frac{2t_{m-1}}{T_{0,m}} - 1 \right)$ – среднее значение

выходных импульсов МРП за интервал $T_{0,m}$; $K_{P\Omega}[m] = \frac{\bar{X}_{\text{BX}} - Y_0[m]}{\bar{A}_\Pi}$ – коэффициент передачи

многозонного развертывающего преобразователя.

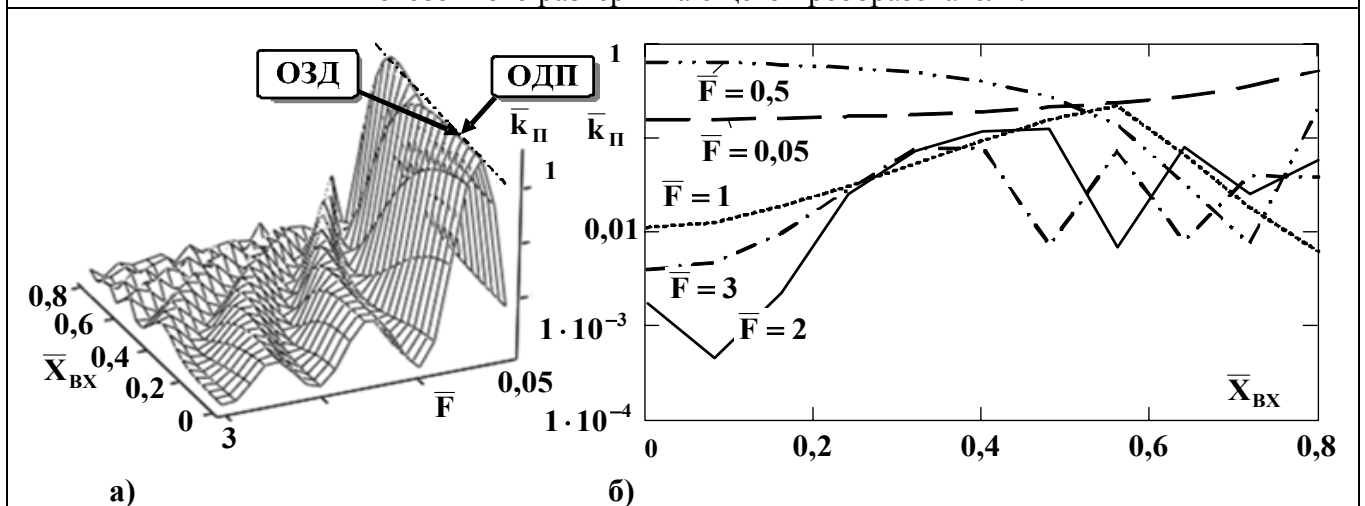


Рис. 2. Пространство динамического состояния МРП (а) и зависимости $K_{P\Omega}[1] = f(\bar{F})$ (б) при фиксированных X_{BX}

значений, возникающих при передаче гармонического сигнала со стороны входа РЭ, а также определена частотная область \bar{F} , для которой данные закономерности справедливы.

Приведены графики переходных процессов в МРП при воздействии гармонического сигнала на информационный вход и на вход РЭ1 для области достоверной передачи частот входного воздействия и области его замедленной дискретизации.

Дан анализ динамики МРП при различных законах одно- и двухтактной модуляции с учетом характеристик выходного демодулирующего фильтра первого порядка. Показано, что минимальную инерционность имеют каскады «МРП – фильтр» с одноконтурной модуляцией и линейно возрастающей в функции входного сигнала частотой несущих колебаний.

Четвертая глава посвящена анализу свойств адаптации МРП к различным катастрофическим отказам активных компонентов его структуры и влиянию этих отказов на статические и динамические характеристики многозонных преобразователей. Предложена структура МРП с параллельными интегрирующими каналами преобразования сигнала управления (рис. 5).

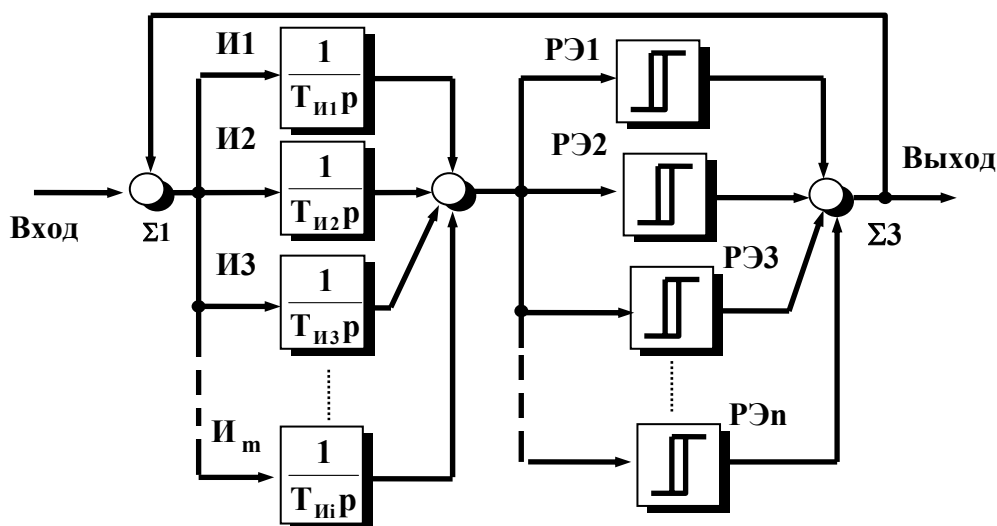


Рис. 5. Структура МРП с параллельными интегрирующими каналами преобразования сигнала управления и адаптацией к отказам активных компонентов схемы

Установлено, что при равенстве числа «k» интеграторов числу $n=5$ релейных элементов МРП по отношению к самому неблагоприятному сочетанию катастрофических отказов обладает свойством трехкратно резервируемой системы с самодиагностированием и автоматическим включением резервных каналов регулирования.

Проведено моделирование в среде MatLab+Simulink процессов перехода МРП на резервный канал. Рассмотрены процессы взаимодействия интеграторов при инфранизкочастотных гармонических изменениях сигналов смещения их «нуля», и доказана способность МРП к подавлению подобного рода возмущений при параллельной работе нескольких интеграторов. Разработана и

экспериментально исследована схема МРП с адаптацией к отказам активных компонентов его структуры.

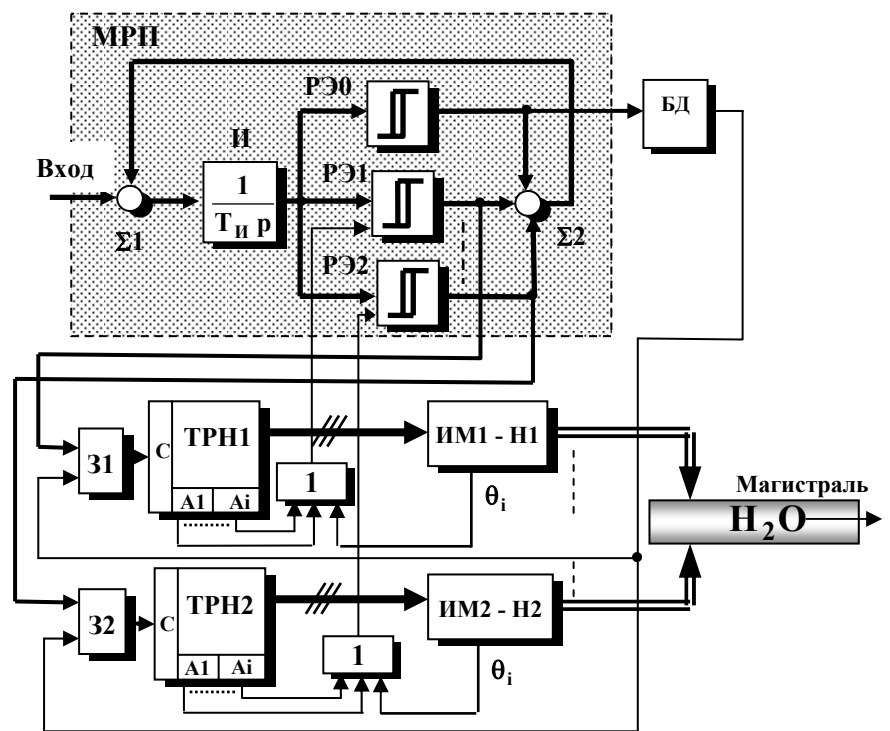
Проведен сопоставительный анализ показателей надежности МРП и однозонных развешивающих преобразователей с различными принципами параметрического диагностирования резервных каналов регулирования. В частности, установлено, что средняя наработка на отказ МРП на порядок превышает аналогичный показатель для наиболее простых в техническом плане систем с параметрическим диагностированием.

В пятой главе рассмотрены функциональные элементы и промышленные системы управления ЭППК на основе МРП.

Разработаны и экспериментально исследованы основные регуляторы на основе МРП, апериодические и дифференцирующие фильтры повышенной стабильности и помехоустойчивости с дискретно перестраиваемыми характеристиками. Приведены осциллограммы сигналов «вход – выход», статические и динамические характеристики конкретных принципиальных схем. Предложена новая структура МРП с гальваническим разделением канала «вход – выход» на основе оптоэлектронных приборов, предназначенная для построения датчиков тока (напряжения). Рассмотрен метод передачи логических сигналов по однопроводной линии связи на основе МРП и вариант его технической реализации, который может быть использован в электроприводах, удаленных от центрального пульта управления.

Предложены новые структурные схемы дискретной системы управления четным числом электроприводов с параллельными каналами регулирования с автоматическим диагностированием и резервированием на основе логических переменных селективных защит силовых преобразователей и исполнительных механизмов (рис. 6), схема дискретной системы управления нечетным числом

Рис. 6. Структурная схема дискретной системы управления с самодиагностированием и автоматическим резервированием (ТРН – тиристорный регулятор напряжения; ИМ-Н – асинхронный электродвигатель с насосом; 31, 32 – блоки логической функции «Запрет»; БД – блок параметрического диагностирования наличия режима автоколебаний в канале РЭ1; $A_1 \dots \theta_i$ – координаты селективных защит ТРН и исполнительных механизмов ЭППК)



электроприводов с демодулирующими фильтрами и фиксирующими компараторами в каналах регулирования (рис. 7) с управлением электродвигателями от ТРН или преобразователей частоты, схема многозонной системы управления группой электроприводов переменного тока с автоматическим переключением силового электрооборудования в режим холодного резерва (рис. 8), а также принцип построения ЭППК с автоматическим резервированием источников электропитания. Рассмотрены режимы работы подобных систем, их переходные процессы при включении резервного канала регулирования.

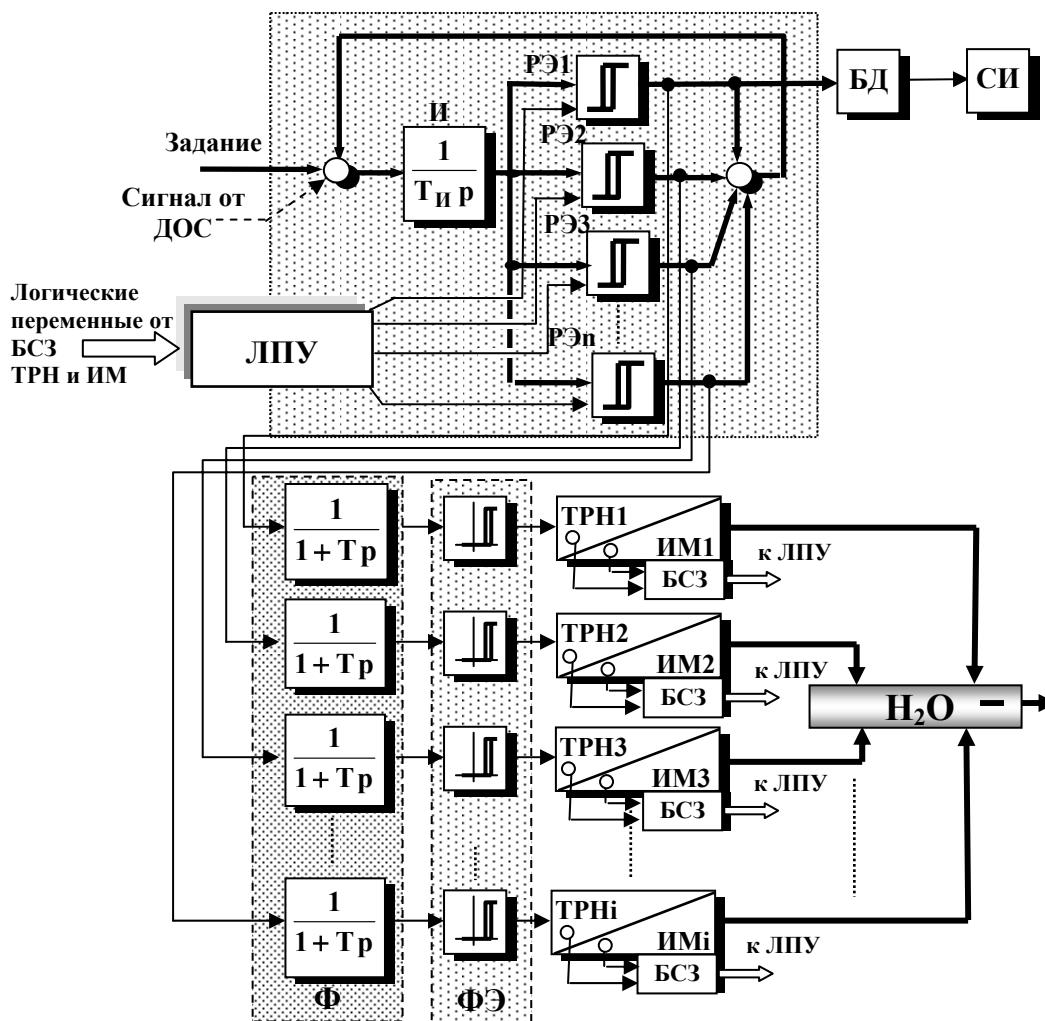


Рис. 7. Структурная схема дискретной системы управления нечетным числом электроприводов с демодулирующими фильтрами и фиксирующими компараторами в каналах регулирования (ДОС – датчик обратной связи; ЛПУ – логическое переключающее устройство; СИ – система индикации работы блока диагностики; Ф – фильтр; ФЭ – фиксирующий элемент; БСЗ – блок селективных защит ТРН и ИМ)

Впервые разработаны структуры и компьютерные модели в среде MatLab+Simulink ЭППК на базе МРП с дискретным и комбинированным управлением при четном и нечетном числе каналов регулирования. Исследованы переходные процессы применительно к группе электроприводов насосов системы

водоснабжения с управлением от тиристорных регуляторов напряжения с контуром обратной связи по току статора асинхронного электродвигателя.

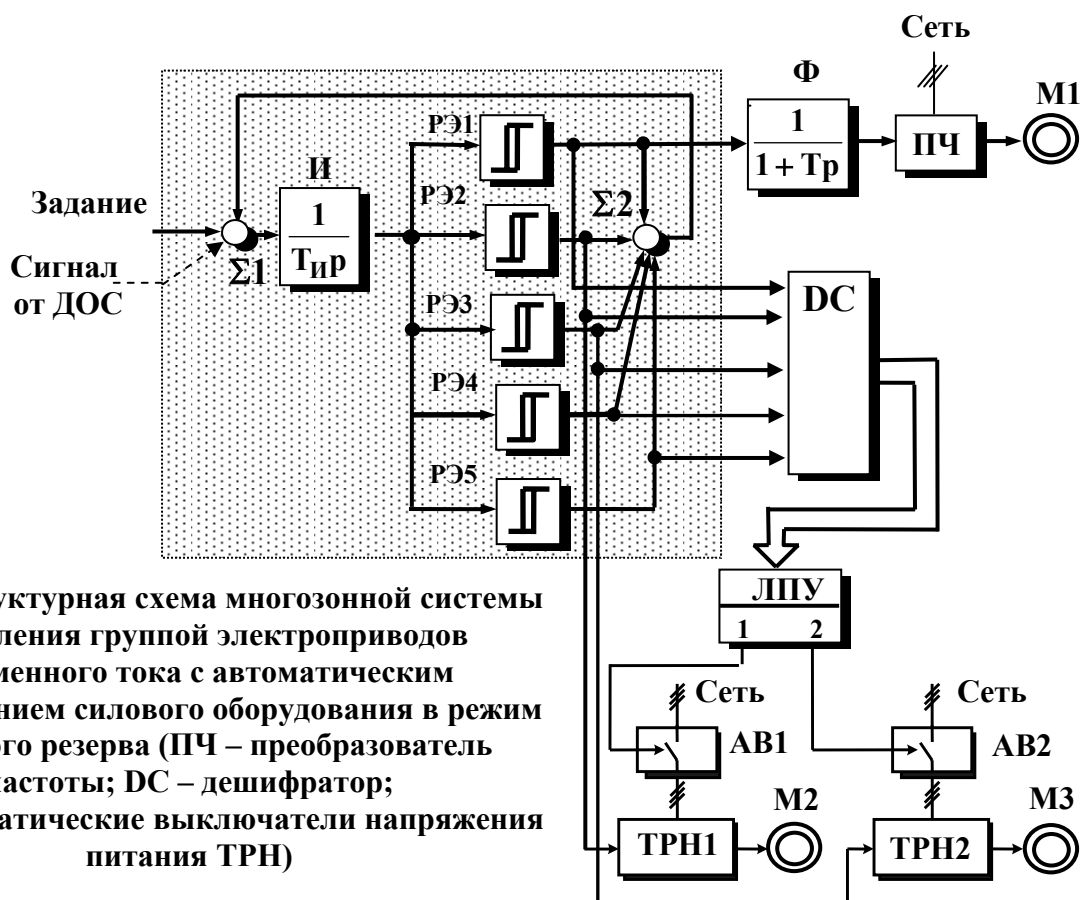


Рис. 8. Структурная схема многозонной системы управления группой электроприводов переменного тока с автоматическим переключением силового оборудования в режим холодного резерва (ПЧ – преобразователь частоты; DC – дешифратор; АВ – автоматические выключатели напряжения питания ТРН)

Разработаны практические схемы систем ЭППК с самодиагностированием и автоматическим резервированием каналов регулирования, которые внедрены на ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» в системе управления электроприводами водяных насосов гран-бассейна шлакоплавильного цеха и в системе воздухообмена линии плазменной резки труб большого диаметра 1020 – 1220 цеха №6.

Результурующий экономический эффект от внедренных систем управления составляет более 700 тыс. руб. в год.

Разработанные и исследованные структуры систем управления являются универсальными для технологических установок других типов с параллельными каналами регулирования и могут быть использованы, например, в регуляторах освещения, температуры и др.

В приложениях содержатся справки о внедрении результатов исследований на ОАО ЧТПЗ и в учебный процесс энергетического факультета ЮУрГУ, а также перечень основных обозначений и сокращений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. В результате разработки математического описания для статических и динамических характеристик МРП, их теоретического и экспериментального анализа получила дальнейшее развитие теория нового класса многозонных интегрирующих развертывающих преобразователей с ЧШИМ и частотно-нулевым сопряжением модуляционных зон, а также систем управления ЭППК на их основе.

2. Впервые выявлена структурная и функциональная идентичность МРП с частотно-нулевым сопряжением модуляционных зон и электроприводов с параллельными каналами регулирования, показывающая целесообразность применения для управления ЭППК интегрирующих развертывающих преобразователей с многозонной ЧШИМ.

3. На основании разработанных математических моделей и полученных аналитических соотношений проведен анализ статических и динамических характеристик базовой структуры МРП с нечетным числом релейных элементов. Даны рекомендации по выбору параметров внутренних и внешних цепей МРП, а также частоты автоколебаний, при которой обеспечивается минимизация статической и динамической ошибки МРП.

4. На основе полученных расчетных соотношений проведен анализ статических и динамических характеристик МРП при четном числе релейных элементов, и даны рекомендации по выбору параметров элементов его схемы. Для данного класса систем впервые предложен способ блокировки дополнительных переключений каналов регулирования в ЭППК при переходе МРП в смежную модуляционную зону.

5. С позиций теории развертывающих систем произведена классификация способов диагностирования систем управления электроприводами и их автоматического резервирования, и на основании проведенного сравнительного анализа показана перспективность решения подобных задач с применением методов интегрирующего развертывающего преобразования сигнала управления, позволяющих создавать системы управления ЭППК с самодиагностированием и автоматическим включением резерва.

6. Предложены новые технические решения для построения систем управления ЭППК с различным числом каналов регулирования, с плавным, с дискретным и комбинированным способами управления, в том числе, ЭППК с автоматическим включением «горячего» и «холодного» резервов, которые отличаются простотой технической реализации, точностью работы и надежностью.

7. Впервые предложен метод самодиагностирования и автоматического резервирования ЭППК за счет введения в замкнутый контур МРП стробирующих логических переменных от селективных защит силового электрооборудования и исполнительных механизмов, что позволяет диагностировать катастрофические отказы элементов, находящихся вне замкнутого контура МРП.

8. Предложена новая схема автоматического резервирования источников электропитания информационных элементов ЭПК с управлением от МРП, отличающаяся простотой технической реализации и бесконтактным подключением резерва.

9. На основе разработанных компьютерных моделей исследованы характеристики структур ЭПК на базе МРП с различным числом каналов регулирования с управлением исполнительными электродвигателями от тиристорных регуляторов напряжения и преобразователей частоты, включая ЭПК с самодиагностированием и автоматическим включением «горячего» и «холодного» резервов.

10. Системы управления ЭПК на базе МРП внедрены на ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» в шлакоплавильном цехе при автоматизации комплекса оборудования гран-бассейна и в цехе № 6 в системе управления электроприводами газоотсосов линии плазменной резки труб большого диаметра. Результирующий годовой экономический эффект от реконструкции технологических объектов составил более 700 тыс. руб. По результатам исследований разработан учебно-лабораторный стенд по курсу «Элементы систем автоматики» и «Теория разветвляющихся систем» для студентов специальности 14060400. Результаты работы используются также в рамках проекта «Развитие научного потенциала высшей школы (2006 – 2008 годы) НИОКР» по заданию Рособразования по аналитической ведомственной целевой программе. Регистрационный номер 01.2006 10696.

Научные публикации по теме диссертации в журналах ВАК

1. Цытович, Л.И. Однопроводная линия передачи логических данных на основе многозонной частотно-широотно-импульсной модуляции / Л.И. Цытович, В.И. Абушаев, О.Г. Терещина // Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». – Вып. 2. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – № 7. – С. 55–59.

2. Цытович, Л.И. Разветвляющие преобразователи с автоматическим диагностированием и резервированием каналов передачи информации / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». – Вып. 5. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – № 4. – С. 55–61

3. Цытович, Л.И. Разветвляющие преобразователи с однотактной широко- и частотно-широотно-импульсной модуляцией / Л.И. Цытович, В.И. Абушаев, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина // Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». – Вып.5. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – № 4. – С. 62-68.

4. Цытович, Л.И. Многозонные интегрирующие разветвляющие преобразователи с четным числом релейных элементов / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». – Вып. 5. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – №4. – С. 69–72.

5. Цытович, Л.И. Система управления асинхронным электроприводом водоснабжения жилого здания с автоматическим резервированием каналов регулирования / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина, М.М. Дудкин // Проблемы

энергетики. Известия высших учебных заведений: сб. науч. тр. – Казань, 2005, – № 5–6, – С. 47–52.

6. Цытович, Л.И. Дискретно перестраиваемый в функции электрического сигнала фильтр на основе многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». – Вып.6. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – № 9 – С.114–116.

7. Терещина, О.Г. Анализ статических характеристик линии связи с широтно- и частотно-широотно-импульсными носителями информации / О.Г. Терещина, В.И. Абушаев, А.Ю. Шейн, М.М. Дудкин // Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». – Вып.6. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – № 9, – С. 103 – 107.

8. Цытович, Л.И. Многозонная система управления группой электроприводов с автоматическим переводом силового электрооборудования в режим холодного резерва / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – Вып. 6. – № 9, – С. 97 – 99.

9. Цытович, Л.И. Система управления группой асинхронных электроприводов с самодиагностированием и автоматическим резервированием каналов регулирования. / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина, М.М. Дудкин // Электротехника. 2006. – №11. – С. 38 – 44.

Другие научные публикации по теме диссертации

10. Цытович, Л.И. Многозонный интегрирующий развертывающий преобразователь и однопроводная линия передачи логических данных на его основе / Л.И. Цытович, В.И. Абушаев, О.Г. Терещина // Механика и процессы управления: сб. науч. тр. – Екатеринбург, 2004. Т.2. – С. 338–346.

11. Терещина, О.Г. Система управления группой из нечетного числа асинхронных электроприводов водяных насосов / О.Г. Терещина // Состояние и перспективы развития энерготехнологий: сб. науч. тр. – Иваново, 2005. Т.1. – С. 203.

12. Цытович, Л.И. Система управления группой асинхронных электроприводов водяных насосов с автоматическим резервированием каналов регулирования / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Электроприводы переменного тока: сб. науч. тр. – Екатеринбург, 2005. – С. 107–110.

13. Терещина, О.Г. Анализ статических погрешностей многозонного развертывающего преобразователя с частотно-нулевым сопряжением модуляционных зон / О.Г. Терещина // Электротехнические системы и комплексы: межвузовский сб. науч. тр. / под ред. С.И. Лукьянова.– Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Т.И. Носова», 2005, – Вып.11. – С. 145–154.

14. Цытович, Л.И. Развертывающие преобразователи с автоматическим диагностированием и резервированием каналов передачи информации / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Повышение эффективности средств обработки

информации на базе математического моделирования: сб. науч. тр. – Тамбов, 2004, Ч. 2. – С. 648–656.

15. Терещина, О.Г. Анализ динамических характеристик многозонных развертывающих преобразователей с частотно-нулевым сопряжением модуляционных интегрирующих зон / О.Г. Терещина // Электротехнические системы и комплексы: межвузовский сб. науч. тр. / под ред. С.И. Лукьянова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Т.И. Носова», 2006. Вып. 13. – С. 146–155.

16. Терещина, О.Г. Многозонные частотно-широотно-импульсные преобразователи для управления группой параллельно работающих электроприводов / О.Г. Терещина // XXVI Российская школа по проблемам науки и технологии. Краткие сообщения. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – С. 289–291.

17. Цытович, Л.И. Многозонные системы управления приводами оборотного цикла водоснабжения / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: сб. науч. тр. XI международной конференции. – Крым, Алушта 2006. Ч. 2. – С. 55–56.

18. Терещина, О.Г. Сравнительный анализ надежности однозонных и многозонных интегрирующих развертывающих преобразователей / О.Г. Терещина // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. – Нижний Новгород, 2006. т.59. –С. 71–75.

Список патентов

19. Пат. 2275723 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 7/00. Устройство защиты тиристорного преобразователя / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина – № 2005100929; заявл. 17.01.2005; опубл. 27.04.2006, Бюл. –№ 12. – 7 с.

20. Пат. 2276449 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 5/46, Н 02 Р 1/54. Система управления группой электроприводов / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина – № 2005103075; заявл. 07.02.2005; опубл. 10.05.2006, Бюл. –№ 13. – 9с.

21. Пат. 2282245 Российская Федерация, МПК G08C 15/00, G05B 9/03. Многозонный развертывающий преобразователь / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина. – № 2005114204; заявл. 11.05.05; опубл. 20.08.06, Бюл. № 23. – 9с.

Терещина Олеся Геннадьевна

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ КАНАЛАМИ
РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОЗОННЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ
РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

Подписано в печать 26.03.2007. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 80 экз. Заказ 56/108.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск,
пр. им. Ленина, 76.