

Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Владивостокский государственный
университет экономики и сервиса»

На правах рукописи



САЧКО МАКСИМ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ОБУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ
СИНТЕЗУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Специальность 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель - доктор
технических наук, профессор,
Кривошеев В.П.

Владивосток - 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
ГЛАВА 1. ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	10
1.1 Управление персоналом в автоматизированных системах управления предприятием	10
1.1.1 Автоматизированные системы управления и обслуживающий их персонал в нефтехимической промышленности (на примере ОАО «НК Роснефть- КНПЗ»).....	14
1.1.2 Автоматизированные системы управления и обслуживающий их персонал в теплоэнергетике (на примере филиала «Амурская генерация» ОАО «ДГК»)..	21
1.1.3 Интеллектуализация контроля, формирования и закрепления компетенций персонала для промышленного производства	26
1.2 Автоматизация решения задач по допуску к производству в системе управления персоналом	28
1.2.1 Автоматизация самостоятельного изучения параметрического синтеза систем автоматического управления.....	31
1.2.2 Применение экспертных систем для обучения	34
1.3 Повышение эффективности и качества управления производственным процессом на основе контроля, формирования и закрепления ключевых компетенций обслуживающего АСУТП персонала	41
1.4 Выводы по первой главе	44
ГЛАВА 2. ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ	

АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.....	45
2.1 Интеллектуализация контроля проведения параметрического синтеза.....	45
2.2 Структура экспертной обучающей системы «Студиум».....	63
2.3 Вывод по второй главе	68
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	70
3.1 Особенности параметрического синтеза систем автоматического управления.....	70
3.2 Параметрический синтез одноконтурной системы автоматического управления.....	78
3.2.1 Теоретические основы синтеза одноконтурной системы автоматического управления.....	78
3.2.2 Программная реализация синтеза одноконтурной системы автоматического управления.....	84
3.3 Параметрический синтез комбинированной системы автоматического управления.....	85
3.3.1 Теоретические основы синтеза комбинированной системы автоматического управления.....	91
3.3.2 Программная реализация синтеза комбинированной системы автоматического управления	103
3.4 Параметрический синтез каскадной системы автоматического управления.....	108
3.4.1 Теоретические основы синтеза каскадной системы автоматического управления.....	108
3.4.2 Программная реализация синтеза каскадной системы автоматического управления.....	112
3.5 Выводы по третьей главе	121

ГЛАВА 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОБУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ СИНТЕЗУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	122
4.1 Моделирование экспертной обучающей системы	122
4.1.1 Модель нечёткого вывода для обучения параметрическому синтезу одноконтурных систем автоматического управления.....	122
4.1.2 Модель нечёткого вывода для обучения параметрическому синтезу комбинированной системы автоматического управления.....	125
4.2 Использование экспертной обучающей системы при самообучении	129
4.3 Экономический эффект от внедрения экспертной обучающей системы на производстве	134
4.4 Выводы по четвертой главе	140
Заключение по диссертационной работе	141
Список сокращений и условных обозначений.....	143
Список литературы	144
Приложение 1	162
Приложение 2	171
Приложение 3	190
Приложение 4	194

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы автоматизации производства позволяют обеспечить непрерывный производственный процесс в режимах с наилучшими технико-экономическими показателями по объёму производства, качеству выпускаемой продукции и энергосбережению. При этом уменьшается доля участия человека в производственном процессе и возрастает необходимость в высококвалифицированных специалистах по созданию и сопровождению систем автоматического управления (САУ) технологическими процессами (ТП).

Эффективность функционирования систем автоматизации производства напрямую зависит от компетентности оперативно-диспетчерского персонала (ОДП), которые обслуживают эти системы. С целью повышения качества обслуживания САУ ТП необходимо контролировать и повышать уровень знаний (УЗ) ОДП в ключевых для него областях знаний.

За качество и компетентность специалистов предприятия отвечают системы управления персоналом (Human Resources Management – HRM). За автоматизацию подобных задач отвечают автоматизированные системы управления (АСУ) класса HRM, функции которых пересекаются с работой автоматизированных систем управления производствами (АСУП). Несмотря на актуальность и экономическую эффективность АСУ класса HRM, её задачи мало исследованы российскими учеными, особенно в вопросах оценки и повышения УЗ ОДП.

Одной из основных компетенций ОДП являются знания и умения проведения структурного синтеза (СС) и параметрического синтеза (ПС) САУ. СС, как правило, проводится один раз на этапе проектирования, а необходимость проведения ПС САУ существует на всех этапах её функционирования. По этой причине для ОДП знания методик проведения ПС САУ является важным компонентом его профессиональных компетенций. Таким образом, контроль, формирование и закрепление компетенций (КФЗК) ОДП является важными задачами HRM, выполнение которых положительно

влияет на качество функционирования САУ ТП. При этом, в условиях непрерывной занятости ОДП на производстве, автоматизация задач HRM возможна за счет применения современных средств организации и интеллектуализации самообучения персонала.

Эффективными и широко используемыми средствами организации самостоятельного обучения являются автоматизированные обучающие системы (АОС), организованные на базе информационных и коммуникационных технологий (ИКТ). В свою очередь, использование нечеткой логики позволяет интеллектуализировать действия обучающего, что при совместном использовании с АОС делает организацию самообучения более эффективной.

Проведенный анализ научных работ по ПС САУ показал отсутствие решений, направленных на интеллектуализацию его изучения. Имеет место противоречие, состоящее в необходимости самостоятельного изучения принципов ПС САУ с одной стороны, и отсутствием средств и методов эффективной его организации посредством интеллектуализации с другой стороны.

По этой причине интеллектуализация обучения ПС САУ ТП является **актуальной задачей**.

Объектом исследования является автоматизированная система управления персоналом промышленного предприятия на примере предприятий нефтехимической промышленности и теплоэнергетики. Теоретические исследования, проводимые в работе, основаны на методах интеллектуализации обучения на основе нечеткой логики. Экспериментальная проверка теоретических результатов выполнялась средствами численного моделирования в среде MATLAB и FuzzyTECH.

Целью работы является повышение эффективности работы системы управления персоналом за счёт интеллектуализации её задач по контролю, формированию и закреплению компетенций ОДП в области теории автоматического управления (ТАУ) и ПС САУ, в частности.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**.

1. Определено место контроля, формирования и закрепления компетенций ОДП, обслуживающего автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУТП), в структуре АСУ предприятия.

2. Проанализированы методы и средства проведения ПС САУ, способы интеллектуализации КФЗК и сформулированы требования к построению интеллектуальной системы для КФЗК ОДП по ПС САУ.

3. Проведена алгоритмизация частотных методов ПС и их реализация на примере одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ.

4. Разработан и алгоритмизирован аналитический метод расчёта компенсирующих устройств для комбинированных САУ.

5. Разработан метод интеллектуализации контроля уровня знаний ПС одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ.

6. Создана интеллектуальная система для КФЗК ОДП по ПС САУ ТП, а также проверена ее эффективность и определен экономический эффект от ее внедрения.

При решении поставленных задач были использованы следующие **методы исследования:**

– теоретические (анализ учебной, технической, научно-методической и психолого-педагогической литературы по проблеме исследования; анализ программ и учебных пособий, применяющихся при изучении ПС САУ);

– общенаучные (анализ процесса самостоятельного обучения, обобщение педагогического опыта преподавателей, в том числе личного);

– аналитические (аналитический вывод математических выражений теории управления к легко реализуемому на ЭВМ виду);

– алгоритмические (применение методов инженерии программного обеспечения и объектно-ориентированного подхода в программировании).

В работе защищаются следующие основные положения, представляющие **научную новизну.**

1. Метод проектирования интеллектуализированной системы КФЗК ОДП АСУТП на основе теории нечёткой логики, в которой реализованы новые

методы расчета настроечных параметров регулирующих и компенсирующих устройств типовых САУ.

2. Аналитический метод расчёта реальных компенсаторов и развязывающих устройств в виде типовых звеньев для обеспечения возможности интеллектуализации проведения ПС комбинированных САУ обслуживаемым АСУТП персоналом.

3. Аналитический метод расчёта расширенной амплитудно-фазовой характеристики (РАФХ) по передаточной функции с полиномами любого порядка на основе бинома Ньютона для обеспечения возможности алгоритмизации частотных методов ПС САУ.

Практическую ценность представляет собой разработанная кроссплатформенная экспертная обучающая система (ЭОС), предназначенная для организации повышения квалификации и контроля базовых знаний ОДП по ТАУ без отрыва от производства.

Полученные результаты могут использоваться для повышения эффективности автоматизированных систем управления персоналом нефтехимического производства, теплоэнергетики и других промышленных производств.

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав основного текста, заключения, списка используемых источников, состоящего из 169 наименований. Текст работы изложен на 198 странице, включая 53 рисунков, 14 таблиц и 4 приложения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи, определены методы решения задач, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, сведения о практическом использовании результатов работы, структура и краткое содержание работы.

В первой главе рассматриваются вопросы использования HRM-систем и их место в структуре АСУ промышленных предприятий на примере

нефтехимической промышленности и теплоэнергетики. Выделены наиболее часто встречаемые САУ АСУТП ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» и ОАО «Дальневосточная генерирующая компания» («ДГК»). Рассмотрены средства интеллектуализации КФЗК обслуживающего САУ ТП персонала.

Во второй главе исследована возможность интеллектуализации контроля проведения ПС САУ ТП при помощи нечеткой логики.

В третьей главе рассматриваются методы ПС САУ и их алгоритмизация. Рассматривается методика расчета расширенной амплитудно-фазовой характеристики и интегрального квадратичного критерия для систем, содержащих звенья чистого запаздывания, с произвольными степенями полиномов числителя и знаменателя передаточной функции. Здесь также описывается ПС одноконтурной, каскадной и комбинированной САУ.

В четвертой главе приводятся результаты проверки работоспособности и эффективности созданной экспертной обучающей системы (ЭОС) и расчёт экономического эффекта от её внедрения в ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» и в филиале ОАО «ДГК» «Амурская генерация».

В приложениях приведены: примеры ПС комбинированной САУ; блок-схемы алгоритмов ЭОС для контроля, формирования и закрепления знаний и умения проведения ПС одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ ТП; копии актов внедрения результатов диссертационной работы.

ГЛАВА 1

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Управление персоналом в автоматизированных системах управления предприятием

Ни одно крупное промышленное производство не может сейчас обойтись без использования автоматизированных систем управления (АСУ). АСУ применяются на различных уровнях функционирования предприятия, начиная от управления производственным процессом и заканчивая управлением экономическими и человеческими ресурсами предприятия.

Согласно [50], [148], [158] АСУ предприятия можно представить в виде иерархической структуры (рисунок 1.1), состоящей из двух основных сегментов: автоматизированной системой управления технологическим процессом в её основании и автоматизированной системой управления производствами в её вершине.



Рисунок 1.1 - Общая структура управления предприятием

Согласно [164] к АСУП относятся системы планирования и управления предприятием ERP (Enterprise Resource Planning) и производственные исполнительные системы MES (Manufacturing Execution Systems). Наиболее развитые системы ERP выполняют различные бизнес-функции, связанные с планированием производства, закупками, сбытом продукции, анализом перспектив маркетинга, управлением финансами, персоналом, складским хозяйством, учётом основных фондов и т. п. MES предназначена для решения оперативных задач управления производством.

В состав АСУТП входит диспетчерская система сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления в реальном времени. Непосредственное программное управление технологическим оборудованием осуществляется с помощью датчиков и регуляторов на основе систем автоматического управления (САУ) технологическими процессами (ТП). Самый нижний уровень предназначен для организации связи между технологическим объектом и управляющими устройствами.

Задачи АСУТП являются наиболее исследованными в сфере автоматизации производства по сравнению с задачами АСУП. Более детально состав АСУП представлен в работах [5], [44], [106], [128], [149], согласно которым в ее состав должны входить функции:

- технико-экономического планирования;
- управления материально-технического снабжения;
- управления механизацией и транспортом;
- бухгалтерского учета и финансовой деятельности;
- управления трудом и кадрами (включая охрану труда и технику безопасности, обучение, тренировку и повышение квалификации персонала);
- общего управления.

Анализ функций АСУП показал, что согласно работам [21], [81], [89], [93] одной из перспективных и мало исследованных функций АСУП является управление трудом и кадрами (управление персоналом).

Из определения термина «управление персоналом» (от английского human resources management, HRM) [146] следует, что системы управления персоналом (HRM-системы) занимаются контролем качества персонала, обслуживающего предприятие. Также можно отметить, что согласно выше представленным работам, к задачам, автоматизируемым HRM-системой при управлении трудом и кадрами относятся:

- учет состава и движения кадров;
- повышение квалификации персонала с помощью учебных программ;
- обучение и тренировка оперативного-диспетчерского и оперативно-ремонтного персонала;
- контроль профессиональных знаний персонала;
- составление планов-графиков, контроль и учет проверки знаний, учеба персонала;
- учет и анализ травматизма и несчастных случаев;
- учет отпусков и больничных листков;
- учет и анализ нарушений правил технической эксплуатации, правил техники безопасности и пожарной безопасности;
- подготовка отчетности по труду и кадрам.

Среди задач автоматизации управления персоналом можно выделить следующие действия по допуску персонала к производству (рисунок 1.2):

- аттестация (контроль компетенций персонала и определения соответствия занимаемой должности);
- формирование кадрового резерва по результатам аттестации;
- организация обучения и повышения квалификации.

Нужно отметить, что авторы приведённых выше работ, посвящённых системам управления персоналом, в основном концентрируют своё внимание на автоматизации контроля компетенций персонала и их соответствия требованиям занимаемой ими должности. В этих работах не уделяется внимания способам повышения квалификации персонала и закрепления знаний, необходимых для выполнения своих должностных обязанностей.

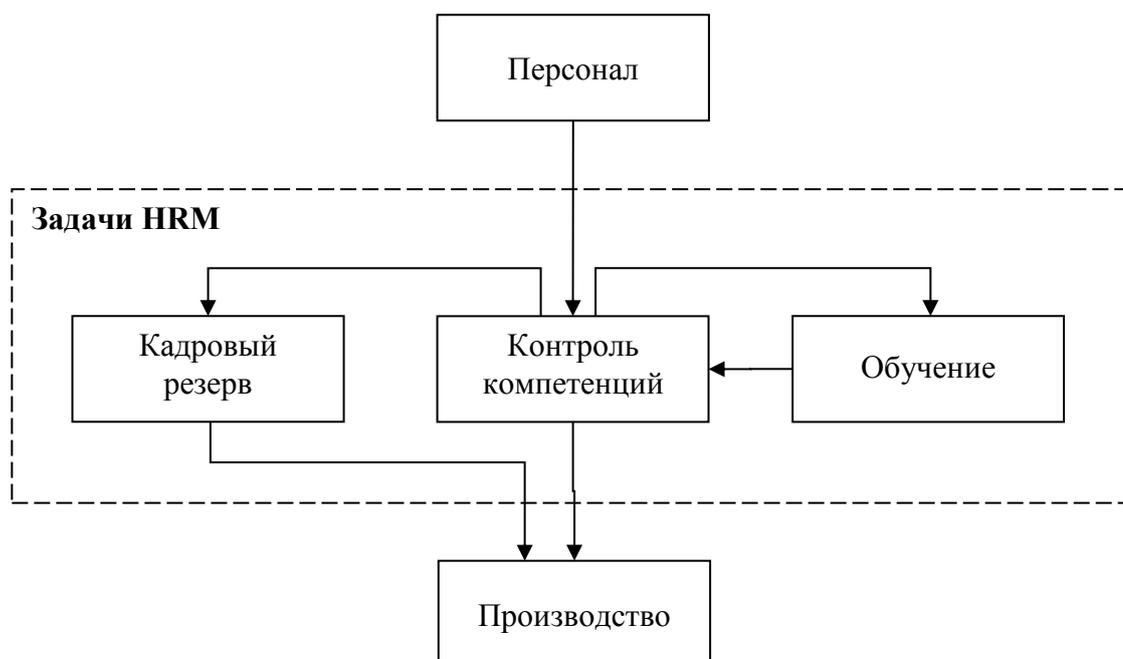


Рисунок 1.2 – Основные задачи системы управления персоналом

На современных производствах, к примеру, в нефтехимической промышленности и в теплоэнергетике использование систем автоматизации на производстве уменьшает количество персонала, непосредственно участвующего в производственном процессе. В связи с этим наиболее важной задачей для HRM-систем данных производств является контроль качества персонала, задействованного в создании и сопровождении АСУТП. Таким образом, качество выполнения задач HRM-систем в АСУП влияет и на качество работы АСУТП.

Анализ нормативных документов [100], [139], [140] и работ [76], [141] посвященных функционированию и обслуживанию АСУТП в нефтехимической промышленности и теплоэнергетике, показал, что персонал обслуживающий работу АСУТП, делится на 2 основные категории:

- оперативно-диспетчерский (технологический) персонал;
- эксплуатационный (обслуживающий) персонал.

Оперативно-диспетчерский персонал участвует непосредственно в принятии решений по управлению технологическим процессом.

Эксплуатационный персонал обеспечивает техническую исправность системы и поддерживает её функционирование согласно требованиям и нормам

работы АСУТП.

Оперативно-диспетчерский персонал (ОДП) непосредственно влияет на работу АСУТП и, как следствие, на весь производственный процесс. Одними из важнейших компетенций ОДП являются знания и умения определять оптимальные параметры регулирующих и компенсирующих устройств в САУ.

Рассматриваемые в работе одноконтурные, каскадные и комбинированные САУ широко используются при управлении технологическими процессами во многих отраслях промышленности. Интеллектуализация обучения параметрическому синтезу САУ может быть использована для автоматизации выполнения выше описанных задач HRM-систем по отношению к ОДП предприятий, например, в нефтехимической промышленности, а также в электроэнергетике на конденсационных электростанциях и теплоэлектроцентралях.

1.1.1 Автоматизированные системы управления и обслуживающий их персонал в нефтехимической промышленности (на примере ОАО «НК Роснефть-КНПЗ»)

На современном этапе развития нефтехимической промышленности часто возникает вопрос [104] о необходимости укрепления и воссоздания материально-технической базы подготовки кадров на новой учебно-технологической и методической основе, развития внутрифирменного обучения, повышения значимости периодической аттестации персонала, оказывающего непосредственное влияние на качество производства.

Согласно [45] нефтеперерабатывающий завод (НПЗ) не может обойтись без автоматизации производства и, соответственно, персонала, обслуживающего САУ ТП. Качество выпускаемой НПЗ продукции напрямую зависит от работы АСУ ТП и квалификации персонала, обслуживающего САУ и контрольно-измерительные приборы (КИП).

В качестве примера можно привести Комсомольский нефтеперерабатывающий завод (КНПЗ), расположенный в городе Комсомольск-на-Амуре Хабаровского края. Он является частью вертикально

интегрированной структуры компании «Роснефть» с момента ее основания. На заводе, по данным на 2014 год, работает более 1000 человек, из которых около 20 % заняты в АСУ предприятия.

По данным компании ОАО «НК «Роснефть»» [19], [20], [36], [101] в связи с быстрым темпом роста производства и вводом в эксплуатацию новых технологических объектов и установок (в частности, установки замедленного коксования) на 306 человек или на 19,9% увеличилось количество промышленных работников предприятия (по данным за 2012-2013 гг.). По сравнению с 2012 годом доля специалистов, обслуживающих технологические объекты предприятия, увеличилась на 0,7% (рисунок 1.3).

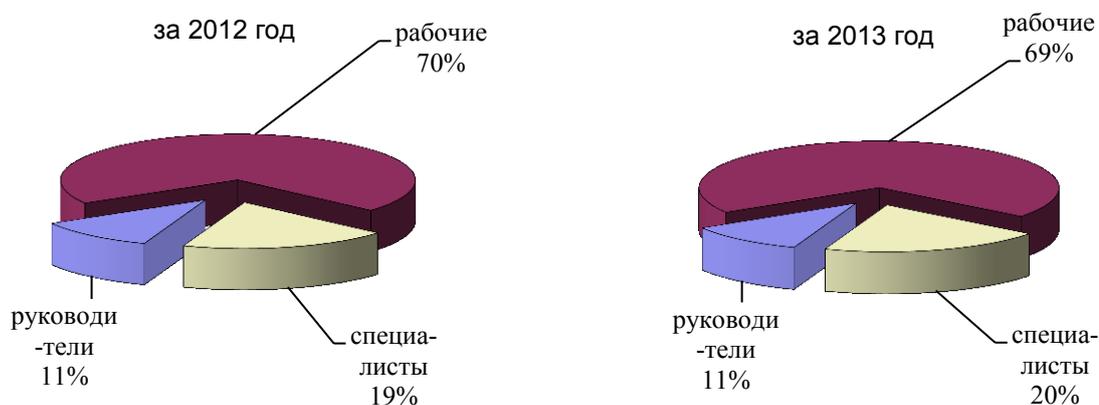


Рисунок 1.3 - Сравнительная структура промышленного персонала КНПЗ 2012 и 2013 годов

При этом, несмотря на увеличение численности работников и роста производственных мощностей Комсомольского НПЗ, наблюдается уменьшение количества выпускаемого нефтепродукта [56]. Данный факт обусловлен рядом причин: перебоями в поставке нефти, авариями на производстве, ремонтом и модернизацией оборудования, недостаточной подготовленностью персонала и т.д. На многие негативные факторы, включая и человеческий фактор, влияющие на качество и количество выпускаемой продукции, а также на энергоэффективность производства, можно оказать воздействия. Уменьшение человеческого фактора, как правило, происходит за счет автоматизации производства, но и при этом полностью его исключить не возможно.

Оперативно-диспетчерский персонал, обслуживающий АСУТП, вносит в данную человеко-машинную систему свой фактор риска. От их компетентности зависит качество работы систем автоматизации и всего производства.

За обеспечением Комсомольского НПЗ квалифицированным персоналом отвечает отдел кадров и технического обучения (ОКиТО). Как отмечено в [79], задачи обучения и контроля компетенций персонала являются ключевыми для всего предприятия. Ключевыми, в плане автоматизации производства, являются отделы АСУП и АСУТП (рисунок 1.4). Для обеспечения данных отделов высококвалифицированным персоналом ОКиТО необходимо с помощью HRM-системы контролировать уровень квалификации специалистов данных отделов.

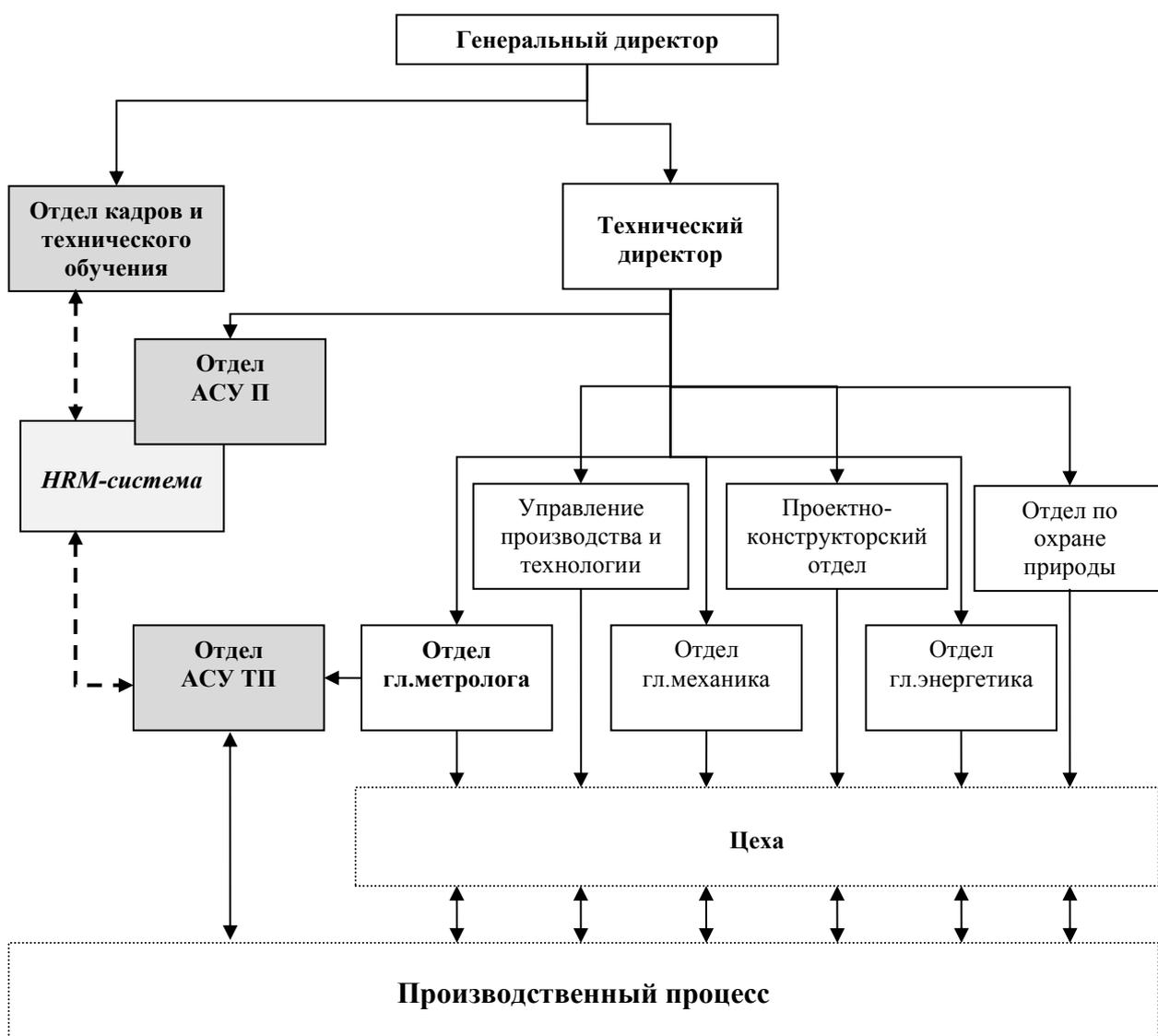


Рисунок 1.4 – Интеграция модуля интеллектуализации обучения и контроля уровня знаний в структуру ОАО «НК Роснефть-КНПЗ»

С учетом естественной текучести кадров, а также планового роста производства, НПЗ постоянно требуются новые кадры, подбором которых занимается ОКИТО.

За годы своего существования КНПЗ неоднократно реконструировался и совершенствовался. В настоящее время в составе завода эксплуатируются:

- установки первичной переработки нефти ЭЛОУ-АВТ-2 и ЭЛОУ-АВТ-3;
- установка каталитического риформинга бензина Л-35/11-450;
- установка изомеризации легкой нефти;
- установка гидроочистки дизельного топлива;
- блок предварительного фракционирования;
- блок производства серы;
- установка замедленного коксования.

На рисунке 1.5 приведена принципиальная блок-схема переработки нефти на ООО «НК Роснефть-КНПЗ». Переработка нефти осуществляется в следующей последовательности:

- сырая нефть готовится к переработке на электрообессоливающих блоках установок ЭЛОУ-АВТ -2,3, где из нефти удаляются соли и вода;
- подготовленная на блоках ЭЛОУ нефть разгоняется на фракции на блоках АВТ с получением прямогонных бензинов, лигроиновых и дизельных фракций, вакуумного газойля и гудрона;
- поступающие с установок первичной переработки нефти прямогонный бензин фр. НК-160°С служит сырьем блока предварительного фракционирования на узкие фракции – компоненты товарных бензинов и сырье установки риформинга.
- компоненты прямогонного дизельного топлива являются сырьем установки гидроочистки, где получают дизельное топливо с высоким цетановым числом;
- фр.100-160°С является сырьем установки риформинга, где получают высокооктановые компоненты для производства автомобильных бензинов;
- фр. 30-75°С, получаемая на блоке предварительного фракционирования,

перерабатывается на установке изомеризации с получением высокооктанового компонента бензина;

- сырьем для коксования служат тяжелые нефтяные остатки (гудрон), получающиеся в результате атмосферно-вакуумной перегонки нефти;

- кислый газ и аммиак, образующиеся в процессе гидроочистки ДТ и при утилизации кислой воды, являются сырьем установки по производству серы. Основным технологическим объектом в узлах разделения всех выше перечисленных стадий переработки нефтепродукта является ректификационная колонна (РК).

На процесс ректификации приходится до 40% энергозатрат из всех процессов нефтепереработки и нефтехимии [60]. В связи с этим, качественный процесс стабилизации технологических параметров РК на требуемых значениях приводит к повышению эффективности за счёт снижения энергетических затрат при получении продуктов требуемого качества или за счёт увеличения отбора целевых продуктов требуемого качества [60].

Для обеспечения стабильной работы РК обслуживающему её персоналу необходимо владеть навыками и знаниями проведения ПС САУ, участвующих в её работе. Наиболее часто для автоматизации РК используются одноконтурные, каскадные и комбинированные САУ.

Применение одноконтурных, каскадных и комбинированных систем при управлении процессом ректификации описано в ряде работ [33], [155], [157], которые до настоящего времени являются наиболее содержательными по автоматизации процесса ректификации. Например, в работе [33] по автоматизации ректификационных установок выделен раздел 2.5.1. В работе [155] регулированию процесса ректификации посвящена глава XI, а в работе [157] четырнадцатая глава содержит оба раздела, посвящённых автоматизации процесса ректификации: часть 1 – обзор схем регулирования, часть 2 – динамические характеристики дистилляционных колонн.

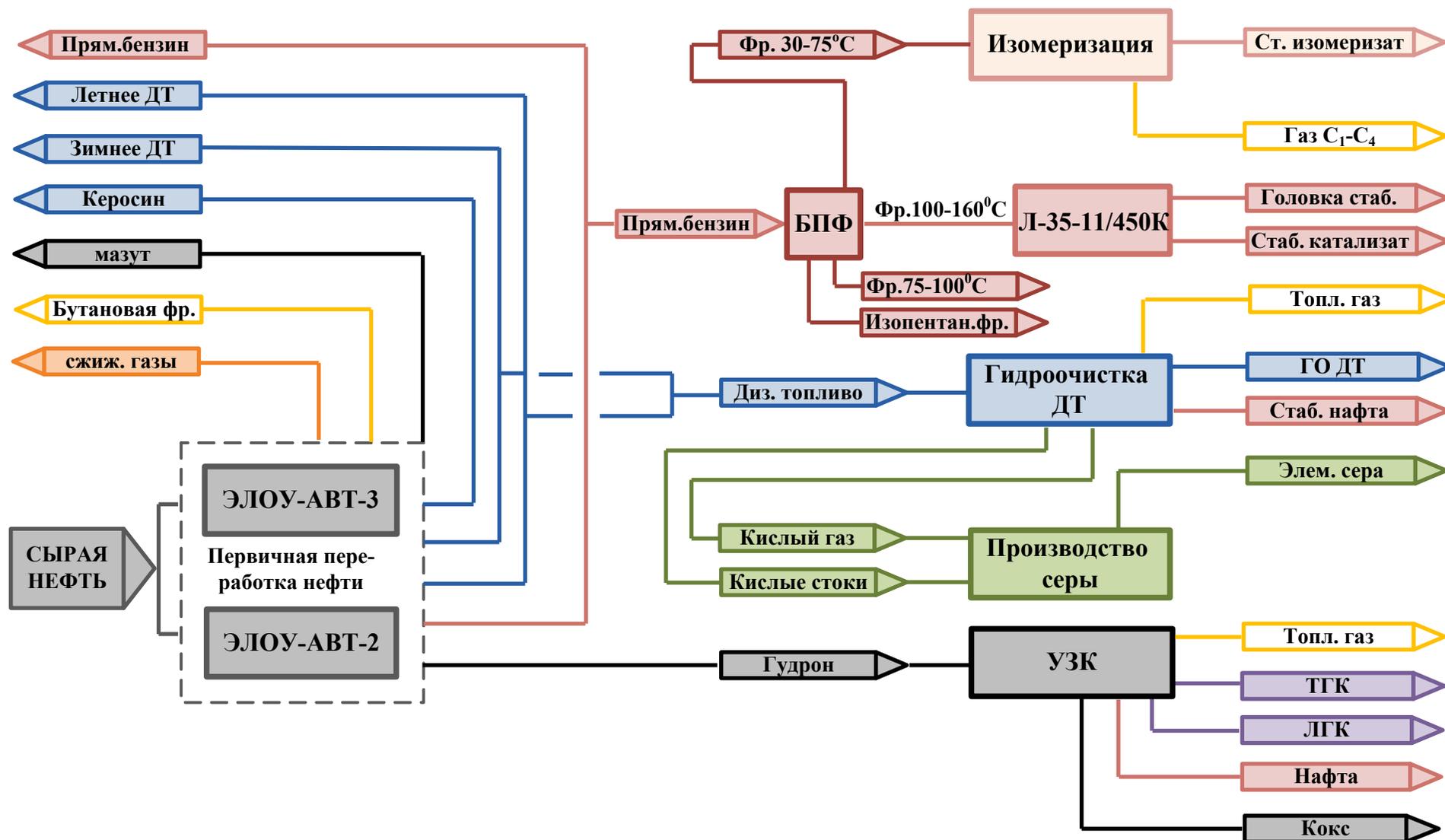


Рисунок 1.5 - Принципиальная блок-схема переработки нефти на ООО «НК Роснефть-КНПЗ»

На рисунке 1.6 приведена схема простой РК с одним вводом питания и отбором продуктовых потоков из верхней и нижней частей колонны [2].

Сущность процесса ректификации состоит во взаимодействии на контактных устройствах паровой и жидкой фаз встречных неравновесных потоков. Паровой поток создаётся при испарении части жидкости, поступающей в низ РК. Поток жидкости образуется при конденсации паров, приходящих в верх РК. В результате теплообмена и массообмена на контактном устройстве компоненты с низкой температурой кипения переходят из жидкой в паровую фазу, а компоненты с высокой температурой кипения из паровой фазы переходят в жидкую фазу. После многократного тепло- и массообмена на ступенях разделения из РК выходят продукты в виде дистиллята, обогащённого легколетучими (с низкой температурой кипения) компонентами, и в виде кубового продукта, обогащённого труднолетучими (с высокой температурой кипения) компонентами.

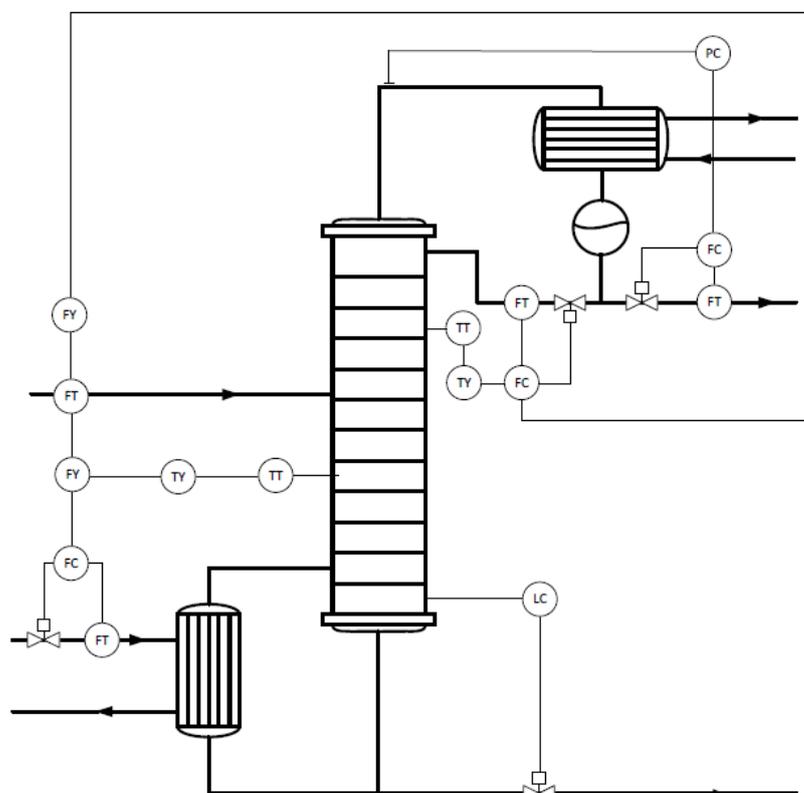


Рисунок 1.6 - Система управления ректификационной колонной (*FT* – расходомер; *FC* – регулятор расхода; *FY* – программный модуль вычисления запаздывания регулирования; *TT* – датчик температуры; *TU* – программный модуль вычисления изменения температуры; *PC* – регулятор давления; *LC* – регулятор уровня)

В приведенной на рисунке 1.6 схеме одноконтурные системы используются для регулирования уровня в кубе колонны изменением отвода кубовой жидкости. Для регулирования давления в колонне применена каскадная система стабилизации отвода дистиллята с коррекцией по давлению в колонне. Каскадные и комбинированные системы в совокупности решают здесь следующие задачи:

- регулирование расхода греющего пара в зависимости от расхода питания с коррекцией по температуре на нижней контрольной тарелке;
- регулирование расхода флегмы в зависимости от расхода питания с коррекцией по температуре на верхней контрольной тарелке.

1.1.2 Автоматизированные системы управления и обслуживающий их персонал в теплоэнергетике (на примере филиала «Амурская генерация» ОАО «ДГК»)

Анализ АСУ предприятий электроэнергетической отрасли [4], [9], [22], [75], [95], [106], показывает высокую востребованность и эффективность их использования на производстве. Подобные АСУ создаются с целью повышения экономичности, надежности и качества теплоснабжения за счет автоматизации и соответствующего повышения эффективности управления основными видами деятельности теплоснабжающих предприятий [106]. При этом, качество их работы напрямую зависит от обслуживающего их персонала.

По данным РАО «ЕЭС России» [8], [82], [83], [84] отмечено, что из-за не квалифицированных и ошибочных действий обслуживающего ТЭЦ персонала достаточно велик процент отказов и аварий на производстве.

Согласно [103] одним из направлений успешного продления срока службы и увеличения эффективности работы оборудования и АСУ ТЭЦ является повышение качества подготовки и повышения квалификации персонала, обслуживающего АСУТП, что обеспечивает снижение отказов и аварийных ситуаций по вине персонала. В работе отмечается, что многие аварии, повреждения и технологические нарушения в работе оборудования ТЭЦ происходят из-за недостаточной квалификации и низкого уровня остаточных

знаний обслуживающего его персонала. Таким образом, контроль и повышение уровня знаний персонала ТЭЦ и его квалификации является важной задачей предприятия.

В типовой структуре управления ТЭЦ (рисунок 1.7) можно выделить подразделения, отвечающие за качество персонала, такие как отделы управления персоналом, повышения квалификации и автоматические системы сопровождения их деятельности.

АСУТП ТЭЦ является многоуровневой системой управления, состоящей из персонала и комплекса средств автоматизации. Она осуществляет управление технологическим процессом на оборудовании ТЭЦ в реальном времени [105].

Согласно [105] АСУТП ТЭЦ состоит из следующих элементов:

- АСУТП общестанционного уровня управления ТЭЦ;
- локальные АСУТП (АСУТП энергоблоков, АСУТП открытого (закрытого) распределительного устройства высокого напряжения и другого общестанционного технологического оборудования).

Основными системами управления на ТЭЦ являются АСУТП энергоблоков, взаимодействующие с вышестоящей АСУТП - АСУТП общестанционного уровня управления ТЭЦ (при ее наличии), а при необходимости и с другими смежными локальными АСУТП ТЭЦ.

АСУТП общестанционного уровня управления ТЭЦ взаимодействует с АСУ вышестоящего уровня управления и локальными АСУТП ТЭС, подготавливает и пересылает информацию в АСУП.

Согласно [9] создание АСУ ТП на объектах электроэнергетики обусловлено необходимостью:

- повышения надежности;
- совершенствования уровня эксплуатации;
- повышения экономичности работы основного энергетического оборудования;
- создания комфортных условий работы для оперативно-диспетчерского персонала.

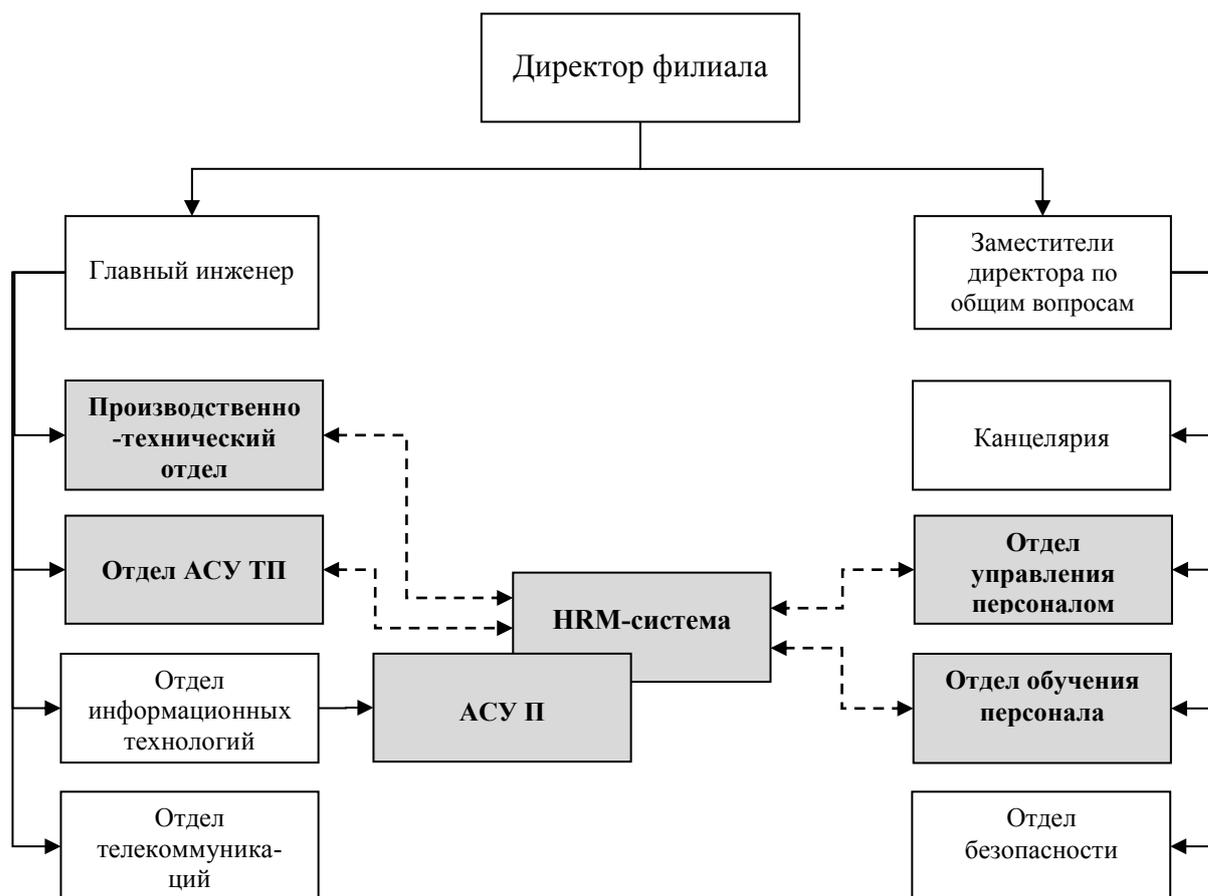


Рисунок 1.7 – Фрагмент организационно-функциональная структура филиала «Амурская генерация» ОАО «ДГК»

При этом автоматизируются следующие функции:

- сбор, контроль достоверности и обработка информации о ходе технологического процесса и представление ее на экране дисплея в форме, удобной оперативно-диспетчерскому персоналу (в виде цифровой индикации, таблиц, графиков и др.);
 - архивирование информации с выводом ее на печать;
 - диагностика состояния основного и вспомогательного оборудования и автоматических устройств;
 - автоматическое управление пускоостановочными режимами котлов, турбин, энергоблоков в комплексе, включая программное изменение технологических параметров, а также отдельных механизмов и устройств (газозадувных горелок, насосов, мельниц и т. п.);
 - автоматическое регулирование технологических параметров

станционного оборудования, а также системных параметров: частоты сети и перетоков мощности;

- автоматическая защита технологического оборудования в аварийных ситуациях путем его останова или снижения нагрузки с целью предотвращения развития аварии и связанных с этим повреждений оборудования;

- дистанционное управление запорно-регулирующей арматурой и механизмами;

- предупредительная и аварийная сигнализация об отклонениях технологических параметров за пределы установленных значений;

- регистрация аварийных ситуаций;

- анализ действия защит;

- расчет технико-экономических показателей (ТЭП) работы оборудования: котлов, турбин, энергоблоков и электростанции в целом для различных интервалов времени;

- коммерческий учет электрической и тепловой энергии.

В зависимости от местных условий, производственной или экономической целесообразности АСУ ТП могут содержать частичный состав перечисленных функций [9].

АСУ в электроэнергетике.

На тепловых конденсационных электростанциях (КЭС) химическая энергия сжигаемого топлива преобразуется в котле в энергию водяного пара, приводящего во вращение турбоагрегат. Механическая энергия вращения турбины преобразуется генератором в электрическую [135].

Основными системами КЭС являются [57]:

- котельная установка;

- паротурбинная установка;

- топливное хозяйство;

- система золо- и шлакоудаления, очистки дымовых газов;

- электрическая часть;

- техническое водоснабжение (для отвода избыточного тепла);

- система химической очистки и подготовки воды.

На рисунке 1.8 показана технологическая схема конденсационной электростанции и теплоэлектроцентрали [111].

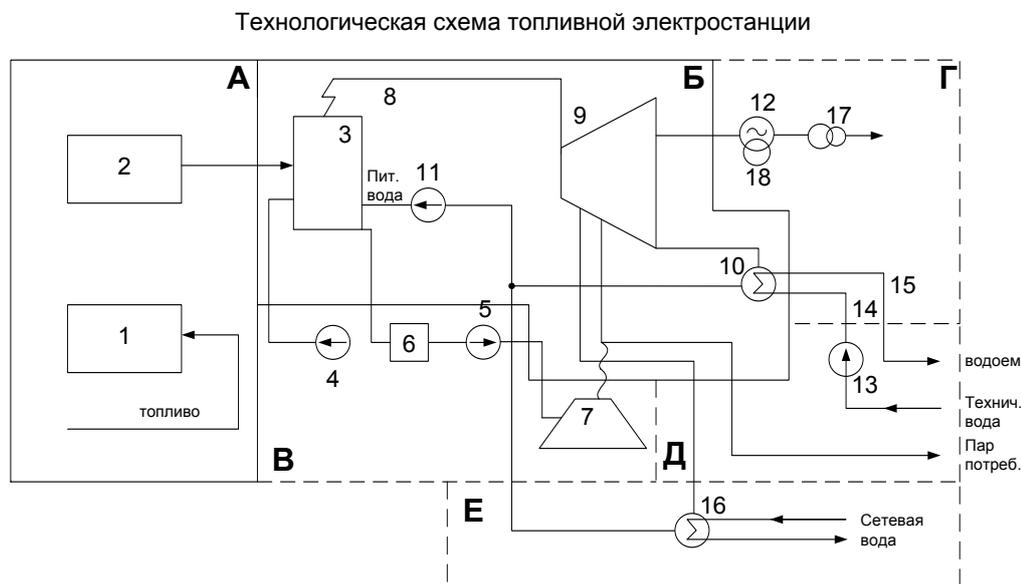


Рисунок 1.8 - Технологическая схема тепловой электростанции

На рисунке 1.8:

А – топливный тракт: 1 – топливopодача (комплекс устройств по разгрузке, транспортировке, хранению и предварительной обработке топлива); 2 – пылеприготовление (размол и сушка);

Б – паровой тракт: 3 – парогенератор; 8 – пароперегреватель; 9 – паровая турбина; 10 – конденсатор; 11 – питательный насос;

В – газовоздушный тракт: 4 – дутьевой вентилятор; 5 – дымосос; 6 – фильтр; 7 – дымовая труба;

Г – электротехническая часть: 12 – электрический генератор; 17 – повышающий трансформатор; 18 – трансформатор собственных нужд;

Д – система технического водоснабжения: 13 – насос; 14 и 15 – водоводы;

Е – теплофикационная часть: 16 – подогреватель сырой воды.

При управлении процессом получения пара согласно [37], [111], [134] на КЭС применяются следующие одноконтурные системы управления:

- стабилизация давления перегретого пара изменением подачи топлива;
- стабилизация температуры перегретого пара изменением впрыска

конденсата;

- стабилизация уровня воды в барабане изменением подачи питательной воды;
- стабилизация разряжения в верхней части топки изменением производительности дымососов;
- стабилизация температуры аэросмеси;
- стабилизация температуры за калорифером;
- стабилизация общего воздуха;
- стабилизация технологических параметров пиковых бойлеров;
- стабилизация подогрева сырой воды.

Для улучшения качества регулирования коэффициента избытка воздуха за пароперегревателем и повышения экономичности процесса применяются системы регулирования расхода воздуха в зависимости от расхода топлива с коррекцией по содержанию кислорода в дымовых газах. Здесь имеет место реализация принципов управления по возмущению со стороны изменения расхода топлива выбором соответствующего вида компенсатора и его оптимальных настроечных параметров, а также реализация принципа управления по отклонению в виде каскадной системы стабилизации расхода воздуха с коррекцией по содержанию кислорода в дымовых газах.

1.1.3 Интеллектуализация контроля, формирования и закрепления компетенций персонала для промышленного производства

Автоматизация контроля, формирования и закрепления компетенций персонала в составе подсистемы управления персоналом АСУП возможна за счёт применения современных образовательных технологий и интеллектуализации данного процесса.

Интеллектуализация в данной работе рассматривается как одно из научных направлений, изучаемых группой наук об искусственном интеллекте. Для её реализации используются интеллектуальные системы.

Согласно [73] интеллектуальная система - это информационно-вычислительная система с интеллектуальной поддержкой, решающая задачи без

участия человека. Она представляет из себя техническую или программную систему, способную решать задачи, традиционно считающиеся творческими, принадлежащие конкретной предметной области, знания о которой хранятся в памяти такой системы [3].

Согласно [46] различают следующие виды интеллектуальных систем.

1. Интеллектуальная информационная система - комплекс программных, лингвистических и логико-математических средств для реализации основной задачи - осуществления поддержки деятельности человека и поиска информации в режиме продвинутого диалога на естественном языке [143].

2. Экспертная система - компьютерная система, способная частично заменить специалиста-эксперта в разрешении проблемной ситуации. Предшественниками экспертных систем были так называемые «интеллектуальные машины», созданные в 1832 году С. Н. Корсаковым в виде механических устройств, позволявших находить решения по заданным условиям, например, определять наиболее подходящие лекарства по наблюдаемым у пациента симптомам заболевания [59].

3. Расчётно-логические системы. К расчётно-логическим системам относят системы, способные решать управленческие и проектные задачи по декларативным описаниям условий. При этом пользователь имеет возможность контролировать в режиме диалога все стадии вычислительного процесса. Данные системы способны автоматически строить математическую модель задачи и автоматически синтезировать вычислительные алгоритмы по формулировке задачи. Эти свойства реализуются благодаря наличию базы знаний в виде функциональной семантической сети и компонентов дедуктивного вывода и планирования.

4. Гибридная интеллектуальная система. Под гибридной интеллектуальной системой принято понимать систему, в которой для решения задачи используется более одного метода имитации интеллектуальной деятельности человека [54].

5. Рефлекторная интеллектуальная система - это система, которая

формирует вырабатываемые специальными алгоритмами ответные реакции на различные комбинации входных воздействий. Алгоритм обеспечивает выбор наиболее вероятной реакции интеллектуальной системы на множество входных воздействий при известных вероятностях выбора реакции на каждое входное воздействие, а также на некоторые комбинации входных воздействий. Данная задача подобна той, которую реализуют нейросети [137].

В настоящей работе для интеллектуализации процесса обучения посредством обучающих систем осуществляется интеллектуальная поддержка действий, необходимых для передачи знаний и определения их уровня.

1.2 Автоматизация решения задач по допуску к производству в системе управления персоналом

Как отмечено выше, одними из основных задач системы управления персоналом при допуске к производству являются контроль компетенций сотрудников предприятия, а также формирование и закрепление компетенций за счет организации их самообучения.

Процесс обучения всегда сложно поддавался автоматизации, т.к. тесно связан с субъективным мнением обучающего. В свою очередь, интеллектуализация действий обучающего позволяет автоматизировать как процесс обучения, так и решение выше перечисленных задач системы управления персоналом.

Одной из самых широко используемых технологий автоматизации обучения являются автоматизированные обучающие системы (АОС). Согласно [35], [138] автоматизированные обучающие системы представляют собой сложные человеко-машинные системы, предназначенные для оптимизации процесса обучения с использованием средств ИКТ на основе автоматизации процессов управления деятельностью обучаемого. При этом в АОС объединяется в одно целое ряд дисциплин: дидактика (научно обосновываются цели, содержание, закономерности и принципы обучения); психология (учитываются особенности характера и душевный склад обучаемого);

моделирование, машинная графика и др.

Применение АОС для повышения уровня усвоения учебного материала, в том числе и при самостоятельной работе обучаемых, рассмотрено в работах: [23], [27], [72], [93], [107], [108], [109], [151] и многих других. Согласно рассмотренным работам, автоматизация образовательного процесса с помощью информационных и коммуникационных технологии является одним из основных способов организации эффективного самообучения.

Рассмотренные работы, посвящённые реализации АОС [1], [14], [15], [24], [53], [58], [65], показывают востребованность и эффективность применения АОС в учебном процессе. При создании большей части рассмотренных АОС используются принципы функционирования электронных учебно-методических комплексов (ЭУМК), иногда совмещённых с системой внутреннего документооборота. Несомненно, что ЭУМК помогают упростить доступ к образовательным материалам и улучшить их качество. Тем не менее, использование ЭУМК не позволяет приблизить качество самообучения к аудиторным занятиям с преподавателем. Таким образом, использование подобных АОС для самообучения не эффективно без использования личного контакта обучаемого с преподавателем. При этом не всегда возможно и целесообразно использование консультаций преподавателя при самообучении. Это имеет место в случае, если количество обучаемых крайне мало, например, при повышении квалификации инженеров по автоматизации ТП на предприятии. В этом случае необходимо организовывать самообучение с минимальным использованием аудиторных занятий или с их полным исключением из образовательного процесса.

Изучение работ по реализации полноценного самостоятельного обучения выявляет необходимость интеллектуализации процессов анализа проведённых учебных заданий, как наиболее зависимых от преподавателя. Интеллектуализация действий преподавателя в рамках учебного процесса позволит переложить его функции на АОС. Таким образом, использование принципов построения интеллектуальных систем при организации АОС

позволяет приблизить уровень самообучения к уровню аудиторных занятий.

Интеллектуальные АОС обычно состоят из множества блоков, в которые входят всевозможные средства для организации самостоятельного обучения. Согласно [156] для обеспечения полного погружения в обучение часто используются системы: «Мультимедиа» и «Виртуальная реальность».

Но, как правило, подобные системы не являются универсальными и их применение возможно только для определённого круга учебных задач. К тому же, реализация систем «Виртуальной реальности» технически сложна. Использование этих систем, с точки зрения финансовых и человеческих ресурсов, часто нецелесообразно.

Для организации процесса самостоятельного обучения без отрыва от производства чаще всего используется система дистанционного обучения (ДО). ДО является обучением на расстоянии, когда преподаватель и обучаемый разделены пространственно и (или) во времени, а учебный процесс осуществляется с помощью ИКТ, главным образом, на основе средств сети Интернет. Многие люди при этом получают возможность повышать образование на дому (например, взрослые люди, обременённые деловыми и семейными заботами, молодёжь, проживающая в сельской местности или в небольших городах). Человек в любой период своей жизни обретает возможность дистанционно получить новую профессию, повысить свою квалификацию и расширить кругозор, причём практически в любом научном или учебном центре мира [156].

Для повышения эффективности системы дистанционного обучения образовательные учреждения стараются максимально воспользоваться всеми достижениями современных информационных технологий в виде электронной почты, телеконференций, электронных досок объявлений и многих других возможностей Интернета. Согласно [156] использование ИКТ в ДО позволяет обеспечить следующие возможности:

- доступ к различным источникам информации через сеть Интернет;
- диалог с преподавателем или с другими участниками обучения в

режиме реального времени;

- совместные проекты и конференции, не ограниченные географическими рамками, позволяющие связать людей в разных уголках планеты.

Технологии, применяемые в ДО, позволяют обеспечивать удалённое взаимодействие всех участников образовательного процесса. При этом, процесс ДО не возможен без участия обучающего. Несмотря на то, что ИКТ позволяют записывать лекционный и практический материал курсов с помощью систем «Мультимедиа», и таким образом уменьшить необходимость проведения занятий преподавателя в «живую», проверка выполненных заданий и уровня знаний обучаемых полностью возложена на обучающего.

Тем не менее, согласно работам [25], [28], [29], [30], [67], [90], [91], [97], [98], [99] технологии, применяемые для создания интеллектуальных систем, позволяют автоматизировать процесс определения уровня знаний обучаемых и возложить его на ЭВМ. С подобными задачами хорошо справляются экспертные системы (ЭС), в том числе и в сфере образования. Такие ЭС называют экспертными обучающими системами (ЭОС). В данных работах отмечено, что использование нечёткой логики для интеллектуализации процесса обучения при помощи экспертных обучающих систем является одним из самых эффективных методов построения интеллектуальных обучающих систем для автоматизации образования.

ЭОС реализуют обучающие функции и содержат знания из определённой достаточно узкой предметной области. ЭОС располагают возможностями пояснения стратегии и тактики решения задачи изучаемой предметной области и обеспечивают контроль уровня знаний, умений и навыков с диагностикой ошибок по результатам обучения [109].

1.2.1 Автоматизация самостоятельного изучения параметрического синтеза систем автоматического управления

АОС в большинстве своем обеспечивают в полной мере самостоятельное изучение только теоретических аспектов предмета, что в особенности для

технических дисциплин не приемлемо. Изучение технической дисциплины невозможно без изучения её практической стороны. Это подтверждается в работах [131], [132], [154]. Также в указанных работах отмечается, что использование электронных лабораторных практикумов в составе АОС позволяет изучать практическую часть предмета наравне с теорией. Это касается и ПС САУ.

Разработка электронных лабораторных практикумов для изучения и исследования ПС САУ, в том числе и с составе АОС, отмечена в работах [31], [32], [52], [55], [80], [133], [152], [153]. Но используемые в рассмотренных работах технологии не позволяют интеллектуализировать процесс самостоятельного обучения, т.к. они базируются на принципах функционирования электронных учебно-методических комплексов (ЭУМК). Так же в указанных работах рассмотрен достаточно узкий перечень типовых систем управления, применяемых при автоматизации ТП, что ограничивает сферу их применения.

В качестве средств проведения ПС САУ обычно используют специализированные программные комплексы VisSim [167] и MatLab [86].

VisSim - это визуальный язык программирования, предназначенный для моделирования динамических систем, а также проектирования, базирующегося на моделях для встроенных микропроцессоров. VisSim сочетает в себе характерный для Windows интуитивный интерфейс для создания блочных диаграмм и мощное моделирующее ядро [168].

MATLAB - пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноимённый язык программирования, используемый в этом пакете [162].

Одним из наиболее известных учебных средств для изучения предмета «Теория управления», и параметрического синтеза в частности, является учебно-методический комплекс по дисциплине «Теория систем автоматического регулирования и управления», разработанный Н.В. Клиначёвым [52].

Данный электронный учебно-методический комплекс рекомендован в

качестве базового ресурса для организации учебного процесса на кафедрах САУ вузов. Комплекс включает типовую рабочую программу, конспект лекций, адаптированный к компьютерным проекторам, комплект лабораторных работ, тесты, и др. документы. В рамках описанной в [52] структуры занятий, лабораторные исследования проводятся на персональных ЭВМ с применением моделирующих пакетов VisSim и Electronics Workbench.

Для связи практической и лекционной части курса используется ЭУМК [51]. Совокупность учебных моделей в данном ЭУМК разбита на две группы. Ядром являются модели для пакета VisSim, которые не отражают особенности конкретных систем, являются чисто математическими и построены на основе задания структурных схем и передаточных функций. Вторая группа моделей для пакета Electronics Workbench отражает особенности технических решений из схемотехники устройств на операционных усилителях (ОУ). Совокупность работ закрывает потребность в лабораторном практикуме по обыкновенным и особым линейным системам автоматического регулирования.

Данный ЭУМК по дисциплине «Теория систем автоматического регулирования и управления», среди существующих учебных средств по изучению параметрического синтеза, наиболее полно использует потенциал современных информационных технологий. Тем не менее, он не является универсальным продуктом и может использоваться только для дисциплины «Теория систем автоматического регулирования» и смежных с ней. Помимо этого, используемые в нем материалы затруднительно редактировать, что вносит ряд проблем с обновлением устаревшей информации или добавлением новой. Программное обеспечение, так же как и все содержание ЭУМК, не имеют связки друг с другом. Применяемая здесь программа VisSim не позволяет считывать полученные в ней данные для дальнейшей автоматизации их обработки и оценивания. Также в этой программе замечены ошибки при моделировании сложных систем управления, что ограничивает спектр её использования. В работе [51] дана следующая оценка ЭУМК: «материала в теоретическом разделе не достаточно для освоения дисциплины. Его объём

специально ограничен. Раскрытие сути отдельных аспектов теории входит в обязанность лектора. При самообучении студент должен дополнительно пользоваться учебниками».

Анализ выше описанного ЭУМК и аналогичных средств организации обучения параметрическому синтезу систем автоматического управления, организованных на базе специализированных программных комплексов (ПК) VisSim и MatLab, показал: что их использование для организации полноценного самостоятельного обучения невозможно, т.к. требуется обязательный контроль со стороны обучающего. К сожалению, ни одна из существующих систем, направленных на обучение проведения параметрического синтеза, не поддается интеллектуализации, т.к. нет возможности связать лабораторное программное обеспечение с действиями ЭОС.

1.2.2 Применение экспертных систем для обучения

Обучение, по сути своей, является передачей знания и опыта. Знания всегда были одним из самых ценных ресурсов. Их всегда старались сохранить максимально достоверным образом, насколько это было возможно, для того чтобы можно было передать потомкам. Знания передавались с помощью рисунков на стенах пещеры, пересказывались друг другу, записывались в книгах. В современном мире появилась возможность сохранять знания в цифровом виде. Вместо наскальных рисунков мы используем фото- и видеозаписи, пересказ из уст в уста заменили аудиозаписи, а целая библиотека книг теперь может поместиться в кармане пиджака. Все это позволяет максимально достоверно сохранить и передать практически любые знания. Единственное, что до сих пор было сложно сохранить в полной мере, это опыт человека.

Почему два специалиста одной области с одинаковыми базовыми знаниями решают одну и ту же задачу за разное время? Одному достаточно взглянуть на сложившуюся ситуацию и он в ту же секунду видит проблему и её решение, а другому требуется несколько минут, а то и часов, чтобы прийти к аналогичному выводу. Как правило, все это зависит от опыта человека и набора

похожих ситуаций в его прошлой практике. Именно это позволяет находить решение в сложных и неоднозначных проблемах.

Знания можно разделить на два вида: теоретические и практические. Теоретические знания представляют собой совокупность теорий, фактов, сведений и т.п. Как правило, подобные знания содержатся в книгах и учебниках. Мы их получаем как базовые знания. Практические знания - это умение применять теоретические знания на практике. И именно это отличает опытного специалиста от неопытного [112].

Специалиста, достигшего высшего уровня мастерства в своей профессиональной области, принято называть экспертом. Как показали исследования в когнитивной психологии, путь от новичка до эксперта занимает не менее 10 лет интенсивной практики [160]. За эти годы созревает умение эксперта быстро и эффективно решать свои профессиональные задачи. На основе метода «проб и ошибок» он вырабатывает правила принятия успешных решений [94].

Исходя из этого, можно заключить, что для достижения наилучшего эффекта от обучения необходимо передавать обучаемым знания наиболее опытных специалистов, которые являются экспертами в своей области. Но в этом и заключается основная проблема: желающих получить знания всегда больше, чем экспертов, готовых ими поделиться. Данный дефицит экспертов порождает необходимость в возможности как-то сохранить их знания для дальнейшего копирования и использования в образовательных целях. Для решения подобных задач используются ЭС, имитирующие экспертное суждение с помощью компьютерных технологий.

Одна из общепризнанных черт экспертного суждения - это подсознательный характер экспертных знаний, что усложняет их передачу каким либо привычным нам методом, в том числе и с помощью ИКТ [159].

На основании теории подсознательных решающих правил (ПРП), предложенной О.И. Ларичевым [68], структура памяти эксперта может быть представлена ниже описанным способом.

На нижнем уровне находится слой из нескольких сотен или тысяч реальных объектов, представляющих практические случаи, встретившиеся эксперту за время его деятельности. Описания этих объектов легко могут быть вербализованы. Вспоминание трудных случаев, извлечение их из памяти происходит тогда, когда эксперт в своей работе встречает особенно сложный объект.

Следующий слой - подсознательные решающие правила, выработанные годами на основе реальных объектов. Некоторые из них могут быть не до конца сформированы. Но быстрота принятия решений, типичная для эксперта, позволяет предположить, что недостающие объекты скорее будут «упакованы» в имеющиеся структуры, чем внесены в «лист исключений». Соответственно, как отмечено выше, подсознательные решающие правила не могут быть вербализованы.

Верхний слой представляет собой набор информативных признаков и их значений, также выработанный экспертом в результате многолетней практики. Он может быть вербализован.

Перед созданием системы, способной сохранить знания эксперта, необходимо определить к какому классу относится решаемая с помощью данных знаний проблема. Выделяется [68] три класса проблем.

Первый класс: проблемы допускают декомпозицию на отдельные компоненты их описания без ущерба для их содержания.

Второй класс: проблемы в целом или частично имеют целостный, «ситуативный» характер, но возможна достаточно точная аппроксимация решающих правил определенной функцией от отдельных компонент описания.

Третий класс: отдельные компоненты описания проблемы столь сильно взаимосвязаны, что такая аппроксимация искажает описание проблемы.

Согласно [68] методы решения задач первых двух классов базируются в основном на составлении баз знаний, имитирующих верхний уровень структуры памяти эксперта. При этом решение задач третьего типа невозможно достаточно точно реализовать с помощью подобных подходов. Основная

проблема их реализации состоит в сложности заполнения базы знаний, т.к. эксперт не может сформулировать правила, которые отвечают за решение подобных задач, и занести их в базу, т.к. они находятся на подсознательном уровне. Для записи правил, сформированных в подсознании эксперта, используются принципы ПРП-теории. Используемые психологические методы, лежащие в основе ПРП-теории, позволяют вычлнить и формализовать подобные бессознательные правила для дальнейшей их записи и использования.

Реализация поиска подсознательных решающих правил эксперта обычно заключается в сборе информации о методах решения различных проблем, предложенных эксперту, и вычленению из них обобщающих правил, которые и являются подсознательными. Эта задача имеет важное практическое значение, поскольку экспертные решающие правила могут быть проанализированы и использованы при построении систем искусственного интеллекта, к примеру, для создания ЭС.

ЭС, используя заполненную экспертом базу знаний, позволяют делать выводы о переданных ей на анализ событиях и реагировать на них, согласно сложившейся ситуации, аналогично тому, как бы это делал эксперт. Отсюда следует, что для функционирования ЭС необходим инструмент заполнения её базы знаний и система принятия решений. При этом ЭС должна вести диалог о решаемой задаче на языке, удобном пользователю (эксперту), и, в частности, приобретать в ходе диалога новые знания; при решении задачи следовать линии рассуждения, понятной пользователю (эксперту); объяснять ход своего рассуждения на языке, удобном для пользователя (эксперта). Данное требование обусловлено тем, что сама ЭС должна быть универсальным инструментом сбора и предоставления знаний вне зависимости от области знаний эксперта, с которым она работает. Использование машинных языков при формировании подобных диалогов неудобно, т.к. усложняет процесс сбора знаний и сужает сферу деятельности экспертов, которые смогут заполнить её базу знаний.

Типичная ЭС имеет следующие компоненты [97]:

- 1) база знаний, хранящая множество продукций (в общем случае –

правил);

2) рабочая память, хранящая данные (база данных);

3) интерпретатор, решающий на основе имеющихся в системе знаний предъявленную ему задачу;

4) лингвистический процессор, осуществляющий диалоговое взаимодействие с пользователем (экспертом) на естественном для него языке (естественный язык, профессиональный язык, язык графики и т.п.);

5) компонента приобретения знаний;

6) объяснительная компонента, дающая объяснение действий системы и отвечающая на вопросы о том, почему некоторые заключения были сделаны или отвергнуты.

В настоящее время экспертные системы используются для решения различных типов задач (интерпретация, предсказание, диагностика, планирование, конструирование, контроль, отладка, инструктаж, управление) в различных сферах деятельности таких, как финансы, нефтяная и газовая промышленность, энергетика, образование, транспорт, фармацевтическое производство, космос, металлургия, горное дело, химия, целлюлозно-бумажная промышленность, телекоммуникации и связь и др.

Одной из самых распространенных сфер использования ЭС является образование, т.к. именно здесь особенно сильно ощущается дефицит экспертов-практиков, способных передать свои знания обучаемым. Для реализации основных образовательных задач, таких как обучение и контроль знаний, используются ЭОС.

Экспертная обучающая система - это программа, реализующая ту или иную педагогическую цель на основе знаний эксперта в некоторой предметной области, осуществляя диагностику знаний обучаемых и управление учением, а также демонстрируя поведение на уровне опытного преподавателя[90].

Как следует из определения ЭОС, кроме знаний по предмету также необходимы знания по методике обучения и по диагностике ошибок обучаемого. Поэтому ЭОС требует не только высоко развитых средств

представления и обработки знаний, но и средств организации эффективного взаимодействия различных источников знаний. При этом ЭОС может состоять из нескольких специализированных ЭС, предназначенных для решения разных задач в рамках работы обучающей системы (системы тестирования, системы анализа знаний обучаемого, системы методики проведения обучения и т.п.).

Согласно [136] можно выделить четыре основных блока, составляющих структуру ЭОС.

1. Блок, содержащий теоретический материал дисциплины.

Форма подачи теоретического материала может быть в виде аудиозаписи или в текстовом виде. Этим блоком экспертно-обучающая система ничем не отличается от обычного электронного пособия.

Так же в этом разделе должно присутствовать большое количество примеров, которые вначале выполняются самой системой, а затем по мере разъяснения определенная часть задания выполняется обучающимся самостоятельно. Для этого требуется организовать вопросно-консультирующую систему обсуждения.

2. Блок, содержащий задачи различного уровня сложности для усвоения и закрепления знаний, полученных из теоретического блока, а также для формирования практических навыков и умений. При этом каждая задача должна быть снабжена пошаговыми инструкциями или подсказками для их решения.

3. Блок диагностики и контроля. В этом блоке фиксируются и анализируются основные моменты непонимания, а также ошибки, совершаемые обучающимися при работе с первыми двумя блоками. На основе анализа ошибок этот блок взаимодействует с другими блоками ЭОС, образуя обратную связь между обучаемым и обучающей системой. Согласно [136] блок диагностики и контроля является наиболее важным в ЭОС, так как именно он должен «уметь» выяснять моменты, с которыми у обучающихся возникают трудности и проблемы, и направлять работу всей системы на их устранение. Он работает параллельно со всеми блоками и осуществляет сбор и статистику

информации по выполняемым заданиям.

4. **Вопросно-консультирующий блок.** Данный блок служит для руководства деятельностью обучающегося в процессе решения задачи и изучения материала, помогает ему найти решение задачи, осуществляет подсказки в проблемных моментах, возникающих по ходу решения.

Предлагаемая в [136] структура ЭОС, по мнению автора, позволяет обучающемуся становиться центральным объектом, полноценным и единственным участником учебного процесса, что способствует самостоятельному усвоению предоставляемого материала за счет развития стремления к познанию и исследованию.

При создании ЭОС возникают теоретические и практические задачи разработки методов представления и обработки знаний в изучаемой предметной области, контроля и диагностики знаний обучаемого, управления учением, а также создания эффективных методов и средств взаимодействия с обучаемым (интерфейсов) [90], [91]. При этом использование ЭОС для решения теоретических образовательных задач встречается значительно чаще, чем практических. Данная картина смотрится несколько странно с учетом того, что база знаний, используемая для функционирования экспертной системы, изначально предназначена для хранения практических знаний и опыта эксперта.

Таким образом, несмотря на общепризнанную эффективность использования в образовательных целях ЭОС по сравнению с обычными обучающими системами, их потенциал используется не в полной мере и в основном только в теоретической части дисциплин. Использование ЭОС для практики [113] усложняется специфичностью каждого курса, что не позволяет сделать универсальный и простой в реализации продукт, как это возможно сделать для теоретического материала. Тем не менее, использование классификации решаемых в образовании практических задач и их группировка позволит создавать ЭОС, охватывающие не один, а несколько предметов во всех изучаемых в них аспектах (теоретических и практических). Создание подобных систем позволит более равномерно распределять высокий уровень образования,

не привязывая его к ресурсам или уровню образовательного учреждения, в котором они используются.

1.3 Повышение эффективности и качества управления производственным процессом на основе контроля, формирования и закрепления ключевых компетенций обслуживающего АСУТП персонала

Для повышения эффективности и качества управления производственным процессом предлагается разработать систему контроля, формирования и закрепления компетенций (КФЗК) персонала предприятия, позволяющую снизить негативное воздействие персонала предприятия на обслуживаемую им техническую систему [21].

Согласно [13], [21], [49], [69], [92], [142], [144], [145] можно выделить 5 ключевых задач КФЗК.

1. Определение требований к компетентности сотрудников с учетом специфики производственного процесса, в который они вовлечены.
2. Оценка компетенций сотрудников.
3. Определение рассогласования между требуемым и фактическим уровнями компетенций.
4. Формирование требуемых компетенций.
5. Закрепление полученных сотрудником знаний и умений.

Как указано в [21] и [129] автоматизированную систему управления любым производственным процессом можно представить в следующем виде (рисунок 1.9).

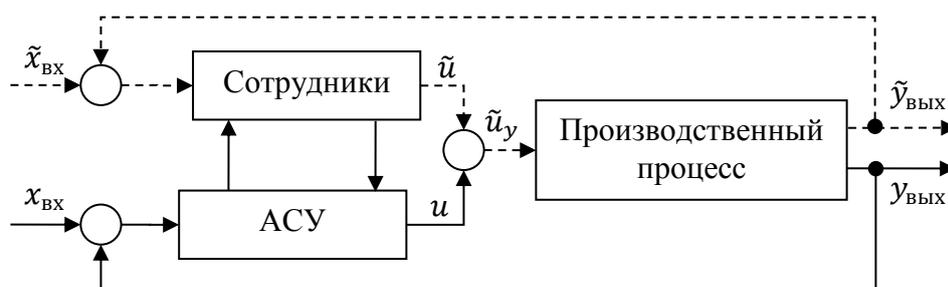


Рисунок 1.9 – Человеко-машинная система управления производственным процессом

На рисунке 1.9 изображены:

x_{ex} – вектор задающих воздействий, выраженных в виде набора четких детерминированных значений, способных обрабатываться при помощи АСУ;

\tilde{x}_{ex} – вектор задающих воздействий, выраженный в виде набора количественных, качественных и ассоциативных характеристик, в большинстве неопределенных, нечетких и не поддающихся обработке АСУ.

\tilde{y}_y – вектор управляющих воздействий, где $\tilde{y}_y = u \cup \tilde{u}$;

u – вектор управляющих воздействий, выраженный в виде значений настроечных параметров, передаваемых на технологические объекты производства по средствам АСУ;

\tilde{u} – вектор управляющих воздействий, выраженный в виде набора количественных, качественных и ассоциативных характеристик, в большинстве неопределенных, нечетких и не поддающихся обработке АСУ;

$y_{вых}$ – выходной вектор, содержащий информацию о текущем состоянии объекта управления (ОУ) в виде набора четких детерминированных значений, способных обрабатываться при помощи АСУ;

$\tilde{y}_{вых}$ – выходной вектор, содержащий информацию о текущем состоянии объекта управления, выраженный в виде набора количественных, качественных и ассоциативных характеристик, в большинстве неопределенных нечетких, и не поддающихся обработке АСУ.

Решение по управлению и повышению эффективности производственного процесса на основе вектора $\tilde{x}_{вх}$ принимаются сотрудниками – специалистами определенной предметной области.

Таким образом, согласно [7], [88] качество канала управления по задающему воздействию напрямую зависит от компетентности сотрудников. Кроме того, согласно [21] принятые к исполнению решения сотрудников создают возмущения в АСУ. Поэтому задачи управления персонала в вопросе контроля, формирования и закрепления компетенций приобретают

первостепенную важность как для повышения эффективности производственного процесса и систем его автоматизации, так и для сбора и первоначальной обработки информации для автоматизированных систем класса MES и HRM.

Предлагается модернизировать контур обратной связи человеко-машинной системы управления производственным процессом (рисунок 1.10), предложенной в [21].

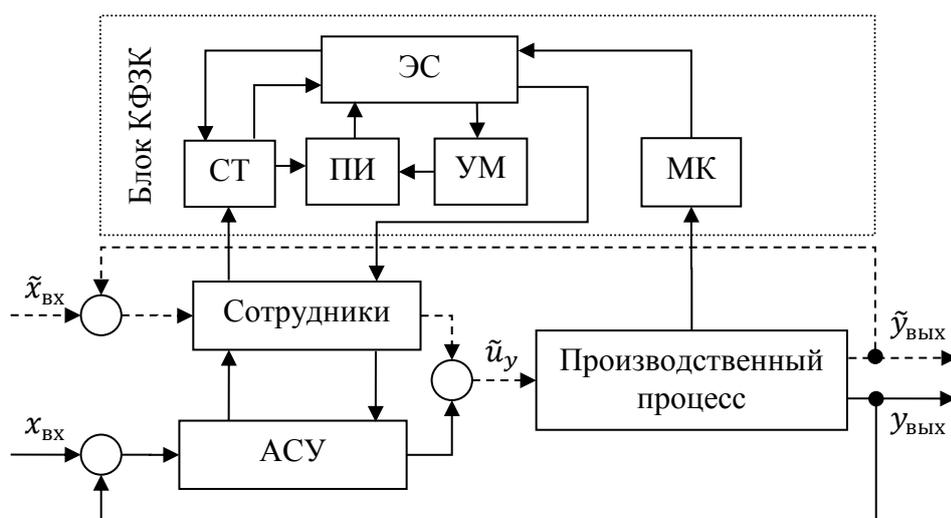


Рисунок 1.10 – Модернизация обратной связи человеко-машинной системы управления производственным процессом

В состав блока КФЗК (рисунок 1.10) входит учебно-методический комплекс, состоящий из учебного материала (УМ) и практического инструментария (ПИ), необходимого для формирования и закрепления компетенций, а также система тестирования (СТ) для их контроля. Экспертная система (ЭС) анализирует УЗ сотрудника на каждом этапе работы КФЗК и на основе МК формирует решение по его направлению на повторную итерацию или в производственный процесс.

В связи с особенностью работы ЭС необходимо интеллектуализировать процесс анализа УЗ сотрудников в ключевых для них областях. Т.к. одной из ключевых компетенций ОДП АСУТП является параметрический синтез, необходима интеллектуализация определения уровня знаний ПС наиболее часто встречаемых на производстве САУ: одноконтурных, каскадных и

комбинированных (согласно пункту 1.1).

Для наиболее эффективной организации КФЗК ОДП необходимо организовать его обучение без отрыва от производства, что позволит автоматизировать весь цикл работы системы управления персоналом по всем ее основным задачам.

1.4 Выводы по первой главе

1. Анализ научных работ, посвященных АСУ предприятия, показал низкий уровень исследований задач HRM-систем по сравнению с другими задачами АСУП.

2. Установлено, что с учетом необходимости высококвалифицированного обслуживания АСУТП предприятия и САУ ТП в частности, повышение эффективности работы HRM-системы и подготовка персонала, обслуживающего АСУТП, является актуальной задачей.

3. Задачи HRM-систем по контролю, формированию икреплению компетенций персонала, обслуживающего АСУТП, возможно интеллектуализировать за счет использования АОС и ЭОС, что позволит повысить эффективность производственного процесса и снизить затраты на подготовку персонала предприятия.

4. Рассмотренные системы контроля уровня знаний и обучения параметрическому синтезу, не поддаются интеллектуализации и не позволяют обеспечить независимость HRM-системы от взаимодействия с внешними системами переподготовки ОДП АСУТП.

5. Установлены технологические процессы нефтехимической промышленности и теплоэнергетики, управляемые одноконтурными, каскадными и комбинированными САУ.

ГЛАВА 2

ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Интеллектуализация контроля проведения параметрического синтеза

Современные методы и средства, применяемые для обучения, позволяют автоматизировать [108] процесс обучения и контроль его качества.

За последние тридцать лет во многих работах [11], [12], [18], [41], [42], [43], [71], [78], [96], [127] было исследовано использование различных видов контроля уровня знаний (УЗ) обучаемых, а так же возможность и эффективность их применения в АОС. Согласно рассмотренным работам можно заключить, что важнейшей составляющей интеллектуализация процесса обучения является контроль уровня знаний, необходимый для решения поставленной задачи. При этом данный контроль обычно основывается на тестировании знаний.

Существующие системы тестирования знаний обычно затрагивают только теоретическую сторону изучаемого предмета. Однако изучение предметов по техническим наукам невозможно без проведения лабораторных и практических работ. По определению техническая наука не может рассматриваться только с точки зрения теории без её практической стороны. В связи с этим полноценные знания по техническим наукам необходимо оценивать как по знанию теории, так и по её применению в решении практических задач [131].

Это касается и параметрического синтеза систем автоматического управления технологическими процессами. Уровень знания его проведения сложно оценить только на основе тестирования, а существующие подходы не позволяют интеллектуализировать этот процесс.

Контроль уровня знаний ПС является неоднозначным процессом. Этот процесс сложно поддаётся алгоритмизации и автоматизации, однако

существующие принципы нечёткой логики [40], [123], [116] позволяют описать алгоритм построения моделей приближенных рассуждений человека. Используя принципы нечёткой логики, можно построить модель приближенных рассуждений человека, выступающего в роли обучающего, для контроля уровня знаний обучаемого и использовать её для интеллектуализации данного процесса. Это позволит контролировать уровень знаний специалистов на нефтехимическом производстве и уровень знаний персонала, обслуживающего электростанции.

Анализируя методы проведения ПС одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ, применяемых на нефтехимическом производстве и в электроэнергетике, подробно описанных в третьей главе, установлено, что основная часть проведения ПС состоит из построения графиков с дальнейшим поиском на них требуемых точек согласно заданным условиям. В связи с этим, одним из основных критериев УЗ поставленной задачи при ПС является точность определения требуемой точки на графике.

Таким образом, для интеллектуализации обучения ПС САУ ТП необходимо обеспечить контроль правильности выбора точек на графиках, необходимых для получения результатов по текущему этапу ПС, на уровне эксперта данной области. Согласно данным, приведённым в первой главе, с задачами такого типа успешно справляются ЭОС, где критерии определения уровня знаний описываются с помощью нечёткой логики [113].

Основываясь на работе [40], описание любого определения и понятия, используемого человеком в процессе своей деятельности, можно выполнить с помощью лингвистической переменной. Для интеллектуализации контроля правильности выбора точек на графиках, необходимых для проведения ПС, введена лингвистическая переменная (ЛП) «Расстояние до точки» с соответствующими термами: «За пределом \rightarrow », «Далеко \rightarrow », «Близко \rightarrow », «Совпадает», «Близко $+$ », «Далеко $+$ » и «За пределом $+$ ».

Терм «Совпадает» определяет область, в которой, по мнению эксперта, выбранная точка соответствует заданным условиям.

Термам «За пределом –», «Далеко –», «Близко –», соответствует расстояние от искомой точки на графике до начала границы заданного экспертом диапазона, а термам «За пределом +», «Далеко +», «Близко +» соответствуют расстояния от искомой точки до конца границы выделенного диапазона. Диапазон на графике выделяется экспертом исходя из его мнения, что выбор точки на графике за пределом данного диапазона является абсолютно ошибочным и полностью не соответствующим заданным условиям.

Для построения функций принадлежности термов ЛП «Расстояние до точки» используется П-образная функция (рисунок 2.1)

$$f_{\text{П}}(x; a, b, c, d) = f_S(x; a, b) \cdot f_S(x; c, d), \quad (2.1)$$

формируемая произведением двух сигмоидальных функций [150]

$$f_S(x; a, b) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}}, \quad (2.2)$$

где a, b, c, d - некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением: $a \geq b \geq c \geq d$. Они определяются в зависимости от типа графика и исходных условий поставленной задачи.

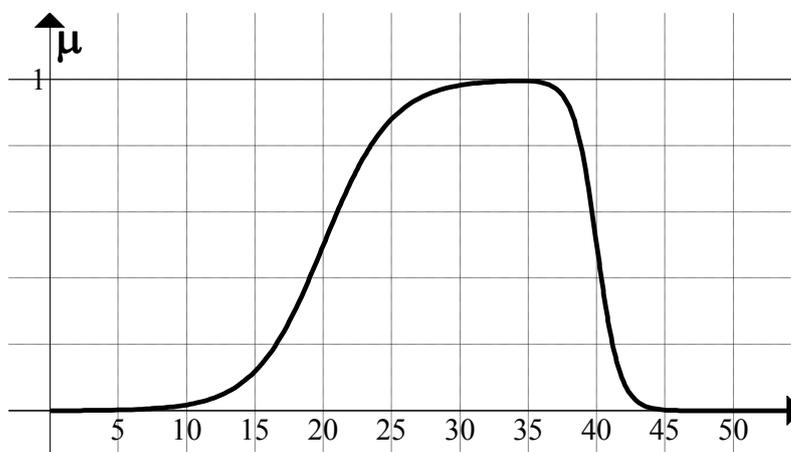


Рисунок 2.1 - П-образная функция принадлежности

Уровень знаний оценивается с помощью ЛП «Знания» с соответствующими термами «Плохо», «Удовлетворительно», «Хорошо» и «Отлично». Основываясь на [26], для термов ЛП «Знания» построены функции принадлежности по формуле (2.1) с параметрами, приведёнными в таблице 2.1. Они имеют вид, изображённый на рисунке 2.2.

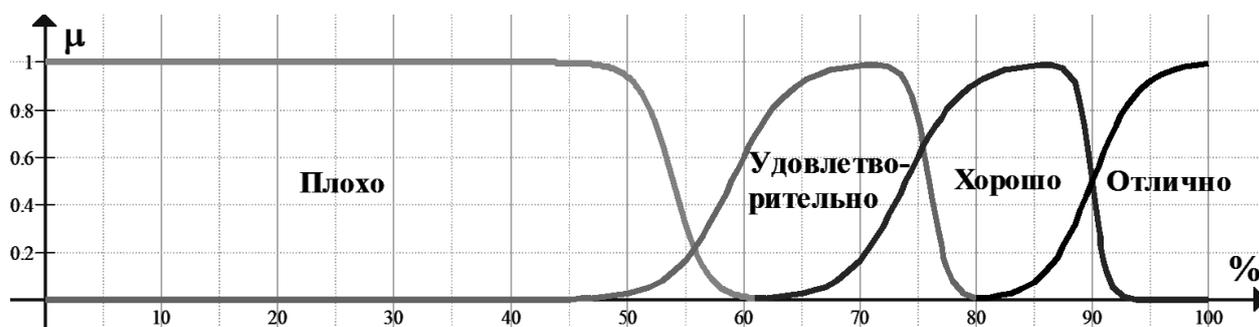


Рисунок 2.2 - Функции принадлежности для лингвистической переменной «Знания»

С помощью ЛП «Знания» можно обозначить уровень знаний на естественном языке в виде обозначенных выше термов. Базовой переменной для ЛП является процент усвоения изучаемого материала и балльно-рейтинговая система оценивания знаний.

Таблица 2.1 – Значения функций принадлежности ЛП «Знания»

Термы ЛП	a	b	c	d
Плохо	-0,7	54	-	-
Удовлетворительно	0,38	59	-1,2	76
Хорошо	0,4	75	-1,6	90
Отлично	0,58	90	-	-

Для интеллектуализации изучения ПС, основываясь на алгоритме нечёткого вывода Мамдани [161], необходимо составить правила нечёткой базы знаний (БЗ), где посылка правил основана на ЛП «Расстояние до точки», а заключением правил является критерий УЗ, основанный на ЛП «Знания». Используемые лингвистические переменные дают возможность эксперту заполнять базу знаний, оперируя понятными ему определениями.

База знаний формируется из правил нечётких продукций в формате:

$$\text{ЕСЛИ } A=a_i \text{ И } B=b_i, \text{ ТО } C=c_i, \quad (2.3)$$

где A, B, C – лингвистические переменные;

a_i, b_i, c_i – термы соответствующих лингвистических переменных.

Для получения чёткого значения вследствие дефаззификации используется метод центра тяжести [169], в котором значение выходной

переменной рассчитывается по формуле:

$$y = \frac{\int_{min}^{max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{min}^{max} \mu(x) dx}, \quad (2.4)$$

где $\mu(x)$ - функция принадлежности соответствующего нечёткого множества;
 min и max - границы универсума нечётких переменных;
 y - результат дефаззификации.

Ниже рассмотрены основные принципы ПС одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ и описаны основные методы интеллектуализации его изучения.

В одноконтурных САУ рассматриваются задачи ПС с пропорционально-интегральным (ПИ), пропорционально-дифференциальным (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законами управления на основе расширенных амплитудно-фазовых характеристик (РАФХ) для заданной степени колебательности.

В этом случае задача ПС включает следующие этапы:

Определение начальной ω_n и конечной ω_k частот для построения линии Д-разбиения, удовлетворяющей заданному значению степени колебательности в плоскости настроечных параметров выбранного типа регулятора.

Определение рабочей частоты $\omega_{раб}$ на линии Д-разбиения и настроечных параметров регулятора, удовлетворяющих наилучшему значению критерия качества переходного процесса.

Сущность первого этапа ПС заключается в том, что выбранный диапазон частот обеспечивает расположение линии Д-разбиения в первом квадранте плоскости настроечных параметров, где на линии Д-разбиения гарантируется устойчивая работа САУ. Здесь, согласно Стефани Е.П. [130] недопустим выбор начальной частоты, соответствующей второму квадранту линии Д-разбиения, и конечной частоты, соответствующей четвёртому квадранту линии Д-разбиения. В этих случаях САУ неустойчива.

Для первого этапа ПС одноконтурной САУ по выбору обучаемым начальной и конечной частот на графике РАФХ сформированы правила на

основании ЛП «Расстояние до точки». РАФХ получают в виде комплексного выражения с мнимой Im и действительной Re частями из передаточной функции объекта управления.

На рисунке 2.3 приведён график расширенной АФХ объекта управления и показаны граничные частоты, необходимые для построения линий D-разбиения. Угол $\gamma_{\text{зад}}$ здесь соответствует заданному значению степени колебательности. Они связаны между собой выражением $\gamma_{\text{зад}} = \text{arctg}(m_{\text{зад}})$.

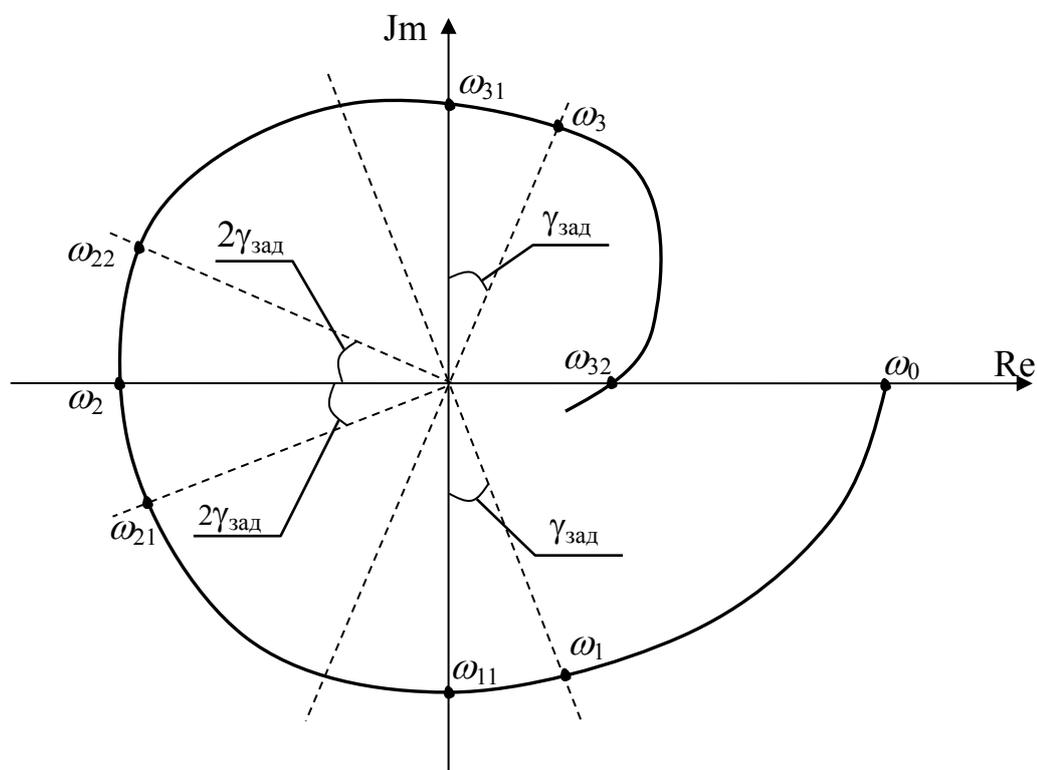


Рисунок 2.3 – Расширенная амплитудно-фазовая характеристика объекта управления

При ПС каждому из рассматриваемых регуляторов для удовлетворения указанных выше условий соответствует свой диапазон частот, определяемый по графику РАФХ. В зависимости от выбранного типа регулятора выбирается следующий диапазон частот:

ПИ-регулятора $\omega_{\text{нач}} = \omega_1$, $\omega_{\text{кон}} = \omega_2$, $\omega_{\text{пред}} = \omega_3$;

ПД-регулятора $\omega_{\text{нач}} = \omega_2$, $\omega_{\text{кон}} = \omega_3$, $\omega_{\text{пред}} = \omega_{32}$;

ПИД-регулятора $\omega_{\text{нач}} = \omega_1$, $\omega_{\text{кон}} = \omega_3$, $\omega_{\text{пред}} = \omega_{32}$,

где $\omega_{нач}$ - начальная частота, $\omega_{кон}$ - конечная частота, $\omega_{пред}$ - предельное значение частоты.

В связи с этим, точки с указанными частотами являются искомыми точками. Для определения точности достижения каждой из них предлагается применить функции принадлежности термов ЛП «Расстояние до точки».

Нужно учесть, что небольшая погрешность выбора обучаемым начальной и конечной частот согласно вышеуказанным условиям, не сильно скажется на результатах всего ПС [123]. По этой причине оценку за выполнение этого этапа можно оценить по функциям принадлежности (рисунок 2.4-2.6), рассчитанным по формуле (2.1). Вид функций принадлежности определён с помощью экспертного опроса. Значения параметров (a , b , c , d) в формуле (2.1) для искомых точек ω_1 , ω_2 , ω_3 приведены в таблицах 2.2, 2.3 и 2.4.

Таблица 2.2 – Значения функций принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки ω_1

Термы ЛП	a	b	c	d
За пределом –	-0,35	-82	-	-
Далеко –	0,35	-82	-0,28	-45
Близко –	0,28	-45	-0,48	-12
Совпадает	0,55	-9	-0,45	12
Близко +	0,4	15	-0,25	58
Далеко +	0,25	58	-0,55	89
За пределом +	0,55	89	-	-

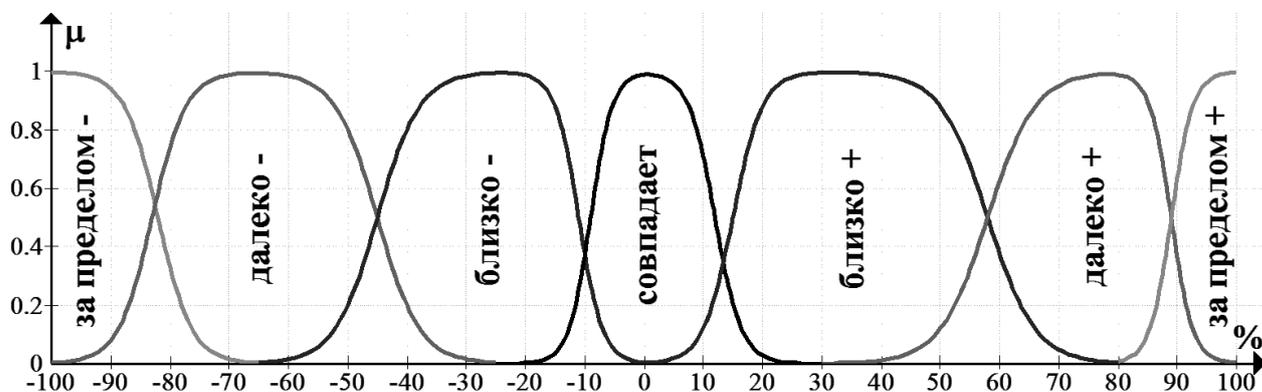


Рисунок 2.4 - Функции принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки

ω_1

Таблица 2.3 – Значения функций принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки ω_2

Термы ЛП	a	b	c	d
За пределом –	-0,35	-82	-	-
Далеко –	0,35	-82	-0,28	-45
Близко –	0,28	-45	-0,48	-12
Совпадает	0,55	-9	-0,55	9
Близко +	-0,28	45	0,48	12
Далеко +	-0,35	82	0,28	45
За пределом +	0,35	82	-	-

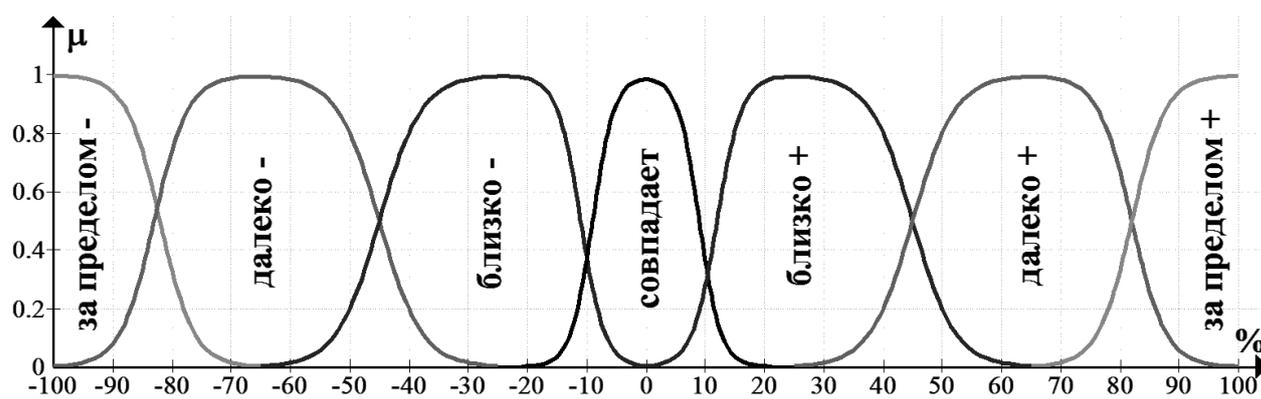


Рисунок 2.5 - Функции принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки ω_2

Таблица 2.4 – Значения функций принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки ω_3

Термы ЛП	a	b	c	d
За пределом –	-0,55	-89	-	-
Далеко –	0,55	-89	-0,25	-58
Близко –	-0,4	-15	0,25	-58
Совпадает	0,45	-12	-0,55	9
Близко +	-0,28	45	0,48	12
Далеко +	-0,35	82	0,28	45
За пределом +	0,35	82	-	-

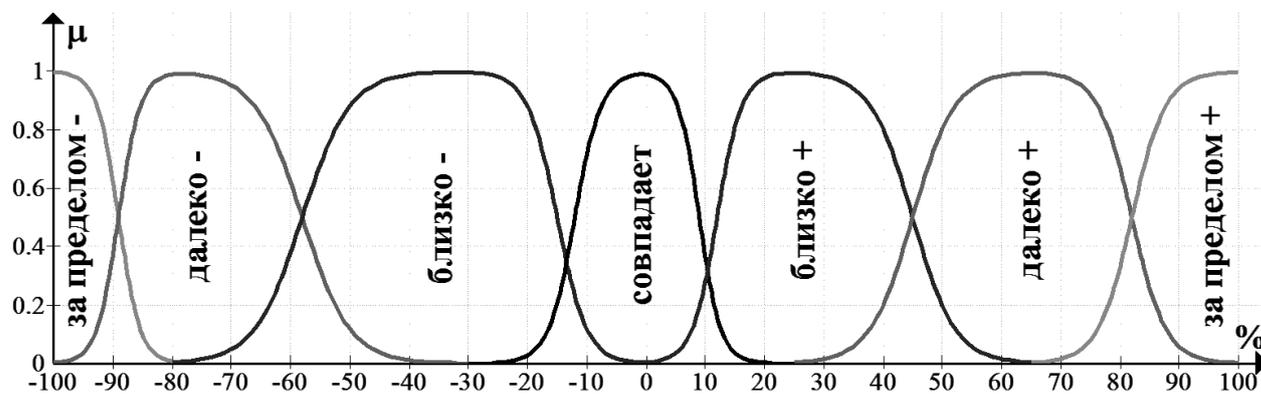


Рисунок 2.6 - Функции принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки ω_3

Для второго этапа ПС контроль правильности выбора рабочей (оптимальной) частоты $\omega_{\text{раб}}$ и соответствующих ей настроек регулятора также выполняется по ЛП «Расстояние до точки» (рисунок 2.7), функции принадлежности которой рассчитаны по формуле (2.1). Значения её параметров, согласно данным экспертного опроса, приведены в таблице 2.5. Из работы [33] известно соотношение $\omega_{\text{раб}} = 1,2 * \omega_{\text{max}}$ (ω_{max} – частота, соответствующая экстремуму на линии Д-разбиения).

Таблица 2.5 – Значения функций принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки $\omega_{\text{раб}}$

Термы ЛП	a	b	c	d
За пределом –	-0,55	-89	-	-
Далеко –	0,55	-89	-0,18	-45
Близко –	-0,95	-8	0,18	-45
Совпадает	1	-6	-0,6	9
Близко +	0,4	15	-0,25	58
Далеко +	0,25	58	-0,55	89
За пределом +	0,55	89	-	-

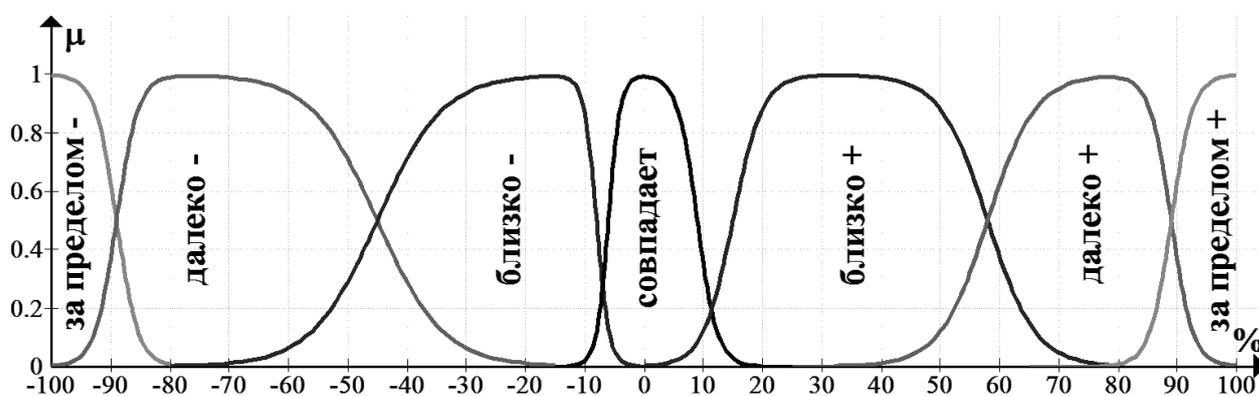


Рисунок 2.7 - Функции принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки $\omega_{\text{раб}}$

Далее, используя заполненную экспертом БЗ (таблицы 2.6-2.7), определяется критерий УЗ по ЛП «Знания». Для определения уровня знаний первого этапа используются правила нечётких продукций (таблица 2.6) в формате (2.3), где А и В – ЛП «Расстояние до точки» для точек начальной и конечной частот графика РАФХ, а С - ЛП «Знания».

Таблица 2.6 – База знаний нахождения начальной и конечной частот на РАФХ

Посылки		Заключение
Начальная частота	Конечная частота	Уровень знаний РАФХ
За пределом –	За пределом –	Плохо
За пределом –	Далеко –	Плохо
За пределом –	Близко –	Плохо
За пределом –	Совпадает	Плохо
За пределом –	Близко +	Плохо
За пределом –	Далеко +	Плохо
За пределом –	За пределом +	Плохо
Далеко –	За пределом –	Плохо
Далеко –	Далеко –	Плохо
Далеко –	Близко –	Удовлетворительно
Далеко –	Совпадает	Хорошо
Далеко –	Близко +	Удовлетворительно
Далеко –	Далеко +	Плохо
Далеко –	За пределом +	Плохо
Близко –	За пределом –	Плохо
Близко –	Далеко –	Удовлетворительно
Близко –	Близко –	Удовлетворительно
Близко –	Совпадает	Отлично
Близко –	Близко +	Хорошо
Близко –	Далеко +	Удовлетворительно
Близко –	За пределом +	Плохо
Совпадает	За пределом –	Плохо
Совпадает	Далеко –	Удовлетворительно
Совпадает	Близко –	Хорошо
Совпадает	Совпадает	Отлично
Совпадает	Близко +	Отлично
Совпадает	Далеко +	Хорошо
Совпадает	За пределом +	Плохо
Близко +	За пределом –	Плохо
Близко +	Далеко –	Удовлетворительно
Близко +	Близко –	Удовлетворительно
Близко +	Совпадает	Хорошо
Близко +	Близко +	Удовлетворительно
Близко +	Далеко +	Плохо
Близко +	За пределом +	Плохо
Далеко +	За пределом –	Плохо
Далеко +	Далеко –	Плохо
Далеко +	Близко –	Удовлетворительно
Далеко +	Совпадает	Удовлетворительно
Далеко +	Близко +	Плохо
Далеко +	Далеко +	Плохо

Продолжение таблицы 2.6

Посылки		Заключение
Начальная частота	Конечная частота	Уровень знаний РАФХ
Далеко +	За пределом +	Плохо
За пределом +	За пределом –	Плохо
За пределом +	Далеко –	Плохо
За пределом +	Близко –	Плохо
За пределом +	Совпадает	Плохо
За пределом +	Близко +	Плохо
За пределом +	Далеко +	Плохо
За пределом +	За пределом +	Плохо

Для определения уровня знаний второго этапа используются правила нечётких продукций (таблица 2.7) в формате (2.3), где А - ЛП «Знания» для определения уровня знаний предыдущего этапа ПС, В – ЛП «Расстояние до точки» для точки рабочей частоты на графике линии Д-разбиения, а С - ЛП «Знания», по которой определяется уровень знаний ПС одноконтурной САУ.

Таблица 2.7 – База знаний ПС одноконтурной САУ

Посылки		Заключение
Уровень знаний РАФХ	Расстояние до точки линии Д-разбиения	Уровень знаний ПС САУ
Плохо	За пределом –	Плохо
Плохо	Далеко –	Плохо
Плохо	Близко –	Плохо
Плохо	Совпадает	Удовлетворительно
Плохо	Близко +	Плохо
Плохо	Далеко +	Плохо
Плохо	За пределом +	Плохо
Удовлетворительно	За пределом –	Плохо
Удовлетворительно	Далеко –	Плохо
Удовлетворительно	Близко –	Удовлетворительно
Удовлетворительно	Совпадает	Хорошо
Удовлетворительно	Близко +	Удовлетворительно
Удовлетворительно	Далеко +	Плохо
Удовлетворительно	За пределом +	Плохо
Хорошо	За пределом –	Плохо
Хорошо	Далеко –	Удовлетворительно
Хорошо	Близко –	Хорошо
Хорошо	Совпадает	Отлично
Хорошо	Близко +	Хорошо

Продолжение таблицы 2.7

Посылки		Заключение
Уровень знаний РАФХ	Расстояние до точки линии Д-разбиения	Уровень знаний ПС САУ
Хорошо	Далеко +	Удовлетворительно
Хорошо	За пределом +	Плохо
Отлично	За пределом –	Плохо
Отлично	Далеко –	Удовлетворительно
Отлично	Близко –	Хорошо
Отлично	Совпадает	Отлично
Отлично	Близко +	Хорошо
Отлично	Далеко +	Удовлетворительно
Отлично	За пределом +	Плохо

На рисунке 2.8 изображена модель контроля уровня знаний обучаемого при проведении параметрического синтеза одноконтурной САУ.

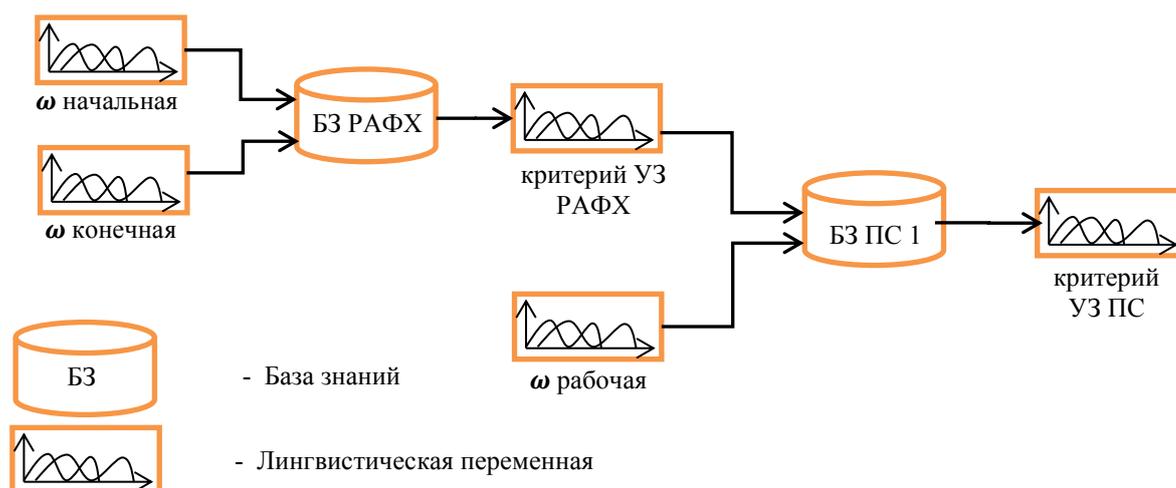


Рисунок 2.8 – Модель контроля обучения ПС одноконтурной САУ

На рисунке показано, что результаты первого этапа параметрического синтеза сводятся в общую базу знаний с данными по второму этапу. На выходе получается итоговый критерий УЗ ПС одноконтурной САУ.

В каскадных САУ сущность параметрического синтеза состоит в итерационном расчёте настроек стабилизирующего и корректирующего регуляторов. Расчёт заканчивается при достижении заданной величины рассогласования между настроечными параметрами регуляторов на текущем и предыдущем шагах.

В связи с изложенным, при контроле изучения ПС каскадной САУ нужно использовать те же методы, что и при изучении ПС одноконтурных САУ. Соответственно, для контроля усвоения ПС используются ЛП «Расстояние до точки» и ЛП «Знания» также, как и при ПС одноконтурной САУ. Так как все этапы ПС одноконтурных САУ здесь проводятся неоднократно, то в качестве выходных параметров используют усреднённый показатель ЛП «Знания» на этапе выбора диапазона частот и на этапе выбора рабочей частоты.

В комбинированных САУ ПС состоит из двух основных этапов: из расчёта настроечных параметров регулятора, аналогично ПС одноконтурной САУ, и расчёта настроечных параметров компенсирующего устройства. Для повышения эффективности ПС и возможности интеллектуализации контроля его проведения предлагается аналитический метод определения параметров компенсирующих устройств в виде реальных дифференцирующих, интегро-дифференцирующих и неминимальнофазовых инерционных звеньев, подробно описанный в третьей главе.

При практической реализации компенсирующих устройств используют: реальные дифференцирующие, интегро-дифференцирующие и неминимальнофазовые инерционные звенья. Области реализуемости этих устройств изображены на рисунке 2.9.

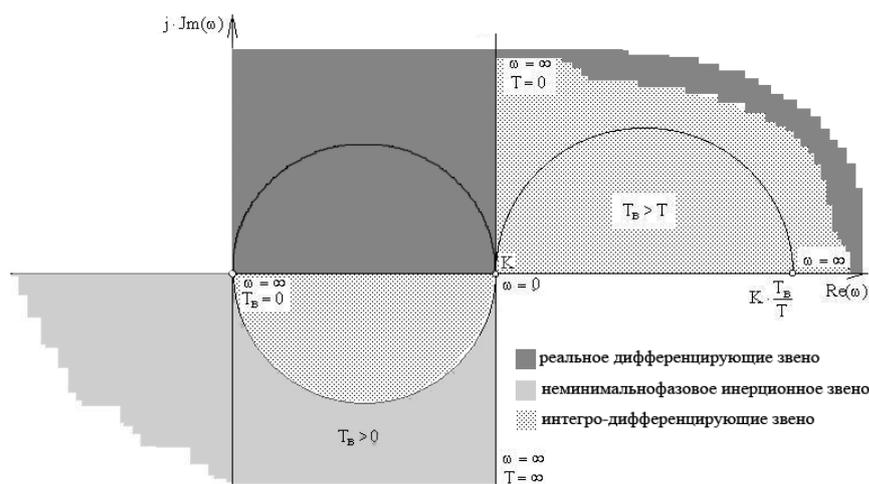


Рисунок 2.9 – Области реализуемости реальных компенсаторов

Структурный и параметрический синтез компенсаторов включает в себя: построение вектора АФХ идеального компенсатора, выбор реального

компенсатора и определение его оптимальных настроечных параметров.

Процесс контроля проведения ПС комбинированной САУ начинается с выбора типа реального компенсатора. Результат выбора типового звена для реализации реального компенсатора оценивается ЛП «Тип компенсатора» по термам «Лучший», «Хороший», «Нормальный», «Плохой» (рисунок 2.10).

Термы ЛП «Тип компенсатора» описываются с помощью трапецевидной функции принадлежности [150]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d < x < a \end{cases}, \quad (2.5)$$

где a, b, c, d – принимающие различные значения, в зависимости от выставленного экспертом рейтинга при текущем выборе обучаемым типового звена для реализации реального компенсатора, и упорядоченные отношением: $a \leq b \leq c \leq d$.



Рисунок 2.10 – Функции принадлежности лингвистической переменной «Тип компенсатора»

Значения коэффициентов в формуле (2.5) для расчёта функций принадлежности термов ЛП «Тип компенсатора» приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Значения функций принадлежности ЛП «Тип компенсатора»

Термы ЛП	a	b	c	d
Лучший	8	9	10	10
Хороший	5	6	8	9
Нормальный	2	3	5	6
Плохой	0	0	2	3

Выбор точки, соответствующей рабочей частоте на графике АХФ реального компенсатора, согласно экспертному опросу, оценивается по ЛП «Расстояние до точки» (рисунок 2.11) с параметрами для формулы (2.1), приведёнными в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Значения функций принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки $\omega_{\text{раб}}$ на графике АФХ реального компенсатора

Термы ЛП	a	b	c	d
За пределом –	-0,55	-89	-	-
Далеко –	0,55	-89	-0,25	-58
Близко –	-0,4	-15	0,25	-58
Совпадает	0,45	-12	-0,55	9
Близко +	-0,28	45	0,48	12
Далеко +	-0,35	82	0,28	45
За пределом +	0,35	82	-	-

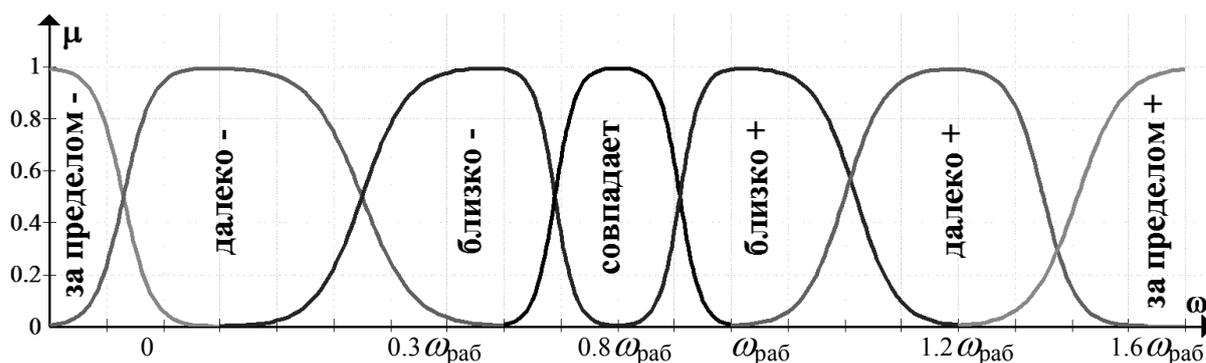


Рисунок 2.11 - Функции принадлежности ЛП «Расстояние до точки» для точки $\omega_{\text{раб}}$ на графике АФХ реального компенсатора

Первый этап проведения ПС комбинированной САУ выполняется аналогично ПС одноконтурной САУ. Поэтому контроль УЗ по выполнению первого этапа проведения ПС комбинированной САУ проводится по схеме, приведённой на рисунке 2.8. Модель выполнения второго этапа и определения общего уровня знаний ПС комбинированной САУ приведена на рисунке 2.12.

Общий критерий УЗ ПС комбинированной САУ определяется на основе данных критериев уровня знаний нахождения настроечных параметров компенсатора и регулятора. При этом критерий уровня знаний нахождения настроечных параметров компенсатора является определяющим при выборе общего критерия УЗ ПС.

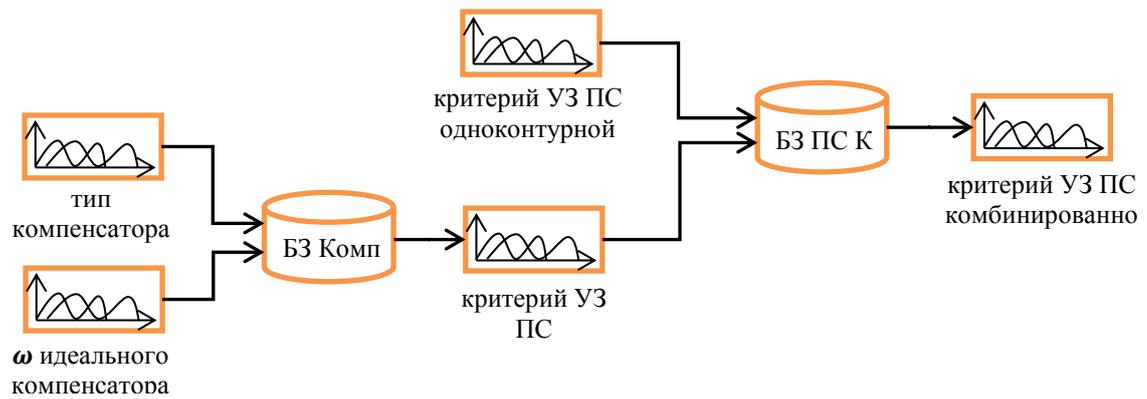


Рисунок 2.12 – Модель контроля обучения ПС комбинированной САУ

Точка, расположенная на графике АФХ, характеризуется координатами в комплексной плоскости (рисунок 2.9) для конкретной частоты. В связи с этим, нечёткое множество критериев правильности выбора частоты A_k является частью множества точек, принадлежащих графику АФХ. Также необходимо учитывать, что множество критериев выбранной частоты $A_k = \{(\omega, \mu_k(\omega)) | \omega \in \mathbf{R}\}$ должно принадлежать множеству координат реализации реального компенсатора K , которое зависит от типа используемого звена. Для реализации области реального компенсатора необходимо выполнение условий:

в виде реального дифференцирующего звена:

$$\{Jm \in K | 0 < Jm < +\infty\} \cap \{Re \in K | -\infty < Re < +\infty\};$$

в виде интегро-дифференцирующего звена:

$$(\{Im \in K | 0 < Im < +\infty\} \cap \{Re \in K | k < Re < +\infty\}) \cup$$

$$(\{Im \in K | -\infty < Im < 0\} \cap \{Re \in K | 0 < Re < k\});$$

$$(\{Jm \in K | -\infty < Jm < 0\} \cap \{Re \in K | 0 < Re < k\});$$

в виде неминимальнофазового инерционного звена:

$$\{Jm \in K | -\infty < Jm < 0\} \cap \{Re \in K | -\infty < Re < +\infty\},$$

где Re - вещественная часть комплексной плоскости, Im - мнимая часть комплексной плоскости; k - коэффициент усиления реального компенсатора.

Исходя из выше описанных правил реализуемости рассматриваемых типовых компенсаторов, сформированы значения термов ЛП «Тип

компенсатора». В таблице 2.10 приведены значения базовой переменной ЛП «Тип компенсатора» для всех возможных результатов выбора типового звена для реализации реального компенсатора.

Таблица 2.10 – Матрица результатов выбора типового звена для реализации реального компенсатора.

k	$\omega_{\text{раб}}$		Реальное дифференцирующее	Интегрирующее		Неминимальнофазовое инерционное	
	Re	Im		верх	низ	верх	низ
=0	>0	>0	10	4	0	1	0
=0	<0	>0	9	3	0	2	0
=0	<0	<0	0	0	4	0	9
=0	>0	<0	0	0	8	0	10
<0	>0	>0	7	4	0	10	0
<0	<0	>0	7	3	0	10	0
<0	<0	<0	1	1	3	2	9
<0	>0	<0	1	1	5	2	9
>0	>0	>0	3	10	0	3	0
>0	<0	>0	0	0	3	5	10
>0	<0	<0	0	0	3	0	10
>0	>0	<0	0	0	8	0	10

При правильном выборе точки на графике АФХ идеального компенсатора (совпадение выбранной точки с точкой на рабочей частоте $\omega_{\text{раб}}$, полученной на первом этапе ПС) возможна ситуация, при которой этот выбор даст нулевую оценку уровня знаний ПС комбинированной САУ из-за неправильного выбора типа компенсатора, так как в этом случае $A_k \cap K = \emptyset$.

Далее, используя заполненную экспертом БЗ (таблицы 2.11-2.12), определяется критерий УЗ этапов проведения ПС комбинированной САУ по ЛП «Знания». Для определения уровня знаний настройки компенсатора используется правила нечётких продукций (таблица 2.11) в формате (2.3), где А – ЛП «Тип компенсатора», В – ЛП «Расстояние до точки» для точки рабочей частоты на графике АФХ реального компенсатора, а С - ЛП «Знания» для определения уровня знаний настройки компенсатора.

Таблица 2.11 – База знаний для определения уровня знаний настройки компенсатора

Посылки		Заключение
Тип компенсатора	Расстояние до точки рабочей частоты	Уровень знаний настройки компенсатора
Плохой	За пределом –	Плохо
Плохой	Далеко –	Плохо
Плохой	Близко –	Плохо
Плохой	Совпадает	Плохо
Плохой	Близко +	Плохо
Плохой	Далеко +	Плохо
Плохой	За пределом +	Плохо
Нормальный	За пределом –	Плохо
Нормальный	Далеко –	Плохо
Нормальный	Близко –	Удовлетворительно
Нормальный	Совпадает	Удовлетворительно
Нормальный	Близко +	Удовлетворительно
Нормальный	Далеко +	Плохо
Нормальный	За пределом +	Плохо
Хороший	За пределом –	Плохо
Хороший	Далеко –	Плохо
Хороший	Близко –	Удовлетворительно
Хороший	Совпадает	Хорошо
Хороший	Близко +	Удовлетворительно
Хороший	Далеко +	Плохо
Хороший	За пределом +	Плохо
Лучший	За пределом –	Плохо
Лучший	Далеко –	Удовлетворительно
Лучший	Близко –	Хорошо
Лучший	Совпадает	Отлично
Лучший	Близко +	Хорошо
Лучший	Далеко +	Удовлетворительно
Лучший	За пределом +	Плохо

Для определения уровня знаний ПС комбинированной САУ используются правила нечётких продукций (таблица 2.12) в формате (2.3), где А и В – ЛП «Знания» для определения уровня знаний настройки компенсатора и регулятора, а С - ЛП «Знания» для определения общего уровня знаний проведения ПС комбинированной САУ.

Таблица 2.12 – База знаний ПС комбинированной САУ

Посылки		Заключение
Уровень знаний настройки компенсатора	Уровень знаний настройки регулятора	Уровень знаний ПС комбинированной САУ
Плохо	Плохо	Плохо
Удовлетворительно	Плохо	Плохо
Отлично	Плохо	Хорошо
Хорошо	Плохо	Удовлетворительно
Плохо	Удовлетворительно	Плохо
Удовлетворительно	Удовлетворительно	Удовлетворительно
Отлично	Удовлетворительно	Хорошо
Хорошо	Удовлетворительно	Удовлетворительно
Плохо	Отлично	Удовлетворительно
Удовлетворительно	Отлично	Удовлетворительно
Отлично	Отлично	Отлично
Хорошо	Отлично	Хорошо
Плохо	Хорошо	Удовлетворительно
Удовлетворительно	Хорошо	Удовлетворительно
Отлично	Хорошо	Отлично
Хорошо	Хорошо	Хорошо

Описанные выше методы определения уровня знаний параметрического синтеза одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ позволит повысить качество самостоятельной работы обучаемых и значительно сократит время на контроль выполнения работ по ПС. Использование описанных способов интеллектуализации обучения ПС САУ ТП при создании лабораторного практикума, входящего в состав обучающей систем [125], дополнит существующие подходы при автоматизации обучения. В частности, данный подход даёт возможность включать практические задания в системы тестирования, а так же в адаптивные и экспертные обучающие системы.

2.2 Структура экспертной обучающей системы «Студиум»

Для изучения ПС САУ ТП разработана ЭОС «Студиум», состоящая из шести функциональных блоков (рисунк 2.13), объединённых единым графическим интерфейсом [124].

Блок «Учебные материалы» служит для предоставления теоретического материала и заданий для лабораторных работ. Лекции содержат ссылки на предусмотренные к ним лабораторные работы и соответствующее программное обеспечение из блока «Лабораторный комплекс» [163].

Блок «База данных» служит для организации клиент/серверной функциональности программы. Он обеспечивает связь с сервером и передачу данных от сервера клиентам.

Блок «Информационный блок» позволяет вести мониторинг успеваемости обучаемых.

Блок «Интерфейс эксперта» предназначен для заполнения базы знаний блока «Интеллектуальная система поддержки решений».

Блок «Лабораторный комплекс» служит для выполнения лабораторных работ и проведения ПС одноконтурной, каскадной и комбинированной САУ [125].

Блок «Интеллектуальная система поддержки решений» содержит систему нечеткого вывода, состоящую из базы знаний и блоков фаззификации, дефаззификации и логического вывода. Работа данного блока реализована на основе алгоритма Мамдани.

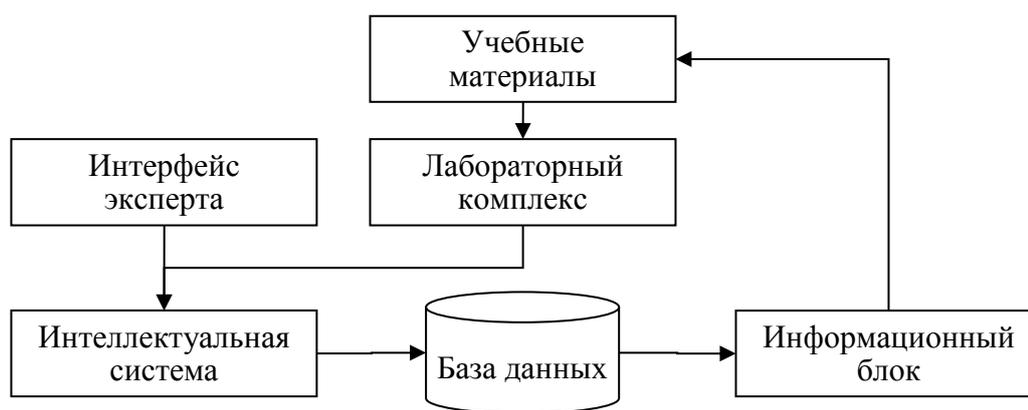


Рисунок 2.13 – Схема экспертной обучающей системы «Студиум»

Основываясь на [6] и [70], алгоритм Мамдани реализуется с помощью выполнения последовательности этапов, изображённых на рисунке 2.14. При этом каждый последующий этап получает на вход значения, полученные на

предыдущем шаге.

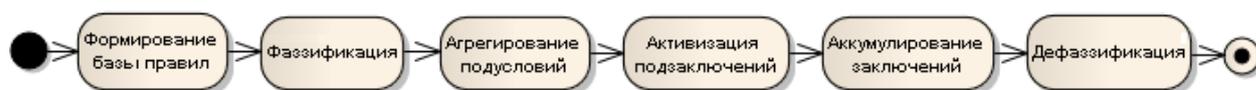


Рисунок 2.14 - Диаграмма процесса нечёткого вывода

Согласно [6] можно выделить следующие 6 этапов необходимых для реализации алгоритма Мамдани.

1. Формирование базы правил, состоящей из последовательности условий в форме «ЕСЛИ..., ТО...» в виде (2.3).

2. Фаззификация входных переменных. На вход данного этапа поступают сформированная база правил и массив входных данных $A = \{a_1, \dots, a_m\}$. В этом массиве содержатся значения всех входных переменных. Целью этого этапа является получение значений истинности для всех подусловий из базы правил. Это происходит так: для каждого из подусловий находится значение $b_i = \mu(a_i)$. Таким образом, получается множество значений b_i ($i = 1..k$).

3. Агрегирование подусловий. Целью этого этапа является определение степени истинности условий для каждого правила системы нечеткого вывода. То есть, для каждого условия находим минимальное значение истинности всех его подусловий по следующему принципу:

$$c_j = \min \{b_i\},$$

где $j = 1..n$;

i - число из множества номеров подусловий, в которых участвует j -ая входная переменная.

4. Активизация подзаклучений. На этом этапе происходит переход от условий к подзаклучениям. Целью данного этапа является получение совокупности «активизированных» нечётких множеств D_i для каждого из подзакключений в базе нечётких правил ($i = 1..q$). На реализации поставленной цели используется метод \min -активизации, который формально записывается следующим образом:

$$\mu'_i(x) = \min \{d_i, \mu_i(x)\},$$

где $\mu'_i(x)$ – «активизированная» функция принадлежности;

$\mu_i(x)$ – функция принадлежности терма;

d_i – степень истинности i -го подзаключения.

5. Аккумуляция заключений. Целью этого этапа является получение нечёткого множества (или их объединения) для каждой из выходных переменных. Выполняется он следующим образом: i -ой выходной переменной сопоставляется объединение множеств $E_i = \cup D_j$, где j – номера подзаключений, в которых участвует i -ая выходная переменная ($i = 1..s$). Объединением двух нечётких множеств является третье нечеткое множество со следующей функцией принадлежности:

$$\mu'_i(x) = \max \{ \mu_1(x), \mu_2(x) \},$$

где $\mu_1(x), \mu_2(x)$ – функции принадлежности объединяемых множеств.

6. Дефаззификации выходных переменных. Цель дефаззификации является получение количественного (четкого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных. В данной реализации алгоритма используется метод центра тяжести [6], в котором значение i -ой выходной переменной рассчитывается по формуле (2.4).

Для реализации алгоритма использовался объектно-ориентированный подход, предложенный в [6]. Диаграмма (рисунок 2.15) показывает наиболее существенные связи и отношения между классами, задействованными в алгоритме.

Правила (Rule) состоят из условий (Condition) и заключений (Conclusion), которые в свою очередь являются нечёткими высказываниями (Statement). Нечёткое высказывание включает в себя лингвистическую переменную (Variable) и терм, который представлен нечётким множеством (FuzzySet). На нечётком множестве определена функция принадлежности, значение которой можно получить с помощью метода `getValue()`. Этот метод определён в интерфейсе `FuzzySetIface`. При выполнении алгоритма необходимо будет воспользоваться «активизированным» нечётким множеством (`ActivatedFuzzySet`), которое некоторым образом переопределяет функцию

принадлежности нечёткого множества (FuzzySet). Также в алгоритме используется объединение нечётких множеств (UnionOfFuzzySets). Объединение также является нечётким множеством и поэтому имеет функцию принадлежности (определённую в FuzzySetIface).

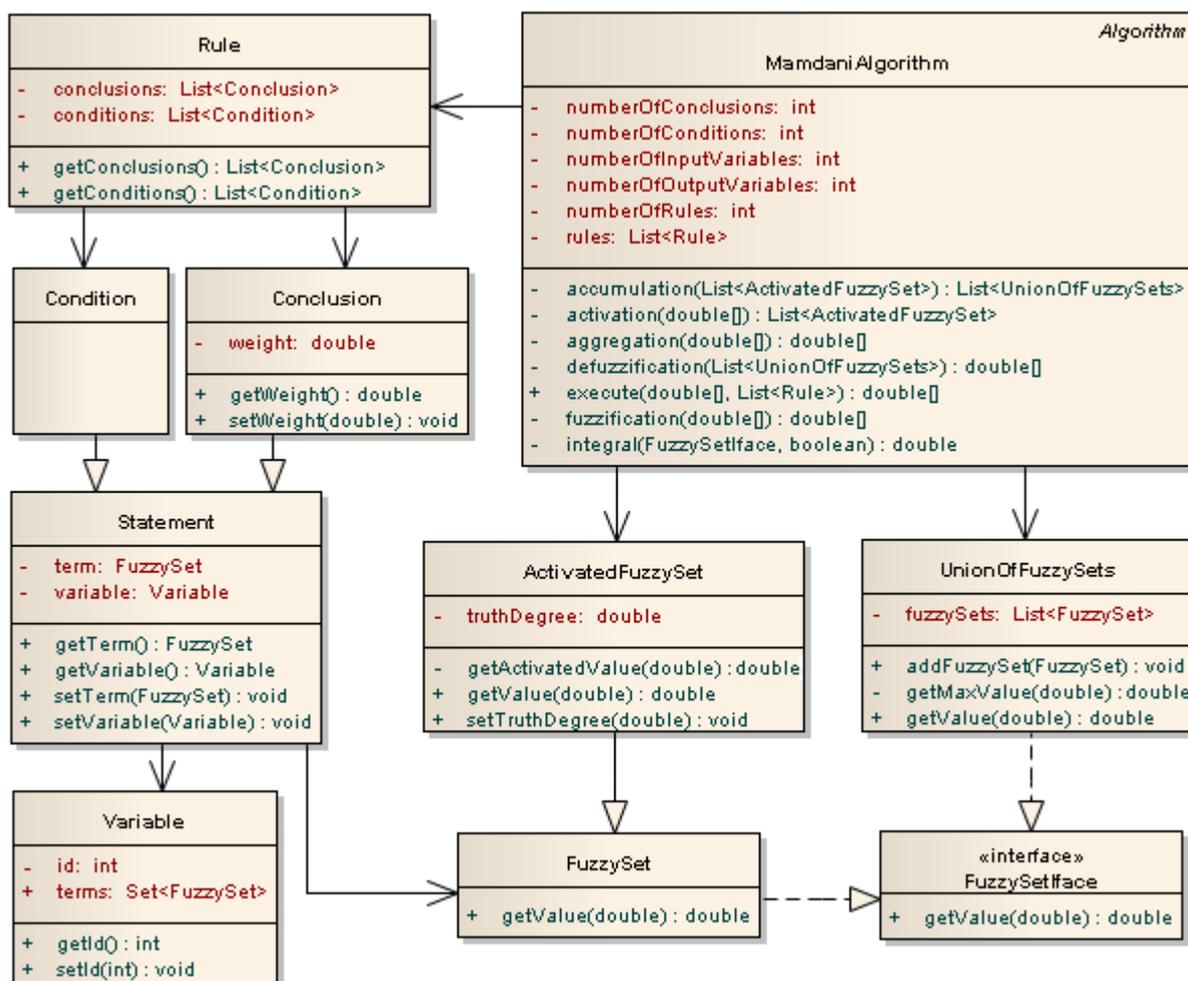


Рисунок 2.15 – Диаграмма классов реализации алгоритма Мамдани

Программная реализация Алгоритма Мамдани (MamdaniAlgorithm), используемая в блоке «Интеллектуальная система поддержки решений» ЭОС «Студиум» и описанная в [6], включает в себя все выше описанные этапы (рисунок 2.13), а также использует базу правил (List<Rule>) в качестве входных данных. Также алгоритм предполагает использование «активизированных» нечётких множеств (ActivatedFuzzySet) и их объединений (UnionOfFuzzySets).

Графический интерфейс ЭОС «Студиум» представляет собой кросс-платформенную оболочку, разработанную средствами библиотеки Qt и

объектно-ориентированного языка программирования C++. Он включает в себя пользовательскую и администраторскую реализации.

Пользовательская реализация ЭОС «Студиум» позволяет выполнять просмотр теоретического материала, списка лабораторных заданий и уровня их усвоения; проводить тестирование; производить ПС одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ согласно выданным ЭОС рекомендациям. Администраторская реализация предоставляет возможность редактирования всех хранимых в системе данных и правил БЗ.

2.3 Вывод по второй главе

В результате анализа научных работ по интеллектуализации процесса обучения установлено, что контроль уровня знаний обучаемых является важнейшим и неотъемлемым компонентом организации процесса самостоятельного обучения. При этом уровень знаний, как правило, контролируется с помощью систем тестирования.

Существующие системы тестирования знаний обычно затрагивают только теоретическую сторону изучаемого предмета и их использование для полноценного самообучения параметрическому синтезу не даст необходимого эффекта. Т.к. уровень знания параметрического синтеза САУ сложно оценить на основе тестирования, необходимо разработать метод интеллектуализации процесса его определения.

На основе проведенного в первой главе анализа способов интеллектуализации процессов обучения предложено использовать принцип построения экспертных обучающих систем, а также методы, применяемые в нечеткой логике для интеллектуализации обучения ПС САУ ТП.

Установлено, что основная часть проведения ПС состоит из построения графиков (АФХ, линии Д-разбиения, переходного процесса и т.п.) с дальнейшим поиском на них требуемых точек согласно заданным условиям. В связи с этим, одним из основных критериев УЗ поставленной задачи при ПС является точность определения требуемой точки на графике.

Для интеллектуализации контроля правильности выбора точек на графиках, необходимых для проведения ПС, введена лингвистическая переменная «Расстояние до точки». Уровень знаний проведения всех этапов параметрического синтеза оценивается с помощью ЛП «Знания».

Таким образом, используя лингвистические переменные для определения действий обучаемого и уровня получаемых при этом знаний, на основе баз знаний, заполненных экспертом данной области, можно интеллектуализировать процесс самообучения ПС.

Выделены основные этапы проведения ПС одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ и предложены методы интеллектуализации их изучения на основе нечёткого вывода, организованного на основе алгоритма Мамдани.

Для всех применяемых термов лингвистических переменных приведены формулы расчета их функций принадлежности, полученные на основе экспертного опроса.

Также приведены правила нечетких продукций, используемые в базах знаний для определения уровня знаний обучаемых всех этапов проведения параметрического синтеза.

На основе разработанного метода интеллектуализации обучения ПС САУ ТП предложена схема экспертной обучающей системы «Студиум», состоящая из шести функциональных блоков, и приведен способ алгоритмизации модулей, обеспечивающих работу системы нечёткого вывода.

ЭОС «Студиум» разработана средствами библиотеки Qt и языка программирования C++. С учетом особенностей используемых технологий данной библиотеки, ЭОС является кросс-платформенной, что обеспечивает возможность её использования на большом спектре различных операционных систем (ОС), включая мобильные ОС.

Алгоритмизация используемых ЭОС модулей для проведения ПС, а также сами методы ПС одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ приведены в третьей главе.

ГЛАВА 3

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Особенности параметрического синтеза систем автоматического управления

Различные методики параметрического синтеза систем автоматического управления значительно отличаются друг от друга в зависимости от вида системы, для которой она применяется. В частности, в системах регулирования: уровня кубовой жидкости и давления в ректификационной колонне; температуры и давления перегретого пара на тепловых электростанциях; технологических параметрах пиковых бойлеров на тепловых электростанциях и т.д. при расчёте настроек регуляторов применяются частотные методы ПС. Из графических построений, используемых для проведения частотных методов ПС САУ, следует отметить [117] необходимость построения графиков амплитудно-фазовой характеристики и переходного процесса системы. В качестве исходных данных для их расчёта используются математические описания динамических свойств отдельных линейных звеньев или всей линейной системы управления, следующего вида [74]:

дифференциальное уравнение

$$a_h \frac{d^h x(t)}{dt^h} + a_{h-1} \frac{d^{h-1} x(t)}{dt^{h-1}} + \dots + a_0 x(t) = b_g \frac{d^g y(t)}{dt^g} + b_{g-1} \frac{d^{g-1} y(t)}{dt^{g-1}} + \dots + b_0 y(t), \quad (3.1)$$

где $x(t)$ - входное воздействие;

$y(t)$ - выходной сигнал (управляемая переменная);

$a_h, a_{h-1}, \dots, a_0, b_g, b_{g-1}, \dots, b_0$ - постоянные коэффициенты, определяемые физическими параметрами звена (системы). Для физически реализуемых систем $g \leq h$;

2) передаточная функция

$$W(S) = \frac{y(S)}{x(S)} = K \frac{\sum_{i=0}^g b_i S^i}{\sum_{k=0}^h a_k S^k}, \quad (3.2)$$

где s - оператор Лапласа;

K - коэффициент усиления;

$y(S)$ и $x(S)$ - изображения по Лапласу соответственно $y(t)$ и $x(t)$ при нулевых начальных условиях;

3) амплитудно-фазовая характеристика (АФХ), или комплексная передаточная функция

$$W(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = K \frac{\sum_{i=0}^g b_i (j\omega)^i}{\sum_{k=0}^h a_k (j\omega)^k}, \quad (3.3)$$

где $y(j\omega)$ и $x(j\omega)$ - преобразования Фурье соответственно сигналов $y(t)$ и $x(t)$.

Среди перечисленных видов описаний динамических звеньев широко используются передаточные функции и АФХ. Причём, при параметрическом синтезе систем автоматического управления технологическими процессами для выполнения условий по качеству применяют расширенные АФХ (РАФХ) [34]. РАФХ получают из передаточной функции (3.2), придавая оператору Лапласа выражение, содержащее показатель качества системы управления, например

$$S = \omega \cdot (j - m), \quad (3.4)$$

где m – степень колебательности.

Подставив (3.4) в (3.2) получим:

$$W(j, m) = K \frac{\sum_{i=0}^g b_i \cdot \omega^i \cdot (j - m)^i}{\sum_{k=0}^h a_k \cdot \omega^k \cdot (j - m)^k}. \quad (3.5)$$

Получение РАФХ из передаточной функции. Для построения графиков РАФХ необходимо функцию (3.5) представить в виде комплексного выражения

с мнимой и действительной частями. Для этого необходимо сначала избавиться от мнимости в знаменателе при помощи умножения числителя и знаменателя на выражение, сопряжённое знаменателю. Основная сложность преобразования заключается в получении $\text{Re}(m, \omega)$ и $\text{Im}(m, \omega)$ из выражения $(j-m)^k$, так как в передаточной функции может быть различная величина степени полинома k , в зависимости от описываемого объекта.

Выражение разности двух слагаемых в заданной степени можно разложить последовательным перемножением. Использовать подобный подход решения этой задачи при алгоритмизации возможно в двух случаях: если использовать алгоритм перемножения разности слагаемых друг на друга, или если рассчитанный ранее результат использовать как шаблон для решения задач для заданной степени полинома. Во втором случае указанный подход имеет большой недостаток, т.к. расчёт полиномов ограничивается величиной степени разности слагаемых.

Представление полиномов числителя и знаменателя любого порядка в РАФХ (3.5) комплексными выражениями возможно при наличии алгоритма раскрытия разности $(j-m)^n$ для любой степени n . С этой целью рассмотрим j и m элементами бинома Ньютона [17] и получим следующее выражение:

$$(j+m)^n = j^n + C_n^1 \cdot j^{n-1} \cdot m + C_n^2 \cdot j^{n-2} \cdot m^2 + \dots + C_n^{n-1} \cdot j \cdot m^{n-1} + m^n, \quad (3.6)$$

где
$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Для применения уравнения (3.6) в функции (3.5) поменяем знак у степени колебательности на отрицательный и после преобразования получим:

$$(j-m)^n = j^n + (-m)^n + \sum_{p=1}^{n-1} (C_n^p \cdot j^{n-p} \cdot (-m)^p). \quad (3.7)$$

РАФХ представим в виде суммы мнимой и действительной частей:

$$W(\omega, m) = \text{Re}(\omega, m) + j \text{Im}(\omega, m). \quad (3.8)$$

Для приведения функции (3.5) к виду (3.8) представим числитель и знаменатель функции (3.5) комплексными выражениями

$$\operatorname{Re}(\omega, m) + j \operatorname{Im}(\omega, m) = K \frac{\operatorname{Re}_{\text{числ}}(\omega, m) + j \operatorname{Im}_{\text{числ}}(\omega, m)}{\operatorname{Re}_{\text{знам}}(\omega, m) + j \operatorname{Im}_{\text{знам}}(\omega, m)}. \quad (3.9)$$

С учётом (3.5) и (3.7) в выражении (3.9) получим:

для чётных степеней полиномов

$$\operatorname{Re}_{\text{числ}} = \sum_{i=0}^g \left[b_i \cdot \omega^i \cdot \left(-1^{i/2} + (-m)^i + \sum_{p=2,4,6\dots}^{i-1} (C_i^p \cdot (-1)^{(i-p)/2} \cdot (-m)^p) \right) \right], \quad (3.10)$$

$$\operatorname{Im}_{\text{числ}} = \sum_{i=0}^g \left[b_i \cdot \omega^i \cdot \left((-m)^i + \sum_{p=1,3,5\dots}^{i-1} (C_i^p \cdot (-1)^{(i+3-p)/2} \cdot (-m)^p) \right) \right], \quad (3.11)$$

$$\operatorname{Re}_{\text{знам}} = \sum_{k=0}^h \left[a_k \cdot \omega^k \cdot \left(-1^{k/2} + (-m)^k + \sum_{p=2,4,6\dots}^{k-1} (C_k^p \cdot (-1)^{(k-p)/2} \cdot (-m)^p) \right) \right], \quad (3.12)$$

$$\operatorname{Im}_{\text{знам}} = \sum_{k=0}^h \left[a_k \cdot \omega^k \cdot \left((-m)^k + \sum_{p=1,3,5\dots}^{k-1} (C_k^p \cdot (-1)^{(k+3-p)/2} \cdot (-m)^p) \right) \right]; \quad (3.13)$$

для нечётных

$$\operatorname{Re}_{\text{числ}} = \sum_{i=0}^g \left[b_i \cdot \omega^i \cdot \left((-m)^i + \sum_{p=1,3,5\dots}^{i-1} (C_i^p \cdot (-1)^{(i-p)/2} \cdot (-m)^p) \right) \right], \quad (3.14)$$

$$\operatorname{Im}_{\text{числ}} = \sum_{i=0}^g \left[b_i \cdot \omega^i \cdot \left(-1^{(i+3)/2} + (-m)^i + \sum_{p=2,4,6\dots}^{i-1} (C_i^p \cdot (-1)^{(i+3-p)/2} \cdot (-m)^p) \right) \right], \quad (3.15)$$

$$\operatorname{Re}_{\text{знам}} = \sum_{k=0}^h \left[a_k \cdot \omega^k \cdot \left((-m)^k + \sum_{p=1,3,5\dots}^{k-1} (C_k^p \cdot (-1)^{(k-p)/2} \cdot (-m)^p) \right) \right], \quad (3.16)$$

$$\operatorname{Im}_{\text{знам}} = \sum_{k=0}^h \left[a_k \cdot \omega^k \cdot \left(-1^{(k+3)/2} + (-m)^k + \sum_{p=2,4,6\dots}^{k-1} (C_k^p \cdot (-1)^{(k+3-p)/2} \cdot (-m)^p) \right) \right]. \quad (3.17)$$

Если описываемый канал передачи воздействия содержит звено чистого запаздывания с передаточной функцией $W(S) = e^{-\tau S}$, то его амплитудно-фазовая характеристика с использованием формулы Эйлера представляется в виде:

$$e^{-\tau(j\omega - m\omega)} = e^{\tau m\omega} \cdot (\cos(\omega\tau) - j \sin(\omega\tau)). \quad (3.18)$$

Добавив в (3.9) звено чистого запаздывания, с учётом (3.18) получим мнимую и действительную части передаточной функции (3.8):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\omega, m) = & K \cdot e^{m\omega\tau} \cdot \frac{(\operatorname{Re}_{\text{числ}} \cdot \operatorname{Re}_{\text{знам}} + \operatorname{Im}_{\text{числ}} \cdot \operatorname{Im}_{\text{знам}}) \cdot \cos(\omega\tau)}{\operatorname{Re}_{\text{знам}}^2 + \operatorname{Im}_{\text{знам}}^2} + \\ & + K \cdot e^{m\omega\tau} \frac{(\operatorname{Im}_{\text{числ}} \cdot \operatorname{Re}_{\text{знам}} - \operatorname{Re}_{\text{числ}} \cdot \operatorname{Im}_{\text{знам}}) \cdot \sin(\omega\tau)}{\operatorname{Re}_{\text{знам}}^2 + \operatorname{Im}_{\text{знам}}^2}, \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\omega, m) = & K \cdot e^{m\omega\tau} \frac{(\operatorname{Im}_{\text{числ}} \cdot \operatorname{Re}_{\text{знам}} - \operatorname{Re}_{\text{числ}} \cdot \operatorname{Im}_{\text{знам}}) \cdot \cos(\omega\tau)}{\operatorname{Re}_{\text{знам}}^2 + \operatorname{Im}_{\text{знам}}^2} - \\ & - K \cdot e^{m\omega\tau} \cdot \frac{(\operatorname{Re}_{\text{числ}} \cdot \operatorname{Re}_{\text{знам}} + \operatorname{Im}_{\text{числ}} \cdot \operatorname{Im}_{\text{знам}}) \cdot \sin(\omega\tau)}{\operatorname{Re}_{\text{знам}}^2 + \operatorname{Im}_{\text{знам}}^2}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Описанный метод может эффективно использоваться при расчёте РАФХ, линии D-разбиения и переходного процесса на ЭВМ. Блок схема алгоритма расчёта с использованием этого метода приведена в приложении 1.

Построение переходного процесса является завершающим этапом синтеза системы управления. По полученному графику переходного процесса при единичном воздействии можно наглядно определить основные показатели качества регулирования - время регулирования, перерегулирование, степень затухания, установившуюся ошибку.

Однако этого не достаточно для оценки системы регулирования с точки зрения их практической пригодности. Переходной процесс должен иметь совершенно определённый характер, диктуемый требованиями технологии.

Таким образом, условие устойчивости системы регулирования является необходимым, но недостаточным для получения желаемого (оптимального) процесса регулирования.

Широкое распространение для оценки качества регулирования получил так называемый интегральный квадратичный критерий

$$I = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt, \quad (3.21)$$

который представляет собой площадь, заключённую между кривой $[e(t)]^2$ и осью времени.

Использовать интегральные критерии необходимо не изолированно, а совместно с оценками качества регулирования, например, с учётом степени

затухания Ψ переходного процесса. Практически это сводится к выбору конкретных значений параметров регулятора на линии равного затухания $\Psi = \text{const}$ в плоскости настроечных параметров регулятора.

Интегральный квадратичный критерий можно определить по следующему изображению ошибки:

$$I = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi j} \int_{C-j\infty}^{C+j\infty} E(s)E(-s) ds. \quad (3.22)$$

Для практических целей более удобной является формула Релея [147], которая получается из уравнения (3.22) заменой $s = j\omega$:

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [E(j\omega)]^2 d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\Phi e(j\omega)]^2 [G(j\omega)]^2 d\omega. \quad (3.23)$$

Если проинтегрированное выражение представить в виде

$$[E(j\omega)]^2 = [\Phi e(j\omega)]^2 [G(j\omega)]^2 = \frac{B(j\omega)}{[A(j\omega)]^2} = \frac{B(j\omega)}{A(j\omega) \cdot A(-j\omega)}, \quad (3.24)$$

где:

$$A(j\omega) = a'_0(j\omega)^n + a'_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a'_{n-1}(j\omega) + a'_n, \quad (3.25)$$

$$B(j\omega) = b'_0(j\omega)^{2n-2} + b'_1(j\omega)^{2n-4} + \dots + b'_{n-2}(j\omega)^2 + b'_{n-1}, \quad (3.26)$$

то интеграл (3.23) вычисляется по формуле [33]:

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B(j\omega)}{[A(j\omega)]^2} d\omega = \frac{(-1)^{n+1} \cdot M_n}{2a'_0 \cdot \Delta_n}, \quad (3.27)$$

где: $M_n = \begin{vmatrix} a'_1 & a'_3 & a'_5 & \dots & 0 \\ a'_0 & a'_2 & a'_4 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a'_n \end{vmatrix}$ - старший определитель Гурвица;

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} b'_1 & b'_2 & b'_3 & \dots & b'_{n-1} \\ a'_0 & a'_2 & a'_4 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a'_n \end{vmatrix}.$$

Для получения коэффициентов уравнений a'_n , (3.25) и b'_n (3.26) необходимо привести изображение ошибки через передаточную функцию

замкнутой системы к виду (3.24).

$$E(S) = \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{1 - W_{oy}(S)W_{yy}(S)}, \quad (3.28)$$

где: W_{oy} – передаточная функция объекта управления;

W_{yy} – передаточная функция управляющего устройства.

$$W_{oy} = K \frac{b_0 + b_1 S + b_2 S^2 + \dots + b_n S^n}{a_0 + a_1 S + a_2 S^2 + \dots + a_m S^m} e^{-tS}, \quad (3.29)$$

$$W_{yy} = C_1 + \frac{C_0}{S} + C_2 S^2, \quad (3.30)$$

где: b_n, a_n – коэффициенты полиномов соответственно числителя и знаменателя передаточной функции замкнутой системы;

C_0, C_1, C_2 – соответственно пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющая вектора настроечных параметров регулятора.

Для приведения функции (3.29) к виду выражения (3.24), согласно [16], [85], [102] звено чистого запаздывания e^{-tS} можно преобразовать в ряд Паде:

$$\begin{aligned} W_{oy} &= K \frac{b_0 + b_1 S + \dots + b_n S^n}{a_0 + a_1 S + \dots + a_m S^m} \cdot \frac{1 - 0.5\tau S + 0.83\tau^2 S^2}{1 + 0.5\tau S + 0.83\tau^2 S^2} = \\ &= K \frac{b_{t0} + b_{t1} S + \dots + b_{t(2+n)} S^{2+n}}{a_{t0} + a_{t1} S + \dots + a_{t(2+m)} S^{2+m}}. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Из уравнения (3.29), с учётом передаточных функций (3.31) и (3.32), были выведены [64] универсальные формулы для нахождения коэффициентов уравнения (3.25) и (3.26):

$$b'_k = (-1)^k \cdot \left(a_{ik}^2 + \sum_{i=1}^k (-1)^i \cdot 2a_{t(k+i)} \cdot a_{t(k-i)} \right) \cdot C_0^2, \quad (3.32)$$

$$a'_k = a_{t(k-1)} \cdot C_0 + K(b_{ik} + b_{t(k-1)} C_0 C_1 + b_{t(k-2)} C_0 C_2). \quad (3.33)$$

Пример. Продемонстрируем зависимость качества оценки САУ от выбранных параметров регуляторов, и разницу при использовании различных подходов по их нахождению.

На рисунке 3.1 приведены результаты расчетов квадратичного интегрального критерия в системе с ПИ-регулятором при следующих исходных данных:

$$W_{oy}(S) = 5 \cdot \frac{1}{1 + 20S + 100S^2} e^{-4S},$$

степень колебательности $m=0,221$, воздействие на систему изменением задания.

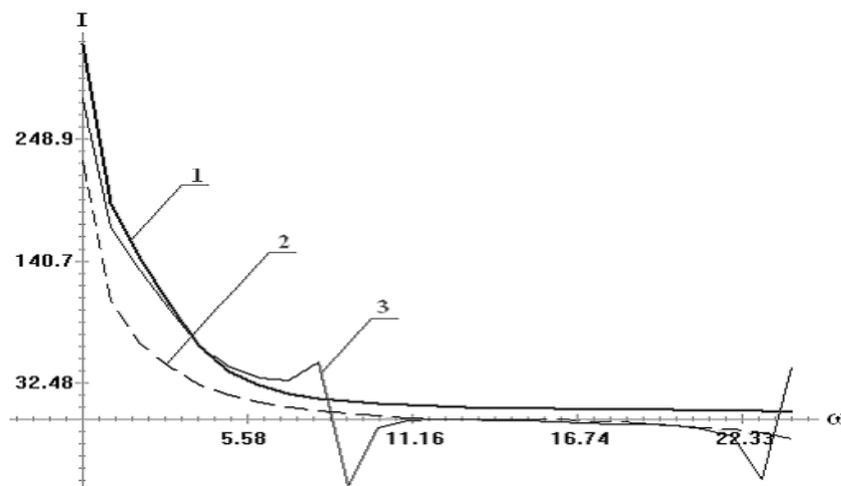


Рисунок 3.1 - Зависимость квадратичного интегрального критерия от частоты (1-расчёт численным интегрированием, 2-расчёт при аппроксимации рядом Паде 1-го порядка, 3-расчёт при аппроксимации рядом Паде 2-го порядка)

Можно считать, что в области низких частот аппроксимация рядом Паде второго порядка дает удовлетворительный и более точный результат, чем аппроксимация рядом Паде первого порядка. Однако, при вычислении критерия с использованием аппроксимации звена запаздывания рядом Паде второго порядка, наблюдаются двухсторонние аномальные «всплески» на графике зависимости критерия от частоты. Полученный результат свидетельствует о том, что для вычисления точных значений квадратичного критерия при наличии в объектах управления чистого запаздывания, целесообразно численно вычислять этот критерий в процессе моделирования переходного процесса. Для качественной оценки влияния параметров регулятора на квадратичный интегральный критерий в образовательном процессе могут быть использованы аналитические методы при аппроксимации звеньев чистого запаздывания рядами Паде.

3.2 Параметрический синтез одноконтурной системы автоматического управления

3.2.1 Теоретические основы синтеза одноконтурной системы автоматического управления

Одноконтурные системы управления используются при автоматизации процесса ректификации, например, для регулирования уровня в кубе колонны изменением отвода кубовой жидкости, а также во многих подсистемах тепловых конденсационных электростанциях, например, для стабилизация давления и температуры перегретого пара парового тракта.

При параметрическом синтезе одноконтурных автоматических систем регулирования ставится задача определения оптимальных настроечных параметров регулятора, при заданной переходной функции объекта по каналу управления, обеспечивающих минимальное значение квадратичной интегральной оценки качества переходного процесса.

$$J = \int_0^{\infty} \varepsilon_n^2(\bar{k}, t) dt \rightarrow \min_{k \in K}$$

при степени затухания

$$\psi \geq \psi_{\text{зад}}$$

где $\varepsilon_n(t)$ - переходная составляющая ошибки регулирования; \mathbf{k} - вектор настроечных параметров регулятора; K - множество допустимых значений настроечных параметров регулятора.

В схеме (рисунок 3.2) передаточная функция эквивалентного регулятора:

$$\bar{W}_p(S) = K_o \cdot W_p(S),$$

где K_o - коэффициент передачи измерителя выходной переменной объекта.

$$\bar{W}_y(s) = \cdot K_{oy} \cdot W_y(s).$$

Здесь K_{oy} - коэффициент передачи органов управления.

Для общего случая возьмём в САУ ПИД- регулятор с передаточной функцией

$$W_p(S) = K_1 + \frac{K_0}{S} + K_2 S,$$

где K_1 , K_0 и K_2 - коэффициенты пропорциональности соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих.

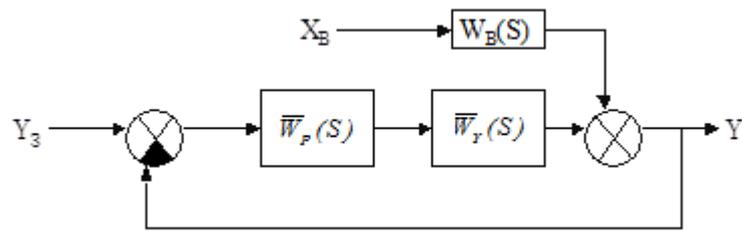


Рисунок 3.2 - Расчётная схема одноконтурной САУ

В процессе расчёта получаются не истинные параметры K_i ($i=0,1,2$), а параметры C_i :

$$\bar{W}_p(S) = C_1 + \frac{C_0}{S} + C_2 S,$$

где $C_i = K_i K_0$ ($i=0,1,2$).

По вычисленным значениям C_0 , C_1 и C_2 находятся истинные настройки K_0 , K_1 и K_2 :

$$K_0 = \frac{\bar{C}_0}{K_0}; K_1 = \frac{\bar{C}_1}{K_0}; K_2 = \frac{\bar{C}_2}{K_0}.$$

Основные этапы расчёта. Необходимой информацией для расчёта являются передаточные функции объекта по каналам возмущения $W_e(S)$ и управления $W_y(S)$.

При определении оптимальных настроечных параметров регулятора используют связь между степенью затухания переходного процесса Ψ и степенью колебательности m . Для систем второго порядка эта связь задаётся в виде: $\Psi = 1 - e^{-2\pi m}$. Для систем управления высокого порядка эта зависимость является приближенной. Степень ее достоверности зависит от расположения корней характеристического уравнения системы управления. Значение степени колебательности рекомендуется выбирать $m = 0,221$ или $m = 0,336$, что соответствует степени затухания $\Psi = 0,75$ и $\Psi = 0,9$ соответственно.

При данной постановке задачи параметрический синтез одноконтурной системы управления включает следующие этапы:

1. Выбор законов регулирования (типа регулятора).
2. Определение области изменения настроечных параметров, обеспечивающих выполнение условий $m = m_{\text{зад}}$ для каждого типа регуляторов.
3. Определение оптимальных настроек.
4. Построение переходных процессов.
5. Анализ качества переходных процессов в системе управления с каждым из регуляторов.

Определение области изменения настроечных параметров, обеспечивающих выполнение условий $m = m_{\text{зад}}$.

Для определения оптимальных значений настроечных параметров регуляторов при заданном условии пользуются методом D - разбиения. Сущность метода D - разбиения состоит в том, что в плоскости настроечных параметров регулятора строится для определённого диапазона частот линия, в каждой точке которой система обеспечивает заданное требование по распределению корней характеристического уравнения и, в частности, например, заданную степень колебательности.

Чтобы сократить объём вычислений, нужно знать диапазон частот для построения участка линии D - разбиения, соответствующий положительным значениям настроечных параметров регулятора.

На рисунке 3.3 приведены расширенные амплитудно-фазовые характеристики объекта управления и показаны условия выбора нужного диапазона частот. Угол $\gamma_{\text{зад}}$ здесь соответствует заданному значению степени колебательности $m = m_{\text{зад}}$. Они связаны между собой выражением $\gamma_{\text{зад}} = \text{arctg}(m_{\text{зад}})$.

Для построения расширенной АФХ ($W(m, \omega)$) в выражении передаточной функции объекта выполняется замена s на $(-m \cdot \omega + j \cdot \omega)$.

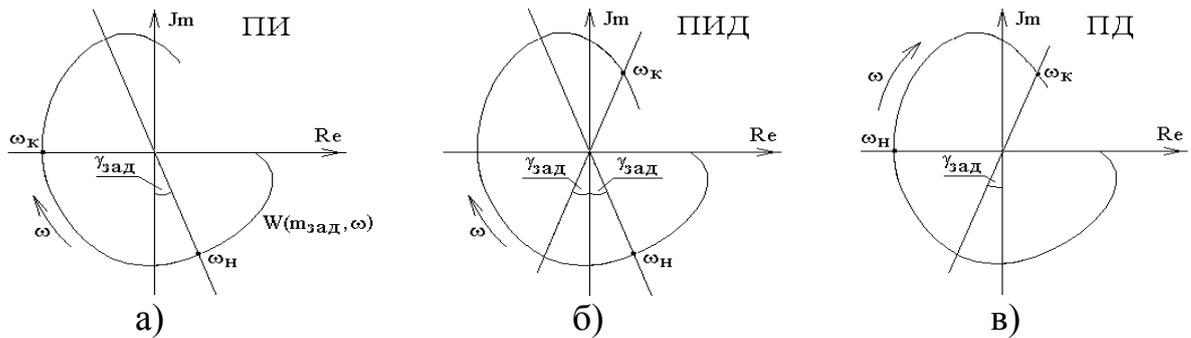


Рисунок 3.3 - Расширенная АФХ объекта к выбору диапазона частот для построения линии D -разбиения

Определение оптимальных настроек регулятора.

Условие выполнения требований $m = m_{\text{зад}}$ выражается соотношением

$$W(m_{\text{зад}}, \omega) \cdot W_p(m_{\text{зад}}, \omega, C_0, C_1, C_2) = -1. \quad (3.34)$$

Соотношение (3.34) базируется на критерии Найквиста, согласно которому система будет иметь степень колебательности $m = m_{\text{зад}}$, если расширенная АФХ разомкнутой системы $W_{pc}(m_{\text{зад}}, \omega)$ проходит через точку с координатами $(-1, j \cdot 0)$.

Для ПИД-регулятора это условие имеет вид

$$C_1 W_y(m, \omega) + \frac{C_0 \cdot W_y(m, \omega)}{(-m\omega + j\omega)} + C_2 (-m\omega + j\omega) \cdot W_y(m, \omega) + 1 = 0.$$

Введём обозначения:

$$W_y(m, \omega) = V(m, \omega);$$

$$\frac{W_y(m, \omega)}{-m\omega + j\omega} = X(m, \omega);$$

$$W_y(m, \omega) \cdot (-m\omega + j\omega) = Y(m, \omega).$$

Представим:

$$V(m, \omega) = V_1(m, \omega) + jV_2(m, \omega),$$

$$Y(m, \omega) = Y_1(m, \omega) + jY_2(m, \omega),$$

$$X(m, \omega) = \frac{V_1(m, \omega) + jV_2(m, \omega)}{-m\omega + j\omega} = X_1(m, \omega) + jX_2(m, \omega).$$

Теперь перепишем уравнение (3.35) в виде:

$$C_1 V_1(m, \omega) + C_0 X_1(m, \omega) + C_2 Y_1(m, \omega) + \\ + j[C_1 V_2(m, \omega) + C_0 X_2(m, \omega) + C_2 Y_2(m, \omega)] = -1.$$

Отсюда:

$$C_1 V_1(m, \omega) + C_0 X_1(m, \omega) + C_2 Y_1(m, \omega) = -1, \quad (3.35)$$

$$C_1 V_2(m, \omega) + C_0 X_2(m, \omega) + C_2 Y_2(m, \omega) = 0. \quad (3.36)$$

При $m = m_{\text{зад}}$ и выбранном значении ω найти C_0 , C_1 и C_2 по уравнениям (3.35) и (3.36) невозможно, т.к. система не доопределена. Поэтому C_2 обычно задают соотношением [130]:

$$C_2 = \alpha \cdot C_1^2 / C_0,$$

где α выбирается в диапазоне $0,1 \leq \alpha \leq 0,6$.

Линия D -разбиения для ПИД-регулятора строится при различных значениях α . В полученных рабочих точках сравниваются переходные процессы. Выбирается наиболее предпочтительный. Строится только рабочий участок линии D -разбиения в диапазоне частот, указанном в предыдущем разделе.

Для САУ с ПИ-регулятором $C_2 = 0$. Уравнение линии D -разбиения в этом случае имеет вид:

$$C_1 V_1(m, \omega) + C_0 X_1(m, \omega) = -1,$$

$$C_1 V_2(m, \omega) + C_0 X_2(m, \omega) = 0.$$

Рабочая точка для ПИ-регулятора выбирается несколько правее точки с максимальным значением C_0 (рисунок 3.4).

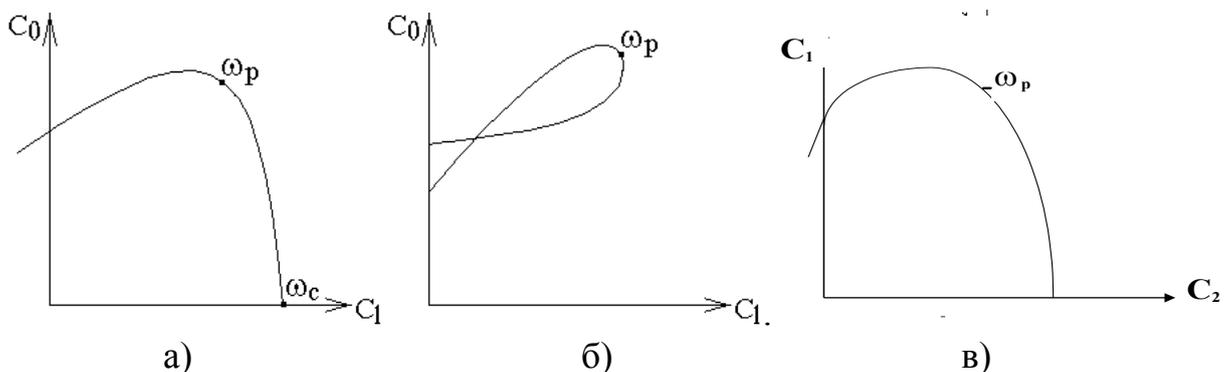


Рисунок 3.4 - Выбор оптимальных значений настроечных параметров
а) ПИ-, б) ПИД-, в) ПД- регуляторов

Для САУ с ПД-регулятором $C_0 = 0$. Уравнение линии D -разбиения в этом случае имеет вид:

$$C_1 V_1(m, \omega) + C_2 Y_1(m, \omega) = -1,$$

$$C_1 V_2(m, \omega) + C_2 Y_2(m, \omega) = 0.$$

Построение переходных процессов.

Рассмотрим приближенный метод построения переходного процесса, предложенный Акульшиным [110]. Основное достоинство метода состоит в возможности программирования на ЭВМ.

Формула для построения переходного процесса может быть записана следующим образом [126]:

$$y(i \cdot \Delta t) = \frac{2d}{\pi} \left[\frac{\pi \operatorname{Re}(0)}{4} + \sum_{k=1}^n \left[\frac{\operatorname{Re}(k\omega_0)}{k} \sin(k\omega_0 i \Delta t) + \frac{\operatorname{Im}(k\omega_0)}{k} \cos(k\omega_0 i \Delta t) \right] \right], \quad k = 1, 3, 5, \dots; i = 0, 1, 2, \dots, m \quad (3.37)$$

где $\operatorname{Re}(\omega)$, $\operatorname{Im}(\omega)$ - вещественная и мнимая частотные характеристики замкнутой системы;

d - амплитуда входного сигнала.

Число гармоник n достаточно выбрать в пределах 15-30. Интервал разбиения Δt определяется по формуле $\Delta t = T/(2m)$.

Если выбирать $m \geq 12$, то за полупериод колебаний получим не менее 12 точек переходной кривой. Сложной задачей является выбор величины ω_0 (или периода T). Рекомендуется значение T выбирать по формуле

$$T/2 = 3.5 \cdot 2\pi / \omega_p, \quad (3.38)$$

где ω_p - рабочая частота, соответствующая оптимальным настроечным параметрам.

Формула (3.38) получена из предположения, что переходный процесс в замкнутой САУ близок к процессу в колебательном звене, который заканчивается практически за 3,5 периода собственных колебаний. При таком выборе T седьмая гармоника ряда (3.37) совпадает с рабочей частотой. Для

определения ω_0 и Δt получаем формулы:

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \omega_p / 7, \\ \Delta t &= \frac{T}{2m} = \frac{\pi}{\omega_0 m}.\end{aligned}\tag{3.39}$$

Значения $\text{Re}(\omega)$ и $\text{Im}(\omega)$ в (3.37) вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}\Phi_y(j\omega) &= \frac{W_p(j\omega) \cdot W_y(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_y(j\omega)} = \text{Re}_y(\omega) + j\text{Im}_y(\omega), \\ \Phi_B(j\omega) &= \frac{W_B(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_y(j\omega)} = \text{Re}_B(\omega) + j\text{Im}_B(\omega), \\ \Phi_\varepsilon(j\omega) &= \frac{1}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_y(j\omega)} = \text{Re}_\varepsilon(\omega) + j\text{Im}_\varepsilon(\omega).\end{aligned}$$

Исходными данными для расчёта являются передаточные функции $W_p, W_y, W_\varepsilon, \omega_p, n, m$ и амплитуда входного воздействия d (удобно принять $d = 1$).

3.2.2 Программная реализация синтеза одноконтурной системы автоматического управления

Для расчёта графиков АФХ и D-разбиения [122] используется функция «AFH_», возвращающая указатель на массив точек типа «DPOINT», в которых хранятся значения мнимой и действительной частей (значения абсциссы и ординаты) и соответствующая им частота. Блок-схема алгоритма функции «AFH_» приведена в приложении 1.

Входные данные функции:

double *pol_B – указатель на полином числителя передаточной функции;

int sizeB – размер полинома числителя;

double *pol_A – указатель на полином знаменателя передаточной функции;

int sizeA – размер полинома знаменателя;

double tau – запаздывание;

double m – степень колебательности;

double begin_w – начальная частота;

double end_w – конечная частота;

double spacebegin_w – шаг по частоте;

int iRegul – тип регулятора (1 – ПИД-регулятор, 2 – PI-регулятор, 3 – ПД-регулятор);

bool AFH – вид рассчитываемого графика (1 – АФХ, 0 – D-разбиение).

Блок-схема функции «AFH_» приведена в приложении 1.

Вначале функция определяет количество точек графика. Затем в циклах «for1» и «for2» отсекаются последние члены полиномов числителя и знаменателя соответственно, если они равны нулю. После этого объявляются переменные «с0», «с1» и «с2», которые приравниваются нулю.

Создаётся массив точек «DP» типа «DPOINT».

Далее перебираются все частоты АФХ. Для каждой частоты рассчитываются параметры «Re» и «Im».

Если значение переменной «AFH» равно «true», координата x для точки массива «DP», соответствующей данной частоте, равна «Re», координата y – «Im».

Если значение переменной «AFH» равно «false», вызывается функция «LineD», которая рассчитывает параметры «с0», «с1», «с2» регулятора. Для регулятора первого или второго типа координата x для точки массива «DP», соответствующей данной частоте, равна «с1», координата y – «с0». Для регулятора третьего типа координата x равна «с2», координата y – «с1».

Координата ω для точки массива «DP», соответствующей данной частоте, равна ω .

Функция возвращает массив «DP».

3.3 Параметрический синтез комбинированной системы автоматического управления

При регулировании температур на нижней или на верхней контрольных тарелках ректификационной колонны, возможны случаи, когда одноконтурные САУ не обеспечивают удовлетворительного качества регулирования ни при каких настройках регулятора. То же самое наблюдается при регулировании коэффициента избытка воздуха за пароперегревателем и повышении

экономичности процесса работы тепловых конденсационных электростанциях. Одной из причин низкого качества регулирования на данных технологических объектах управления (ТОУ) является воздействие существенных возмущений. Если имеется возможность автоматического измерения наиболее «сильного» возмущающего воздействие на ТОУ, то применяется комбинированная САУ. Действие контролируемого возмущения компенсируется специальным устройством, компенсатором [39], [66], а с помощью регулятора, находящегося в контуре обратной связи, устраняется действие других (не контролируемых) возмущений. Таким образом, регулирующее воздействие формируется на основании двух принципов регулирования: по отклонению регулируемой переменной от заданного значения и по возмущению. Компенсация возмущений осуществляется путём введения дополнительного управляющего воздействия либо на вход канала регулирования ТОУ (рисунок 3.7а.), либо непосредственно на вход регулятора (рисунок 3.8а). Подобные системы находят применение в различных отраслях промышленности: в пищевой и химической промышленности [66], в нефтехимии [60], в теплоэнергетике [38].

Основой расчёта комбинированных систем регулирования является принцип инвариантности. Применительно к рассматриваемым системам этот принцип можно сформулировать следующим образом: отклонение выходной координаты ТОУ $y(t)$ под действием возмущения $x(t)$ должно быть тождественно равно нулю:

$$\Delta y(t, x) = y(t) - y_0(t) \equiv 0. \quad (3.40)$$

Переходя к изображениям по Лапласу $x(s)$ и $y(s)$ сигналов $x(t)$ и $y(t)$, условие (3.40) при $y_0(t) = 0$ можно преобразовать к виду:

$$y(s) \equiv 0. \quad (3.41)$$

Равенство (3.41) используется для вывода передаточной функции компенсатора $R_k(s)$ при заданных по каналам возмущения $W_x(s)$ и регулирования $W_u(s)$ характеристиках объекта. Для случая, когда сигнал от компенсатора подаётся на вход объекта (рисунок 3.5а), структурная схема

комбинированной САУ преобразуется к последовательному соединению разомкнутой системы и замкнутого контура (рисунок 3.5б), передаточные функции которых соответственно равны:

$$W_{pc}^{(1)}(s) = W_x(s) + R_k(s) \cdot W_u(s) \text{ и } W_{zc} = \frac{1}{1 - W_u(s)R(s)}.$$

При этом передаточная функция комбинированной САУ равна

$$W_{kc}^{(1)}(s) = W_{pc}^{(1)} \cdot W_{zc}(s) \quad (3.42)$$

и

$$y(s) = x(s) \cdot W_{kc}^{(1)}(s). \quad (3.43)$$

Подстановка выражений (3.42) и (3.43) в условие инвариантности (3.41) приводит к следующим соотношениям:

$$x(s) \cdot W_{pc}^{(1)}(s) \cdot W_{zc}(s) = 0.$$

Если $x(s) \neq 0$ и $W_{zc}(s) \neq 0$, то получаем условие инвариантности в виде:

$$W_x(s) + R_k(s) \cdot W_u(s) = 0,$$

откуда

$$R_k(s) = -\frac{W_x(s)}{W_u(s)}. \quad (3.44)$$

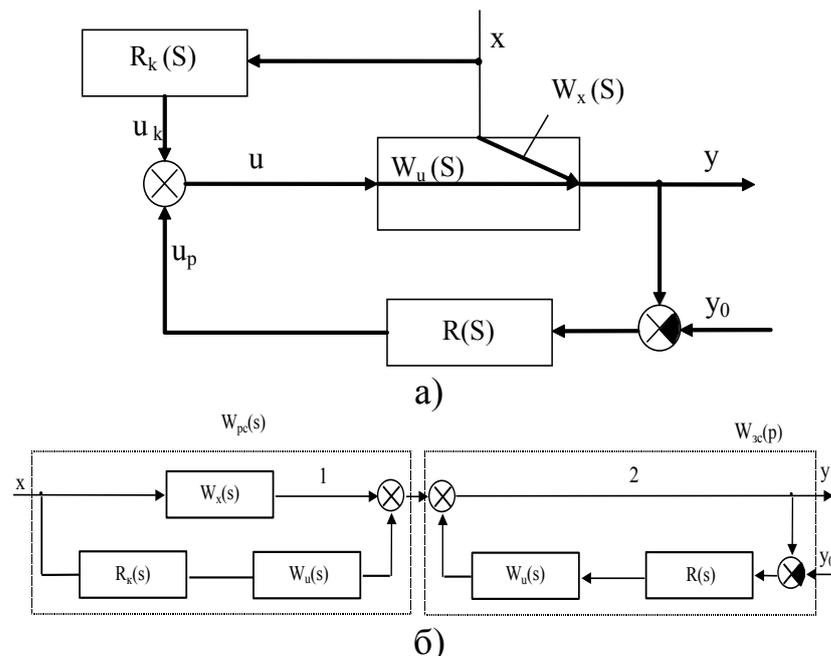


Рисунок 3.5 – Структурные схемы комбинированной САУ при подаче компенсирующего сигнала на вход объекта: а) исходная; б) преобразованная (1-разомкнутая система; 2-замкнутая САУ).

При использовании комбинированной САУ второго типа (рисунок 3.6а) аналогичный вывод условия инвариантности приводит к соотношениям вида (рисунок 3.6б):

$$y(s) = x(s) \cdot W_{kc}^{(2)}(s),$$

где

$$W_{kc}^{(2)}(s) = W_{pc}^{(2)}(s) \cdot W_{zc}(s) \quad (3.45)$$

и

$$W_{pc}^{(2)}(s) = W_x(s) + R_k(s) \cdot R(s) \cdot W_u(s).$$

С учётом условий (3.41) и (3.45) имеем

$$x(s) \cdot W_{pc}^{(2)}(s) \cdot W_{zc}(s) = 0,$$

следовательно, если $x(s) \neq 0$ и $W_{zc}(s) \neq 0$, то $W_{pc}^{(2)}(s) = 0$, откуда

$$R_k(s) = -\frac{W_x(s)}{W_u(s) \cdot R(s)}. \quad (3.46)$$

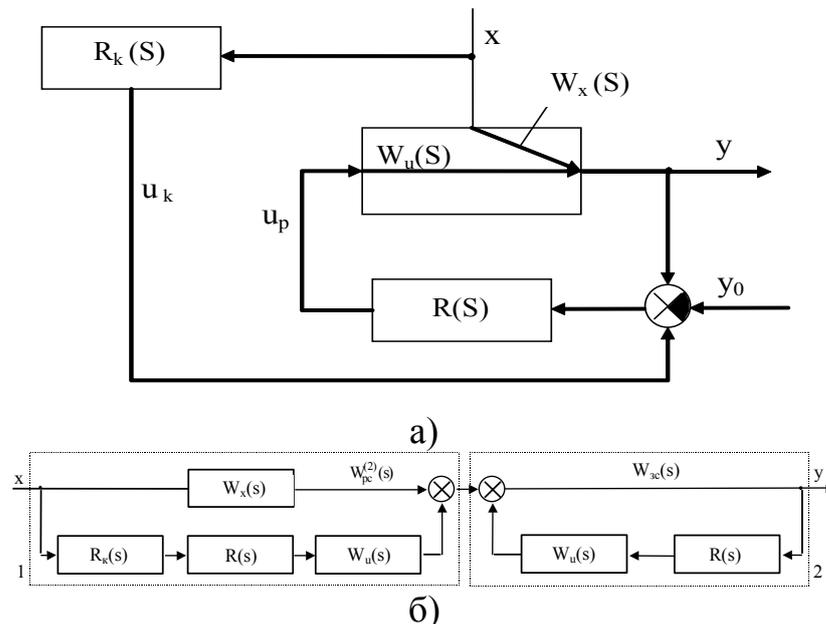


Рисунок 3.6 – Структурные схемы комбинированной САУ при подаче компенсирующего сигнала на вход регулятора: а)- исходная; б)- преобразованная (1-разомкнутая система; 2-замкнутая САУ).

Знак минус в формулах (3.44) и (3.46) означает, что компенсирующий сигнал должен иметь знак, противоположный знаку возмущения. Одной из основных трудностей построения инвариантных систем регулирования

является проблема их физической реализуемости. Можно указать два условия физической реализуемости компенсаторов.

Компенсатор не должен содержать звена с отрицательным чистым запаздыванием, т.е. время чистого запаздывания по каналу регулирования τ_u должно быть меньше, чем время запаздывания по каналу возмущения τ_x . Тогда, с учётом (3.44) или (3.46) $\tau_k = \tau_x - \tau_u > 0$.

В передаточной функции компенсатора степень m_k полинома в числителе не должна превышать степени n_k полинома в знаменателе. Например, если канал возмущения представляет собой апериодическое звено 1-го порядка, а канал регулирования - апериодическое звено 2-го порядка, то компенсатор окажется физически нереализуемым, так как если

$$W_x(s) = \frac{k_x}{Ts+1} \text{ и } W_u(s) = \frac{k_u}{(T_1s+1) \cdot (T_2s+1)},$$

то

$$R_k(s) = -\frac{k_x \cdot (T_1s+1) \cdot (T_2s+1)}{k_u \cdot (Ts+1)},$$

т.е. $m_k = 2, n_k = 1$.

При практической реализации разомкнутых и комбинированных САУ обычно добиваются приближенной инвариантности системы в определённом диапазоне частот. При этом реальный компенсатор выбирается из числа наиболее легко реализуемых динамических звеньев, параметры которых рассчитываются из условия близости частотных характеристик идеального $R_k(i\omega)$ и реального $\tilde{R}_k(i\omega)$ компенсаторов в заданном диапазоне частот, т.е.

$$R_k(i\omega) \approx \tilde{R}_k(i\omega), \quad \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega^{\max}.$$

При такой постановке задачи условие приближенной инвариантности имеет вид:

$$|y(i\omega)| = 0, \quad \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega^{\max},$$

где $|y(i\omega)| = |x(i\omega)| \cdot |W_{\text{к}}(i\omega)|^2$.

При синтезе автоматической системы регулирования выражения передаточных функций компенсирующих и развязывающих устройств $W_k(S)$, полученные из условий инвариантности, во многих случаях либо физически не реализуемы, либо их реализация из-за сложности нецелесообразна [118].

Поэтому реальный компенсатор или реальное развязывающее устройство выбирают в виде достаточно простых типовых динамических звеньев с такими параметрами, при которых удовлетворяются следующие условия:

$$\begin{aligned} W_k(j \cdot 0) - W_k^p(j \cdot 0) &= 0, \\ W_k(j \cdot \omega_p) - W_k^p(j \cdot \omega_p) &= 0; \\ W_k(j \cdot 0) - W_k^p(j \cdot 0) &= 0, \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$W_k(j \cdot \omega_p) - W_k^p(j \cdot \omega_p) \rightarrow \min_{\vec{a}, \vec{b}} \quad (3.48)$$

или

$$W_k(j \cdot 0) - W_k^p(j \cdot 0) \rightarrow \min_{\vec{a}, \vec{b}}, \quad (3.49)$$

$$W_k(j \cdot \omega_p) - W_k^p(j \cdot \omega_p) = 0, \quad (3.50)$$

где $W_k(j\omega)$, $W_k^p(j\omega)$ - амплитудно-фазовая характеристика соответственно идеального и реального компенсатора или развязывающего устройств;

\vec{a} , \vec{b} - векторы параметров выбранного типа реального компенсатора или развязывающего устройства.

Условия (3.47) и (3.48), (3.49) и (3.50) выражают максимально возможное приближение АФХ идеального и реального компенсатора или развязывающего устройства на частоте $\omega = 0$ и на рабочей частоте $\omega = \omega_p$. При этом компенсация возмущения на нулевой частоте обеспечивает инвариантность системы в установившихся статических режимах, если $W_{зс}(i\omega) \neq 0$ при $\omega = 0$ (например, при использовании ПИ-регулятора). Диапазон $[\omega_{\min}, \omega^{\max}]$ зависит от частотного спектра сигнала возмущения $|x(i \cdot \omega)|$ и частотных характеристик системы. Комбинированную САУ можно рассматривать, как двухступенчатый фильтр для сигнала возмущения, состоящий из разомкнутой системы и замкнутого контура.

Следует отметить, что при управлении объектами с несколькими регулируемыми переменными добиваются селективной инвариантности, как независимости работы контуров регулирования различных переменных. В этом случае роль компенсаторов выполняют развязывающие устройства [33], [77], [165], [166].

3.3.1 Теоретические основы синтеза комбинированной системы автоматического управления

Для расчёта оптимальных значений настроечных параметров реальных компенсаторов комбинированной САУ известен [110] графо-аналитический метод. Недостатком этого метода является сложность его реализации на ЭВМ

В связи с этим осложняется автоматизированное проектирование подобных систем регулирования, так как процесс машинной обработки прерывается.

Предлагается аналитический метод расчета оптимальных значений настроечных параметров указанных компенсаторов [61], [62], [63], [114], [119].

Реальные дифференцирующие звенья.

Для практической реализации астатических компенсирующих и развязывающих устройств в качестве реальных часто используют реальные дифференцирующие звенья [110]:

$$W_k^p(s) = \frac{T_B \cdot s}{TS + 1}. \quad (3.51)$$

С целью уменьшения затрат времени на расчет параметров реальных компенсирующих звеньев и возможности автоматизированного параметрического синтеза реальных компенсирующих звеньев ставится задача аналитического определения значений этих параметров, не прибегая к графическим построениям [61].

Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой и рабочей частотах.

Рассмотрим в качестве реального компенсатора звено с передаточной функцией (3.51). Возможные случаи положения вектора $W_k(j\omega)$ изображены на

рисунке 3.7.

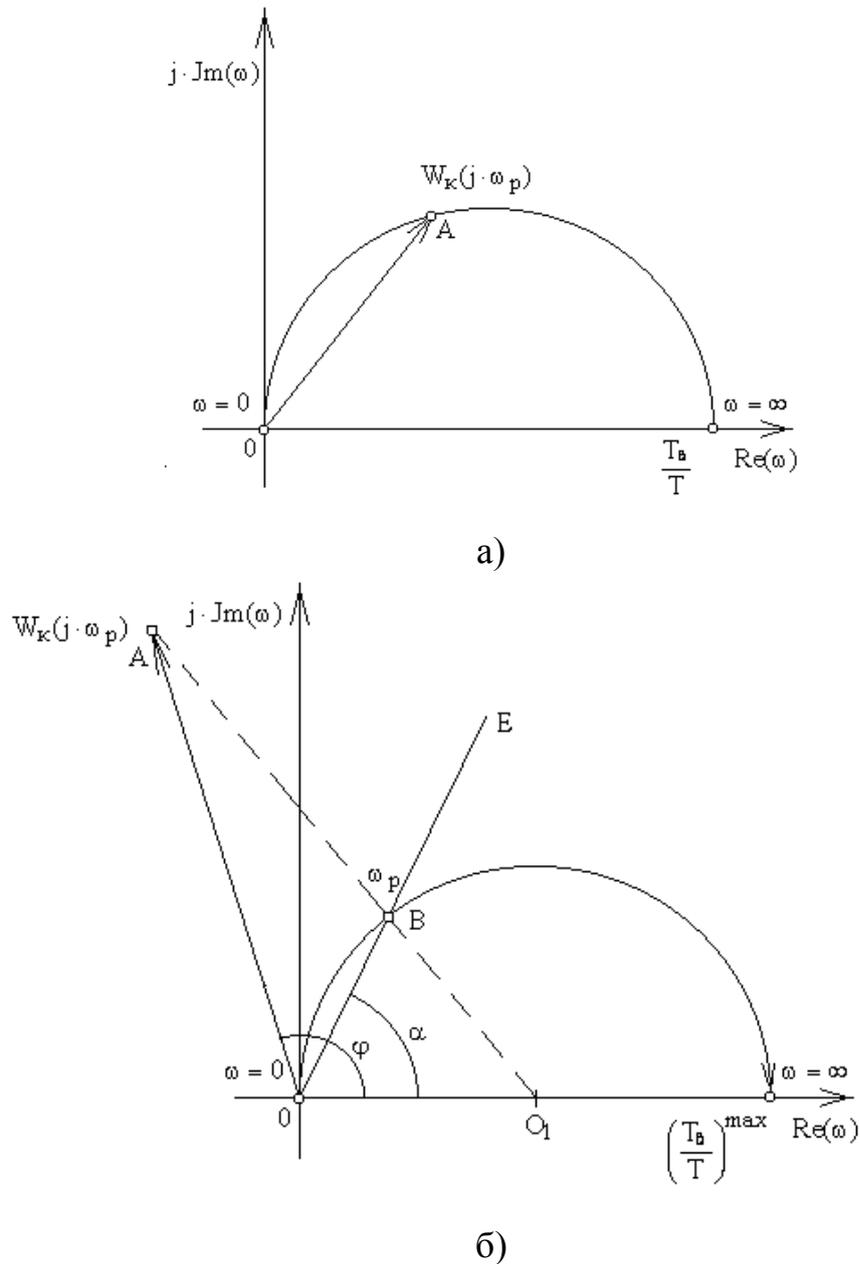


Рисунок 3.7 - К определению параметров компенсатора

АФХ звена (3.51) имеет вид полуокружности [110]. Используя уравнение окружности [10], на основании АФХ, построенной по передаточной функции (3.51), получим:

$$\left(\operatorname{Re}_k(\omega) - \frac{T_B}{2 \cdot T} \right)^2 + \operatorname{Im}_k^2(\omega) = \left(\frac{T_B}{2 \cdot T} \right)^2. \quad (3.52)$$

Уравнение направления вектора $W_k(j \cdot \omega_p)$ имеет вид:

$$\operatorname{Im}_k(\omega) = \operatorname{tg}(\varphi) \operatorname{Re}_k(\omega),$$

где

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\operatorname{Im}_k(\omega_p)}{\operatorname{Re}_k(\omega_p)}. \quad (3.53)$$

Для случая, изображённого на рисунке 3.7а, имеет место условие:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \operatorname{tg}(\alpha) > 0.$$

Учитывая, что в рассматриваемом случае

$$W_k^p = \frac{T_B \cdot T \cdot \omega^2}{T^2 \cdot \omega^2 + 1} + j \frac{T_B \cdot \omega}{T^2 \cdot \omega^2 + 1}$$

с учетом (3.53)

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{1}{T \cdot \omega_p}, \quad (3.54)$$

найдем

$$T = \frac{\operatorname{Re}_k(\omega_p)}{\omega_p \cdot \operatorname{Im}_k(\omega_p)}. \quad (3.55)$$

Подставив (3.55) в (3.53) при $\omega = \omega_p$, получим

$$T_B = \frac{\operatorname{Re}_k^2(\omega_p) + \operatorname{Im}_k^2(\omega_p)}{\omega_p \cdot \operatorname{Im}_k(\omega_p)}. \quad (3.56)$$

Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой частоте и приближении на рабочей.

Для случая, изображённого на рисунке 3.7б, имеет место условие $\operatorname{tg}(\varphi) < 0$.

Выберем максимально возможное отношение $\frac{T_B}{T} = \left(\frac{T_B}{T}\right)^{\max}$ и, подставив в уравнение (3.52), после преобразований получим:

$$\operatorname{Re}^2(\omega) - \left(\frac{T_B}{T}\right)^{\max} \cdot \operatorname{Re}(\omega) + \operatorname{Im}^2(\omega) = 0. \quad (3.57)$$

Запишем уравнение луча O_1A :

$$\operatorname{Im}(\omega) = \left(\operatorname{Re}(\omega) - 0.5 \cdot \left(\frac{T_B}{T}\right)^{\max} \right) \cdot \frac{\operatorname{Im}_k(\omega_p)}{\operatorname{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left(\frac{T_B}{T}\right)^{\max}} \quad (3.58)$$

и, решая (3.58) совместно с (3.57), получим координаты точки В:

$$\operatorname{Re}_B(\omega_p) = \min \operatorname{Re}_{1,2}(\omega_p) = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}, \quad (3.59)$$

где

$$\begin{aligned} a &= 1 + \frac{\operatorname{Im}_k^2(\omega_p)}{\left(\operatorname{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \right)^2}, \\ b &= \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{Im}_k^2(\omega_p)}{\left(\operatorname{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \right)^2} \right), \\ c &= 0.25 \cdot \left(\left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \right)^2 \cdot \frac{\operatorname{Im}_k^2(\omega_p)}{\left(\operatorname{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \right)^2}, \\ \operatorname{Im}_B(\omega_p) &= \operatorname{Re}_B(\omega_p) - 0.5 \cdot \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \cdot \frac{\operatorname{Im}_k(\omega_p)}{\operatorname{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max}}. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Из очевидного выражения

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = \frac{\operatorname{Im}_B(\omega_p)}{\operatorname{Re}_B(\omega_p)}$$

с учетом (3.59) и (3.60) получим

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = 1 - 0.5 \cdot \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \cdot \frac{\operatorname{Im}_k(\omega_p)}{\operatorname{Re}_B(\omega_p) \cdot \left(\operatorname{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \right)}. \quad (3.61)$$

Для $\alpha = \alpha_1$ из (3.54) с учётом (3.61) найдём

$$T = \frac{\left(\operatorname{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \right) \operatorname{Re}_B(\omega_p)}{\omega_p \left(\operatorname{Re}_B(\omega_p) \left(\operatorname{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \right) - 0.5 \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max} \operatorname{Im}_k(\omega_p) \right)},$$

а величину T_B найдём по выражению

$$T_B = T \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max}.$$

$$W_k^p(j \cdot \omega_p) = K_k^p \cdot \frac{1 + T_B \cdot T \cdot \omega^2}{1 + T^2 \cdot \omega^2} + j \cdot K_k^p \cdot \frac{(T_B - T) \cdot \omega}{1 + T^2 \cdot \omega^2} \quad (3.63)$$

имеет вид полуокружности. Уравнение окружности, построенной на АФХ (3.63), представляет собой выражение:

$$\left(\operatorname{Re}_k(\omega) - \frac{K_k^p}{2} \cdot \left(\frac{T_B}{T} + 1 \right) \right)^2 + \operatorname{Im}_k^2(\omega) = 0.25 \cdot (K_k^p)^2 \cdot \left(\frac{T_B}{T} - 1 \right)^2. \quad (3.64)$$

Пусть при $K_k^p = W_k(0)$ конец вектора $W_k(j \cdot \omega_p)$ лежит в заштрихованной области. При этом будут выполнены либо условия

$$\operatorname{Im}_k(\omega_p) \geq \min \operatorname{Im}_k^p(\omega) \text{ при } \operatorname{Re}_k^p(\omega) = \operatorname{Re}_k(\omega_p) > 0, \operatorname{Im}_k(\omega_p) < 0, \quad (3.65)$$

если $T_B < T$, либо условие

$$\operatorname{Im}_k(\omega_p) > 0 \text{ при } \operatorname{Re}_k(\omega_p) > W_k(0) > 0, \quad (3.66)$$

если $T_B > T$.

Значение $\min \operatorname{Im}_k^p(\omega)$ в условиях (3.65) получают как $\operatorname{Im}_k(\omega_p)$ из уравнения (3.64) при $T_B = 0$ и $\operatorname{Re}_k(\omega) = \operatorname{Re}_k(\omega_p)$.

Определим параметры T_B и T уравнения (3.64) при условии, что полуокружность пройдет через точки А и В (рисунок 3.9а).

Подставляя $K_k^p = W_k(0)$, $\operatorname{Re}_k(\omega) = \operatorname{Re}_k(\omega_p)$ и $\operatorname{Im}_k(\omega) = \operatorname{Im}_k(\omega_p)$ в уравнение (3.64), после преобразований получим:

$$\frac{T_B}{T} \cdot W_k(0) \cdot (W_k(0) - \operatorname{Re}_k(\omega_p)) + \operatorname{Re}_k(\omega_p) \cdot (\operatorname{Re}_k(\omega_p) - W_k(0)) + \operatorname{Im}_k^2(\omega_p) = 0. \quad (3.67)$$

Из (3.63)

$$W^p(\infty) = \operatorname{Re}^p(\infty) = W_k(0) \cdot \frac{T_B}{T}. \quad (3.68)$$

Из (3.67) с учетом (3.62)

$$\operatorname{Re}^p(\infty) = \operatorname{Re}_k(\omega_p) - \frac{\operatorname{Im}_k^2(\omega_p)}{W_k(0) - \operatorname{Re}_k(\omega_p)}. \quad (3.69)$$

Теперь определим параметры T и T_B , пользуясь известными выражениями:

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{AC}{CD}}, \quad (3.70)$$

$$T_B = OD \cdot \frac{T}{K_k^p}, \quad (3.71)$$

где отрезки AC, CD и OD (рисунок 3.9) имеют очевидные выражения.

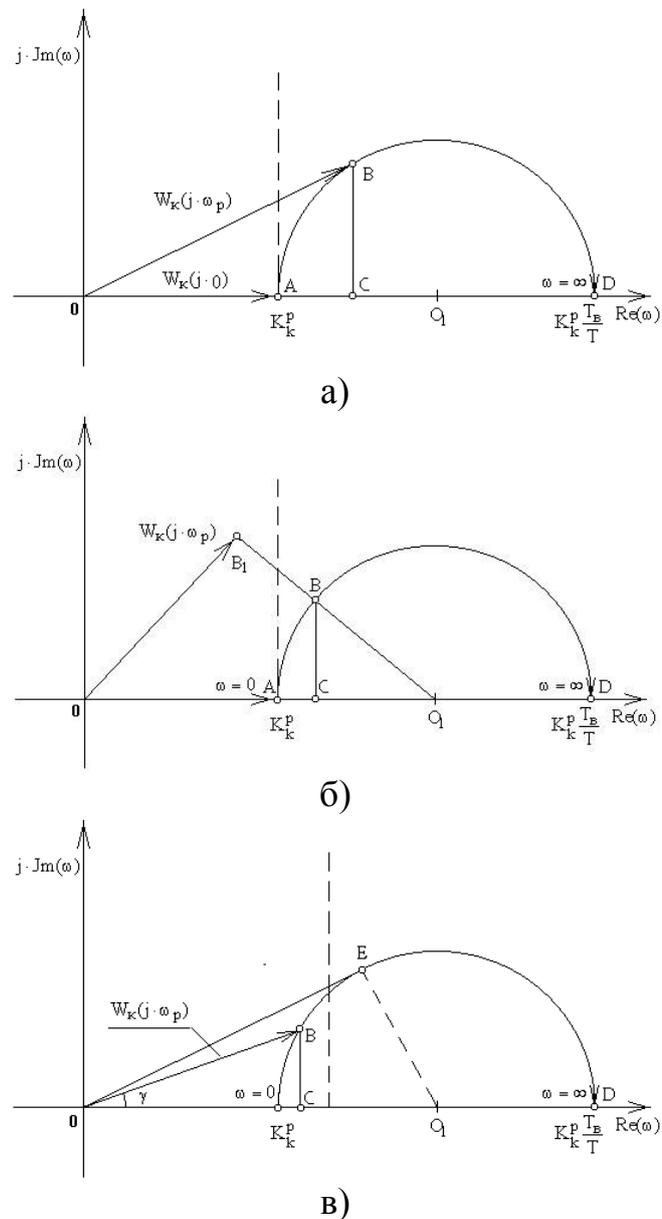


Рисунок 3.9 - К определению параметров компенсатора в виде интегро-дифференцирующего звена.

С учетом (3.68) и (3.69) из (3.70) получим:

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{W_k(0) - \operatorname{Re}_k(\omega_p)}{\operatorname{Re}_k(\omega_p) - \operatorname{Re}_k^p(\infty)}}, \quad (3.72)$$

а из (3.71):

$$T_B = T \cdot \frac{W_k^p(\infty)}{W_k(0)}. \quad (3.73)$$

Выражения (3.72) и (3.73) справедливы для определения настроечных параметров T и T_B при попадании конца вектора $W_k(j\omega)$ в любую точку заштрихованной области, изображённой на рисунке 3.8.

Если конец вектора $W_k(j\omega_p)$ не лежит в заштрихованной области, т.е. не выполняются условия (3.65) или (3.66), то ставится задача выполнения условий (3.47) и (3.48) или (3.49) и (3.50).

Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой частоте и приближении на рабочей частоте.

Рассмотрим случай выполнения условий (3.47) и (3.48) (рисунок 3.9б).

Выбирается максимально возможное значение отношения $(T_B/T)^{max}$, если $\text{Im}(\omega_p) > 0$, или минимально возможное отношение $(T_B/T)^{min}$, если $\text{Im}(\omega_p) < 0$.

Пусть $\text{Im}_k(\omega_p) > 0$. Найдем координаты точки В совместным решением уравнений окружности (3.64) и линии O_1B_1 .

Уравнение линии O_1B_1 имеет вид:

$$\text{Im}(\omega) = \frac{\text{Im}_k(\omega_p) \cdot (\text{Re}(\omega) - 0.5 \cdot W_k(0) \cdot (1 + (T_B/T)^{max}))}{\text{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot W_k(0) \cdot (1 + (T_B/T)^{max})}. \quad (3.74)$$

Подставив (3.74) в (3.64), получим:

$$\begin{aligned} & \text{Re}^2(\omega) \cdot \left(1 + \left(\frac{\text{Im}_k(\omega_p)}{\text{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot D} \right)^2 \right) - \text{Re}(\omega) \cdot D \cdot \left(1 + \left(\frac{\text{Im}_k(\omega_p)}{\text{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot D} \right)^2 \right) + \\ & + W_k^2(0) \cdot \left((T_B/T)^{max} + \left(\frac{0.5 \cdot (1 + (T_B/T)^{max}) \cdot \text{Im}_k(\omega_p)}{\text{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot D} \right)^2 \right) = 0, \end{aligned} \quad (3.75)$$

где $D = W_k(0) \cdot (1 + (T_B/T)^{max})$.

Пользуясь выражениями (3.70) и (3.71) определим параметры T_B и T :

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{W_k(0) - \text{Re}_B(\omega_p)}{\text{Re}_B(\omega_p) - W_k(0) \cdot (T_B/T)^{max}}} \quad (3.76)$$

$$T_B = T \cdot (T_B/T)^{max}. \quad (3.77)$$

Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на рабочей частоте и приближении на нулевой частоте.

Рассмотрим случай выполнения условий (3.49) и (3.50), когда $T_B > T$ (рисунок 3.9в).

Выберем максимально возможную величину $(T_B/T)^{\max}$ и запишем уравнение окружности (3.64), проходящей через точку В.

$$\left(\operatorname{Re}_k(\omega_p) - 0.5 \cdot K_k^p \cdot \left(\left(T_B/T\right)^{\max} + 1\right)\right)^2 + \operatorname{Im}^2(\omega_p) = 0.25 \cdot K_k^{p2} \cdot \left(\left(T_B/T\right)^{\max} - 1\right)^2, \quad (3.78)$$

из (3.78) определим величину K_k^p , решая квадратное уравнение

$$\left(T_B/T\right)^{\max} \cdot \left(K_k^p\right)^2 - \left(\left(T_B/T\right)^{\max} + 1\right) \cdot \operatorname{Re}_k(\omega_p) \cdot K_k^p + \operatorname{Re}_k^2(\omega_p) + \operatorname{Im}_k^2(\omega_p) = 0, \quad (3.79)$$

выберем меньший корень K_k^p .

Определим теперь параметры T_B и T , пользуясь выражениями (3.72) и (3.73) с учетом (3.79),

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{K_k^p - \operatorname{Re}_k(\omega_p)}{\operatorname{Re}_k(\omega_p) - K_k^p \cdot \left(T_B/T\right)^{\max}}}, \quad (3.80)$$

а T_B определяется по формуле (3.77).

Неминимальнофазовые инерционные звенья.

Рассмотрим в качестве реального компенсатора неминимальнофазовое инерционное звено с передаточной функцией

$$W_k^p(s) = k \frac{1 - T_B S}{1 + T S}. \quad (3.81)$$

Методики расчёта настроечных параметров таких звеньев неизвестны.

Выделенная на рисунке 3.10 область, является областью принципиально возможной реализации рассматриваемого компенсатора [63].

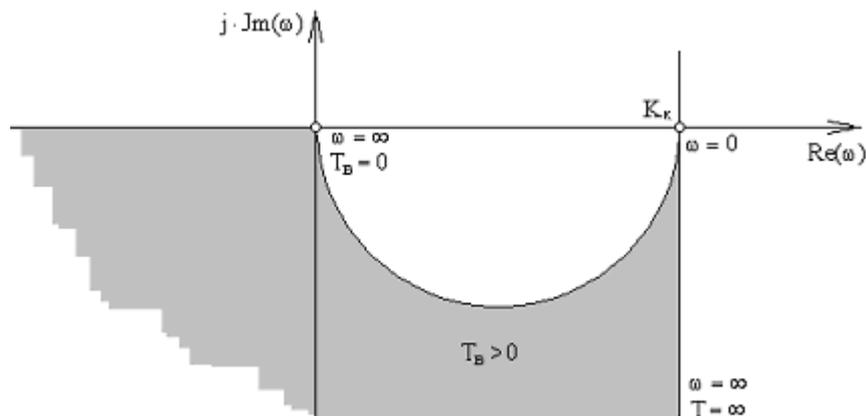


Рисунок 3.10 - Область реализуемости неминимальнофазового инерционного звена

Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой и рабочей частотах.

АФХ рассматриваемого звена

$$W_k^p(j \cdot \omega_p) = K_k^p \cdot \frac{1 - T_B \cdot T \cdot \omega^2}{1 + T^2 \cdot \omega^2} - j \cdot K_k^p \cdot \frac{(T_B + T) \cdot \omega}{1 + T^2 \cdot \omega^2} \quad (3.82)$$

имеет вид полуокружности. Уравнение окружности³, построенной на АФХ (3.82), представляет собой выражение:

$$\left(\operatorname{Re}_k(\omega) - \frac{K_k^p}{2} \cdot \left(1 - \frac{T_B}{T} \right) \right)^2 + \operatorname{Im}_k^2(\omega) = 0.25 \cdot (K_k^p)^2 \cdot \left(1 + \frac{T_B}{T} \right)^2 \quad (3.83)$$

Определим параметры T_B и T уравнения (3.81) при условии $W_k(j \cdot 0) - W_k^p(j \cdot 0) = 0$ и $W_k(j \cdot \omega_p) - W_k^p(j \cdot \omega_p) = 0$. В этом случае полуокружность пройдёт через точки А и В (рисунок 11а).

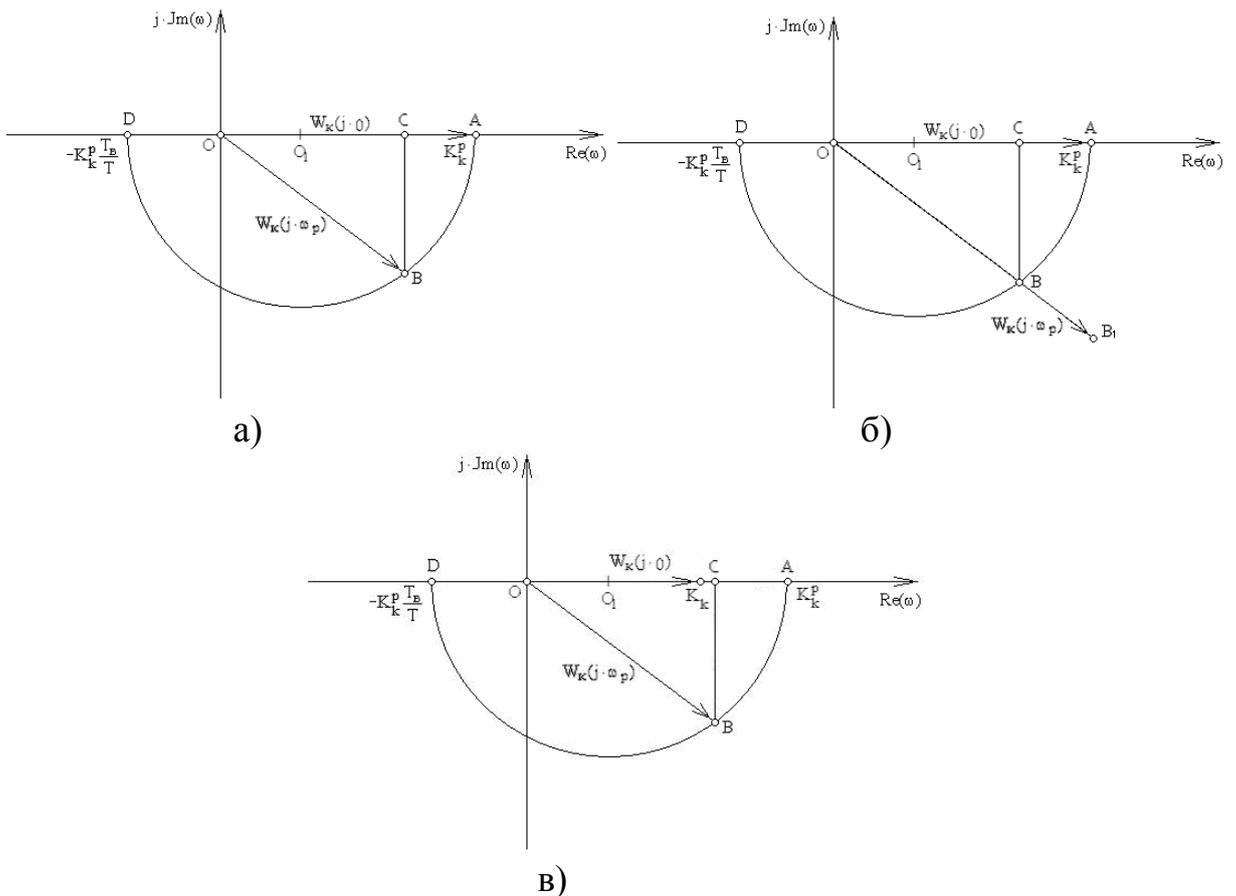


Рисунок 3.11 - Нахождение настроечных параметров компенсатора в виде неминимальнофазового инерционного звена

Подставляя $K_k^p = W_k(0)$, $\text{Re}_k(\omega) = \text{Re}_k(\omega_p)$ и $\text{Im}_k(\omega) = \text{Im}_k(\omega_p)$ в уравнение (3.83), после преобразований получим:

$$\begin{aligned} & -W_k(0) \cdot \frac{T_B}{T} \cdot (W_k(0) - \text{Re}_k(\omega_p)) + \\ & + \text{Re}_k(\omega_p) \cdot (\text{Re}_k(\omega_p) - W_k(0)) + \text{Im}_k^2(\omega_p) = 0. \end{aligned} \quad (3.84)$$

Из (3.88)

$$W^p(\infty) = \text{Re}^p(\infty) = -W_k(0) \cdot \frac{T_B}{T}. \quad (3.85)$$

Из (3.84) с учетом (3.85)

$$\text{Re}^p(\infty) = \text{Re}_k(\omega_p) - \frac{\text{Im}_k^2(\omega_p)}{W_k(0) - \text{Re}_k(\omega_p)}. \quad (3.86)$$

Теперь определим параметры T и T_B , пользуясь известными [110] выражениями:

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{AC}{CD}}, \quad (3.87)$$

$$T_B = OD \cdot \frac{T}{K_k^p}, \quad (3.88)$$

где отрезки AC, CD и OD (рисунок 3.11) имеют очевидные выражения.

С учетом (3.85) и (3.86) из (3.87) получим

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{W_k(0) - \text{Re}_k(\omega_p)}{\text{Re}_k(\omega_p) - \text{Re}_k^p(\infty)}}, \quad (3.89)$$

а из (3.88)

$$T_B = T \cdot \frac{W_k^p(\infty)}{W_k(0)}. \quad (3.90)$$

Выражения (3.89) и (3.90) справедливы для определения настроечных параметров T и T_B при попадании конца вектора $W_k(j\omega)$ в любую точку выделенной области на рисунке 3.10.

Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой частоте и приближении на рабочей частоте.

Если конец вектора $W_k(j\omega_p)$ не лежит в выделенной области, то ставится задача выполнения условий (3.47) и (3.48) или (3.49) и (3.50).

Рассмотрим случай выполнения условий (3.47) и (3.48) (рисунок 3.11б).

Выбрав максимально возможное значение отношения $(T_B/T)^{\max}$, найдем координаты точки В совместным решением уравнений окружности (3.83) и линии OB_1 . Уравнение линии OB_1 имеет вид:

$$\operatorname{Re}_B(\omega) = \frac{\operatorname{Im}_B(\omega_p) \cdot \operatorname{Re}_k(\omega)}{\operatorname{Im}_k(\omega_p)}. \quad (3.91)$$

Подставив (3.91) в (3.83), получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\operatorname{Im}_B^2(\omega_p) \cdot (\operatorname{Re}_k^2(\omega) + \operatorname{Im}_k^2(\omega_p))}{\operatorname{Im}_k^2(\omega_p)} - \\ & - \frac{2 \cdot \operatorname{Im}_B(\omega_p) \cdot X_O \cdot \operatorname{Re}_k(\omega) \cdot \operatorname{Im}_k(\omega)}{\operatorname{Im}_k^2(\omega_p)} + \\ & + \frac{\operatorname{Im}_k^2(\omega_p) \cdot (X_O^2 - R^2)}{\operatorname{Im}_k^2(\omega_p)} = 0, \end{aligned} \quad (3.92)$$

где $X_O = 0.5 \cdot W_k(0) \cdot (1 - (T_B/T)^{\max})$,

$$R = 0.5 \cdot W_k(0) \cdot (1 + (T_B/T)^{\max}).$$

Решая уравнение (3.92), определим что:

$$\operatorname{Im}_B(\omega_p) = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (3.93)$$

где $a = \operatorname{Re}_k^2(\omega) / \operatorname{Im}_k^2(\omega_p)$,

$$b = -2 \cdot X_O \cdot \operatorname{Re}_k(\omega) / \operatorname{Im}_k(\omega),$$

$$c = X_O^2 + \operatorname{Im}_k^2(\omega_p) - R^2.$$

При

$$\frac{T_B}{T} = \left(\frac{T_B}{T} \right)^{\max}$$

получим

$$T_B = T \cdot (T_B / T)^{\max}. \quad (3.94)$$

Подставив (3.94) в вещественную часть уравнения (3.82), с учетом (3.91) и (3.93) найдем

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{W_k(0) - \operatorname{Re}_B(\omega_p)}{\operatorname{Re}_B(\omega_p) + W_k(0) \cdot (T_B/T)^{\max}}}. \quad (3.95)$$

Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на рабочей частоте и приближении на нулевой частоте.

Рассмотрим случай выполнения условий (3.49) и (3.50) (рисунок 3.11в).

Из рисунка 3.11в видно, что K_k^p равен длине отрезка ОА, $O_1A = R$, $O_1C = \sqrt{R^2 - \text{Im}_k^2(\omega_p)}$ и $OC = \text{Re}_k(\omega_p)$, отсюда следует что:

$$K_k^p = R + \text{Re}_k(\omega_p) - \sqrt{R^2 - \text{Im}_k^2(\omega_p)}. \quad (3.96)$$

Настроечные параметры компенсатора T и T_B находятся аналогично (3.95) и (3.94) с учетом (3.96).

$$T = \frac{1}{\omega_p} \cdot \sqrt{\frac{K_k^p - \text{Re}_k(\omega_p)}{\text{Re}_k(\omega_p) + K_k^p \cdot (T_B/T)^{\max}}},$$

а T_B определяется по формуле (3.94).

3.3.2 Программная реализация синтеза комбинированной системы автоматического управления

Параметрический синтез комбинированной САУ состоит из трёх основных этапов:

- расчёт параметров регулятора;
- расчёт параметров идеального компенсатора;
- расчёт параметров реального компенсатора.

Расчет параметров реализован в программном продукте для параметрического синтеза комбинированных систем управления [121]. Блок-схема алгоритма параметрического синтеза комбинированной САУ приведена в приложении 1.

В начале работы модуля для параметрического синтеза комбинированной САУ пользователь вводит через графический интерфейс пользователя (ГИП) передаточную функцию объекта управления, выбирает тип регулятора и вводит параметры графика D-разбиения. После этого рассчитываются точки графика, которые передаются ГИП для построения линий D-разбиения. Для расчёта параметров регулятора пользователь выбирает рабочую частоту. Производится расчёт параметров, которые затем передаются ГИП для отображения.

Для расчёта параметров компенсатора пользователь вводит через ГИП передаточную функцию по каналу возмущения, параметры графика АФХ и тип компенсатора. Производится расчёт параметров идеального компенсатора и точек графика АФХ идеального компенсатора. Данные передаются ГИП для отображения.

После построения идеальной АФХ пользователь выбирает рабочую частоту. Производится расчёт параметров реального компенсатора и точек графика АФХ реального компенсатора. Данные передаются ГИП для отображения.

После этого пользователь вводит параметры графика переходного процесса. Производится расчёт точек графика. Точки передаются ГИП для построения графика переходного процесса.

Модуль ПС состоит из семи функций:

- расчёт графиков АФХ и D-разбиения;
- расчет параметров Re и Im;
- расчет параметров регулятора;
- расчет параметров компенсатора;
- расчет вещественной и мнимой частей АФХ системы;
- расчет переходного процесса.

Для расчета параметров компенсатора используется функция «KompensType», на выход которой передается «1», при удачном расчете настроек компенсатора выбранного типа, или «0» при неудачном.

Входные данные функции:

double k – коэффициент усиления идеальной АФХ;

DPOINT P₀ – начальная частота идеальной АФХ;

DPOINT P_{wr} – рабочая частота;

double *K_{real} – указатель на коэффициент усиления реальной АФХ;

double *p_{Bi} – указатель на полином числителя передаточной функции;

double *p_{Ai} – указатель на полином знаменателя передаточной функции;

int KomType – тип компенсатора (1 – реальное дифференцирующее звено,

2 – интегро-дифференцирующее звено, 3 – интегро-дифференцирующее звено (низ), 4 – неминимально-фазовое звено);

bool Pribl_W – 0 при совпадении на рабочей частоте, 1 – при совпадении на начальной частоте.

Блок-схема функции «KompType» также приведена в приложении 1.

В начале работы функции объявляется переменная «Ki» равная «K_real». Затем переменная «K_real» приравнивается к переменной «K». Объявляются переменные «dRe», равная «Pwr.x», «dJm», равная «Pwr.y», «dW», равная «Pwr.w», «dRe_b» и «dJm_b».

Если переменная «KompType» равна «1», при Pwr.x > 0 переменная «K_real» приравнивается к «1». Переменная «pAi[0]» приравнивается к «1». Переменная pAi[1] приравнивается к $\frac{dRe}{dW \cdot dJm}$. Переменная «pVi[0]» приравнивается к «0». Переменная pVi[1] приравнивается к $\frac{dRe^2 + dJm^2}{dW \cdot dJm}$. После этого на выход функции подается «1», что подтверждает удачное завершение ее работы.

При Pwr.x < 0 переменная «K_real» приравнивается к «1». Объявляются переменные D, равная «1000», «a», «b», «c» и «TdT», равная $dRe - 0,5 \cdot D$. Переменная «a» приравнивается к $1 + \frac{dJm^2}{TdT^2}$. Переменная «b» приравнивается к «D·a». Переменная c приравнивается к $\frac{0,25 \cdot D^2 \cdot dJm^2}{TdT^2}$. Переменная «dRe_b» приравнивается к $\frac{b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$. Переменная «pAi[0]» приравнивается к «1». Переменная pAi[1] приравнивается к $\frac{dRe_b \cdot TdT}{dW \cdot (dRe_b \cdot TdT - 0,5 \cdot D \cdot dJm)}$. Переменная «pVi[0]» приравнивается к «0». Переменная «pVi[1]» приравнивается к pAi[1]·D. Далее работа функции завершается и на ее выход подается «1».

Если переменная «KompType» равна «2», при K > Ki переменная «K_real» приравнивается к K. Объявляется переменная «Tmax», равная 1000.

Переменная « $pAi[0]$ » приравнивается к «1». Переменная « $pAi[1]$ » приравнивается к $\frac{1}{dW} \cdot \sqrt{\frac{Ki - dRe}{dRe - Ki \cdot Tmax}}$. Переменная « $pVi[0]$ » приравнивается к

1. Переменная « $pVi[1]$ » приравнивается к $pAi[1] \cdot Tmax$. Возвращается «1».

При $K \leq Ki$, если $Pwr.x \geq K$, объявляется переменная « Re_8 », равная $dRe - \frac{dJm^2}{K - dRe}$. Переменная « $pAi[0]$ » приравнивается к «1». Переменная « $pAi[1]$ »

приравнивается к $\frac{1}{dW} \cdot \sqrt{\frac{Ki - dRe}{dRe - Re_8}}$. Переменная « $pVi[0]$ » приравнивается к «1».

Переменная « $pVi[1]$ » приравнивается к $\frac{pAi[1] \cdot Re_8}{K}$. После этого на выход функции подается «1»

Если $Pwr.x < K$, объявляются переменные « $Tmax$ », равная 1000, R , равная $\frac{K \cdot Tmax}{2}$, и dA , равная $K + R$. Если переменная « $Pribl_W$ » равна «false»,

« dJm_b » приравнивается к $\sqrt{\frac{R^2 \cdot dJm^2}{(dRe - dA)^2 + dJm^2}}$, « dRe_b » приравнивается к $\frac{dJm_b \cdot (dRe - dA)}{dJm} + dA$; иначе создаются переменные R , равная $Tmax/2$, и « dD »,

равная $\sqrt{R^2 - dJm^2}$, переменная « K_real » приравнивается к $\sqrt{R^2 - dJm^2} + dRe - R$, переменная K приравнивается к « K_real », переменная « dRe_b » приравнивается к « dRe », переменная « $Tmax$ » приравнивается к $(Tmax - K)/K$. Переменная « $pAi[0]$ » приравнивается к «1». Переменная « $pAi[1]$ » приравнивается к

$\frac{1}{dW} \cdot \sqrt{\frac{K - dRe_b}{dRe_b - K \cdot Tmax}}$. Переменная « $pVi[0]$ » приравнивается к «1». Переменная

« $pVi[1]$ » приравнивается к $pAi[1] \cdot Tmax$. После этого на выход функции подается «1».

Если переменная « $КомпТуре$ » равна «3», при $Pwr.x \leq K$ объявляется переменная « Re_8 », равная $dRe - \frac{dJm^2}{K - dRe}$. Переменная « $pAi[0]$ » приравнивается

к «1». Переменная « $pAi[1]$ » приравнивается к $\frac{1}{dW} \cdot \sqrt{\frac{Ki - dRe}{dRe - Re_8}}$. Переменная

«pVi[0]» приравнивается к «1». Переменная «pVi[1]» приравнивается к $\frac{pAi[1] \cdot Re_8}{K}$. После этого на выход функции подается «1» и работа функции завершается.

При $R_{\text{вг.х}} \leq K$ объявляются переменные «Tmax», равная 1000, R, равная $\frac{K \cdot T_{\text{max}}}{2}$, и dA, равная K-R. Если переменная «Pribl_W» равна «false», «dJm_b» приравнивается к $\sqrt{\frac{R^2 \cdot dJm^2}{(dRe - dA)^2 + dJm^2}}$, «dRe_b» приравнивается к $\frac{dJm_b \cdot (dRe - dA)}{dJm} + dA$; иначе создаются переменные «R», равная Tmax/2, и «dD», равная $\sqrt{R^2 - dJm^2}$, переменная «K-real» приравнивается к $R - \sqrt{R^2 - dJm^2} + dRe$, переменная K приравнивается к «K_real», переменная «dRe_b» приравнивается к «dRe», переменная «Tmax» приравнивается к (Tmax+K)/K. Переменная «pAi[0]» приравнивается к «1». Переменная «pAi[1]» приравнивается к $\frac{1}{dW} \cdot \sqrt{\frac{K - dRe_b}{dRe_b + K \cdot T_{\text{max}}}}$. Переменная «pVi[0]» приравнивается к «1». Переменная pVi[1] приравнивается к $-pAi[1] \cdot Tmax$. На выход функции подается «1» и она завершает свою работу.

Если переменная KompType равна «4», создается переменная «atg», равная $atg(dJm/dRe)$. Переменная «K_real» приравнивается к $\sqrt{\frac{dJm^2}{dRe^2}}$. Переменная «pAi[0]» приравнивается к «1». Переменная «pAi[1]» приравнивается к $dW \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + atg^2}}{atg}$. Переменная «pVi[0]» приравнивается к «1». Переменная «pVi[1]» приравнивается к $-dW \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + atg^2}}{atg}$. После этого на выход функции подается «1», что подтверждает удачное завершение ее работы.

При остальных значениях переменной «KompType» на выход функции подается «0», что сигнализирует об ошибке в ее работе.

3.4 Параметрический синтез каскадной системы автоматического управления

3.4.1 Теоретические основы синтеза каскадной системы автоматического управления

При автоматизации ТОО часто возникает задача применения каскадных САУ. Такие САУ обеспечивают достаточно высокое качество регулирования ТОО, имеющих помимо выходных регулируемых координат, ещё и дополнительные промежуточные координаты, которые могут быть использованы для организации вспомогательных контуров стабилизации. Вследствие этого каскадные САУ всегда имеют многоконтурную структуру и включают в свой состав два регулятора и более. Выбор оптимальных настроек этих регуляторов и экспериментальная наладка каскадных систем регулирования становятся невозможными без предварительного расчёта САУ и исследования на ЭВМ качества переходных процессов. Такой расчёт и моделирование каскадной САУ позволяет определить оптимальные настройки регуляторов, обеспечивающие устойчивость всей системы, и оценить эффективность каскадного регулирования по сравнению с одноконтурной стабилизацией выходных координат сложного ТОО.

Для ТОО, имеющего кроме основной регулируемой координаты y , ещё и вспомогательную переменную y_1 применяются каскадные системы управления. При этом качество каскадного регулирования будет тем выше, чем более быстродействующим оказывается канал $x \rightarrow y_1$ относительно канала $x \rightarrow y$. Это даёт основание полагать, что рабочая частота контура регулирования координаты y_1 будет выше рабочей частоты САУ основной координаты y .

Типовая схема двухконтурной САУ (рисунок 3.12) содержит вспомогательный регулятор R_1 и основной регулятор R , причём выходной сигнал основного регулятора R служит заданием вспомогательному регулятору R_1 системы стабилизации координаты y_1 .

Примером их применения могут служить: система регулирования расхода флегмы с коррекцией по температуре на контрольной тарелке верхней секции

ректификационной колонны; система регулирования расхода греющего пара в кипятильник с коррекцией по температуре на контрольной тарелке нижней секции ректификационной колонны; система регулирования расхода воздуха с коррекцией по концентрации кислорода в газе за пароперегревателем в тепловых конденсационных электростанциях.

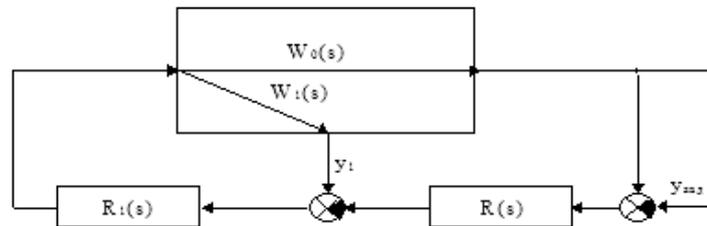


Рисунок 3.12 – Схема каскадной САУ

Определение параметров настроек каскадной САУ осуществляется теми же методами, что и расчёт настроек одноконтурной САУ. Различие состоит в том, что каждый из регуляторов R и R_1 рассчитывается итеративным методом по динамическим характеристикам эквивалентных объектов. Структура эквивалентных объектов для регуляторов R_1 и R приведена соответственно на рисунках 3.13 и 3.14.

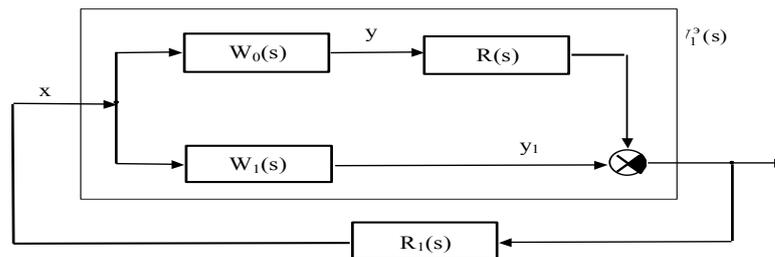


Рисунок 3.13 – Схема эквивалентного объекта для регулятора R_1 .

Передаточная функция эквивалентного объекта для регулятора R_1 имеет вид

$$W_1^0(s) = W_1(s) - W_0(s)R(s). \quad (3.97)$$

Если на рабочей частоте ω_{p1} вспомогательной САУ выполняется условие

$$\left| W_0(i\omega_{p1}) \cdot R(i\omega_{p1}) \right| \ll \left| W_1(i\omega_{p1}) \right|, \quad (3.98)$$

то приближённо передаточная функция эквивалентного объекта для регулятора R_1 может быть определена как

$$W_1^{\text{э}}(s) \approx W_1(s). \quad (3.99)$$

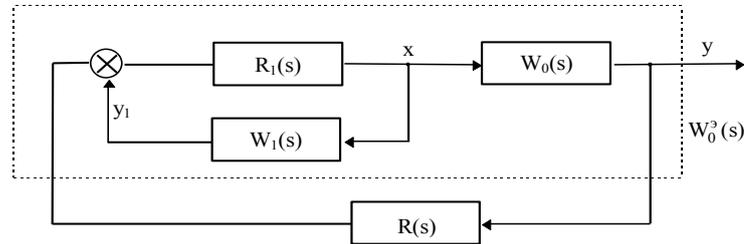


Рисунок 3.14 - Схема эквивалентного объекта для регулятора R

Передаточная функция эквивалентного объекта для регулятора R имеет вид

$$W_0^{\text{э}}(s) = \frac{-R_1(s) \cdot W_0(s)}{1 - W_1(s) \cdot R_1(s)}. \quad (3.100)$$

Если на рабочей частоте ω_p основной САУ выполняется условие

$$|R_1^{-1}(i\omega_p)| \ll |W_1(i\omega_p)|, \quad (3.101)$$

то приближенно передаточная функция эквивалентного объекта для регулятора R равна

$$W_0^{\text{э}}(s) \approx \frac{W_0(s)}{W_1(s)}. \quad (3.102)$$

Достаточно часто [117] динамические характеристики ТОУ по каналам $x \rightarrow y_1$ и $x \rightarrow y$ имеют следующий вид:

$$W_1(s) = y_1(s) / x(s) = k_1 e^{-s\tau_1} / (T_1 s + 1), \quad (3.103)$$

$$W_0(s) = y(s) / x(s) = k e^{-s\tau} / (T_0 s + 1)(T_2 s + 1). \quad (3.104)$$

В этом случае, при использовании в каскадной САУ двух ПИ-регуляторов

$$R(s) = -C_1 - C_0 / s, \quad (3.105)$$

$$R_1(s) = -C_{11} - C_{01} / s, \quad (3.106)$$

передаточные функции эквивалентных объектов будут описываться следующими выражениями:

$$W_1^3(s) = \frac{k_1 e^{-s\tau_1}}{T_1 s + 1} + \frac{k e^{-s\tau} \cdot (C_1 s + C_0)}{(T_0 s + 1) \cdot (T_2 s + 1) \cdot s}, \quad (3.107)$$

$$W_0^3(s) = \frac{k e^{-s\tau} \cdot (C_{11} s + C_{01})}{(T_0 s + 1) \cdot (T_2 s + 1) \cdot s \cdot \left[1 + \frac{k_1 e^{-s\tau_1} \cdot (C_{11} s + C_{01})}{s \cdot (T_1 s + 1)} \right]} \quad (3.108)$$

или, при выполнении неравенства (3.101), приближённо

$$W_0^3(s) \approx \frac{k \cdot (T_1 s + 1)}{k_1 \cdot (T_0 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)} e^{-s(\tau - \tau_1)}, \quad (3.109)$$

$$W_1^3(s) = \frac{k_1 e^{-s\tau_1}}{T_1 s + 1} + \frac{k e^{-s\tau} \cdot (C_1 s + C_0)}{(T_0 s + 1) \cdot (T_2 s + 1) s}. \quad (3.110)$$

Непосредственный расчёт настроек регуляторов каскадной САУ осуществляется в несколько (не менее двух) итераций.

На первой итерации каким-либо известным методом определяются параметры настройки одного из регуляторов R_1 или R . При этом используются приближенные передаточные функции эквивалентных объектов (3.99) или (3.102) соответственно (выбор для начального расчёта регуляторов R_1 или R обуславливается справедливостью неравенств (3.98) или (3.101), для проверки которых требуется приближенное определение рабочих частот ω_p для одноконтурных САУ основной y и вспомогательной y_1 координат). Нахождение настроек второго регулятора осуществляется по точным передаточным функциям эквивалентных объектов (3.100) или (3.97).

На второй итерации при определении параметров настроек регуляторов R_1 и R , а также используются точные передаточные функции эквивалентных объектов соответственно $W_1^3(s)$ и $W_0^3(s)$, в которые входят функции $R_1(s)$ и $R(s)$ с найденными ранее настройками.

Найденные на первой и второй итерациях параметры настроек регуляторов сравниваются между собой. Если расхождения их незначительны, например, $\leq 15-20\%$, то расчет каскадной САУ считается законченным. В противном случае выполняются третья и последующие итерации [115].

3.4.2 Программная реализация синтеза каскадной системы автоматического управления

Для описания потока данных, проходящего в программной реализации параметрического синтеза [120], строится схема данных. На рисунках 3.15 представлены схемы данных основных программных модулей ПС.

Модули расчета графика АФХ и расчета графика линии Д-разбиения независимы друг от друга и поток данных между ними отсутствует. Входными и выходными данными данного модуля являются целые числа, вещественные числа и указатели.

Входными данными модулей расчета графика АФХ и линии Д-разбиения являются:

- а) параметры основного и вспомогательного объекта управления:
 - 1) полиномы числителя и знаменателя в виде массива чисел типа double;
 - 2) количество элементов в каждом из полиномов в виде числа типа int;
 - 3) коэффициент усиления в виде числа типа double;
 - 4) величина чистого запаздывания в виде числа типа double;
- б) параметры основного и вспомогательного регулятора:
 - 1) пропорциональная часть в виде числа типа double;
 - 2) интегральная часть в виде числа типа double;
 - 3) дифференциальная часть в виде числа типа double;
 - 4) тип регулятора в виде числа типа char;
- в) степень колебательности системы в виде числа типа double;
- г) границы частот для расчета и шаг по частоте в виде чисел типа double;
- д) объект, для которого производится расчет, в виде числа типа char;
- е) флаг нахождения граничных частот в виде переменной типа bool;
- ж) указатель на переменную типа int, в которую будет записано количество элементов в возвращаемом массиве;
- з) указатели на переменные типа double, в которые записываются граничные частоты.

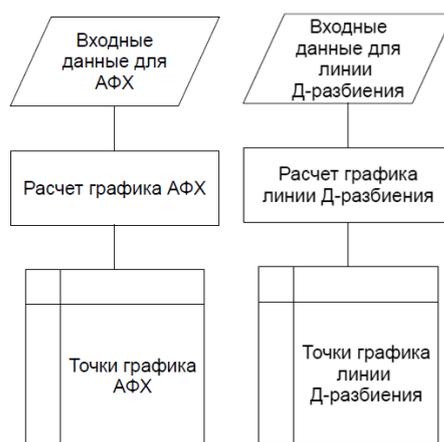


Рисунок 3.15 - Схемы данных модулей расчета графиков АФХ и линии Д-разбиения

Выходными данными модуля расчета графика АФХ является указатель на массив элементов «DPOINT». Элемент «DPOINT» представляет собой структуру из трех элементов типа double. Первые два элемента структуры «DPOINT» являются координатами точки по оси абсцисс и оси ординат, третий элемент является частотой.

Программная реализация параметрического синтеза состоит из двух основных модулей, которые вызываются непосредственно из ЭОС «Студиум», и вспомогательных модулей, используемых основными модулями. Основными модулями являются «Модуль расчета графика АФХ» и «Модуль расчета графика линии Д-разбиения». Вспомогательными модулями являются «Модуль расчета точек графика АФХ», «Модуль нахождения границ линии Д-разбиения», «Модуль нахождения Re и Im объекта для частоты ω », «Модуль нахождения Re и Im объекта «W0э» для частоты ω », «Модуль нахождения Re и Im объекта «W1э» для частоты ω » и «Модуль нахождения Re замкнутой системы».

Блок-схема модуля расчета графика АФХ.

Входными данными модуля расчета графика АФХ являются:

а) параметры объектов управления:

1) полиномы числителя и знаменателя и количество элементов в каждом из них;

2) коэффициент усиления;

- 3) величина чистого запаздывания;
- б) параметры регуляторов:
 - 1) пропорциональная часть;
 - 2) интегральная часть;
 - 3) дифференциальная часть;
 - 4) тип регулятора;
- в) степень колебательности системы;
- г) границы частот для расчета и шаг по частоте;
- д) объект, для которого производится расчет;
- е) флаг нахождения граничных частот для расчета линии Д-разбиения;
- ж) указатель на переменную, в которую будет записано количество точек в графике;
- з) указатели на две переменные, в которые будут записаны граничные частоты для расчета линии Д-разбиения.

Выходными данными модуля расчета графика АФХ является указатель на массив элементов «DPOINT». Блок-схема модуля расчета графика АФХ представлена на рисунке 3.16.

Получив управление, модуль расчета графика АФХ вычисляет количество точек в графике и создает массив элементов DPOINT размером, равным количеству точек. Количество точек в графике вычисляется путем деления разницы граничных частот на шаг по частоте. В созданный массив будут записаны точки графика АФХ.

После этапа инициации модуль расчета графика АФХ отдает модулю расчета точек графика АФХ задание на расчет точек. Модулю расчета точек графика АФХ передаются все необходимые параметры, в том числе указатель на массив для заполнения. После возвращения управления к модулю расчета графика АФХ массив будет заполнен координатами точек графика АФХ.

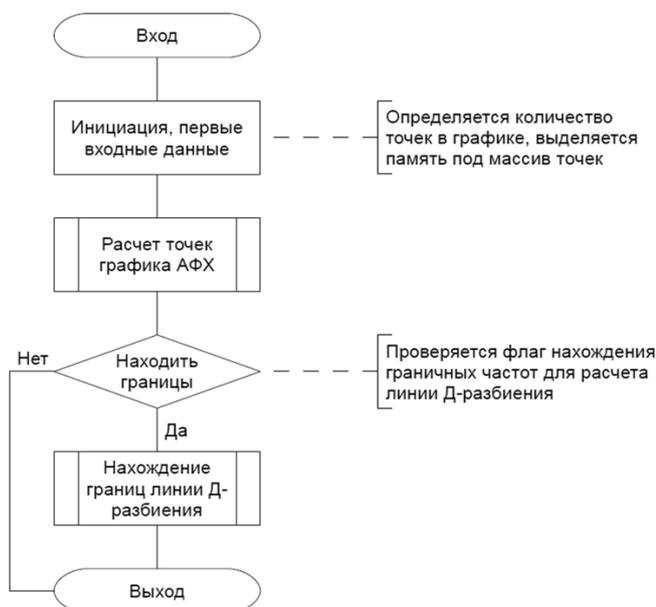


Рисунок 3.16 – Блок-схема модуля расчета графика АФХ

На следующем этапе модуль расчета графика АФХ проверяет флаг нахождения граничных частот для расчета линии Д-разбиения. Если флаг установлен в «0», то модуль переходит к стадии завершения работы. Если флаг установлен в «1», то модуль расчета графика АФХ отдает модулю нахождения границ линии Д-разбиения задание на нахождения граничных частот. Модулю нахождения границ линии Д-разбиения передаются все необходимые параметры, в том числе указатель на массив точек графика АФХ и указатели на переменные, куда будут записаны граничные частоты. После возвращения управления к модулю расчета графика АФХ в указанных переменных будут записаны граничные частоты.

На стадии завершения работы модуль расчета графика АФХ возвращает указатель на массив точек графика АФХ и завершает работу.

Блок-схема модуля нахождения границ линии Д-разбиения.

Входными данными модуля нахождения границ линии Д-разбиения являются:

- а) указатель на массив точек графика АФХ;
- б) количество точек графика АФХ;
- в) тип регулятора;
- г) степень колебательности системы;

д) указатели на две переменные, в которые будут записаны граничные частоты для расчета линии Д-разбиения.

Выходных данных у модуля нахождения границ линии Д-разбиения нет.

Блок-схема модуля нахождения границ линии Д-разбиения представлена на рисунке 3.17.

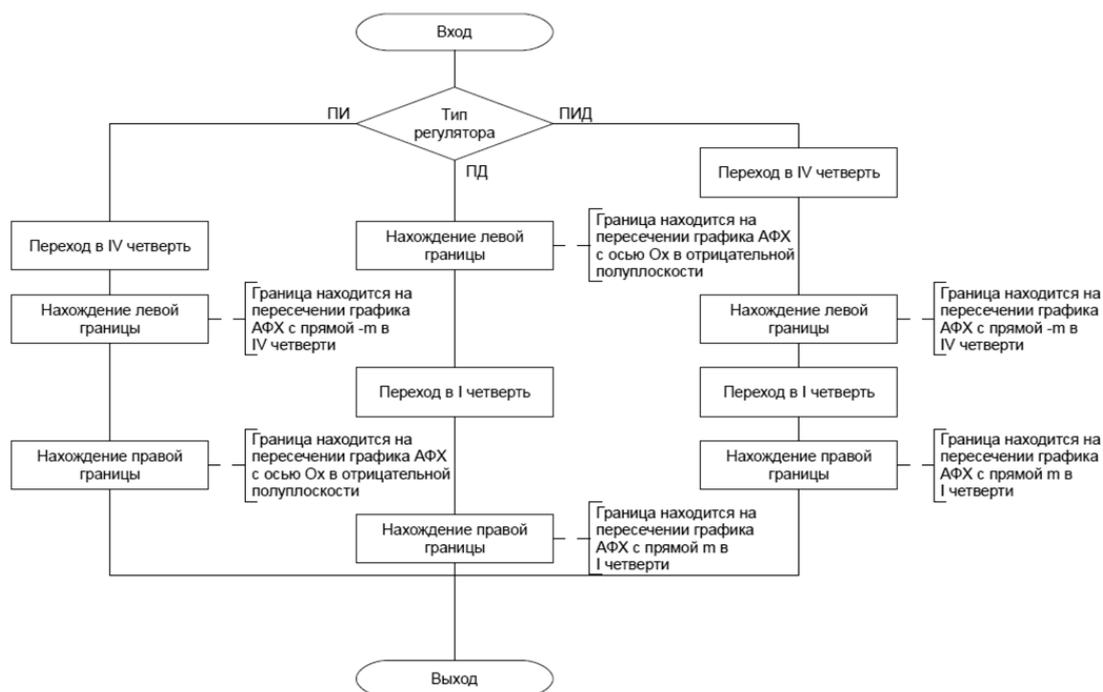


Рисунок 3.17 - Блок-схема модуля нахождения границ линии Д-разбиения

Получив управление, модуль нахождения границ линии Д-разбиения определяет тип регулятора. Возможны три типа регуляторов:

- а) пропорционально-интегральный регулятор (ПИ);
- б) пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД);
- в) пропорционально-интегро-дифференциальный регулятор (ПИД).

В зависимости от типа регулятора могут быть три варианта выполнения модуля, названные соответственно типам регуляторов ПИ, ПД и ПИД.

По первому варианту модуль проходит три этапа.

На первом этапе пропускаются все точки графика, которые находятся вне IV четверти. Дойдя до первой точки, входящей в IV четверть, модуль переходит ко второму этапу.

На втором этапе происходит поиск левой граничной частоты, модуль

последовательно перебирая каждую точку графика, находит точку, ближайшую к пересечению графика АФХ с прямой «-m». Тангенс угла наклона прямой «-m» от оси ординат равен степени колебательности системы. Найдя эту точку, модуль задает переменной начальной граничной частоты значение частоты найденной точки и переходит к третьему этапу.

На третьем этапе модуль, последовательно перебирая каждую точку графика, находит точку, ближайшую к пересечению графика АФХ с осью абсцисс в отрицательной полуплоскости. Найдя эту точку, модуль задает переменной конечной граничной частоты значение частоты найденной точки и завершает работу.

Модуль расчёта графика линии Д-разбиения.

Входными данными модуля расчёта графика линии Д-разбиения являются:

- а) параметры объектов управления:
 - 1) полиномы числителя и знаменателя и количество элементов в каждом из них;
 - 2) коэффициент усиления;
 - 3) величина чистого запаздывания;
- б) параметры регуляторов:
 - 1) пропорциональная часть;
 - 2) интегральная часть;
 - 3) дифференциальная часть;
 - 4) тип регулятора;
- в) степень колебательности системы;
- г) границы частот для расчёта и шаг по частоте;
- д) объект, для которого производится расчёт;
- е) указатель на переменную, в которую будет записан размер возвращаемого массива.

Выходными данными модуля расчёта графика линии Д-разбиения является указатель на массив элементов «DPOINT».

Блок-схема модуля расчёта графика линии Д-разбиения представлена на рисунке 3.18.

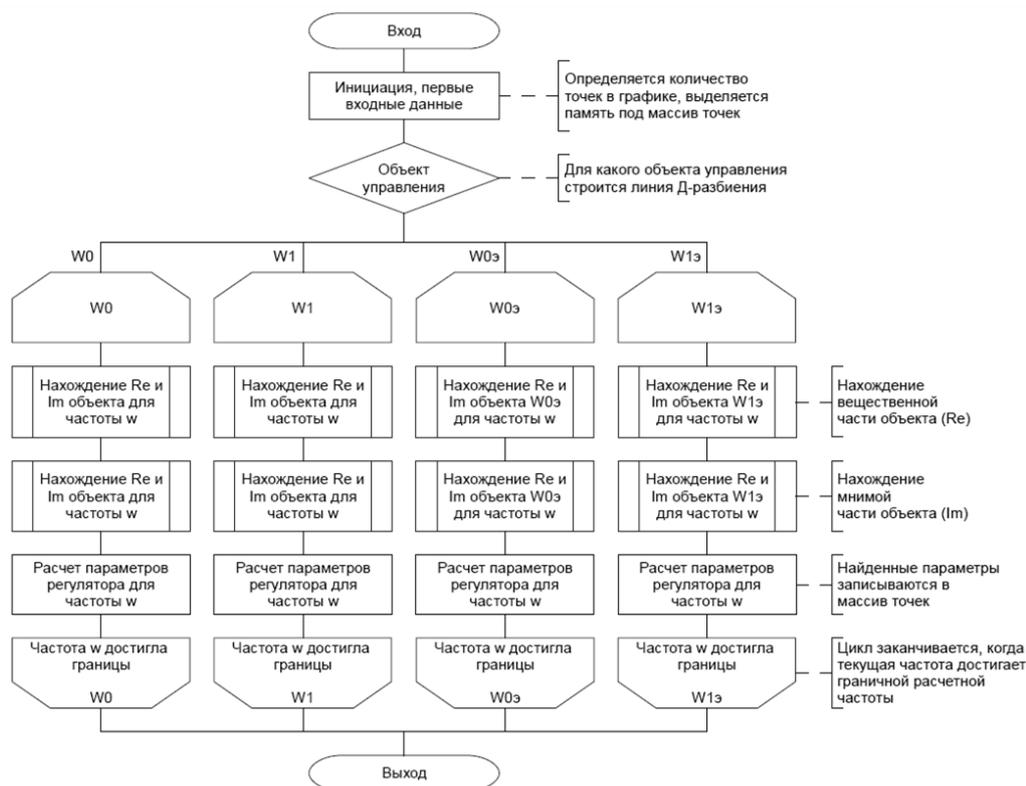


Рисунок 3.18 - Блок-схема модуля расчета графика линии Д-разбиения

Получив управление, модуль расчёта графика линии Д-разбиения вычисляет количество точек в графике и создаёт массив элементов «DPOINT» размером, равным количеству точек. Количество точек в графике вычисляется путем деления разницы граничных частот для расчёта на шаг по частоте. В созданный массив будут записаны настроечные параметры регулятора для различных рабочих частот.

После этапа инициации модуль расчёта графика линии Д-разбиения определяет объект управления, для которого строится график линии Д-разбиения. Возможны четыре объекта управления:

- а) основной объект управления « W_0 »;
- б) вспомогательный объект управления « W_1 »;
- в) эквивалентный объект управления « $W_{0э}$ », состоящий из объектов управления « W_0 » и « W_1 » и регулятора « R_1 »;
- г) эквивалентный объект управления « $W_{1э}$ », состоящий из объектов

управления «W0» и «W1» и регулятора «R».

В зависимости от объекта управления могут быть четыре варианта выполнения модуля, названные соответственно объектам управления «W0», «W1», «W0э» и «W1э».

Для каждого варианта выполнения модуля запускается цикл, в котором последовательно перебираются все частоты с шагом по частоте в пределах граничных частот, переданных модулю в качестве входных параметров расчета. Для каждой частоты модуль расчёта графика линии Д-разбиения даёт задание модулю нахождения Re и Im объекта для частоты ω на нахождение вещественной и мнимой частей передаточной функции одного из объектов («W0», «W1», «W0э» и «W1э») в зависимости от варианта расчета. После нахождения вещественной и мнимой частей передаточной функции выбранного объекта управления модуль расчёта графика линии Д-разбиения производит расчёт параметров регулятора для текущей частоты, записывает рассчитанные параметры в массив и завершает работу модуля по текущему варианту расчета.

Блок-схема модуля расчёта точек графика АФХ

Входными данными модуля расчёта точек графика АФХ являются:

- а) параметры объектов управления:
 - 1) полиномы числителя и знаменателя и количество элементов в каждом из них;
 - 2) коэффициент усиления;
 - 3) величина чистого запаздывания;
- б) параметры регуляторов:
 - 1) пропорциональная часть;
 - 2) интегральная часть;
 - 3) дифференциальная часть;
- в) степень колебательности системы;
- г) границы частот для расчёта и шаг по частоте;
- д) объект, для которого производится расчёт;
- е) указатель на массив для заполнения.

Выходных данных у модуля расчёта графика АФХ нет.

Блок-схема модуля расчёта точек графика АФХ аналогична схеме, представленной на рисунке 3.18.

Получив управление, модуль расчёта точек графика АФХ определяет объект управления, для которого строится график АФХ. Возможны четыре объекта управления:

- а) основной объект управления «W0»;
- б) вспомогательный объект управления «W1»;
- в) эквивалентный объект управления «W0э», состоящий из объектов управления «W0» и «W1» и регулятора R1;
- г) эквивалентный объект управления «W1э», состоящий из объектов управления «W0» и «W1» и регулятора R.

В зависимости от объекта управления могут быть четыре варианта выполнения модуля, названные соответственно объектам управления «W0», «W1», «W0э» и «W1э».

Для каждого варианта выполнения модуля запускается цикл, в котором последовательно перебираются все частоты с шагом по частоте в пределах граничных частот, переданных модулю в качестве входных параметров расчета. Для каждой частоты модуль расчета точек графика АФХ дает задание модулю нахождения Re и Im объекта для текущей частоты ω нахождение вещественной и мнимой частей передаточной функции одного из объектов («W0», «W1», «W0э» и «W1э») в зависимости от выбранного варианта. После нахождения вещественной и мнимой частей передаточной функции выбранного объекта управления модуль расчета точек графика АФХ записывает найденные координаты точки в массив, состоящий из трех элементов: «x», «y», «w». Элементам «x» и «y» задаются значения вещественной и мнимой частей передаточной функции объекта управления, а элементу «w» задается значение текущей частоты. После завершения цикла модуль завершает свою работу.

3.5 Выводы по третьей главе

Рассмотренные методы проведения параметрического синтеза, а также вспомогательные методы, необходимые для его проведения, легко поддаются алгоритмизации. Они позволяют автоматизировать процесс проведения и изучения ПС САУ, например, процессом ректификации в нефтехимии или процессом сжигания топлива при производстве электрической и тепловой энергии на тепловых электроцентралях.

На основе разработанного метода расчёта расширенной амплитудно-фазовой характеристики по передаточной функции с полиномами любого порядка произведена алгоритмизация частотных методов ПС одноконтурных и каскадных САУ. Его использование в алгоритме программы упрощает ввод исходных данных системы управления, т.к. не накладывает на неё ограничений по степени полинома передаточной функции объекта управления.

Разработанный метод расчёта интегральной квадратичной ошибки для передаточной функции со звеном чистого запаздывания позволяет автоматизировать выбор оптимальных настроечных параметров на линии Д-разбиения.

Разработан и алгоритмизирован аналитический метод расчёта реальных компенсаторов и развязывающих устройств в виде: реальных дифференцирующих, интегро-дифференцирующих и неминимальнофазовых инерционных звеньев. Данный метод получил развитие в работах [47], [48] при ПС комбинированных цифровых САУ.

ГЛАВА 4

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОБУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ СИНТЕЗУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

4.1 Моделирование экспертной обучающей системы

Для создания и моделирования систем нечёткого вывода чаще всего используют специализированные программные продукты MATLAB [86] и FuzzyTECH [87]. При этом FuzzyTECH специализируется на создании систем нечёткого вывода. Она позволяет строить модели из нескольких взаимосвязанных баз знаний, используя более простой и понятный интерфейс, чем в программном комплексе MATLAB [70].

Так как созданная модель нечёткого вывода, описанная во второй главе, строится на системе из нескольких связанных между собой баз знаний, то для её моделирования целесообразней использовать программу FuzzyTECH.

Программа FuzzyTECH не поддерживает кириллические шрифты. Поэтому все обозначения, используемые для построения систем нечёткого вывода в FuzzyTECH (термы, лингвистические переменные, база знаний и их правила), обозначаются буквами латинского алфавита.

4.1.1 Модель нечёткого вывода для обучения параметрическому синтезу одноконтурных систем автоматического управления

На рисунке 4.1 изображена структура системы нечёткого вывода, по которой определяется итоговый критерий уровня знаний проведения ПС одноконтурной САУ.

Входные данные системы нечёткого вывода для определения критерия УЗ ПС одноконтурных САУ базируются на лингвистической переменной «Расстояние до точки» с термами {«out_m» (За пределом –), «far_m» (Далеко –), «close_m» (Близко –), «zero» (Совпадает), «close_p» (Близко +), «far_p» (Далеко +), «out_p» (За пределом +)}.

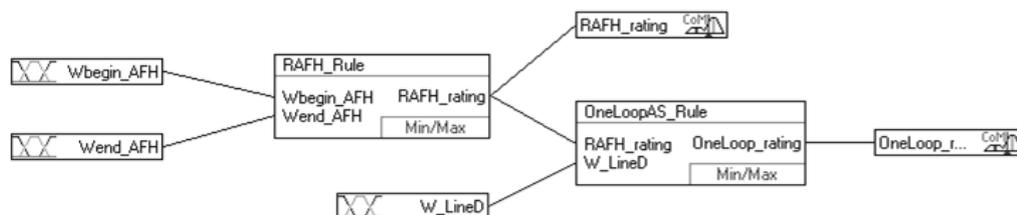


Рисунок 4.1 – Структура системы нечёткого вывода для ПС одноконтурной САУ

Так как функции принадлежности для определения расстояния до трёх точек, на которых базируется ПС одноконтурной САУ, рассчитываются по разным показателям, то для их реализации в FuzzyTECH созданы три лингвистические переменные:

«Wbegin_AFH» – расстояние до точки начальной частоты;

«Wend_AFH» – расстояние до точки конечной частоты;

«W_LineD» – расстояние до точки рабочей частоты.

Выходные данные системы базируются на лингвистической переменной «Знания» с терминами {«_2_poor» (Плохо), «Normal» (Удовлетворительно), «Good» (Хорошо), «Exalente» (Отлично)} и реализуются в ЛП «OneLoop_rating» для определения УЗ ПС одноконтурной САУ. Также на этой лингвистической переменной базируется промежуточная ЛП «RAFH_rating» для определения критерия УЗ проведения первого этапа ПС (нахождение начальной и конечной частоты на графике РАФХ).

Рассматриваемая нечёткая модель содержит 2 блока правил нечётких продукций для определения уровня знаний первого и второго этапа проведения ПС.

Первый блок правил «RAFH_Rule» используется для определения УЗ первого этапа ПС и содержит 49 правил нечётких продукций согласно таблице 2.5. Входными лингвистическими переменными этого блока являются «Wbegin_AFH» и «Wend_AFH», а выходной ЛП промежуточная переменная «RAFH_rating».

Второй блок правил «OneLoopAS_Rule» используется для определения УЗ второго (заключительного) этапа ПС и содержит 28 правил нечётких

продукций согласно таблице 2.6. Входными ЛП этого блока являются переменные «RAFH_rating» и «W_LineD» а выходной ЛП «OneLoop_rating».

Для анализа рассматриваемой системы нечёткого вывода построена поверхность нечёткого вывода в плоскости начальной и конечной частот на графике РАФХ.

Поверхность нечёткого вывода на графике (рисунок 4.2) позволит установить зависимость уровня знаний первого этапа ПС от выбора начальной и конечной частоты на графике РАФХ. Она полностью соответствует ожиданиям эксперта. Согласно [70] отсутствие разрывов поверхности нечёткого вывода свидетельствует об адекватности созданной системы.

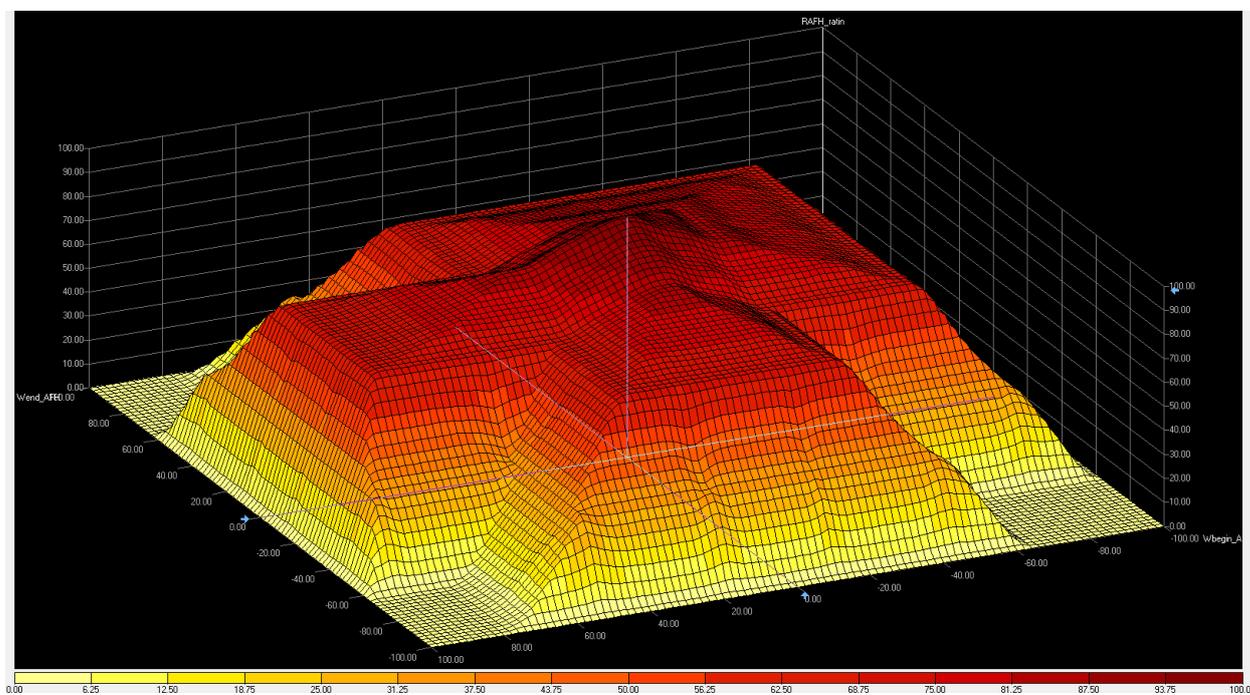


Рисунок 4.2 - Зависимость уровня знаний первого этапа ПС от выбора начальной и конечной частоты на графике РАФХ

Поверхность нечёткого вывода на графике (рисунок 4.3) позволяет установить зависимость уровня знаний ПС одноконтурной САУ от уровня знаний первого этапа ПС и от выбора рабочей частоты регулятора. Анализ этой зависимости свидетельствует об адекватности и соответствии созданной системы требованиям, предъявляемым экспертом.

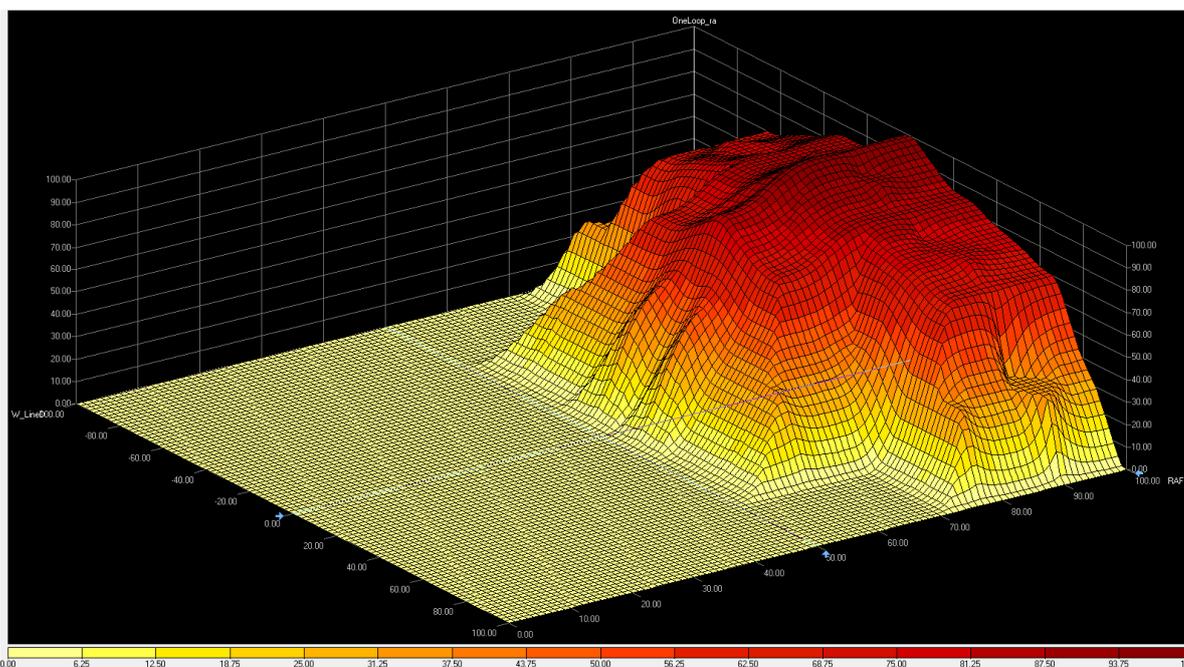


Рисунок 4.3 - Зависимость уровня знаний ПС одноконтурной САУ от уровня знаний первого этапа ПС и выбора рабочей частоты регулятора

Отсутствие разрывов на поверхности нечёткого вывода свидетельствует об устойчивости созданных нечётких моделей. По созданным правилам нечетких продукций можно определить критерий УЗ данного этапа при любых действиях обучаемого по поиску заданных точек на графике РАФХ и линии Д-разбиения.

Выше описанный анализ свидетельствует о возможности применения на практике созданной системы нечёткого вывода для определения уровня знаний обучаемых параметрическому синтезу одноконтурных систем автоматического управления технологическими процессами.

4.1.2 Модель нечёткого вывода для обучения параметрическому синтезу комбинированной системы автоматического управления

На рисунке 4.4 изображена структура системы нечёткого вывода, по которой определяется итоговый критерий уровня знаний проведения параметрического синтеза комбинированной САУ.

Так как ПС комбинированной САУ состоит из 2х основных этапов, описанных во второй главе, и первый этап аналогичен ПС одноконтурной САУ, то часть модели нечёткого вывода данной системы полностью копирует модель,

описанную в разделе 4.1.1.

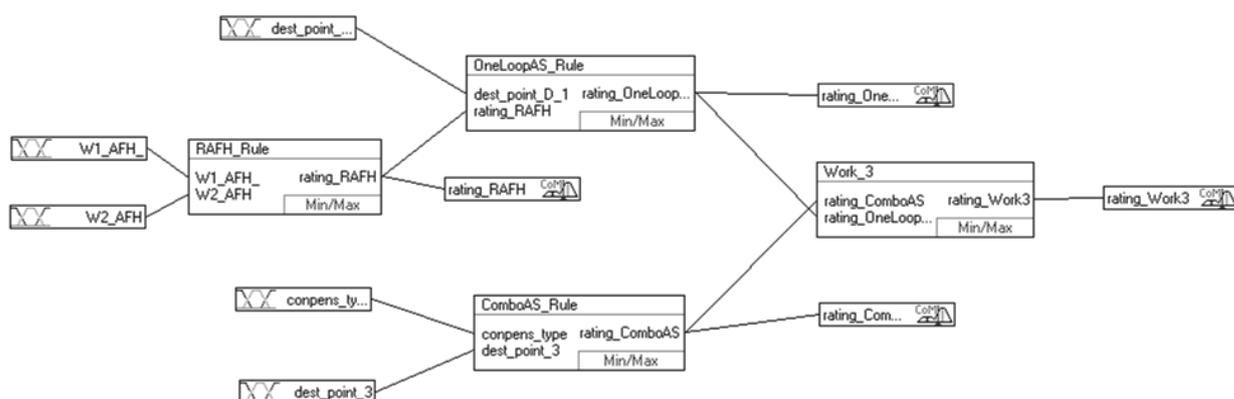


Рисунок 4.4 – Структура системы нечёткого вывода для ПС комбинированной САУ

Входные данные системы нечёткого вывода для определения критерия уровня знаний ПС комбинированной САУ, аналогично описанным выше моделям, базируются на лингвистической переменной «Расстояние до точки», а так же на лингвистической переменной «Тип компенсатора» с термами {«best» (Лучший), «good» (Хороший), «normal» (Нормальный), «badly» (Плохой)}.

Для создания данной модели в программе FuzzyTECH в качестве входных данных используются следующие лингвистические переменные:

«W1_AFH» – расстояние до точки начальной частоты на графике РАХФ объекта управления;

«W2_AFH» – расстояние до точки конечной частоты на графике РАХФ объекта управления;

«dest_point_D_1» – расстояние до точки рабочей частоты на линии Д-разбиения;

«compens_type» – определение правильности выбора типа звена реального компенсатора;

«dest_point_3» – расстояние до точки рабочей частоты на графике АФХ идеального компенсатора.

Выходные данные системы базируются на лингвистической переменной «Знания» и реализуются в ЛП «rating_ComboAS» для определения уровня знаний ПС комбинированной САУ. Также на этой лингвистической переменной

базируются промежуточные ЛП:

«rating_RAFH» – УЗ нахождения начальной и конечной частоты на графике РАФХ;

«rating_OneLoopAS» – УЗ определения настроечных параметров регулятора;

«rating_ComboAS» – УЗ определения настроечных параметров компенсатора;

«rating_Work3» – УЗ ПС комбинированной САУ.

Рассматриваемая нечёткая модель содержит 4 блока правил нечётких продукций для определения итогового уровня знаний проведения ПС комбинированной САУ.

Первые два блока правил «RAFH_Rule» и «OneLoopAS_Rule» используются для определения УЗ по нахождению настроечных параметров регулятора аналогично описанным выше блокам определения УЗ одноконтурной САУ.

Третий блок правил «ComboAS_Rule» используется для определения УЗ по нахождению настроечных параметров компенсатора. Он содержит 28 правил нечётких продукций согласно таблице 2.8. Входными ЛП этого блока являются переменные «dest_point_D_1» и «compens_type», а выходной ЛП «rating_ComboAS».

Четвёртый заключительный блок правил «rating_Work3» суммирует полученные результаты УЗ нахождения настроечных параметров регулятора и компенсатора на основе переменных «rating_OneLoopAS» и «rating_ComboAS». Полученный результат помещается в переменную «rating_Work3», значения которой определяются по 16 правилам нечетких продукций согласно данным таблицы 2.9.

Для анализа рассматриваемой системы построена поверхность нечёткого вывода (рисунок 4.5) в плоскости выбора рабочей частоты на графике АФХ и выбора типа звена реального компенсатора. По поверхности нечёткого вывода устанавливается уровень знаний нахождения настроечных параметров

компенсатора.

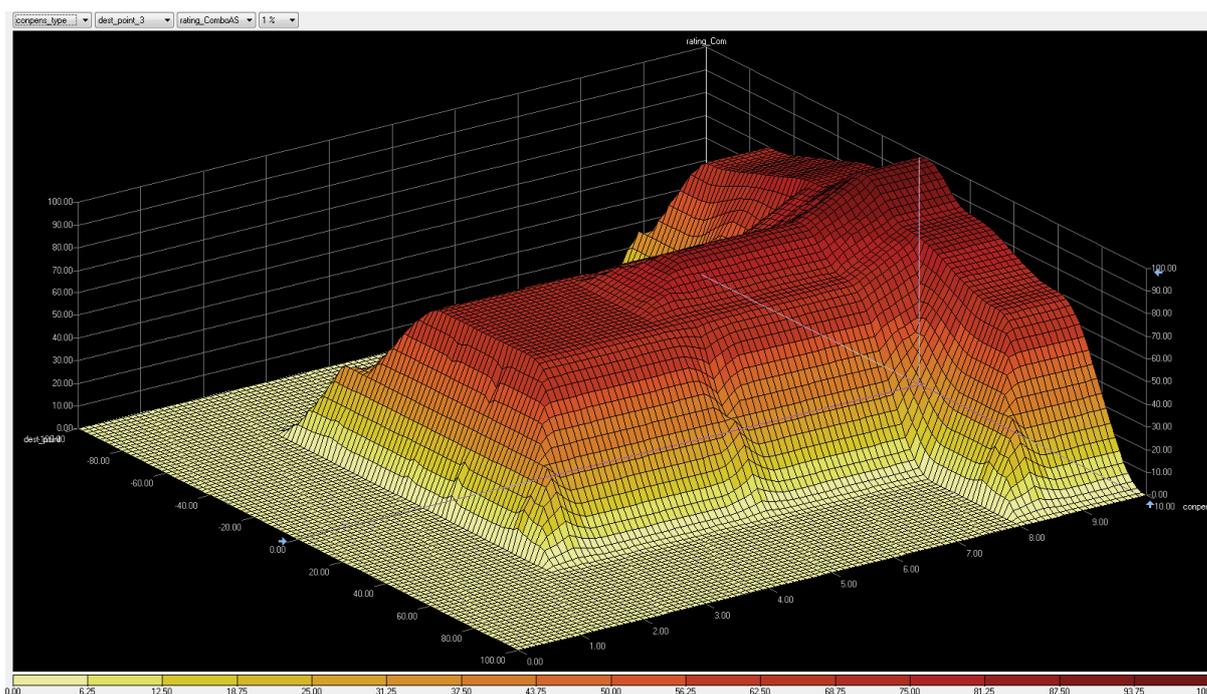


Рисунок 4.5 - Зависимость уровня знаний нахождения настроек компенсатора от выбора рабочей частоты на графике АФХ и от типа звена реального компенсатора

Поверхность нечёткого вывода на графике (рисунок 4.6) позволяет установить зависимость уровня знаний ПС комбинированной САУ от уровня знаний настройки регулятора и от уровня знаний настройки компенсатора.

Отсутствие разрывов на поверхности нечёткого вывода свидетельствует об устойчивости созданных нечётких моделей, что вместе с её адекватностью свидетельствует о возможности её применения на практике для определения уровня знаний обучаемых параметрическому синтезу комбинированной систем автоматического управления технологическими процессами.

Проведенное моделирование системы нечёткого вывода показало, что:

- предложенные правила нечёткой базы знаний обучающей системы адекватно реагируют на все действия обучаемого, необходимые для проведения ПС САУ;
- экспертная система корректно обрабатывает исходные данные, подаваемые в блок логического вывода;
- полученные на выходе критерии УЗ всех промежуточных и конечных

этапов проведения ПС САУ соответствуют ожиданиям экспертов.

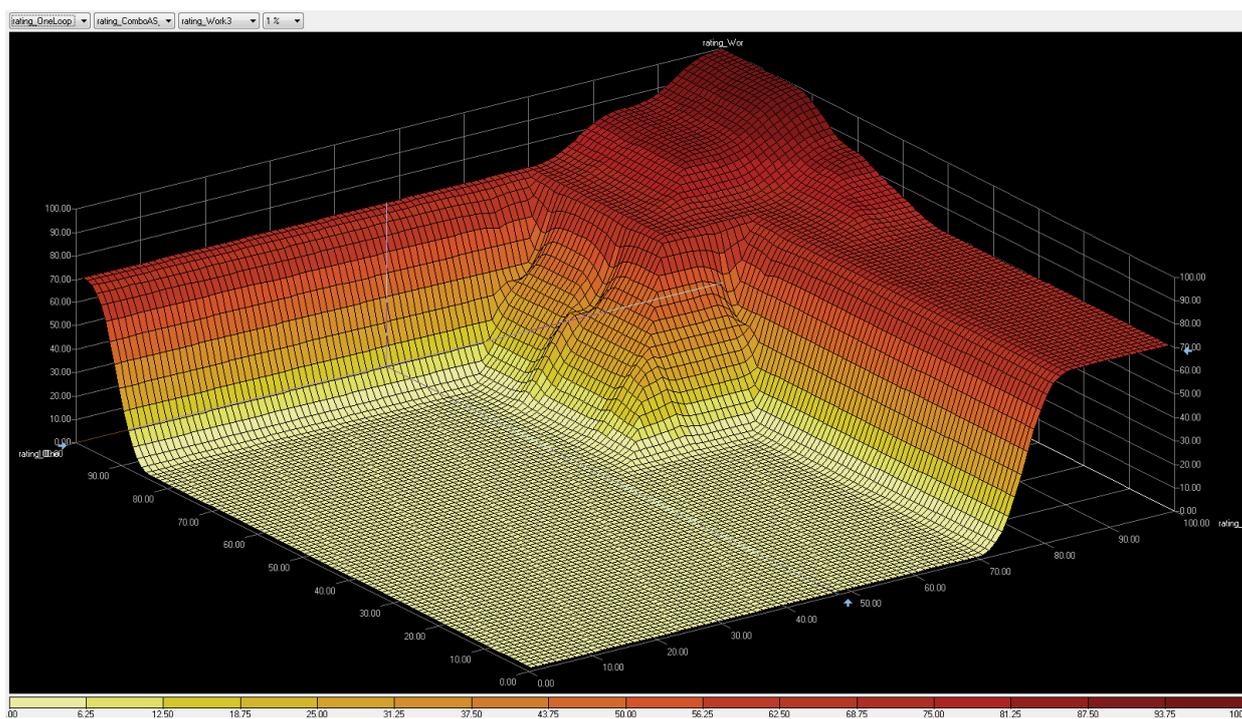


Рисунок 4.6 - Зависимость уровня знаний ПС комбинированной САУ от уровня знаний настройки регулятора и реального компенсатора (двух- и трехмерная проекция)

Модель системы нечёткого вывода, созданная при помощи программы fuzzyTECH, показала, что её можно использовать для создания экспертной обучающей системы. Это даст возможность выдавать оценку УЗ обучаемого и рекомендации по их повышению в ответ на любые его действия при выполнении всех этапов ПС.

4.2 Использование экспертной обучающей системы при самообучении

Апробация созданной экспертной обучающей системы «Студиум» проводилась во время обучения экспериментальной группы специалистов из 28 человек. Начальный уровень знаний параметрического синтеза САУ у экспериментальной группы определялся с помощью собеседования и пробного выполнения лабораторных работ.

Во время пробного выполнения работ использовался лабораторный

инструментарий для проведение ПС, входящий в состав ЭОС «Студиум». Уровень знаний обучаемых оценивался группой экспертов на основе полученных результатов выполнения работ и данных проведённого опроса. В ходе опроса выяснилось, что 25 человека из группы имели представления об одноконтурных системах автоматического управления, 5 из них знали о принципах работы комбинированных систем и 2 человека имели представления об каскадных автоматических системах управления. 3 человека из экспериментальной группы владели только общими принципами теории управления.

С учётом того, что большая часть экспериментальной группы не имела представления о каскадных и комбинированных системах автоматического управления, начальный уровень знаний параметрического синтеза САУ оценивался по знаниям принципов функционирования одноконтурной САУ и проведения ПС данной системы, а также по общим знаниям теории управления. Всем участникам эксперимента был присвоен порядковый номер от 1 до 28. Полученные результаты приведены на графике (рисунок 4.7), где на оси ординат отложены оценки, выставленные группой экспертов по пяти балльной шкале, а на оси абсцисс отложены номера участников экспериментальной группы.

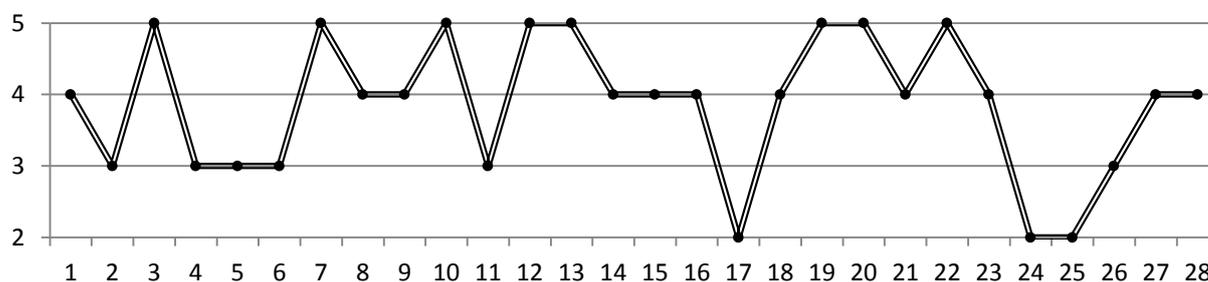


Рисунок 4.7 – Начальный уровень знаний проведения параметрического синтеза САУ у экспериментальной группы

Для повышения уровня знаний проведения параметрического синтеза САУ участникам экспериментальной группы, после консультации по работе с пользовательским интерфейсом ЭОС «Студиум», было предложено

самостоятельно изучить с её помощью материал по данному направлению.

Через месяц после начала эксперимента, повторно был проведён опрос всех участников экспериментальной группы. По результату опроса и на основе данных, полученных из ЭОС «Студиум», экспертами определён уровень знаний группы по проведению ПС всех изучаемых САУ, а также отдельно определён уровень знаний группы по ПС одноконтурной САУ. Полученные результаты приведены на графике (рисунок 4.8), где на оси ординат отложены оценки, выставленные группой экспертов по пяти балльной шкале, а на оси абсцисс отложены номера участников экспериментальной группы.

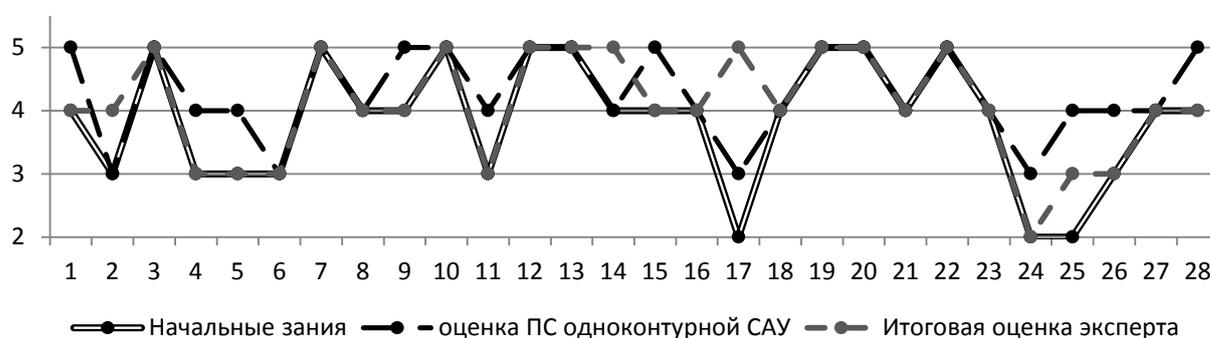


Рисунок 4.8 –Уровень знаний проведения параметрического синтеза САУ у экспериментальной группы по окончании эксперимента

С учётом того, что в начале эксперимента его участники имели представления в большинстве своём только об одноконтурных САУ, целесообразней сравнивать их начальный уровень знаний с уровнем знаний ПС данной системы. В результате, как видно из графика на рисунке 4.8, начальный уровень знаний повысился на 43% при его сравнении с полученными знаниями об одноконтурной САУ и на 21% в сравнении с общим уровнем знаний по ПС САУ по итоговой оценке эксперта.

Общий уровень знаний принципов проведения ПС САУ оценивается итоговым критерием в виде ЛП «Знания», сформированной из критериев УЗ проведения ПС одноконтурной, каскадной и комбинированной САУ. Данные критерии, полученные для экспериментальной группы из 28 человек, приведены на рисунке 4.9. Здесь термам ЛП «Знания»: «Плохо», «Удовлетворительно», «Хорошо» и «Отлично» соответствуют значения от 2 до 5

на оси ординат. Критерии усвоения выставлялись параллельно экспертом и ЭОС.

Из графиков на рисунке 4.9(а) следует, что критерии УЗ выполнения ПС одноконтурной САУ, определённые экспертом и ЭОС, друг от друга не отличаются. Это обусловлено тем, что ПС одноконтурной САУ состоит из относительно небольшого количества промежуточных этапов, что облегчает интеллектуализацию процесса определения критерия УЗ для данного ПС САУ.

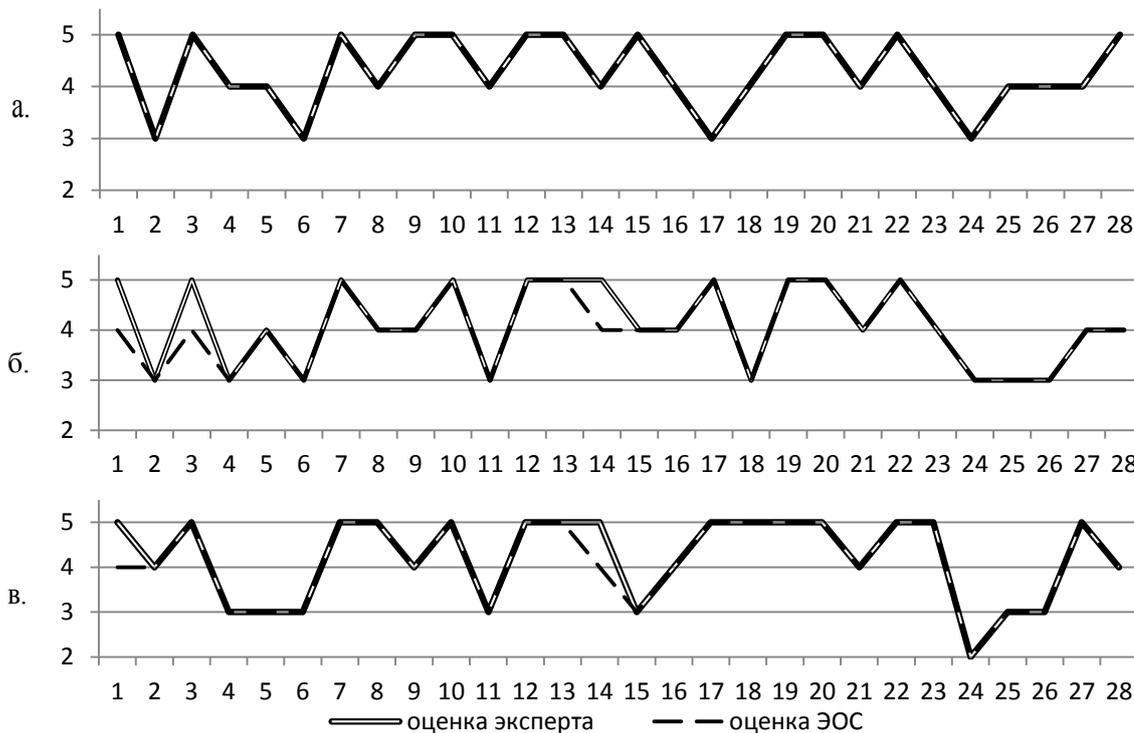


Рисунок 4.9 – Критерии УЗ ПС одноконтурной (а), каскадной (б), комбинированной (в) САУ

По графикам на рисунках 4.9(б) и 4.9(в) установлено, что критерий УЗ ПС каскадной и комбинированной САУ, определённые экспертом и ЭОС, отличаются на 11% и 7% соответственно. Это обусловлено тем, что ПС этих САУ более сложен по своей структуре по сравнению одноконтурной САУ и определение критерия его усвоения сложнее формализуется. Улучшить результат можно добавлением новых правил нечётких продукций в базу знаний ЭОС.

На рисунке 4.10 приведены результаты определения общего уровня УЗ

проведения ПС САУ. Определение общего уровня знаний проведения ПС САУ ТП выполнялось по четырём оценкам:

- выданных экспертом;
- полученных с помощью ЭОС;
- на основе среднеарифметических оценок критерия УЗ всех промежуточных этапов;
- на основе среднеарифметических оценок критерия УЗ конечных этапов ПС одноконтурной, каскадной и комбинированной САУ.

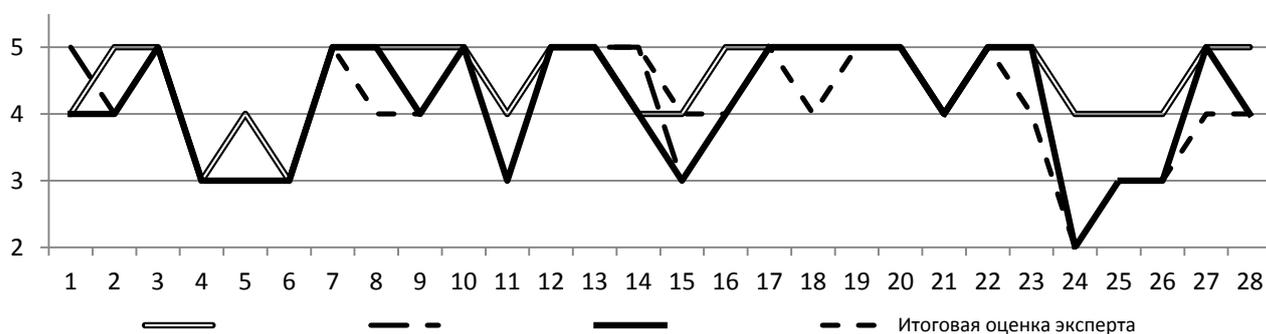


Рисунок 4.10 – Итоговые критерии УЗ проведения ПС САУ

В результате, итоговые критерии УЗ ПС, выставленные экспертом, отличаются на:

- 36% от значений среднеарифметических критериев УЗ проведения промежуточных этапов ПС САУ;
- 18% от значений среднеарифметических критериев УЗ проведения конечных этапов ПС САУ;
- 7% от значений критериев УЗ, выставленных ЭОС.

В результате установлено, что данные, полученные с помощью ЭОС, достаточно близки к мнению эксперта и в 2,5-5 раз точнее среднеарифметических значений. Таким образом, интеллектуализация обучения параметрическому синтезу систем автоматического управления технологическими процессами, реализованная на базе ЭОС, способна с высокой достоверностью определять уровень знаний обучаемых по ПС САУ ТО и впоследствии выдавать рекомендации по его закреплению и повышению.

4.3 Экономический эффект от внедрения экспертной обучающей системы на производстве

Интеграция ЭОС в структуру АСУП позволит сократить временные затраты на обучение персонала предприятия и связанные с этим издержки.

Так как знания по теории автоматического управления являются важным компонентом компетенций ОДП АСУТП, существует необходимость их контроля, закрепления и формирования знаний на всех этапах работы данных специалистов, начиная от момента прохождения собеседования и заканчивая курсами повышения квалификации.

По данным ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» за 2013 год АСУТП предприятия обслуживает отдел главного метролога (14 человек), цех № 4 (контрольно-измерительных приборов и автоматизации (КИПиА) - 50 человек). Таким образом, количество персонала, компетенции которого базируются на знаниях ТАУ, составляет 64 человека. Так же, в 2013 году на ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» было принято на работу около 300 человек, из которых 6% (21 человека) на должности персонала, обслуживающего АСУТП и технологические объекты.

По данным за 2013 год доля специалистов, обслуживающих АСУТП и технологические объекты филиала ОАО «ДГК» «Амурская генерация», составляет около 80 человек, а с учётом текучести кадров и расширения производства на Благовещенской ТЭЦ в 2013 году на данные должности было принято 30 человека.

В настоящем расчёте упущенная выгода, связанная с отвлечением специалиста от выполнения основных обязанностей на один час для всех категорий сотрудников рассчитана по формуле:

$$\bar{P} = \frac{\overline{GP}}{365 \cdot 24 \cdot M}, \quad (4.1)$$

где \overline{GP} – средняя валовая прибыль предприятия за год в рублях, M – количество сотрудников предприятия.

Экономический эффект от внедрения ЭОС в ОАО «НК Роснефть-КНПЗ».

Согласно финансовым отчетам ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» на 2013 год

средняя валовая прибыль предприятия $\overline{GP} = 3255950$ тыс. руб., а средняя численность персонала $M = 1950$ человек. При этом согласно формуле (4.1) $\bar{P} \approx 190,61$ руб/час.

Суммарную упущенную выгоду, связанную с отвлечением персонала предприятия от выполнения основных обязанностей, можно рассчитать по следующей формуле:

$$\overline{P}_c = \bar{P} \cdot t \cdot M, \quad (4.2)$$

где t – время необходимое для обучения персонала,

M – количество обучаемых людей.

По нормативам учебных программ базового курса повышения квалификации ОДП по теме ТАУ на их изучение выделяется около 36 чел/час, а стоимость подобных курсов составляет около 8000 руб/чел.

По данным ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» за 2013 год 64 сотрудникам, обслуживающим АСУТП, по нормативам компании, данные специалисты должны проходить курсы повышения квалификации один раз в год. Таким образом, согласно формуле (4.2) суммарная упущенная выгода \overline{P}_c при отвлечении данного персонала от своих обязанностей составит 390363,28 руб. Суммарная стоимость их обучения составит 512000 руб. Итого, с учётом упущенной выгоды затраты на обучение всех сотрудников составят около 902363,28 руб.

С учётом среднего конкурсного отбора в 8 человек на одно рабочее место (по данным за 2010-2013 года) в ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» в год в среднем проводится около 168 собеседований с претендентами на учитываемые в данном расчёте должности ОДП. Для расчёта затрат на проведение собеседований учитывается, что на собеседование с одним претендентом выделяется 0,5 часа, а комиссия, проводящая собеседования, состоит из 3 человек. Таким образом, суммарное время t , необходимое для проведения собеседования, составляет 1,5 часа.

С учётом (4.2), где M – количество претендентов на должность ОДП (168 человек), суммарная упущенная выгода \overline{P}_c при отвлечении персонала от своих

обязанностей на собеседование составит 48032,98 рублей.

Таким образом, использование ЭОС в АСУ класса HRM ОАО «НК Роснефть-КНПЗ», для обучения теории управления и проведения ПС позволит избежать затрат на сумму 1142528,19 руб. при плановом проведении повышения квалификации ОДП АСУТП и частичной автоматизации проведения собеседований (определение УЗ претендентов) при помощи ЭОС.

Экономический эффект от внедрения ЭОС в филиале ОАО «ДГК» «Амурская генерация».

Согласно финансовым отчётам за 2013 год ОАО «ДГК» средняя валовая прибыль филиала «Амурская генерация» в год при средней численности $M = 1200$ человек составляет $\overline{GP} = 590$ млн. рублей, что по формуле (4.1) даёт $\overline{P} \approx 56,13$ руб/час.

По данным за 2013 год доля ОДП, обслуживающих АСУ и технологические объекты филиала ОАО «ДГК» «Амурская генерация», составляет около 80 человек. Согласно формуле (4.2) суммарная упущенная выгода \overline{P}_c составит около 143683,41 руб., а суммарная стоимость их обучения составит 640000 руб. С учётом упущенной выгоды затраты на обучение сотрудников составят около 783683,41 рублей в год.

С учётом среднего конкурсного отбора в 4 человека на одно рабочее место, по данным 2010-2013 года, было проведено 120 собеседований с претендентами на должности ОДП АСУТП. Суммарная упущенная выгода, согласно формуле (4.2) при отвлечении персонала от своих обязанностей на собеседование составит около 10102,74 рублей.

Таким образом, использование ЭОС в АСУ класса HRM в филиале ОАО «ДГК» «Амурская генерация» позволит избежать затрат на 834197,11 руб.

Инвестиционная привлекательность разработки и внедрения ЭОС.

С учётом требований Министерства образования на необходимость обновления учебной литературы и прочих учебно-методических материалов не реже чем один раз в 5 лет, в течение данного срока не потребуется вносить изменения в содержание ЭОС, т.к. основные составляющие ее материалы

являются учебно-методическими. Таким образом, можно определить, что инвестиционный срок, на который рассчитан данный проект, не должен превысить 5 лет.

Смета затрат на разработку и внедрение экспертной обучающей системы «Студиум» представлена в таблице 4.1. Расчет производился с учетом привлечения к разработке двух человек: эксперта данной области знаний (Э) и программиста (П). Эксперт привлекался к работам исследовательского характера, а также для создания и наполнения базы знаний экспертной системы. Программист выполнял работы по непосредственной реализации проекта, а также в роли инженера знаний при заполнении базы знаний экспертной системы.

Расчет заработной платы производился с учетом того, что месячный оклад эксперта составляет 45 тыс. рублей, а оклад программиста 35 тыс. рублей. Таким образом, с учетом районных коэффициентов и налоговых сборов почасовая оплата эксперта составит 292,5 рублей в час, а программиста 227,5 рублей в час.

Согласно рассчитанным данным по срокам реализации проекта (таблица 4.1) суммарные трудозатраты на разработку и внедрение ЭОС составляют 2160 человек в час, что в стоимостном выражении составляет 561600 рублей. Продолжительность разработки и внедрения ЭОС с учетом возможности параллельной реализации этапов проекта двумя разработчиками (экспертом и программистом) составляет 1840 часов или 230 рабочих дней (~11 месяцев) при 8-часовом рабочем дне. Суммарная чистая прибыль от реализации проекта составит 1391725,30 рублей.

Таблица 4.1 – Смета затрат на разработку и внедрение ЭОС

Название этапа	Трудозатраты, человек/час			Оплата труда, рубли		Общие затраты	Продолжи- тельность, час
	Э	П	Общее	Э	П		
Классификация сотрудников	120	0	120	35100	0	35100	120
Классификация технической системы	400	0	400	117000	0	117000	400
Разработка интерфейса	40	160	200	11700	36400	48100	160
Разработка модуля расчета одноконтурной САУ	40	160	200	11700	36400	48100	160
Разработка модуля расчета каскадной САУ	40	200	240	11700	45500	57200	200
Разработка модуля расчета комбинированной САУ	60	260	320	17550	59150	76700	260
Разработка интеллектуальной подсистемы	40	200	240	11700	45500	57200	200
Заполнение базы знаний	80	40	120	23400	9100	32500	80
Загрузка учебного материала	80	0	80	23400	0	23400	80
Тестирование системы	100	60	160	29250	13650	42900	100
Интеграция системы в АСУП предприятия	80	0	80	23400	0	23400	80
Сумма	1080	1080	2160	315900	245700	561600	1840

Согласно приведенным выше данным были рассчитаны значения основных показателей инвестиционной привлекательности проекта. Расчетные значения представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Значение показателей инвестиционной привлекательности проекта

Наименование показателя	Расчётное значение	
	НК Роснефть-КНПЗ	Амурская генерация
Срок реализации проекта, месяцы	60	
Среднее кол-во обучаемых человек в год	64	80
Экономия средств на обучение ОДП в течение 5 лет, руб.	902363,28	783683,41
Среднее кол-во претендентов на должности ОДП в год, человек	168	120
Экономия средств при проведении собеседований в год, руб.	48032,98	10102,74
Суммарная выгода в год, руб.	228505,64	166839,42
Затраты на разработку и внедрение ЭОС отнесенные к предприятию, руб.	292500	292500
Трудозатраты на разработку и внедрение, человек/час	2160	2160
Доход от реализации проекта, руб.	1142528,19	834197,11
Чистая прибыль, руб.	850028,19	541697,11
Срок окупаемости, месяцы	15	21

Экономический расчет подтверждает целесообразность разработки и внедрения ЭОС в ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» в филиале ОАО «ДГК» «Амурская генерация»

Чистая прибыль от внедрения ЭОС в ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» составит 848020 рублей, а срок окупаемости составит около 1 года и 3 месяца. Выгода от внедрения ЭОС в филиале ОАО «ДГК» «Амурская генерация» составит 566740 рублей, а срок окупаемости составит около 1 года и 9 месяцев.

4.4 Выводы по четвертой главе

На основе созданных методов и алгоритмов разработана кросс-платформенная ЭОС для автоматизации самостоятельного изучения и исследования одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ ТП. Применение ЭОС для самостоятельного обучения ПС САУ показало ее эффективность по сравнению с традиционными методами самообучения, а методы определения УЗ эффективней среднеарифметической оценки на 18% при учете конечных этапов ПС и на 36% при учете промежуточных этапов ПС. Отклонение значений УЗ выставленные ЭОС и экспертом составили 7%.

Использование разработанной ЭОС в АСУ класса НРМ в ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» и в филиале ОАО «ДГК» «Амурская генерация» для обучения теории управления и проведения ПС, в рамках повышения квалификации, а также при собеседовании на должности ОДП АСУТП, позволит избежать затрат в данных предприятиях на сумму около 1391725 руб. Окупаемость разработки ЭОС составит 1 год и 6 месяцев.

Всё выше изложенное доказывает, что разработанный метод интеллектуализации обучения параметрическому синтезу систем автоматического управления технологическими процессами способен обеспечить самообучение специалистов по автоматизации ТП на достаточно высоком уровне. При этом качество оценивания знаний специалистов будет приближено к мнению экспертов данной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Проведенный анализ структуры предприятий ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» и ОАО «ДГК», а также должностных инструкций ОДП и обслуживаемых ими САУ ТП, показал необходимость и востребованность систем автоматизации контроля, формирования и закрепления компетенций ОДП в ключевых областях знаний. Выделены одноконтурные, каскадные и комбинированные САУ, как наиболее востребованные на данных производствах.

2. В связи с недостатком решений, позволяющих автоматизировать выполнение задач HRM по КФЗК ОДП АСУТП, установлена необходимость интеллектуализировать изучение ПС САУ ТП с помощью ЭОС, как наиболее значимой для него области знаний. Это возможно за счёт использования нечёткой логики при определении уровня знаний ПС.

3. Разработан аналитический метод расчёта расширенной амплитудно-фазовой характеристики по передаточной функции с полиномами любого порядка и на его основе произведена алгоритмизация частотных методов ПС одноконтурных и каскадных САУ.

3. Разработан и алгоритмизирован аналитический метод расчёта реальных компенсаторов и развязывающих устройств в виде: реальных дифференцирующих, интегро-дифференцирующих и неминимальнофазовых инерционных звеньев.

4. Для интеллектуализации КФЗК в ТАУ разработана база знаний и методы построения функций принадлежности для оценки правильности определения оптимальных настроечных параметров регуляторов в одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ на основе расширенных АФХ и оптимальных настроечных параметров компенсаторов на основе аналитического метода расчёта реальных компенсаторов. Моделирование процессов принятия решений по определению УЗ ПС САУ ТП показало, что созданные правила БЗ могут оценить любые действия обучаемого при выполнении этапов ПС.

5. На основе созданных методов и алгоритмов разработана кросс-платформенная ЭОС для автоматизации самостоятельного изучения и исследования одноконтурных, каскадных и комбинированных САУ ТП. Применение ЭОС для КФЗК ОДП показало её эффективность по сравнению с традиционными методами самообучения, а разработанные методы определения УЗ эффективней среднеарифметической оценки на 18% при учёте конечных этапов ПС и на 36% при учёте промежуточных этапов ПС. Отклонение значений УЗ выставленные ЭОС и экспертом составили 7%. Расчёт инвестиционной привлекательности проекта по разработке и внедрения ЭОС в ОАО «НК Роснефть-КНПЗ» и в филиале ОАО «ДГК» «Амурская генерация» показал экономическую обоснованность его реализации. Использование ЭОС на данных предприятиях для обучения теории управления и проведения ПС, в рамках повышения квалификации, а также при собеседовании на должности ОДП АСУТП в течение сроков реализации проекта позволит избежать суммарных затрат на сумму 1414760 рублей.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АОС – автоматизированная обучающая система.

АСУ – автоматизированная система управления.

АСУП – автоматизированная система управления производствами.

АСУТП – автоматизированной системой управления технологическим процессом.

ИКТ – информационные и коммуникационные технологии.

КФЗК – контроль, формирование и закрепление компетенций.

ЛП – лингвистическая переменная.

ОДП – оперативно-диспетчерского персонала.

ПС – параметрический синтез.

РАФХ – расширенная амплитудно-фазовая характеристика.

САУ – система автоматического управления.

СС – структурный синтез.

ТАУ – теории автоматического управления.

ТП – технологический процесс.

УЗ – уровень знаний.

ЭОС – экспертная обучающая система.

ERP – Enterprise Resource Planning (управление ресурсами предприятия).

HRM – Human Resources Management (управление человеческими ресурсами).

MES – Manufacturing Execution Systems (решение оперативных задач производства).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумова Е.В. Педагогическое проектирование автоматизированных систем управления контролем в образовательном процессе : дис. ... канд. пед. наук ... 13.00.08. С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2006. 174 с. ил.
2. Абрамов К.В., Смирнов В.Н., Софиева Ю.Н. Программно-логическое управление ректификационными колоннами // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2012. Т. 19. № 1. С. 147-154.
3. Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. Москва: Радио и связь, 1992. 256 с.
4. Автоматизированная система управления технологическими процессами энергоблока №6 Новосибирской ТЭЦ-5 // Инновации бизнесу. 2006. URL: <http://www.ideasandmoney.ru/Ppt/Details/297556> (дата обращения: 15.04.2012).
5. Автоматизированные системы управления предприятиями (АСУП) // Теоретические основы автоматизированного управления. Владикавказ, 2007. URL: <http://asy.osetiaonline.ru/docs/2-1-opredelenie-sostav-i-osnovnie-prinsipy-proektirovania-asytp.html> (дата обращения: 15.08.2013).
6. Алгоритм Мамдани в системах нечёткого вывода // Информационный портал «Хабрахабр». 2 февраля 2011. URL: <http://habrahabr.ru/post/113020> (дата обращения: 14.04.2012).
7. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления. СПб.: Наука, 1999. 467 с.
8. Антошин Д. В., Анохин А. Н. Разработка прототипа системы поддержки оператора АЭС, основанной на фреймах // Научная сессия МИФИ – 2002: Сб. науч. тр. В 14 т. Т.3. Интеллектуальные системы и технологии. М.: МИФИ. 2002. С. 206-207.
9. АСУ ТЭЦ с энергоблоками мощностью 180 МВт и выше //

Энергетика - Всё для энергетика. 2011. URL: <http://foraenergy.ru/1-8-2-na-kazhdoy-tes-s-energoblokami-moshhnostyu-180-mvt-i-vyshe/> (дата обращения: 16.04.2012).

10. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учебник для студ. вузов. 11-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 312 с.

11. Беспалько В.П. Основы теории педагогических систем. Проблемы и методы психолого-педагогического обеспечения технических обучающих систем. – Воронеж : Воронежск. ун-т, 1977. – 304 с.

12. Беспалько В.П. Слагаемые педагогической технологии. – М.: Педагогика, 1989. 192 с.

13. Борисова Е. Компетенция и критерии оценки // Служба кадров и персонал. 2006. № 2. С. 16-19

14. Брановский Ю.С., Шапошникова Т.Л. Информационные инновационные технологии в профессиональном образовании: учеб. пособие. Краснодар: Изд-во КубГТУ. 2001. 369 с.

15. Братищенко В.В. Автоматизированная система управления байкальского государственного университета экономики и права // Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Информатика и информатизация образования. 2009. № 9. С. 156-158.

16. Володин В.М., Данилов А.И., Кошелева И.В. Альтернативная реализация чистого запаздывания и «бесконечные» эксперименты с Simulink-моделями // Труды Всероссийской научной конференции «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». М.: ИПУ РАН. 202. С. 604-612.

17. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991с.

18. Габбасова И.Н. Оценка уровня автоматизации контроля знаний в филиале ДВФУ г. Дальнереченска // Современные научные исследования и инновации. – Июнь 2012. - № 6. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2012/06/15049> (дата обращения: 03.10.2013)

19. Годовой отчет ОАО «НК Роснефть» // Официальный Сайт компании ОАО «НК Роснефть». 2012. URL: http://www.rosneft.ru/attach/0/02/01/a_report_2012.pdf (дата обращения: 19.03.2014).

20. Годовые отчеты // Сайт компании Роснефть. 2014. URL: http://www.rosneft.ru/Investors/statements_and_presentations/annual_reports/ (дата обращения: 19.03.2014).

Белозеров И. В. Религиозная политика Золотой Орды на Руси в XIII–XIV вв.: дис. ... канд. ист. наук ... 07.00.02. М., 2002. 215 с.

21. Горькавый М.А. Модели, методы и средства управления и интегрированной информационной поддержки производственных процессов предприятия металлургической отрасли: дис. ... канд. тех. наук ... 05.13.06. – Комсомольск-на-Амуре, 2010. 216 с.

22. Готовые решения по автоматизации в энергетике // НПФ «КРУГ». сор. 2002 - 2014. URL: http://www.krug2000.ru/decisions/solutions_energy.html (дата обращения: 19.01.2014).

23. Грушевский С.П., Добровольская Н.Ю., Кольцов Ю.В. Организация учебного процесса на основе нейросетевой компьютерной обучающей системы // Вестник Адыгейского государственного университета. 2008. № 7. С. 142-148

24. Давыдова Т.В. Инновационные подходы к организации учебного процесса в смоленском филиале РГОТУПС // Ежегодная межрегиональная научно-практическая конференция «Инфокоммуникационные технологии в региональном развитии. - Смоленск: Смоленский филиал РГОТУПС. 2008. С. 28-31.

25. Данилюк С.Г. Вероятностно-лингвистический метод диагностирования. Серпухов: МО РФ, 1998. 96 с.

26. Данилюк С.Г. Теоретическое обоснование итогового оценивания на основе среднего балла текущей успеваемости // Ученые записки ИИО РАО/ Под ред. И.В. Роберт – М.: Институт информатизации образования РАО, 2003. № 10. С. 123-135

27. Данилюк С.Г., Агарев В.А. Обоснование структуры анализа

надежности прикладного программного обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2008. № 4. С. 52-55.

28. Данилюк С.Г., Злобин В.И. Автоматизация поиска неисправностей на основе вероятностно-лингвистического метода диагностирования // Информационные технологии в проектировании и производстве: Научно-техн. сб. / ВИМИ. 1996. № 3-4. С. 59-65.

29. Данилюк С.Г., Злобин В.И., Ванюшин В.М. Принципы построения сложных адаптивных систем в связи и управлении. М.: МО РФ, 1998. 296 с.

30. Данилюк С.Г., Романенко Ю.А. Метод формализации нечеткой информации для диагностической экспертной системы аппаратуры радиосвязи // Электросвязь. 1997. № 1. С. 32-34.

31. Дмитриев В.М., Зайченко Т.Н., Гарганеев А.Г. Автоматизация функционального проектирования электромеханических систем и устройств преобразовательной техники : монография. Томск : [б. и.], 2000. 291 с. : ил.

32. Доронина Ю.В., Кондратьева Л.П. Программный комплекс анализа устойчивости систем автоматического управления // Вестник СевГТУ. Информатика, электроника, связь. Выпуск 93. Севастополь. 2008. С.89-92

33. Дудников Е.Г. Автоматическое управление в химической промышленности. М.: Химия, 1987. 368 с.

34. Душин С.Е. Теория автоматического управления. Учеб. для вузов/С. Е. Душин, Н. С. Зотов, Д.Х. Имаев, Н. Н. Кузьмин, В. Б. Яковлев; под ред. В. Б. Яковлева. 2-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 2005. 567 с.

35. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий. М.: Химия, Колос, 2016. 416 с.

36. Ежеквартальные отчеты // Сайт компании Роснефть. URL: <http://www.rosneft.ru/Investors/information/quarterlyreport/> (дата обращения: 19.03.2014).

37. Еремин Е.Л. Теличенко Д.А. Адаптивное и робастное управление

объектами теплоэнергетики. Благовещенск: Амурский гос. ун-т. 2009. 228 с.

38. Журавлев А.А. Система регулирования газоохладителя теплонасосной установки в комбинированной системе теплоснабжения в широком диапазоне изменения тепловой нагрузки // Электронный журнал «Проблемы региональной энергетики» - Institutul de Energetica al ASM. 2007. URL: http://ieasm.webart.md/data/m71_2_67.doc (дата обращения: 17.03.2009).

39. Заде Л., Дезоер Ч. Теория линейных систем (Метод пространства состояний). М.: Наука, 1970. 704 с.

40. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 168 с.

41. Зайцева Л.В. Методы контроля знаний при автоматизированном обучении // Автоматика и вычислительная техника. 1991. Т. 4. С. 88-92.

42. Зайцева Л.В., Прокофьева Н.О. Модели и методы адаптивного контроля знаний // Educational Technology & Society. 2004. URL: http://ifets.ieee.org/russian/depositor/v7_i4/html/1.htm (дата обращения: 01.11.2013).

43. Зайцева Л.В., Прокофьева Н.О. Проблемы компьютерного контроля знаний // Proceedings. IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT 2002). 9-12 September 2002. Kazan, Tatrstan, Russia, 2002. С. 102-106.

44. Зеленков А.В. Латкин В.А., Митрахович М.М. Автоматизированные системы управления предприятием. Учебное пособие. Харьков. 2008. 45 с.

45. Зорина С. Автоматический режим // Деловой портал «Управление производством». 2013. URL: http://www.up-pro.ru/library/information_systems/management/avtomaticheskii-regim.html (дата обращения: 19.02.2014).

46. Интеллектуальная система // Википедия - свободная энциклопедия. 2012. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Интеллектуальная_система (дата обращения: 26.10.2013).

47. Кан Б.А. Параметрический синтез цифровой комбинированной системы управления на примере управления промышленным объектом //

Интеллектуальный потенциал ВУЗов – на развитие Дальневосточного региона России и стран АТР: Материалы XV международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 24-25 апреля 2013 г. Кн. 1. Владивосток: Изд-во ВГУЭС. 2013. С. 24-27.

48. Кан Б.А. Сравнительная оценка алгоритмов параметрического синтеза цифрового ПИД – регулятора // Интеллектуальный потенциал ВУЗов – на развитие Дальневосточного региона России и стран АТР: Материалы XV международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 24 – 25 апреля 2013 г. Кн. 1. Владивосток: Изд-во ВГУЭС. 2013. С. 27-31.

49. Карпова Н.Н. Основные принципы аттестации // Справочник по управлению персоналом. 2004. № 4. С. 70-77.

50. Классификация автоматизированных систем, обеспечивающих жизненный цикл изделий // Pandia: Энциклопедия знаний. Москва. 2011. URL: <http://www.pandia.ru/text/77/205/80238.php> (дата обращения: 30.03.2014).

51. Клиначёв Н.В. Моделирование обыкновенных и особых линейных систем // Руководство к лабораторным работам в пакетах VisSim и Jigrein. сор. 2000-2013. URL: http://model.exponenta.ru/lectures/lr_ix.htm (дата обращения: 21.10.2013).

52. Клиначёв Н.В. Теория систем автоматического регулирования и управления: учеб.-метод. компл. Offline версия 3.8. Челябинск 2008. URL: <http://model.exponenta.ru/lectures/> (дата обращения: 16.05.2011).

53. Коваленко Д. StudSystem - Автоматизированная система управления учебным процессом // Сайт Коваленко Дениса. 21.09.2010. URL: <http://kdv.net13.info/programs.php?act=studsystem> (дата обращения: 13.05.2012).

54. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы: Теория и технология разработки / Под ред. А.М. Яшина. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 711 с.

55. Колесов Ю.Б. Сенченков Ю.Б. Визуальное моделирование сложных динамических систем. Санкт-Петербург: АНО НПО «Мир и Семья», 2001. 242 с.

56. Комсомольский НПЗ // Сайт НК Роснефть. 2014. URL: http://www.rosneft.ru/Downstream/refining/Refineries/Komsomolsk_Refinery/ (дата обращения: 28.04.2014).

57. Конденсационная электростанция // Википедия - свободная энциклопедия. 2013. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Конденсационная_электростанция (дата обращения: 29.12.2013).

58. Корпоративная информационная система «АСУ УНИВЕРСИТЕТА» // МГГУ им. М.А. Шолохова. соp. 2009-2010. URL: <http://gisoft.mggu-sh.ru> (дата обращения: 24.06.2010).

59. Корсакова С.Н. Интеллектуальные машины URL: <http://www.homeoscope.ru/> (дата обращения: 16.07.2011).

60. Кривошеев В.П. Автоматизация непрерывных технологических процессов нефтехимических производств на основе двухуровневых систем управления: дис. ... докт. техн. наук ... 05.13.06. Уфа. 1989. 274 с.

61. Кривошеев В.П., Сачко М.А. Аналитический метод расчета типовых компенсаторов и развязывающих устройств. I // Информатика и системы управления. 2010. № 23. С. 147-155.

62. Кривошеев В.П., Сачко М.А. Аналитический метод расчета типовых компенсаторов и развязывающих устройств. II // Информатика и системы управления. 2010. № 25. С. 125-136.

63. Кривошеев В.П., Сачко М.А. Аналитический метод расчета типовых компенсаторов и развязывающих устройств. III // Информатика и системы управления. 2010. № 26. С. 127-136.

64. Кривошеев В.П., Сачко М.А. Эффективный метод расчёта расширенных амплитудно-фазовых характеристик с использованием бинорма Ньютона // Вестник ВГУЭС. Территория новых возможностей. Проблемы. Мнения. Дискуссии. События. 2013. № 4. С. 271-280.

65. Кривошеева Е.А., Цыпленкова Е.В., Швецова С.В. Автоматизированная система информационно-аналитического обеспечения управления образовательным процессом (АСУОП «школа») // XIV

Международная конференция-выставка «Информационные Технологии в Образовании» (ИТО-2004). Секция IV. – М.: АНО «ИТО». 2004. URL: <http://www.ict.edu.ru>. (дата обращения: 15.10.2013).

66. Кудряшов В.С. Синтез систем цифрового управления многосвязными нестационарными технологическими объектами (на примере процессов ректификации) : дис. ... докт. техн. наук ... 05.13.01, 05.13.06. Воронеж, 2006. 320 с.

67. Ларичев О.И. Новые возможности компьютерного обучения // Вестник Российской Академии наук. 1999. Т. 69. № 2. С. 110-111.

68. Ларичев О.И. Теория подсознательных решающих правил и ее применение в диагностических задачах // Психологический журнал. 2003. Т. 24. № 1. С. 56-64.

69. Леевик Г.Е. Аттестация персонала по международным стандартам качества. М.: БПА, 2007. 424 с.

70. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2003. 719 с.

71. Лернер И.Я. Развивающее обучение с дидактических позиций // Педагогика. 1996. № 2. С. 7-11.

72. Линьков В.М., Линькова А.В. Вопросы автоматизации управления учебным процессом в вузе // ИТО-2003. Секция IV. – М.: АНО «ИТО». 2003. URL: <http://ito.edu.ru/2003/IV/IV-0-1862.html> (дата обращения: 15.04.2012)

73. Лисьев Г.А., Попова И.В. Технологии поддержки принятия решений. 2-е издание, стереотипное. М.: Издательство «ФЛИНТА», 2011. 133 с.

74. Лукас В.А. Теория управления техническими системами. Екатеринбург: УГГГА, 2002. 675 с.

75. Методические указания по созданию АСУ ТП водоподготовительных установок электростанций // Многоотраслевой федеральный интернет-портал RuFox.ru. М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004. URL: <http://law.rufox.ru/print/14/1200035600.htm> (дата обращения: 15.04.2012)

76. Магид С.И. Проблемы и приоритеты проектирования тренажеров

для подготовки персонала энергообъектов, оснащенных современными автоматизированными системами управления / С.И. Магид, Е.Н. Архипова, Л.П. Музыка, А.В. Машков // Надежность и безопасность энергетики. №2. 2008. URL: <http://www.sigma08.ru/jur2-5.htm> (дата обращения: 14.08.2013).

77. Мееров М.В., Литвак Б.Л. Оптимизация систем многосвязного управления. М.: Наука, 1972. 344 с.

78. Молнина Е.В., Данилюк В.А., Косовец Е.А. Проблема автоматизации контроля знаний студентов по гуманитарным дисциплинам // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 11. URL: www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article&article_id=2748 (дата обращения: 02.11.2013).

79. Надеждин Ю. Безопасность АСУ ТП критически важных объектов // Системы безопасности. 2014. № 2. С. 34-39.

80. Никитин А. В., Шишлаков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: Монография / Под ред. В. Ф. Шишлакова; СПбГУ АП. СПб., 2003. 358 с.

81. Новиков В.Н. Научно-методическое обеспечение автоматизированной системы подготовки и поддержки деятельности специалистов по управлению качеством аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики : дис. ... канд. тех. наук. Москва. 2006. 157 с.

82. О первоочередных мерах по повышению надежности работы ЕЭС России: Оперативное указание ОУ-08-01-ВП от 22.01.2001 г. Разд. 6. Совершенствование управления надежностью профессиональной деятельности персонала. Мероприятия № 6.22, 6.23, 6.27, 6.32.

83. О проведении соревнований персонала энергопредприятий. Приказ РАО «ЕЭС России» №538 от 30.12.1999 г. М.: РАО «ЕЭС России». 5 с.

84. О совершенствовании эксплуатации турбинного оборудования ТЭС. Приказ РАО «ЕЭС России» №307 от 23.08.1999 г. М.: РАО «ЕЭС России». 20 с.

85. Огнев С.П. Вариантные аппроксимации звена запаздывания // Сборник научных трудов SWorld. По материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое

применение. Современное состояние и пути развития '2011. Одесса: Черноморье. 2011. Т. Том 3. Технические науки. С. 25-30.

86. Официальный сайт компании MathWorks. The MathWorks, Inc, 1994-2013. URL: <http://www.mathworks.com> (дата обращения: 14.03.2013).

87. Официальный сайт программы FuzzyTECH. INFORM GmbH, 1997-2013. URL: <http://www.fuzzytech.com> (дата обращения: 14.03.2013).

88. Первозванский, А.А. Курс теории автоматического управления: учебное пособие. М.: Наука, 1980. 611 с.

89. Петров Е. В. Модели и методы автоматизированного управления персоналом металлургического комбината : дисс. ... канд. тех. наук. ... 05.13.10. 235 с.

90. Петрушин В.А. Архитектура экспертно-обучающих систем // Разработка и применение экспертно-обучающих систем: Сб. науч. тр. – М.: НИИВШ, 1989. – С. 7-18.

91. Петрушин В.А. Интеллектуальные обучающие системы: архитектура и методы реализации (обзор) // Известия АН. Техническая кибернетика. 1993. №2. С. 164-189.

92. Платонова Т. Экспертная оценка как элемент управления персоналом в ОАО «УАЗ» // Служба кадров и персонал. 2006. No. 8.

93. Плотников С.В. Алгоритмическое и аппаратное обеспечение автоматизированной системы тестирования операторов сложных технологических установок : дис. ... канд. тех. наук ... 05.13.06. Шуя, 2010. 114 с.

94. Подлипский О.К. Построение баз знаний группой экспертов // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2. № 1. С. 3-11

95. Полномасштабная АСУ ТП Бобруйской ТЭЦ-2 РУП «Могилевэнерго» // Wonderware. Энергетика. URL: http://www.wonderware.ru/pdf/WW_sstory_BobruiskHS_ru_1210.pdf (дата обращения: 07.04.2012).

96. Попов Д.И. Способ оценки знаний в дистанционном обучении на основе нечетких отношений // Дистанционное образование. 2000 №6. URL:

http://www.mesi.ru/joe/N6_00/popov.html (дата обращения: 24.09.2012).

97. Попов Э.В. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. М.: Наука, 1987. 288с.

98. Поспелов Д.А. Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1968. 328 с.

99. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика. М.: Наука, 1986. 284 с.

100. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (издание официальное). СПО ОРГРЭС, 2003.

101. Презентации // Сайт компании Роснефть. 2014. URL: http://www.rosneft.ru/Investors/statements_and_presentations/presentations/ (дата обращения: 28.09.2013).

102. Пугачев В.И. Выбор параметров настройки обратной связи адаптивной системы управления с эталонной моделью по расширенной АФХ // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. №5. 2010. URL: <http://jurnal.org/articles/2010/inf8.html> (дата обращения: 14.11.2013).

103. Рабенко В.С., Мошкарин А.В. Повышение безопасности, надежности, экономичности и продление срока службы оборудования предприятий тепловой энергетики средствами новых компьютерных технологий подготовки оперативного персонала // Энергосбережение и водоподготовка. №2. 2002. URL: http://ispu.ru/files/1_27.pdf (дата обращения: 25.04.2012).

104. Распоряжение правительства РФ от 6 сентября 2011 г. N 1540-р. «Стратегия социально-экономического развития центрального федерального округа на период до 2020 года».

105. РД 153-34.1-35.127-2002. Общие технические требования к программно-техническим комплексам для АСУ ТП тепловых электростанций // Промышленный портал complexdoc.ru. Москва, 2002. URL: <http://www.complexdoc.ru/ntdtext/551943> (дата обращения: 21.02.2013).

106. РД 34.35.128-96. Основные требования к созданию интегрированных автоматизированных систем управления предприятиями

централизованного теплоснабжения «Тепловые сети» (ИАСУ «теплосеть») // Отраслевой методический материал. Москва. 1996. 27 с.

107. Роберт И.В. Автоматизация информационно - методического обеспечения образовательного процесса и организационного управления учебным заведением // Ученые записки ИИО РАО. 2007. № 23. С. 210-233.

108. Роберт И.В. Автоматизация информационно-методического обеспечения учебно-воспитательного процесса и организационного управления образовательным учреждением: современное состояние; перспективы развития // Информатизация образования и науки. 2009. № 2. С. 51-62.

109. Роберт И.В. Современные информационные технологии в образовании. М.: Школа-Пресс, 1994.

110. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М.: Энергия, 1973. 440 с.

111. Рыбалев А.Н. Автоматическое управление энергетическими установками. Лекционный курс. Благовещенск. 2007. 94 с.

112. Сачко М.А. Сохранение экспертных знаний и их применение в образовании // Вестник ВГУЭС. Территория новых возможностей. №4(8). 2010. С. 149-154.

113. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Автоматизация оценки качества знаний по параметрическому синтезу САУ // Современные проблемы науки и образования. 2012. URL: www.science-education.ru/106-7665 (дата обращения: 28.10.2013).

114. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Информационно-программное обеспечение комбинированных САУ // Проблемы управления и автоматизации процессов и производств. Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 50-ти летию кафедры «Автоматизации технических процессов и производств». УГНТУ, Уфа. 2010. С. 295-300.

115. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Исследование каскадных САУ // Вестник ВГУЭС. Территория новых возможностей. 2011. № 2. С. 81-95.

116. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Применение нечёткой логики для

интеллектуализации обучения параметрическому синтезу комбинированной системы автоматического управления // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 3 (часть 3). С. 484-489.

117. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Программные аспекты при разработке комплекса для расчета автоматических систем регулирования // *Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-19*. Сб. трудов XIX Международ. науч. конф. Воронеж, Воронеж. гос. технол. акад. 2005. С. 129-132.

118. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Развязывание контуров в системах автоматического управления // *Интеллектуальный потенциал ВУЗов – на развитие Дальневосточного региона России: Материалы VIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. 24-26 мая 2006 г.: в 6 кн. Владивосток: Изд-во ВГУЭС. 2006. Т. Кн. 4. С. 117-121.

119. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Расчет и исследование комбинированных систем регулирования с использованием реальных компенсаторов // *Вестник ВГУЭС. Территория новых возможностей. Проблемы. Мнения. Дискуссии. События*. 2009. № №1. С. 103-108.

120. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Расчет каскадных систем («РКС») // Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. № 2009611166. Дата регистрации – 20 февраля 2009 г.

121. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Расчет комбинированных систем («РКоС») // Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. № 2009623134. Дата регистрации – 24 июня 2009 г.

122. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Расчет одноконтурных систем («РОС») // Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. № 2009611165. Дата регистрации – 20 февраля 2009 г.

123. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Теоретические основы определения уровня знаний при изучении параметрического синтеза одноконтурных и каскадных систем автоматического управления // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 11 (часть 9). С. 1804-1809.

124. Сачко М.А., Кривошеев В.П. Учебно-методический комплекс

«Студиум» // Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. № 2010615361. Дата регистрации – 20 августа 2010 г.

125. Сачко М.А., Кривошеев В.П., Епифанцев А.В. Разработка информационно-программного комплекса для исследования систем управления // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-23: сб. трудов XXIII международная научная конференция в 12 т. Т. Т 12. С. 151-154.

126. Сачко М.А, Цой С.Ю. Разработка информационно-программного обеспечения для построения переходных процессов в системах управления // Теоретические знания в практические дела: сб. науч. статей международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых исследователей 25 марта 2008 г.: в пяти частях. Омск: филиал ГОУ ВПО «РосЗИТП». 2008. Ч. 4. С. 88-91.

127. Свиридов А.П. Основы статистической теории обучения и контроля знаний. - М.: Высшая школа, 1981. – 262 с.

128. Состав АСУП // АСУ ТП и промышленная автоматика. 2009. URL: <http://automation-system.ru/main/item/54-sostav-asup.html> (дата обращения: 24.11.2012).

129. Степаненко В. Е. Методы и средства имитационного моделирования систем управления материальными ресурсами дискретного машиностроительного производства на основе сетей Петри: дис. ... канд. тех. наук ... 05.13.06. Комсомольск-на-Амуре. 2013.

130. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1972. 376 с.

131. Стригин Е.Ю. Дидактический потенциал учебного лабораторного эксперимента на основе автоматизированного лабораторного практикума удалённого доступа // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. URL: www.science-education.ru/102-5676 (дата обращения: 21.02.2013).

132. Стригин Е.Ю., Елочкин М.Е. Особенности использования лабораторного практикума с удаленным доступом при обучении студентов технического вуза // Среднее профессиональное образование. М.: ИПР СПО,

2009. № 6. С. 3-29.

133. Суходоев М.С. Пакет прикладных программ для анализа и синтеза интервальных систем // Молодежь и современные информационные технологии: сб. трудов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 26–28 февраля 2008. Томск: СПб Графикс. 2008. С. 104-108.

134. Теличенко Д.А. Адаптивные системы управления с эталонным упредителем для объектов с различными типами запаздываний: дис. ... канд. тех. наук ... 05.13.01. Благовещенск. 2006. 198 с.

135. Тепловые конденсационные электростанции (КЭС) // Электроэнергетические системы и сети. URL: <http://esis-kgeu.ru/elstipst/472-elstipst> (дата обращения: 29.12.2013).

136. Теремкова И.И., Хандыго В.Г. Применение технологий искусственного интеллекта при построении электронного обучающего пособия // Материалы II-я международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, образовании и производстве». 2012. URL: http://science-bsea.narod.ru/2012/it_2012/teremkova_prim.htm (дата обращения: 21.12.2013).

137. Тесля Ю.Н. Введение в информатику природы. Маклаут, 2010. 255 с.

138. Толковый словарь терминов понятийного аппарата информатизации образования. М.: ИИО РАО, 2009. 96 с.

139. ТП 34-70-010-86: Типовое положение о цехе тепловой автоматики и измерений. М.: СПО Союзтехэнерго, 1987.

140. ТП 34-70-34-84: Типовые должностные инструкции персонала цеха ТАИ. М.: СПО Союзтехэнерго, 1985.

141. Требования к АСУ ТП // АСУ ТП и промышленная автоматика. 2011. URL: <http://automation-system.ru/spravochnik-inzhenera/item/7-5.html> (дата обращения: 24.05.2013).

142. Трофимов Е.Ф., Голкина В.А. Модель формирования компетенций

персонала в системе ДПО с учетом требований предприятия-заказчика // Дополнительное профессиональное образование. 2007. № 2. С. 14-31.

143. Трофимова Л.А., Трофимов В.В. Управление знаниями. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2012. 77 с.

144. Тысячная В. Ключевые аспекты управления персоналом при слиянии компаний // Менеджер по персоналу. 2009. №6. С.16-21.

145. Уиддет С., Холлифорд С. Руководство по компетенциям. 3-е изд. Гиппо. 2008. 240 с.

146. Управление персоналом // Википедия – свободная энциклопедия. 2014. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Управление_персоналом (дата обращения: 30.03.2014).

147. Фельдбаум А.А. Электрические системы автоматического регулирования. М.: «Оборонгиз». 809 с.

148. Фролов Е.Б., Загидуллин Р.Р. Оперативно-календарное планирование и диспетчирование в MES-системах // Портал машиностроения. 2008. URL: <http://mashportal.ru/Default.aspx?tabid=124&newsType=ArticleView&articleId=10455> (дата обращения: 30.03.2014).

149. Функциональная структура АСУП. Подсистема оперативного управления основным производственным процессом 2011. URL: <http://vvy.me/gosi/toau/59.html> (дата обращения: 24.11.2012).

150. Функция принадлежности и методы ее построения // Сайт Fuzzy Modeling Group – URL: http://fuzzy-group.narod.ru/files/Fuzzy_Modeling/Lecture03.The.membership.function.pdf (дата обращения: 14.05.2012).

151. Хоменко Т. В., Лайко Н. В. Информационные технологии как интеллектуализация деятельности в системе образования // Вестник АГТУ. 2007. №1. С.273-276.

152. Целигоров Н.А., Леонов М.В. Информационно-исследовательская система «Критерий» // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Интеллектуальные САПР». 2000. № 2 (16). С. 149-154.

153. Целигорова Е.Н. Современные информационные технологии и их

использование для исследования систем автоматического управления // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2010. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/222> (дата обращения: 13.11.2013).

154. Шапошникова Е.Ю Стригин Т.Л. Физический практикум с удаленным доступом. Методические указания к лабораторному практикуму по физике: методическое пособие. Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2009. 91 с.

155. Шински Ф. Системы автоматического регулирования химико-технологических процессов. М: Химия, 1967. 480 с.

156. Экспертно-обучающие системы // Информационные системы в менеджменте. URL: <http://lib.rushkolnik.ru/text/27573/index-1.html?page=10> (дата обращения: 20.12.2013).

157. Эрриот П. Регулирование производственных процессов. М: Энергия, 1976. 480 с.

158. Яковис Л.М. Многоуровневое управление производством (состояние, проблемы, перспективы) // Автоматизация в промышленности. 2009. № 9. С. 15-22.

159. Ericsson K.A. The Acquisition of Expert Performance: An Introduction to Some of the Issues. – Hillsdale. NJ: Lawrence Erlbaum Associates. 1996. pp. 1-50

160. Kihlstrom J.F. The Cognitive Unconscious. – Science. 1987. Vol. 237. pp. 1445-1452.

161. Mamdani E.H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, IEEE Transactions on Computers 26(12) pp. 1182–1191.

162. MATLAB // Материал из Википедии – свободной энциклопедии. 28 октября 2013. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (дата обращения: 13.07.2013).

163. Sachko M.A. Krivosheev V.P., Epifantsev A.V. Automation of control system analysis in educational process. Proceeding of 2011'Sino-Russian Conference on Information Technology. China: Shenyang university of chemical technology. 2011. pp. 61-62.

164. SCADA // Википедия – свободная энциклопедия. 2014. URL:

<http://ru.wikipedia.org/wiki/SCADA> (дата обращения: 23.03.2014).

165. Sompol A., Chitwong S., Nilas P. Decoupling Control of Electro - Pneumatic Pressure Tank System. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009. Vol II. IMECS 2009, March 18 - 20, Hong Kong. 2009. URL: http://www.iaeng.org/publication/IMECS2009/IMECS2009_pp1189-1192.pdf (дата обращения: 21.04.2009).

166. Tham M.T. Multivaivable control: an introduction to decoupling control // University of Newcastle upon Tyne. 1999. URL: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/mloop/mloop.pdf> (дата обращения: 17.03.2009).

167. VisSim. A graphical language for simulation and model-based embedded development. Visual Solutions 2013. URL: <http://www.vissim.com> (дата обращения: 17.07.2013).

168. VisSim // Материал из Википедии – свободной энциклопедии. 12 марта 2013. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/VisSim> (дата обращения: 14.07.2013).

169. Zimmermann H.J. Fuzzy Set Theory and its Applications. 3rd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1996. 435p.

**БЛОК СХЕМЫ АЛГОРИТМОВ ПРОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

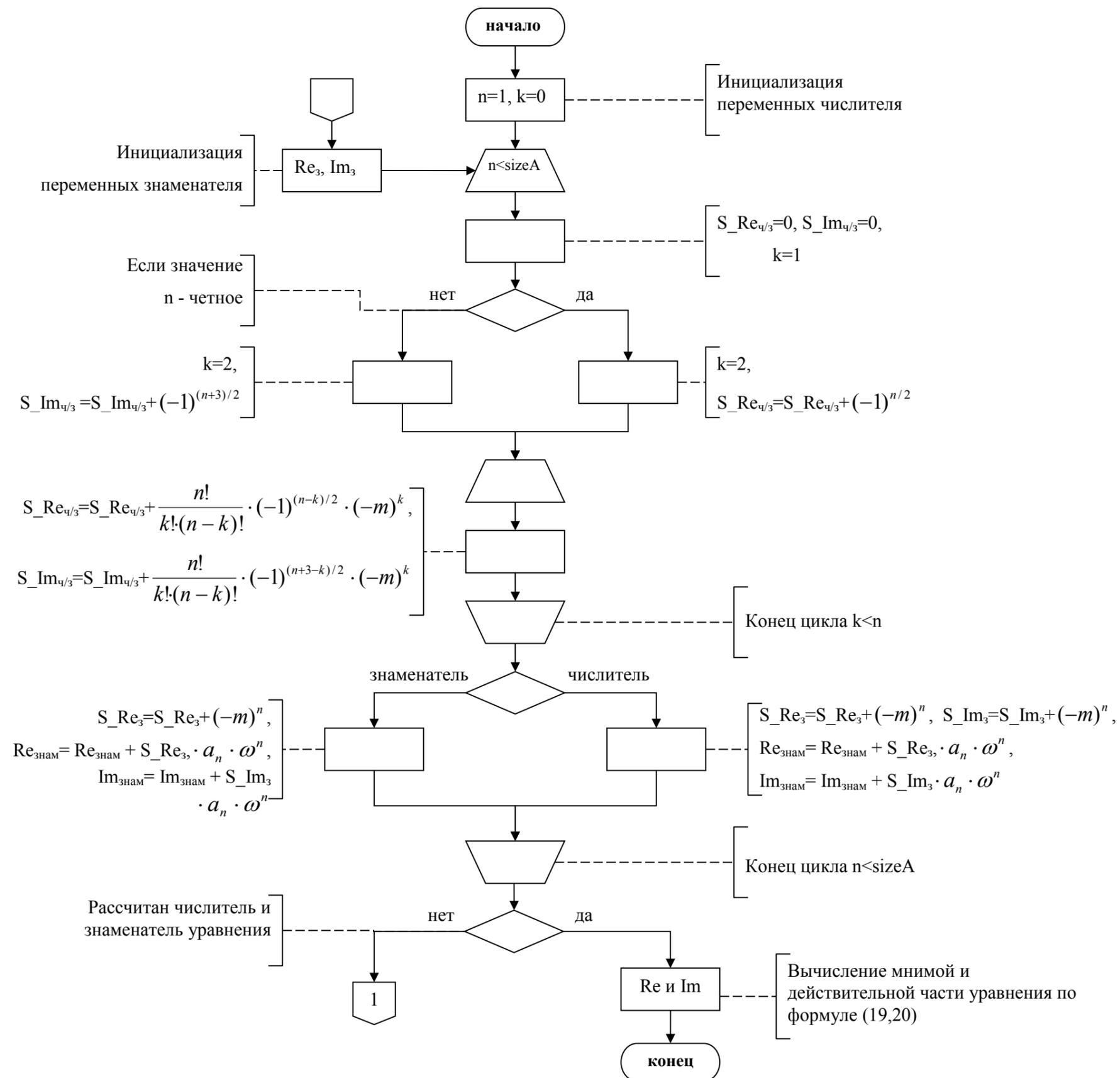


Рисунок П1.1 - Блок-схема алгоритма расчёта мнимой и действительной части РАФХ

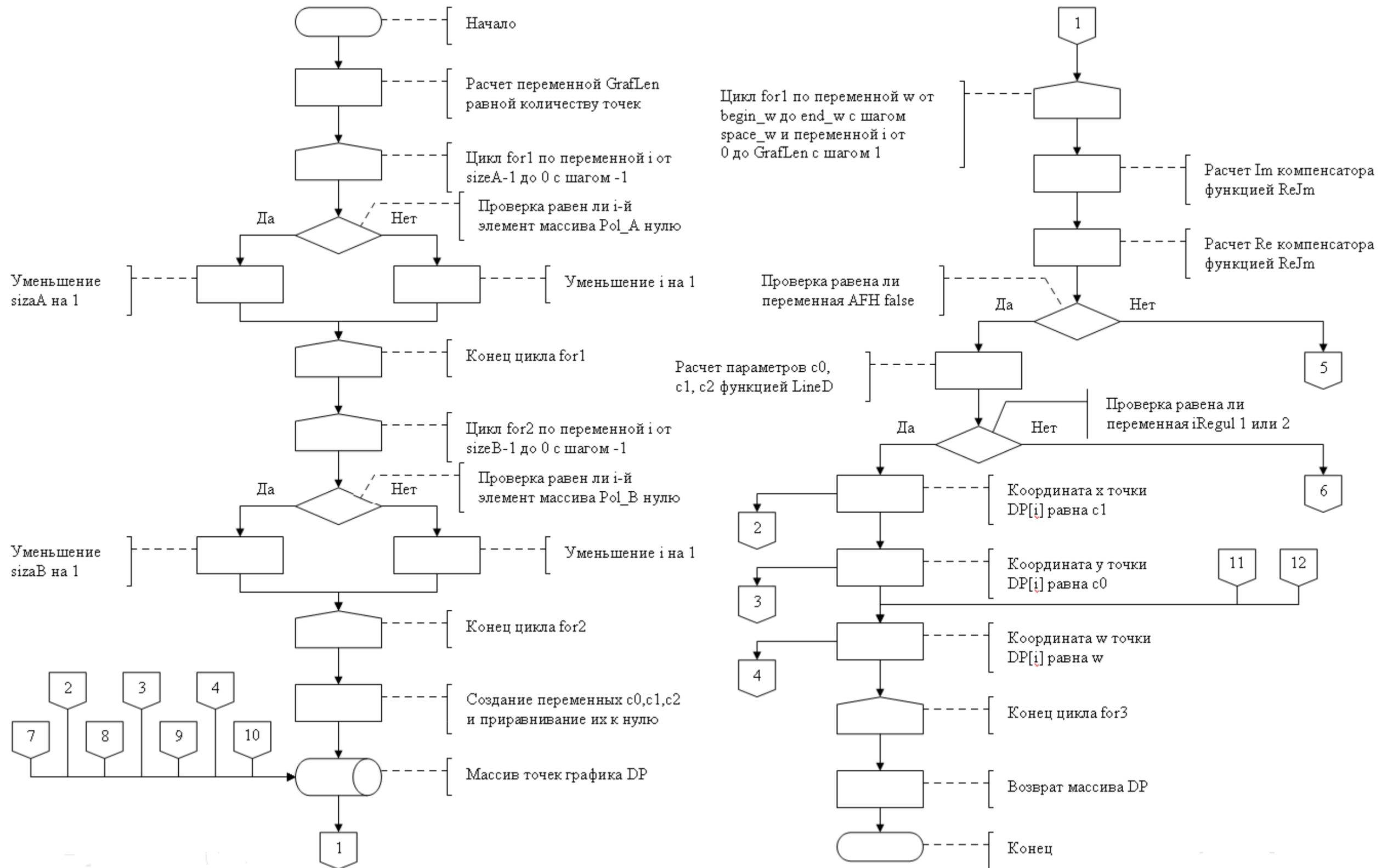
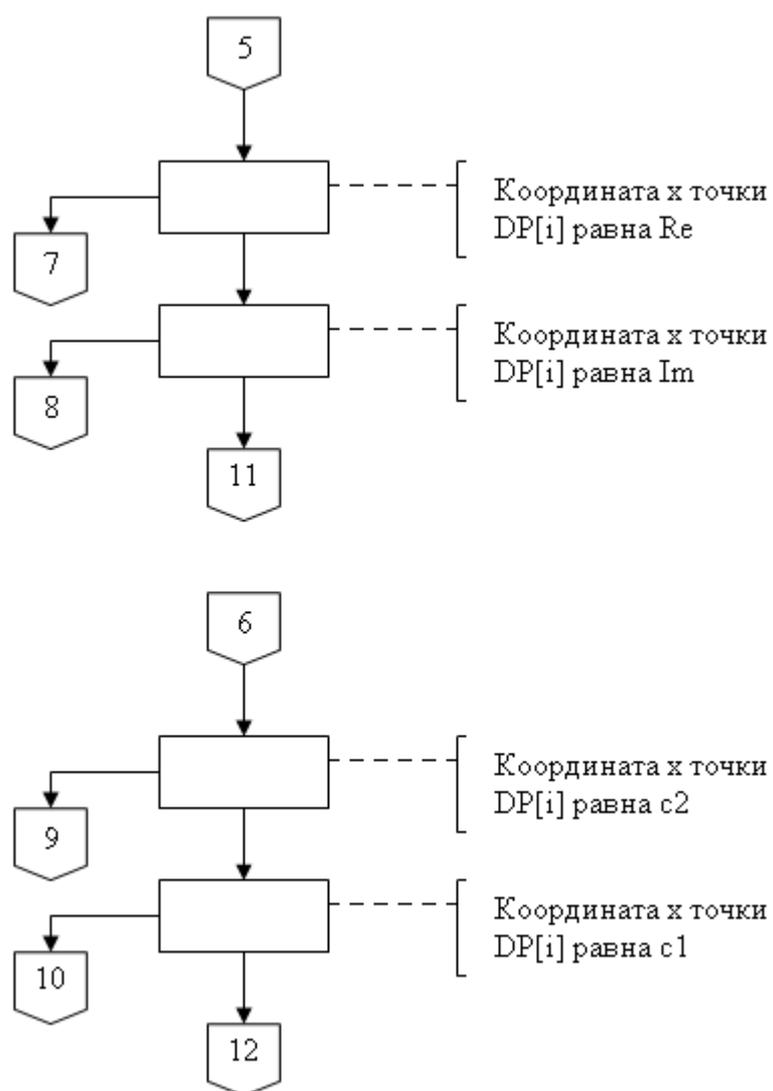


Рисунок П1.2 - Блок-схема функции «AFH_»



Продолжение рисунка П1.2

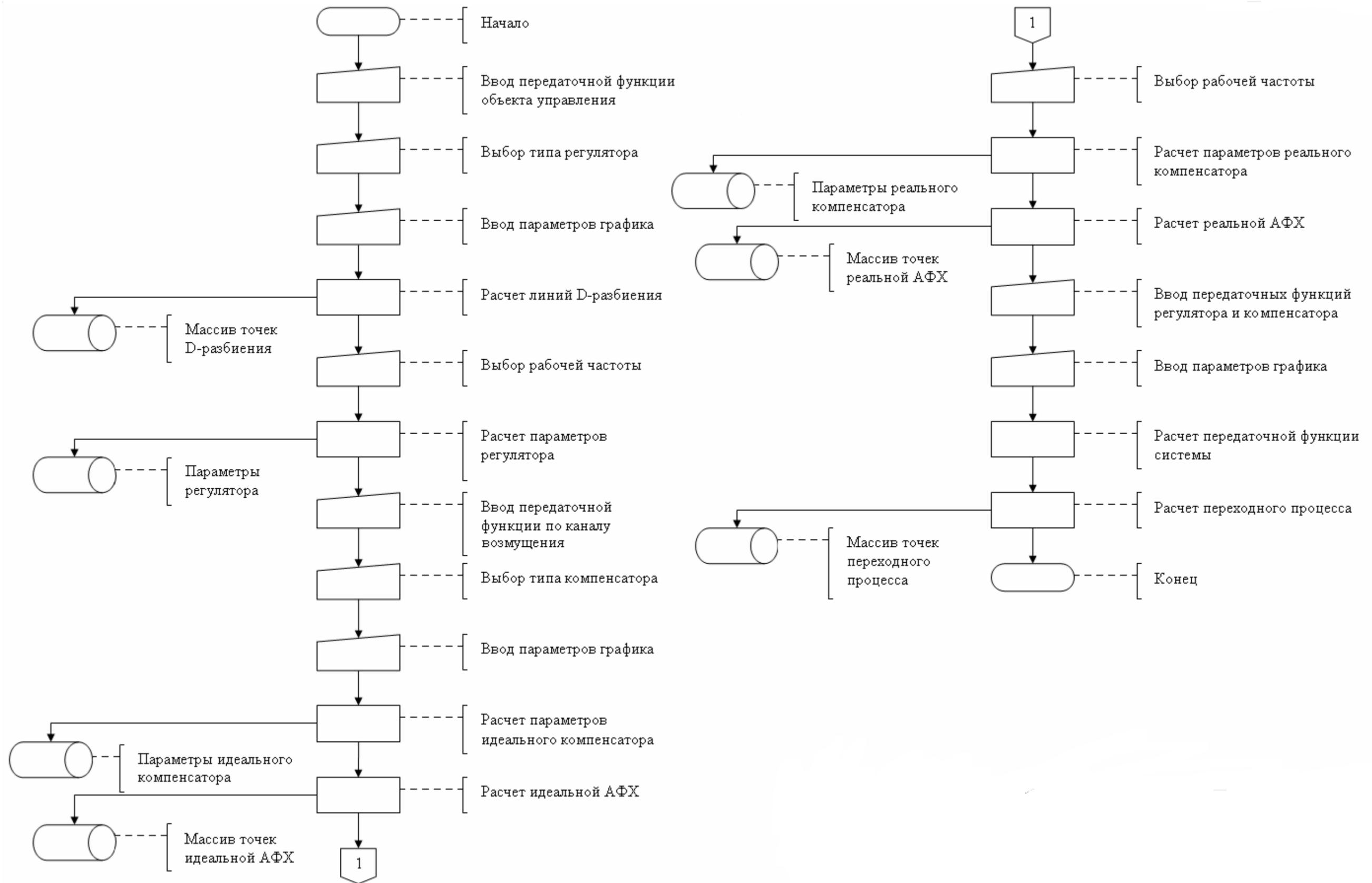


Рисунок П1.3 – Блок-схема проведения ПС комбинированной САУ

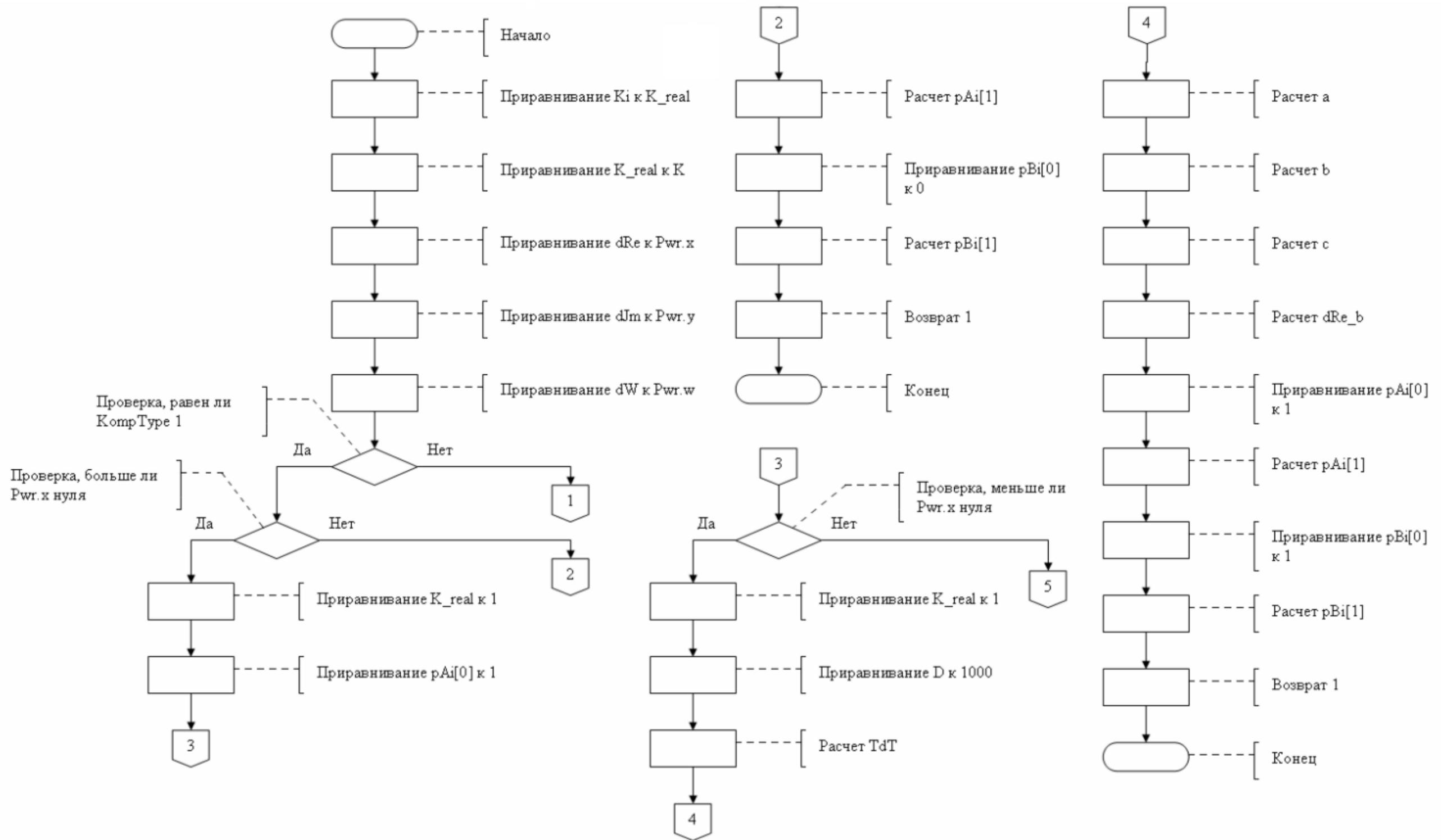
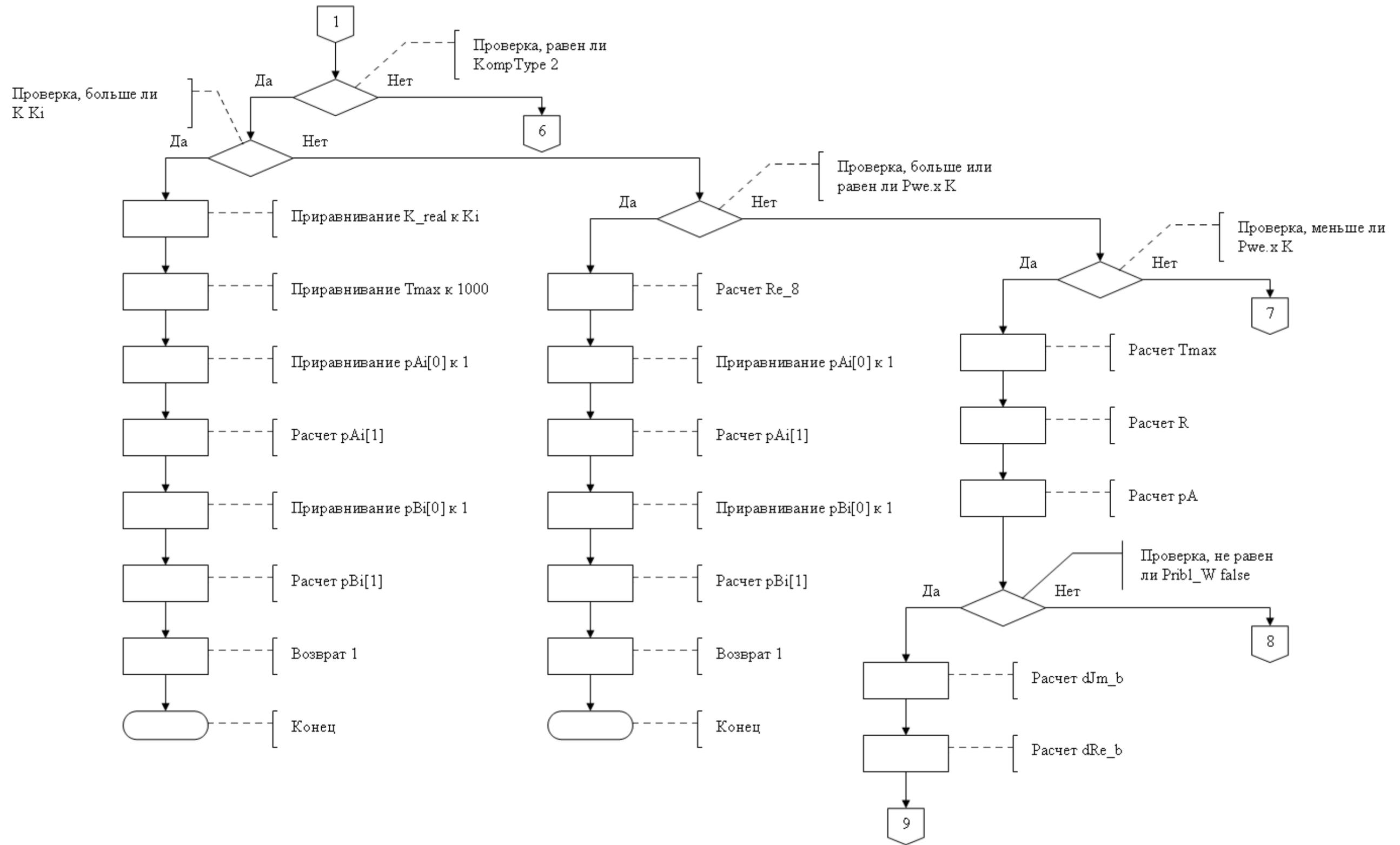
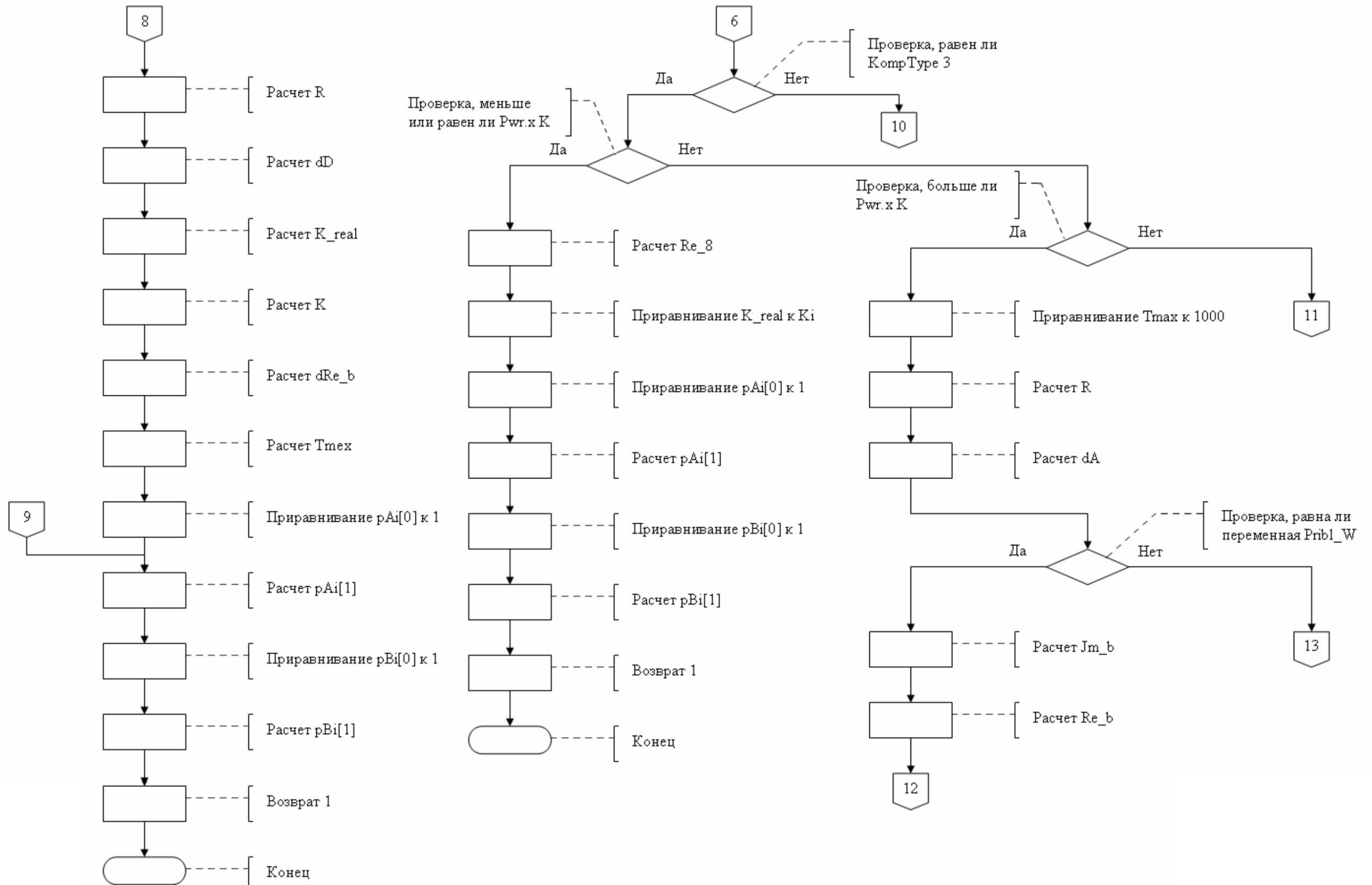


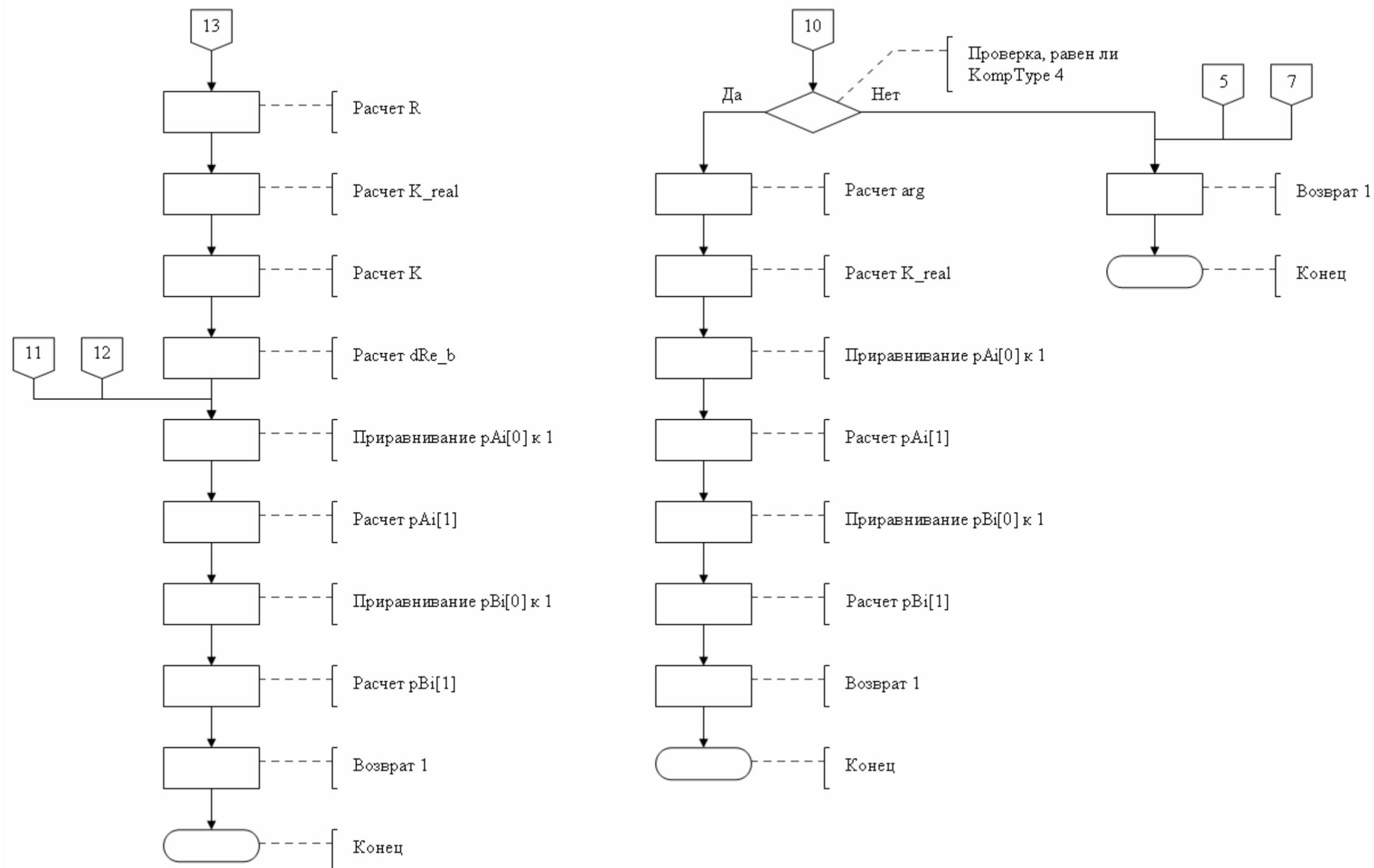
Рисунок П1.4 - Блок-схема функции «KompensType»



Продолжение рисунка П1.4



Продолжение рисунка П1.4



Окончание рисунка П1.4

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРИМЕРЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Результаты аналитического метода расчета настроечных параметров компенсаторов комбинированной системы управления иллюстрируется ниже приведенными примерами для реального дифференцирующего звена, интегро-дифференцирующего звена и неминимальнофазового инерционного звена.

П2.1 Реальное дифференцирующее звено

Пример 1. Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой и рабочей частотах.

Передаточная функция объекта по каналу управления

$$W_{oy}(S) = \frac{30 \cdot e^{-0.5S}}{10S^2 + 10S + 1}.$$

Передаточная функция объекта по каналу возмущения

$$W_{ov}(S) = \frac{20 \cdot e^{-S}}{S^2 + 4S + 1}.$$

Рабочая частота АСР $\omega_p = 0,733$ 1/сек, при которой настроечные параметры ПИ-регулятора имеют следующие значения $K_0=0,061$ 1/сек, $K_1=0,237$.

Передаточная функция идеального компенсатора

$$W_k = 0,667 \frac{(10S^3 + 10S^2 + S)e^{-0.5S}}{0,237S^3 + 1,009S^2 + 0,481S + 0,061}.$$

На рисунке П2.1 изображены АФХ идеального и реального компенсаторов.

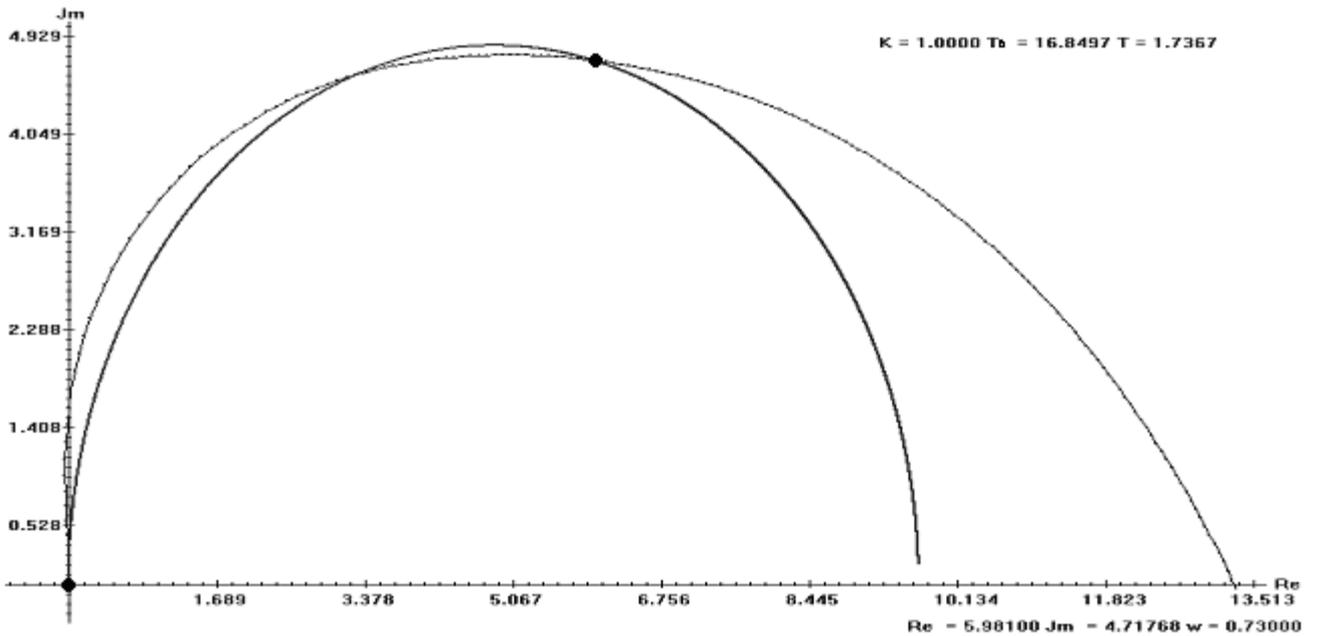


Рисунок П2.1 - АФХ идеального компенсатора и компенсатора в виде реального дифференцирующего звена

Настроечные параметры реального компенсатора: $T_B = 16,85$ сек. и $T = 1,74$ сек.

На рисунке П2.2 приведена схема моделирования комбинированной САУ в среде MATLAB.

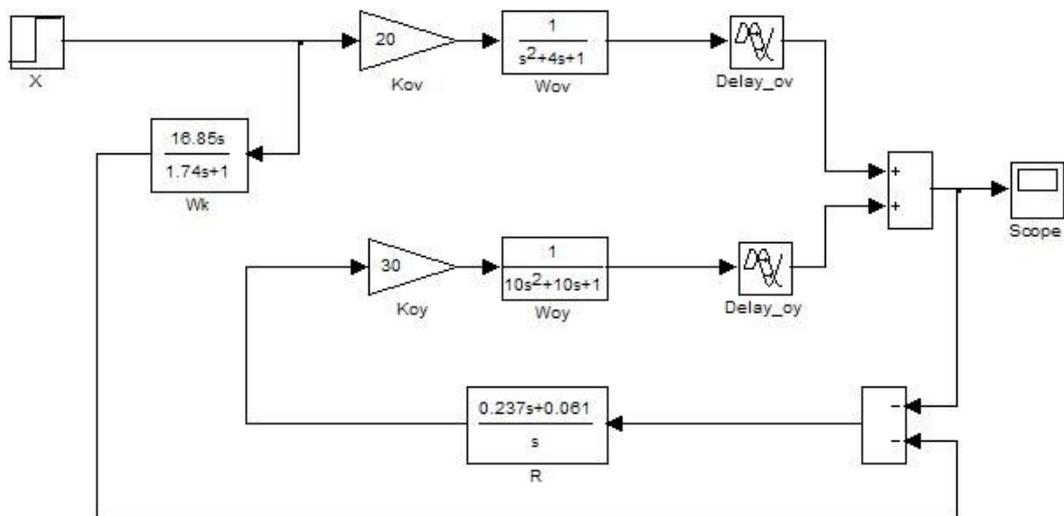


Рисунок П2.2 - Схема моделируемой АСР

На рисунках П2.3, П2.4 приведены графики переходных процессов одноконтурной и комбинированной САУ при полученных значениях настроек компенсатора и регулятора.

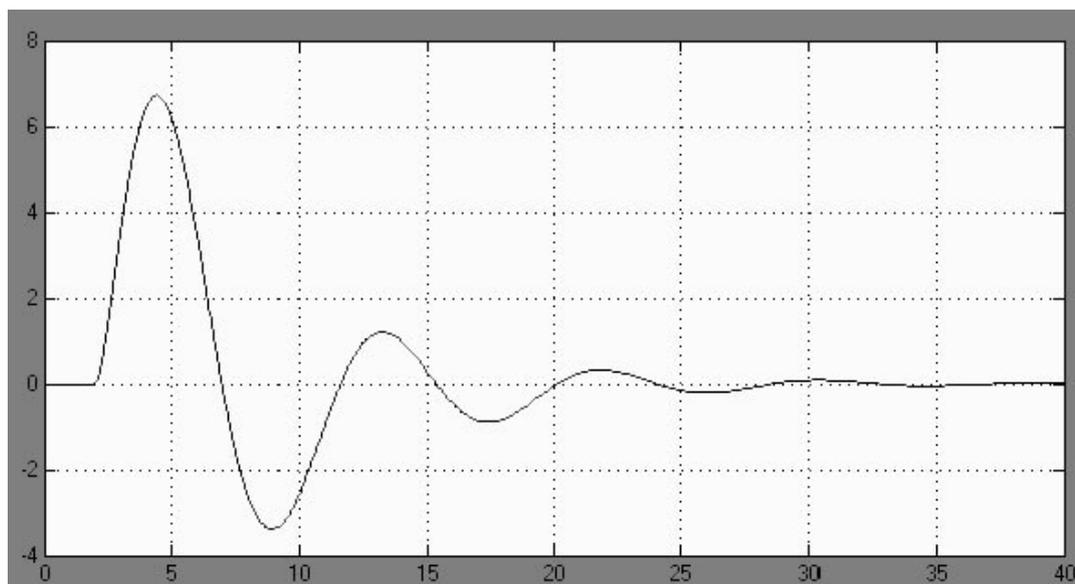


Рисунок П2.3 - Переходной процесс одноконтурной АСР

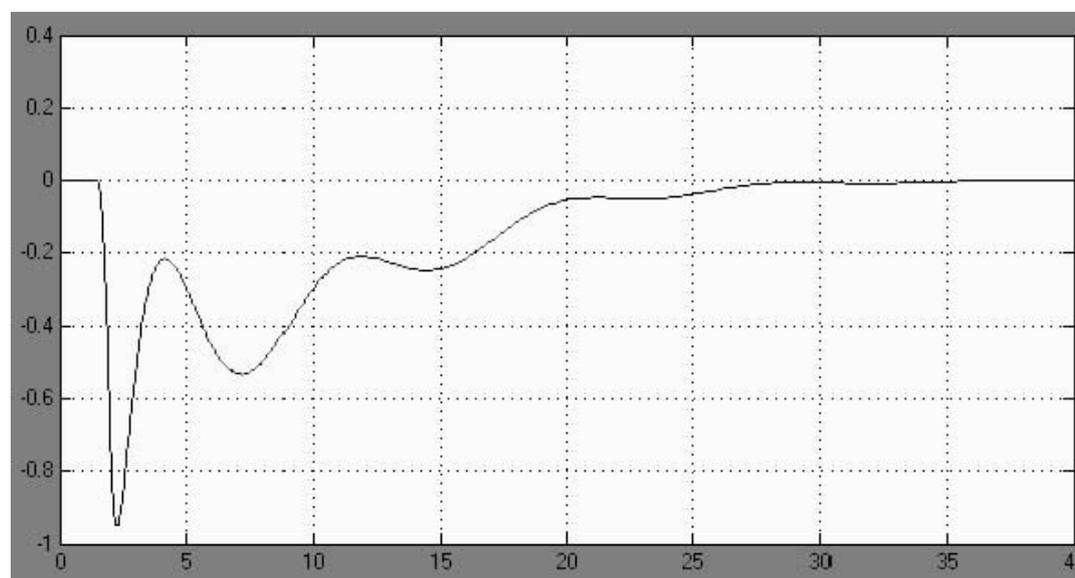


Рисунок П2.4 - Переходной процесс комбинированной АСР

Пример 2. Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой частоте и приближении на рабочей частоте.

Передаточная функция объекта по каналу управления

$$W_{oy}(S) = \frac{30 \cdot e^{-0,5S}}{100S^2 + 30S + 1}.$$

Передаточная функция объекта по каналу возмущения

$$W_{oc}(S) = \frac{20 \cdot e^{-S}}{S^2 + 4S + 1}.$$

Рабочая частота АСР $\omega_p = 0,24$ 1/сек, при которой настроечные параметры

регулятора имеют следующие значения $K_0=0,032$ 1/сек, $K_1=0,242$.

Передаточная функция идеального компенсатора

$$W_K = 0,667 \frac{(100S^3 + 30S^2 + S)e^{-0.5S}}{0,242S^3 + 0,998S^2 + 0,369S + 0,032}$$

На рисунке П2.5 изображены АФХ идеального и реального компенсаторов.

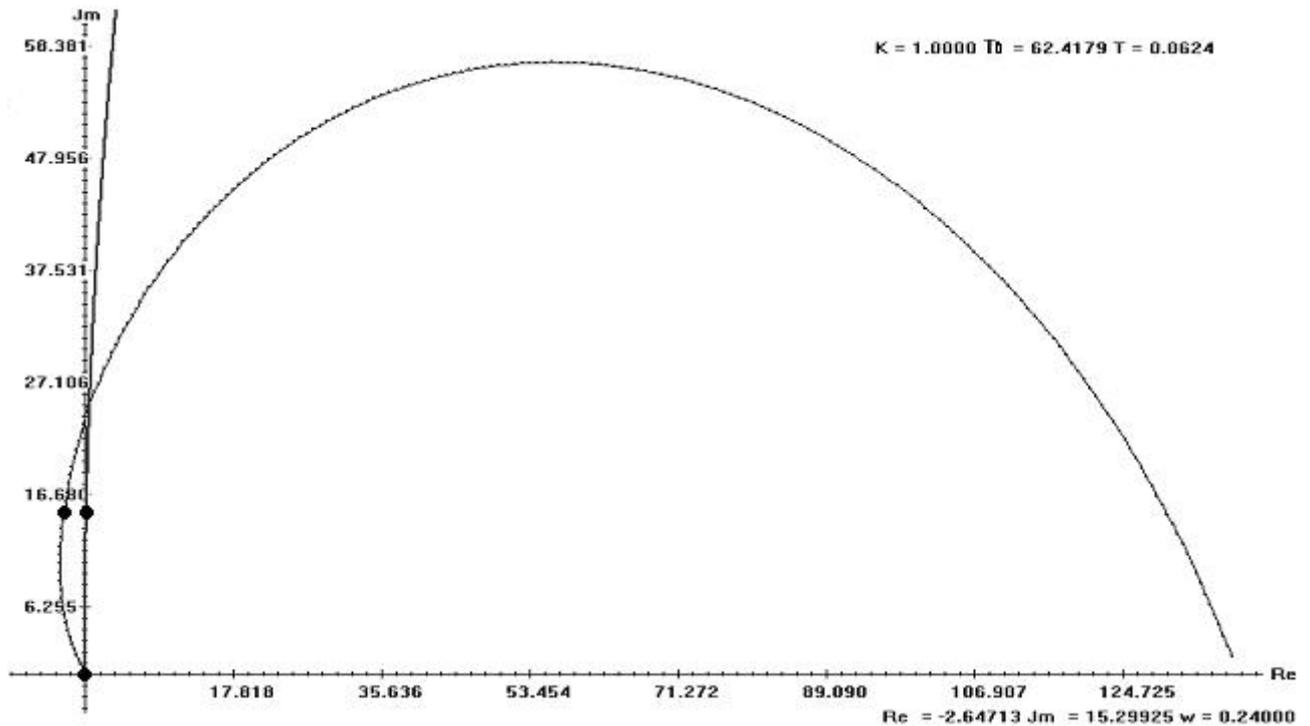


Рисунок П2.5 - АФХ идеального компенсатора и компенсатора в виде реального дифференцирующего звена (пример 2)

Настроечные параметры реального компенсатора: $T_B = 62,418$ сек и $T = 0,062$ сек.

На рисунке П2.2 приведена схема моделирования комбинированной САУ в среде MATLAB.

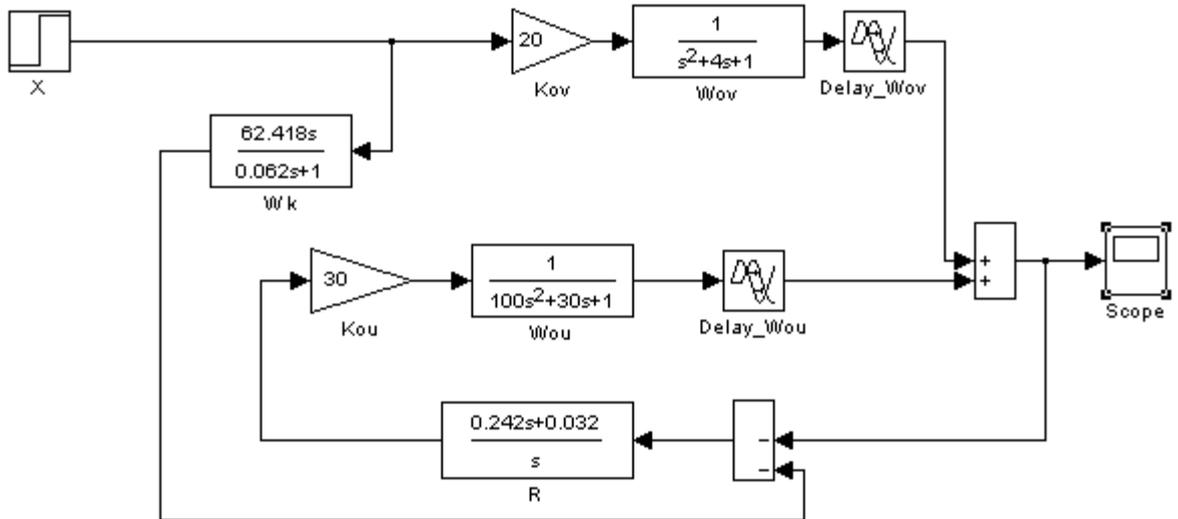


Рисунок П2.6 - Схема комбинированной АСР

На рисунках П2.7, П2.8 приведены графики переходных процессов одноконтурной и комбинированной САУ при полученных значениях настроек компенсатора и регулятора.

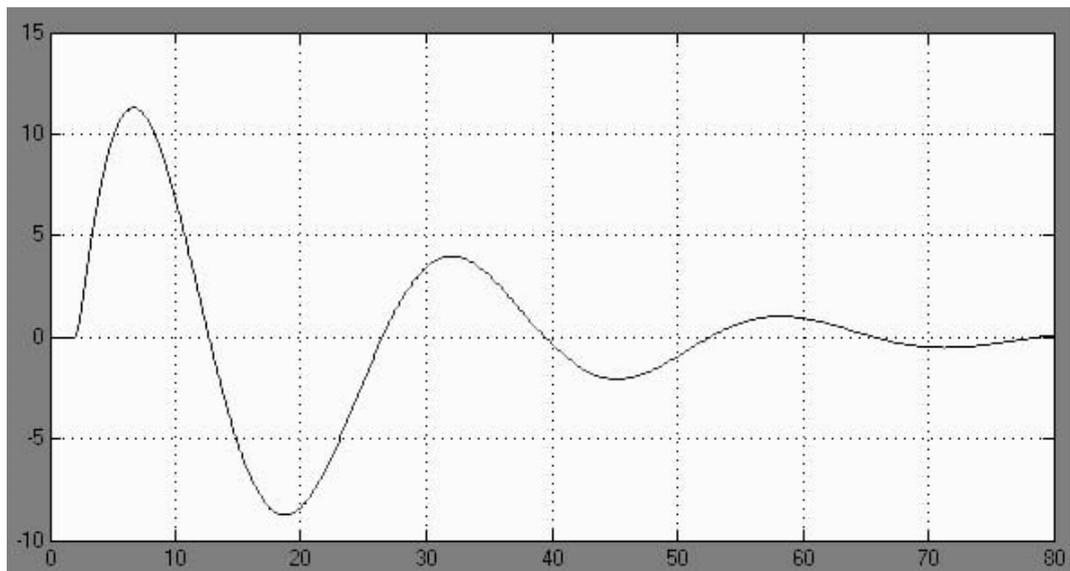


Рисунок П2.7 - Переходной процесс одноконтурной АСР

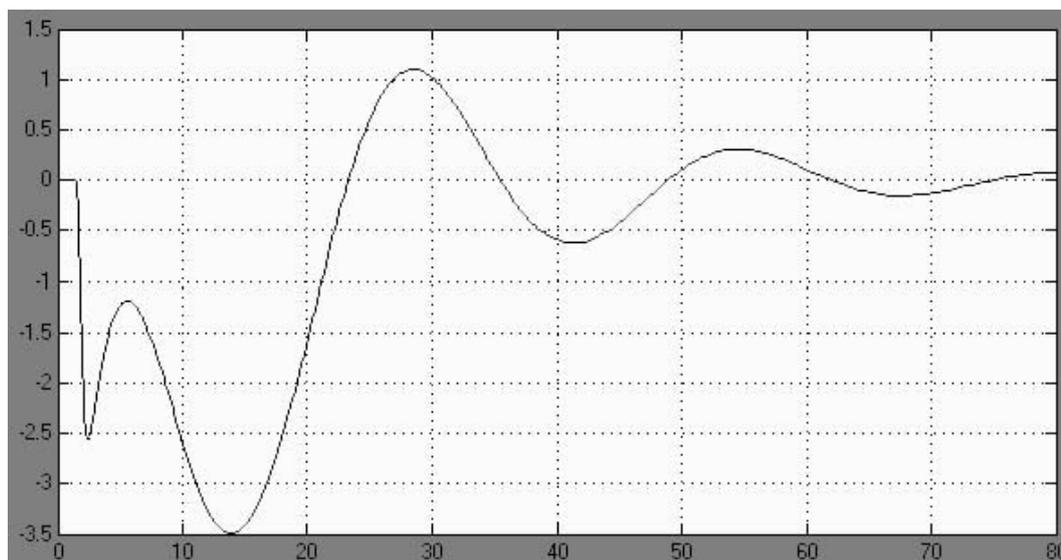


Рисунок П2.8 - Переходной процесс комбинированной АСР

П2.2 Интегро-дифференцирующее звено

Пример 1. Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой и рабочей частотах.

Передаточная функция объекта по каналу управления

$$W_{oy} = 2 \frac{e^{-0,2S}}{10000S^2 + 570S + 1}$$

Передаточная функция объекта по каналу возмущения

$$W_{ov} = 10 \frac{e^{-2,2S}}{100S^2 + 25S + 1}$$

Передаточная функция идеального компенсатора

$$W_K = 5 \frac{(10000S^2 + 570S + 1)e^{-2S}}{100S^2 + 25S + 1}$$

На рисунке П2.9 приведены АФХ реального и идеального компенсаторов.

Рабочая частота АСР $\omega_p = 0,09$ 1/сек., настроечные параметры регулятора $K_0=0,655$ 1/сек., $K_1=45,181$.

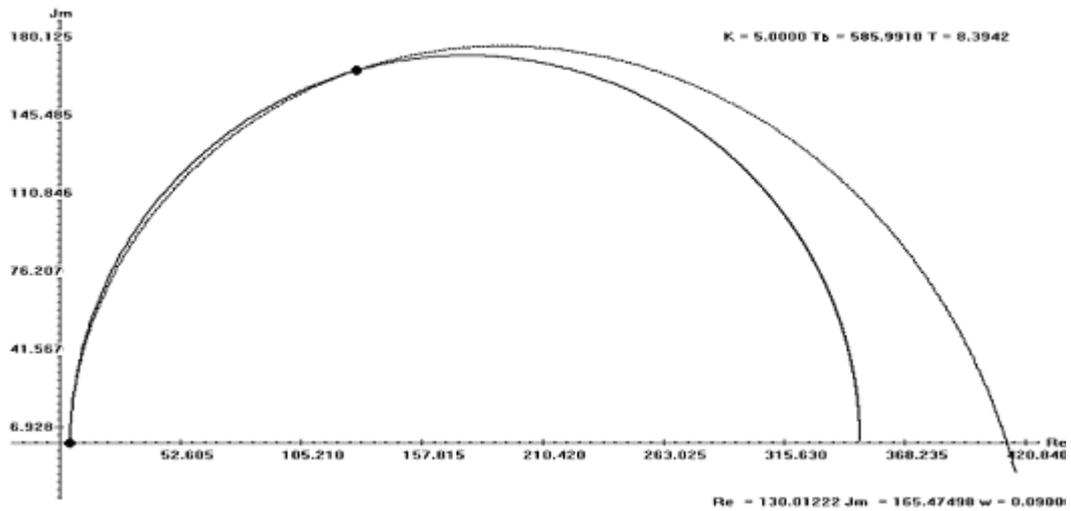


Рисунок П2.9 - АФХ идеального и реального компенсатора в виде реально-дифференцирующего звена (пример 1)

Настроечные параметры реального компенсатора: $K=5$; $T_b=585,991$ сек.; $T=8,394$ сек.

На рисунке П2.10 приведена схема моделирования комбинированной САУ в среде MATLAB.

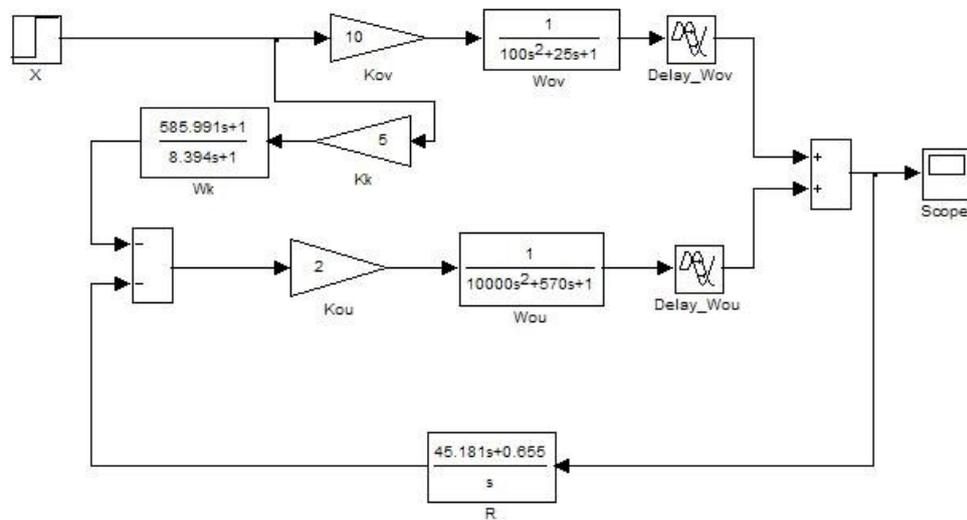


Рисунок П2.10 - Схема комбинированной АСР

На рисунках П2.11, П2.12 приведены графики переходных процессов одноконтурной и комбинированной САУ при полученных значениях настроек компенсатора и регулятора.

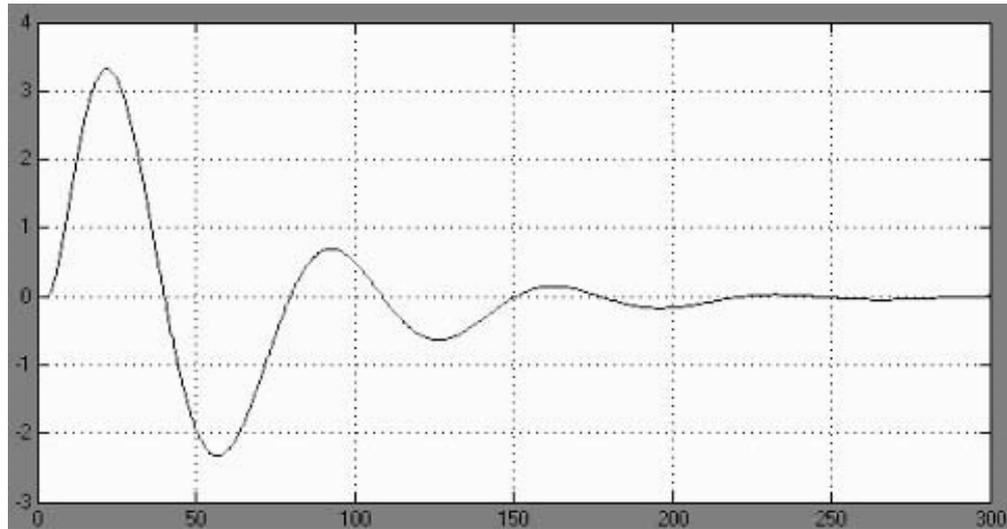


Рисунок П2.11 - Переходной процесс одноконтурной АСР

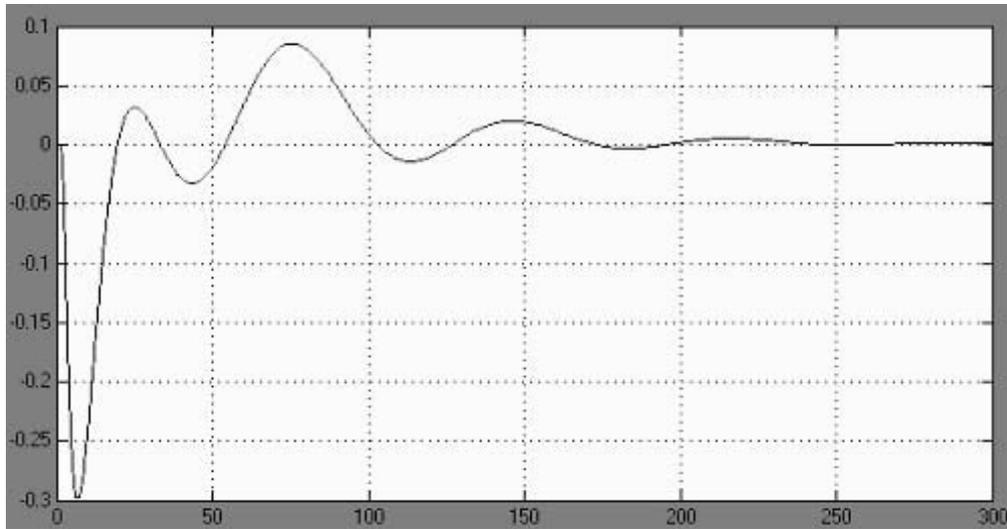


Рисунок П2.12 - Переходной процесс комбинированной АСР с реальным компенсатором в виде интегро-дифференцирующего звена

Пример 2. Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой частоте и приближении на рабочей частоте.

Передаточная функция объекта по каналу управления

$$W_{oy} = \frac{0,849 \cdot (-47,52S + 1)e^{-0,03S}}{4142S^2 + 135S + 1},$$

передаточная функция объекта по каналу возмущения

$$W_{os} = \frac{0,172 \cdot (2,32S + 1)e^{-9,4S}}{1555S^2 + 86S + 1}.$$

Передаточная функция идеального компенсатора

$$W_k = 0.2 \frac{(9609,44S^3 + 4455,2S^2 + 137,32S + 1)e^{-9,37S}}{-73893,6S^3 - 2531,72S^2 + 38,48S + 1}$$

На рисунке П2.13 изображены АФХ идеального и реального компенсаторов.

Рабочая частота АСР $\omega_p = 0,0171$ 1/сек., настроечные параметры регулятора: $K_0=0,016$ 1/сек., $K_1=1,473$.

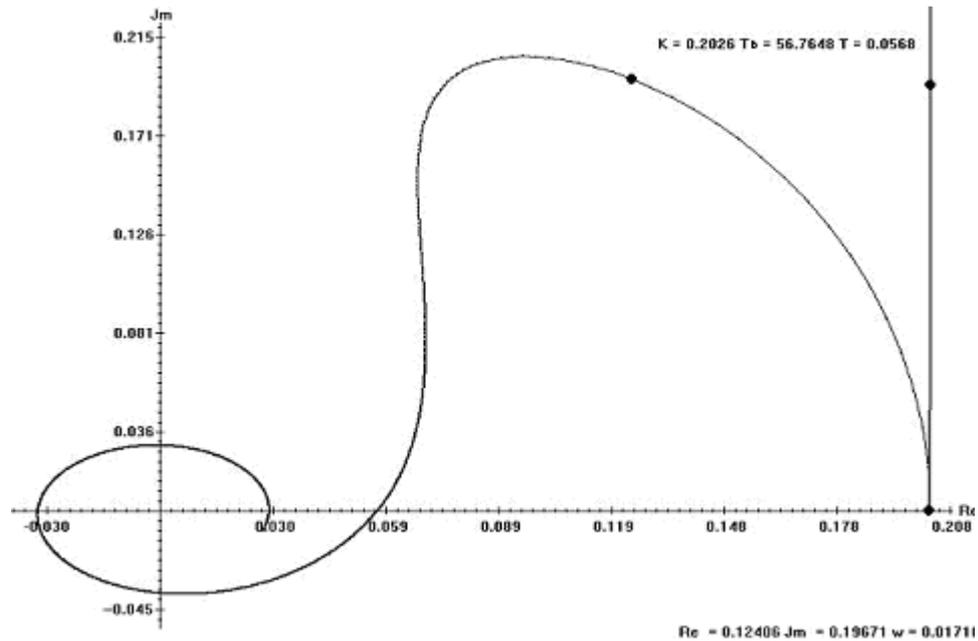


Рисунок П2.13 - АФХ идеального и реального компенсатора в виде реально-дифференцирующего звена (пример 2) (поставить w_0)

Настроечные параметры реального компенсатора: $K=0,2026$; $T_B=56,7648$ сек.; $T=0,0568$ сек.

На рисунке П2. приведена схема моделирования комбинированной САУ в среде MATLAB.

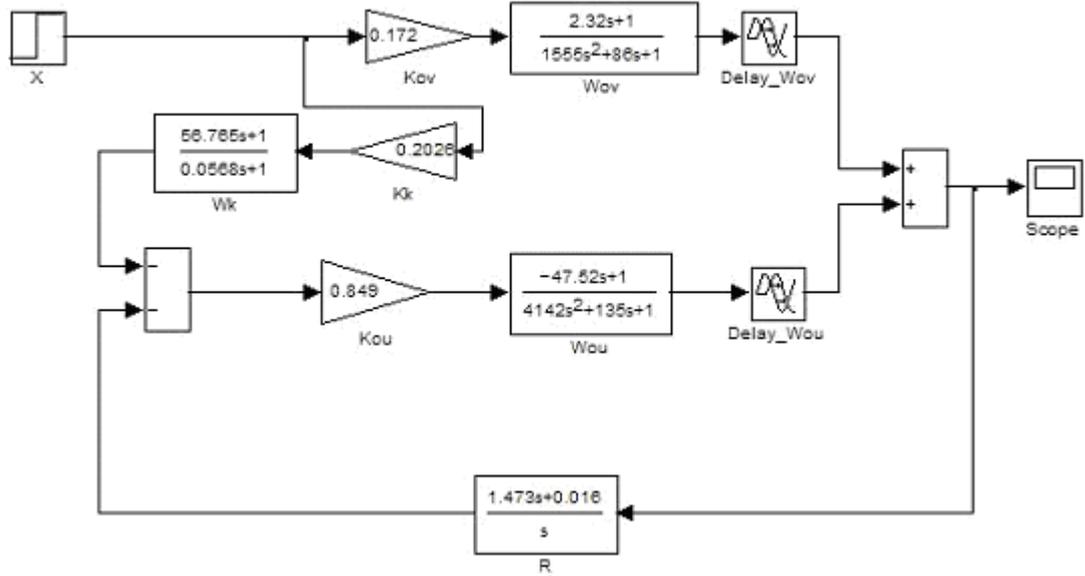


Рисунок П2.14 - Схема комбинированной АСР

На рисунках П2.15, П2.16 приведены графики переходных процессов одноконтурной и комбинированной САУ при полученных значениях настроек компенсатора и регулятора.

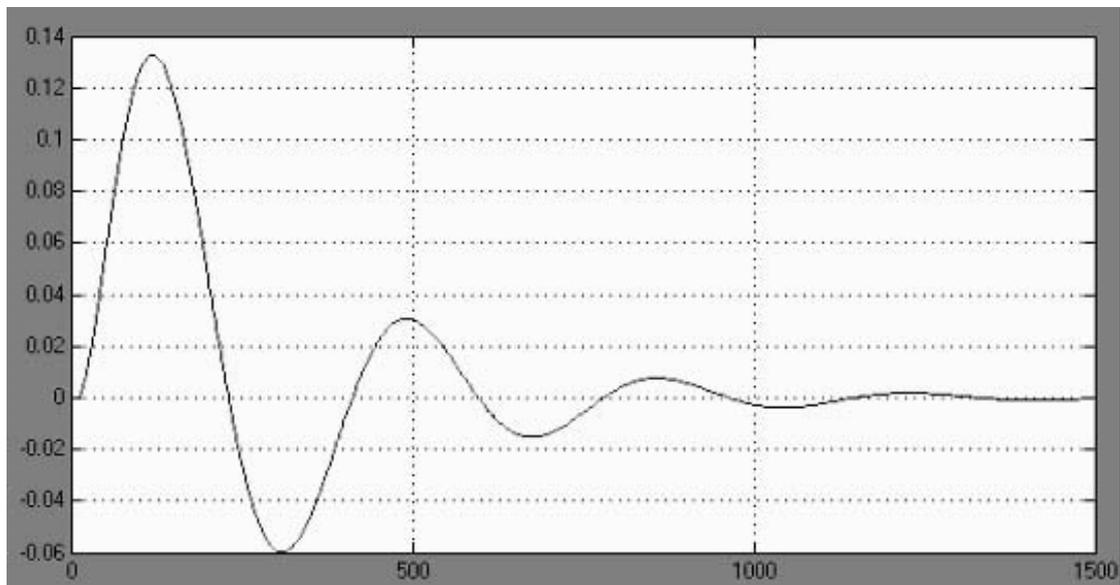


Рисунок П2.15 - Переходной процесс одноконтурной АСР

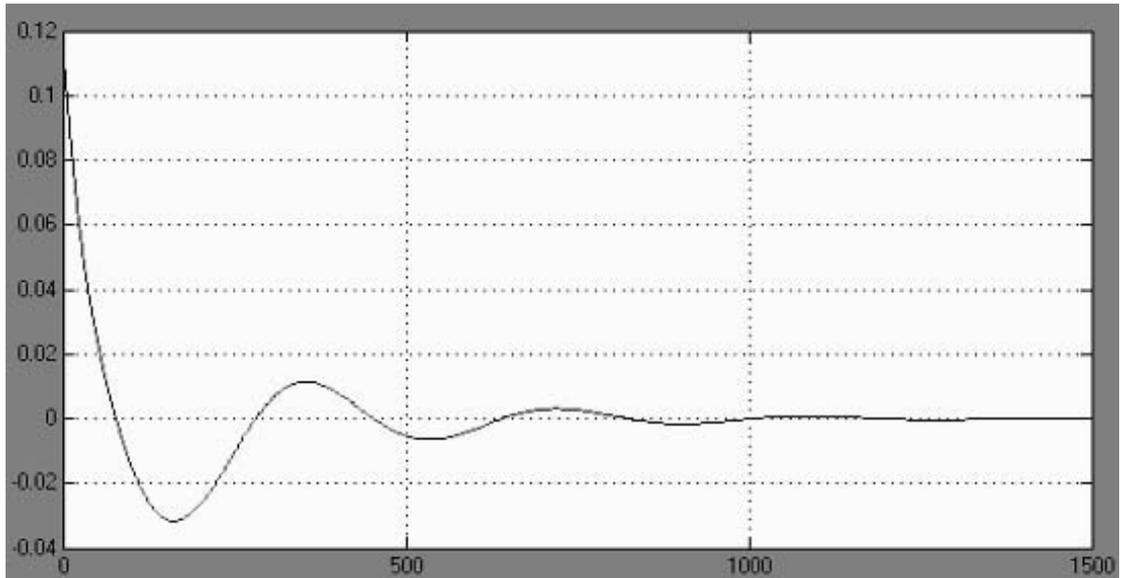


Рисунок П2.16 - Переходной процесс комбинированной АСР с реальным компенсатором в виде интегро-дифференцирующего звена

Пример 3. Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на рабочей частоте и приближении на нулевой частоте

Рассмотрим комбинированную АСР с теми же передаточными функциями объекта, что и в примере 2.

На рисунке П2.17 изображены АФХ идеального и реального компенсаторов.

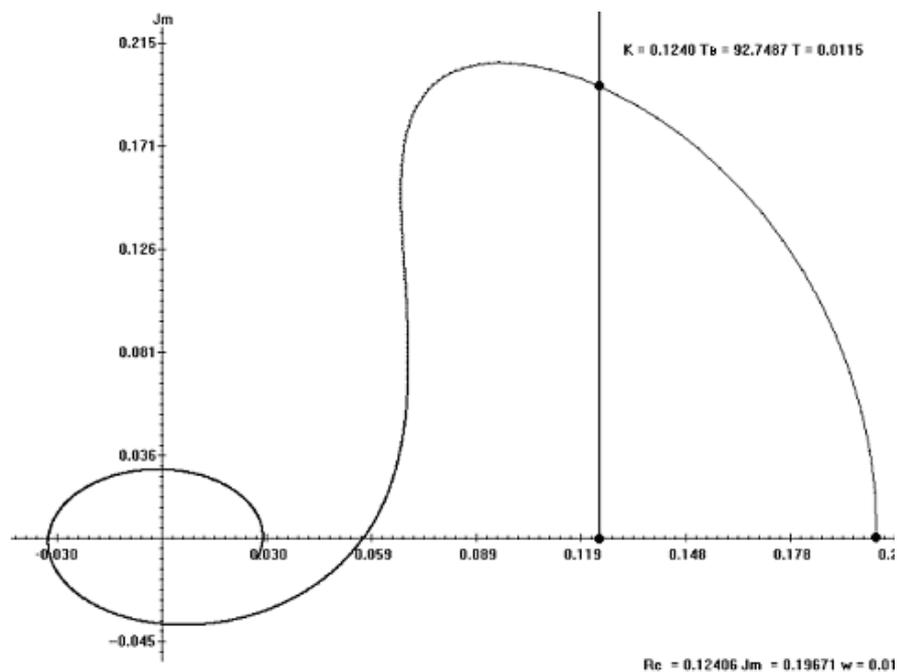


Рисунок П2.17 - АФХ идеального и реального компенсатора в виде реально-дифференцирующего звена (пример 3)

Настроечные параметры реального компенсатора: $K=0,124$; $T_B=92,749$

сек.; $T=0,0115$ сек.

На рисунке П2.18 приведена схема моделирования комбинированной САУ в среде MATLAB.

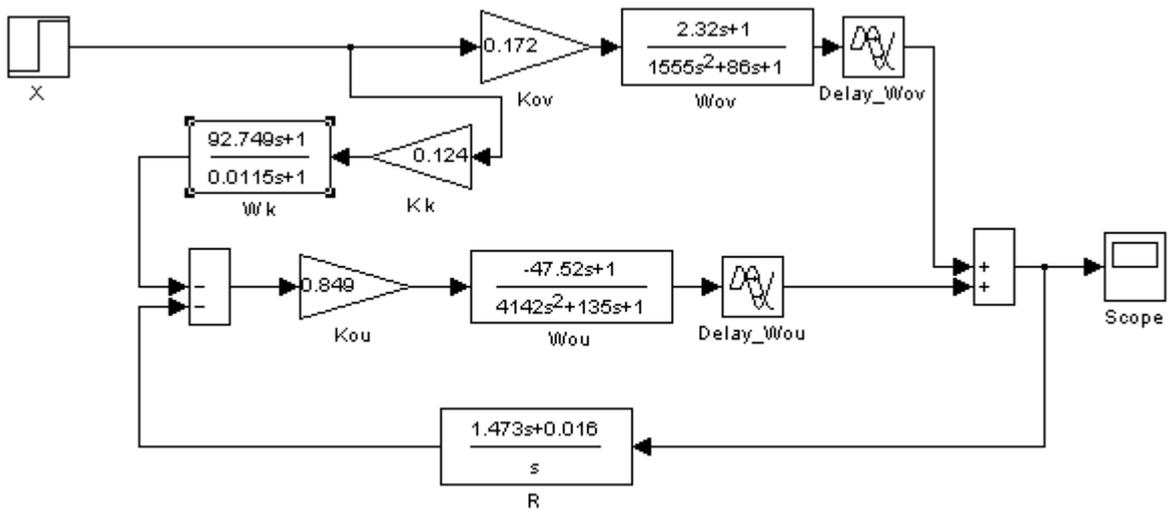


Рисунок П2.18 - Схема комбинированной АСР

На рисунках П2.19 приведены графики переходных процессов комбинированной САУ при полученных значениях настроек компенсатора и регулятора.

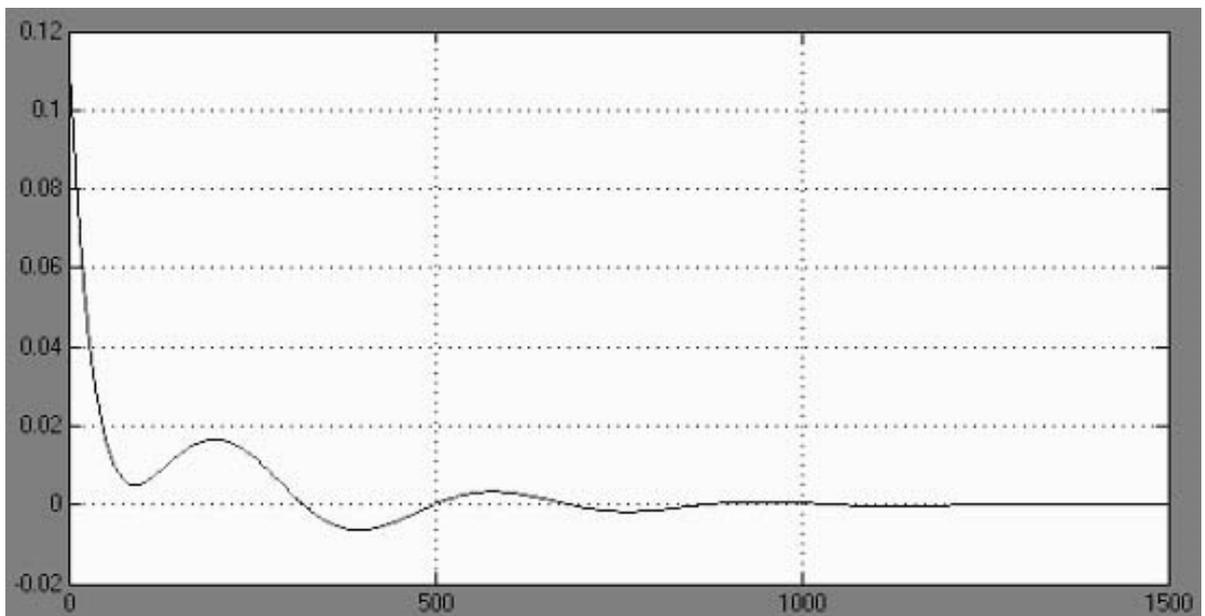


Рисунок П2.19 - Переходной процесс комбинированной АСР с реальным компенсатором в виде интегро-дифференцирующего звена

П2.3 Неминимальнофазовое инерционное звено

Пример 1. Нахождение настроечных параметров при совпадении

АФХ компенсаторов на нулевой и рабочей частотах

Передаточная функция объекта по каналу управления

$$W_{oy} = \frac{200 \cdot e^{-0,5S}}{10S + 1}$$

Передаточная функция объекта по каналу возмущения

$$W_{os} = \frac{100 \cdot e^{-S}}{50S^2 + 20S + 1}$$

Передаточная функция идеального компенсатора

$$W_k = 0,5 \frac{(10S + 1)e^{-0,5S}}{50S^2 + 20S + 1}$$

На рисунке П2.20 изображены АФХ идеального и реального компенсаторов.

Рабочая частота АСР $\omega_p = 2$ 1/сек., настроечные параметры регулятора: $K_0=0,067$ 1/сек., $K_1=0,082$.

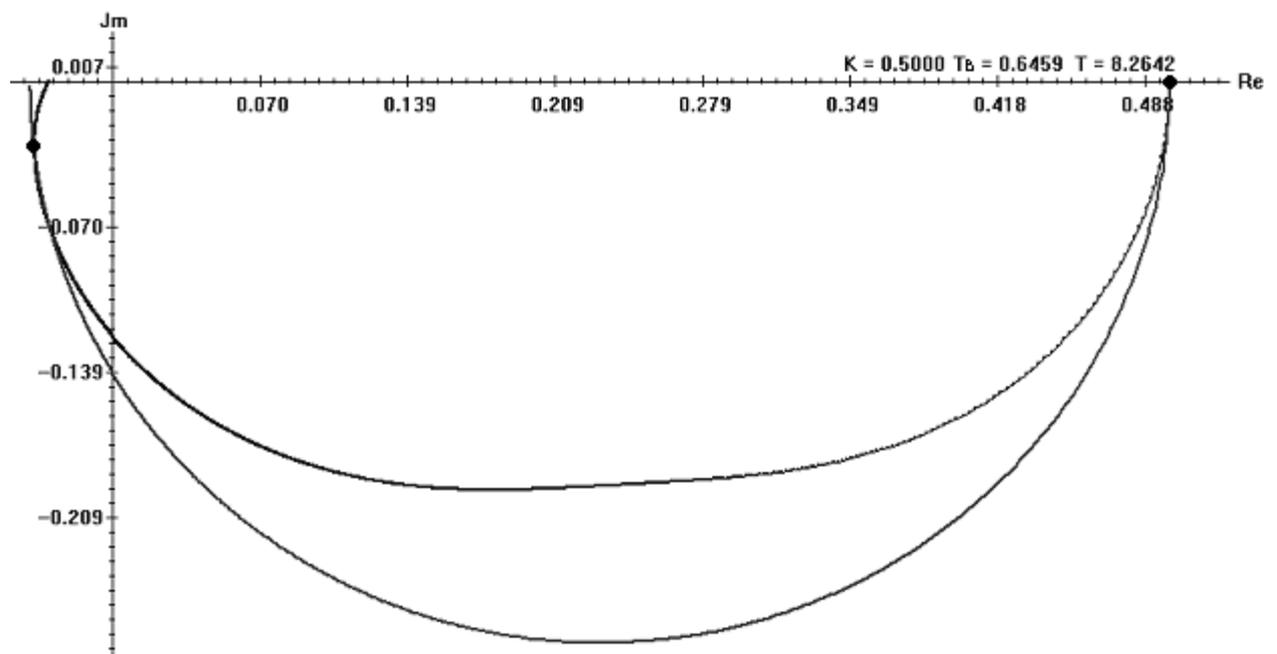


Рисунок П2.20 - АФХ идеального и реального компенсаторов интегрирующе-дифференцирующего звена

Настроечные параметры реального компенсатора: $K=0,5$; $T_B = 0,6459$ сек.; $T=8,2642$ сек.

На рисунке П2.21 приведена схема моделирования комбинированной САУ в среде MATLAB.

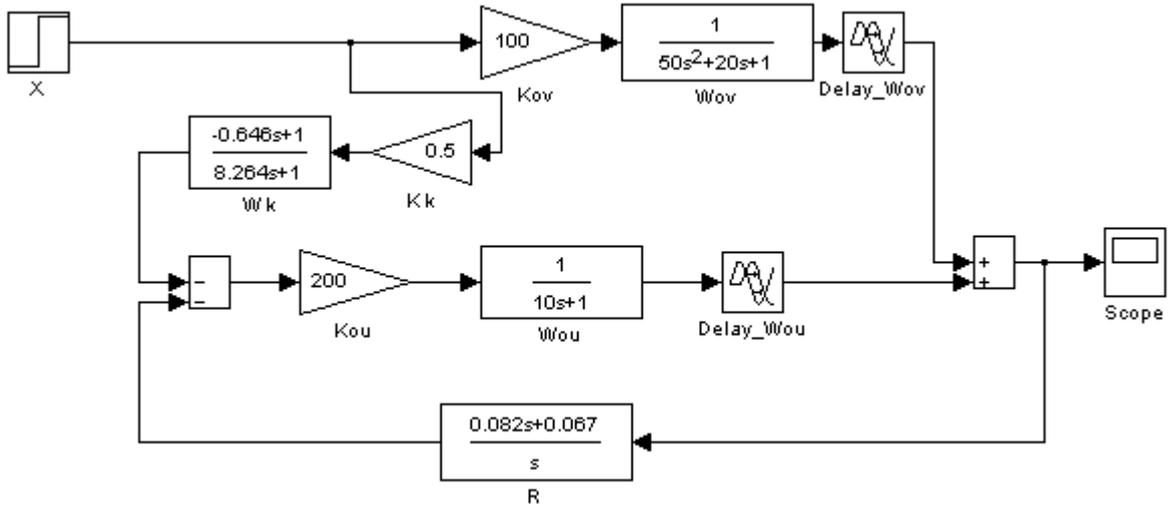


Рисунок П2.21 - Схема моделируемой комбинированной системы

На рисунках П2.22 и П2.23 приведены графики переходных процессов одноконтурной и комбинированной САУ при полученных значениях настроек компенсатора и регулятора.

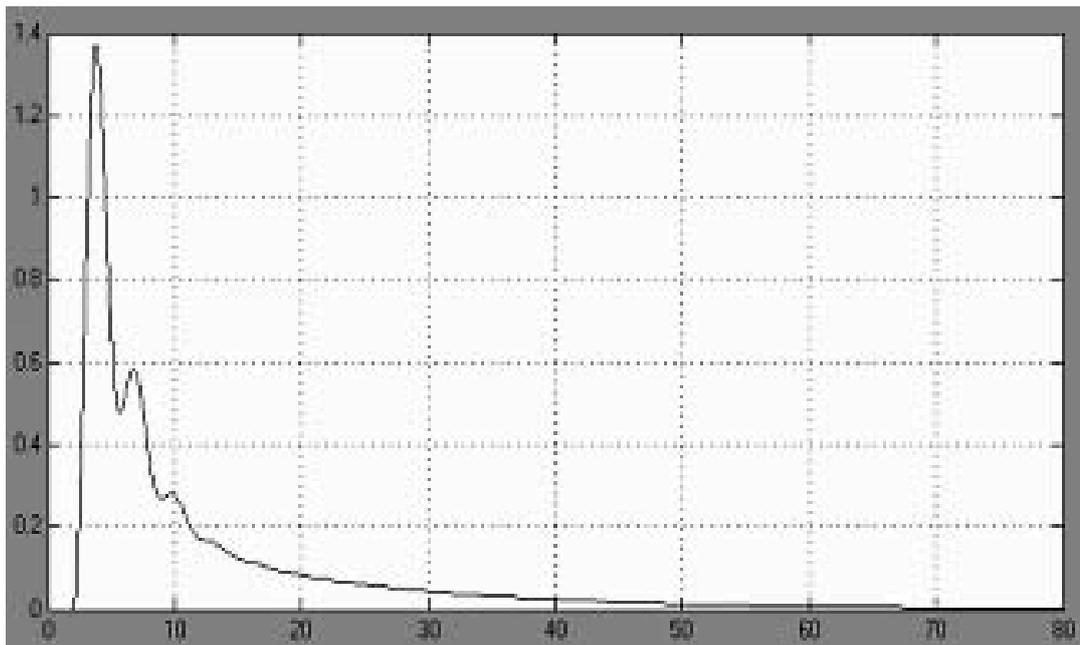


Рисунок П2.22 - Переходной процесс одноконтурной АСР

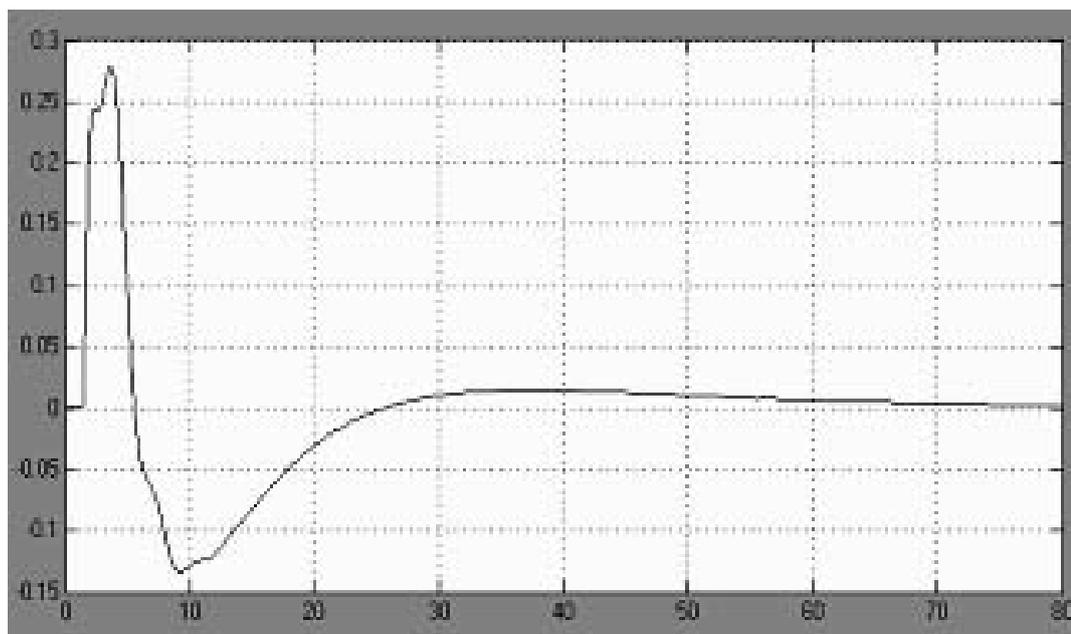


Рисунок П2.23 - Переходной процесс комбинированной АСР

Пример 2. Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на нулевой частоте и приближении на рабочей частоте.

Передаточная функция объекта по каналу управления

$$W_{об} = 5 \frac{e^{-3S}}{S^2 + 2S + 1}$$

Передаточная функция объекта по каналу возмущения

$$W_{оу} = 10 \frac{e^{-2,5S}}{2S + 1}$$

Передаточная функция идеального компенсатора

$$W_k = 0.5 \frac{(2S + 1)e^{-0.5S}}{S^2 + 2S + 1}$$

На рисунке П2.24 изображены АФХ идеального и реального компенсаторов.

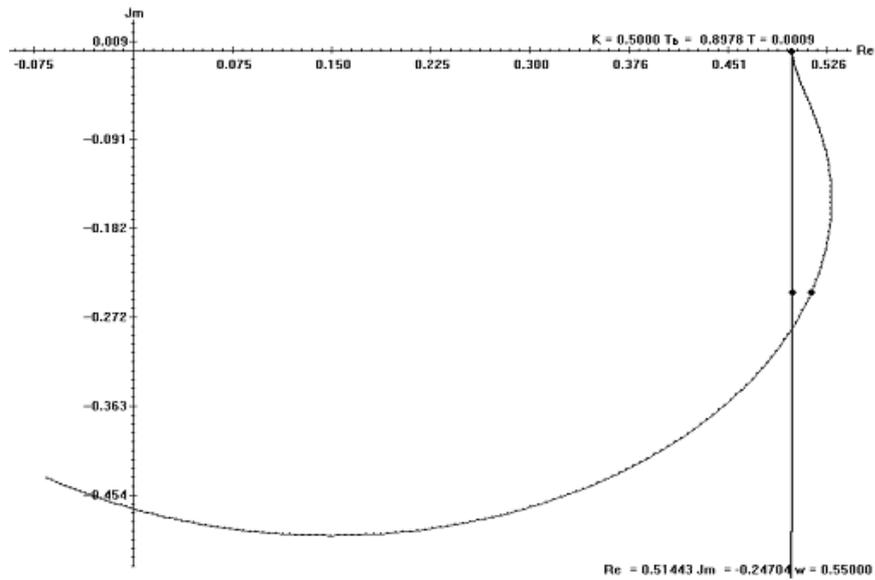


Рисунок П2.24 - АФХ реального и идеального компенсаторов комбинированной АСР

Рабочая частота АСР $\omega_p = 0,055$ 1/сек., настроечные параметры регулятора: $K_0=0,041$ 1/сек., $K_1=0,084$.

Настроечные параметры реального компенсатора при условии $(T_B/T)^{\max} = 1000$: $K=0,5$; $T_B=0,8978$ сек.; $T=0,0009$ сек.

На рисунке П2.25 приведена схема моделирования комбинированной САУ в среде MATLAB.

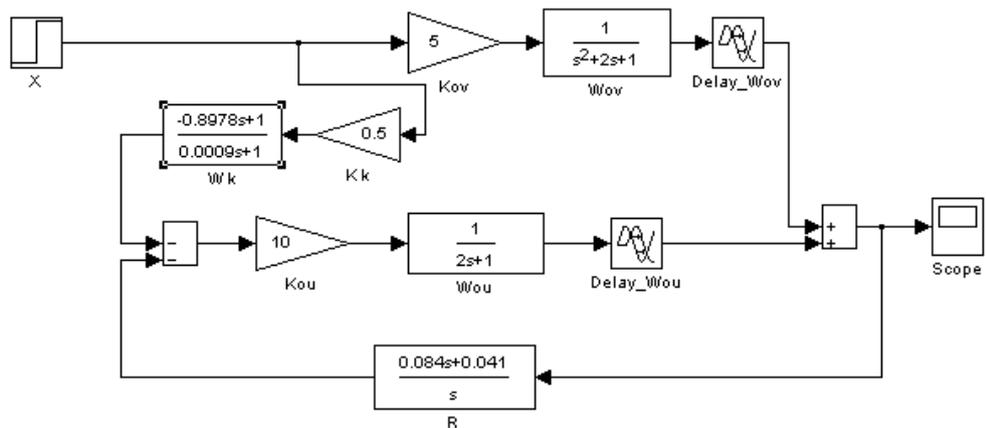


Рисунок П2.25 - Схема комбинированной АСР

На рисунках П2.26 и П2.27 приведены графики переходных процессов одноконтурной и комбинированной САУ при полученных значениях настроек компенсатора и регулятора.

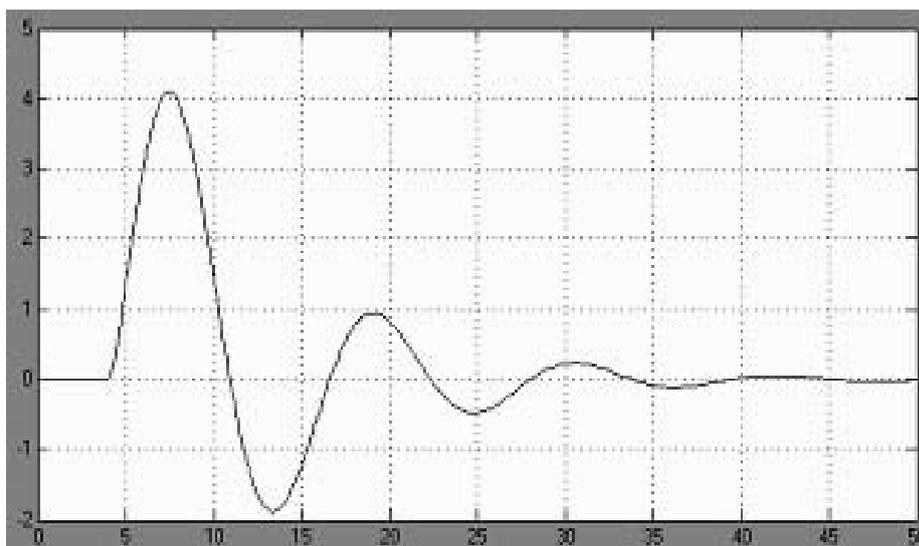


Рисунок П2.26 - Переходной процесс одноконтурной АСР

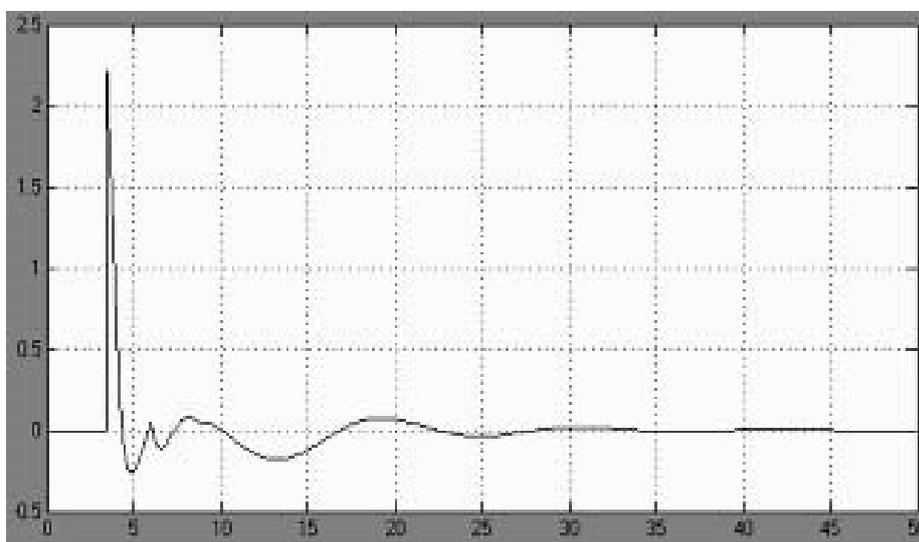


Рисунок П2.27 - Переходной процесс комбинированной АСР

Пример 3. Нахождение настроечных параметров при совпадении АФХ компенсаторов на рабочей частоте и приближении на нулевой частоте.

Рассмотрим комбинированную АСР с теми же передаточными функциями объекта, что и в примере 2. На рисунке П2.28 приведены АФХ реального и идеального компенсаторов.

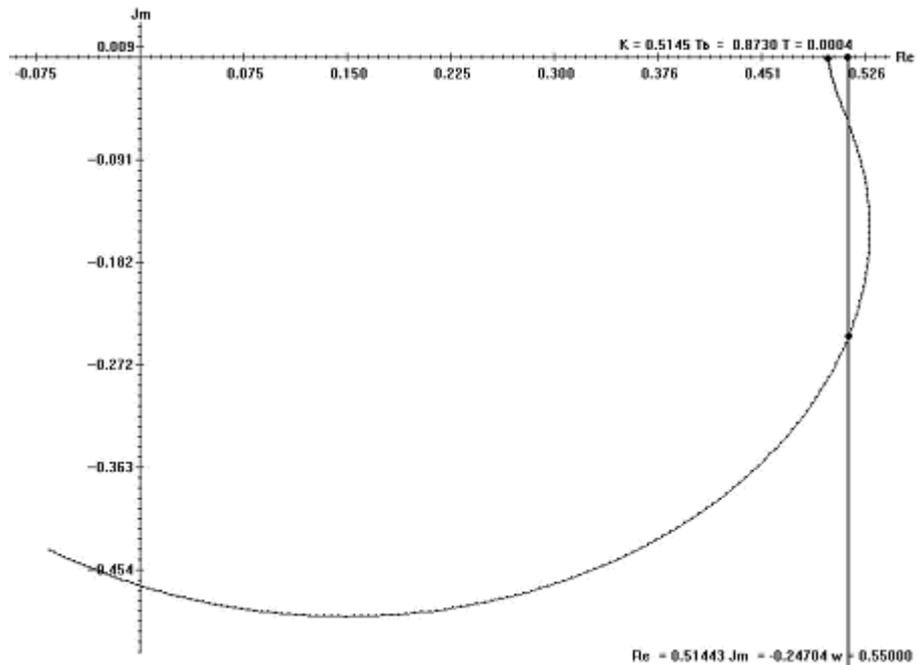


Рисунок П2.28 - АФХ реального и идеального компенсаторов комбинированной АСР

Настроечные параметры реального компенсатора при условии $(T_B/T)^{\max} = 2000$: $K=0,515$; $T_B=0,873$ сек.; $T=0,0004$ сек.

На рисунке П2.29 приведена схема моделирования комбинированной САУ в среде MATLAB.

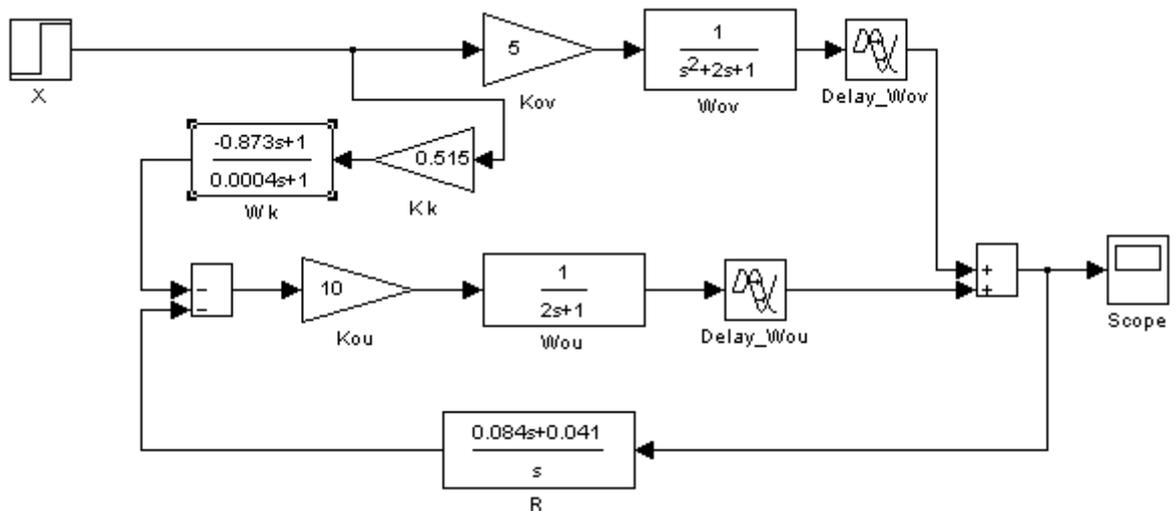


Рисунок П2.29 - Схема комбинированной АСР

На рисунках П2.30 и П2.31 приведены графики переходных процессов одноконтурной и комбинированной САУ при полученных значениях настроек компенсатора и регулятора.

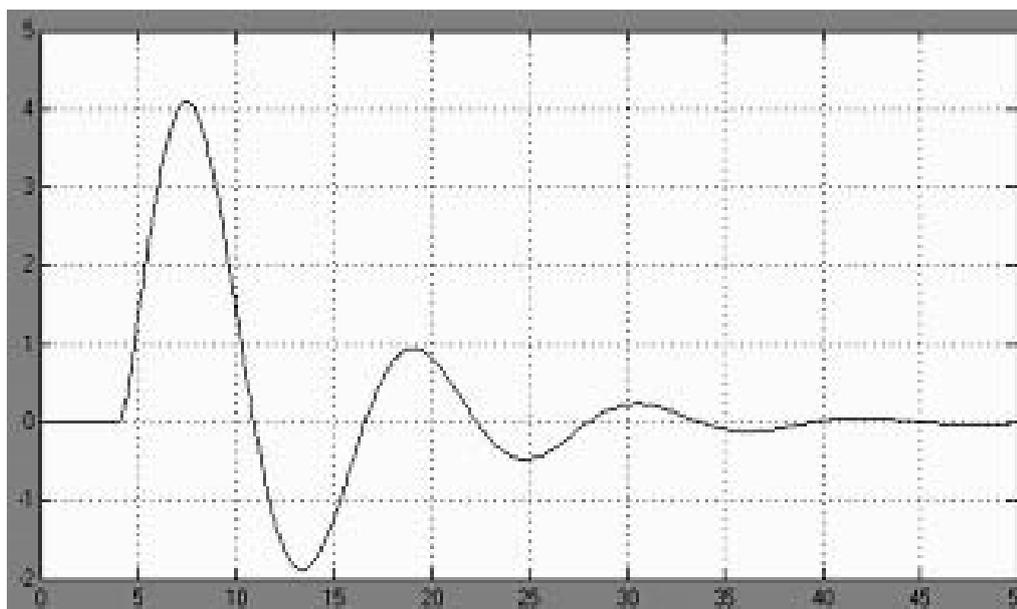


Рисунок П2.30 - Переходной процесс одноконтурной АСР

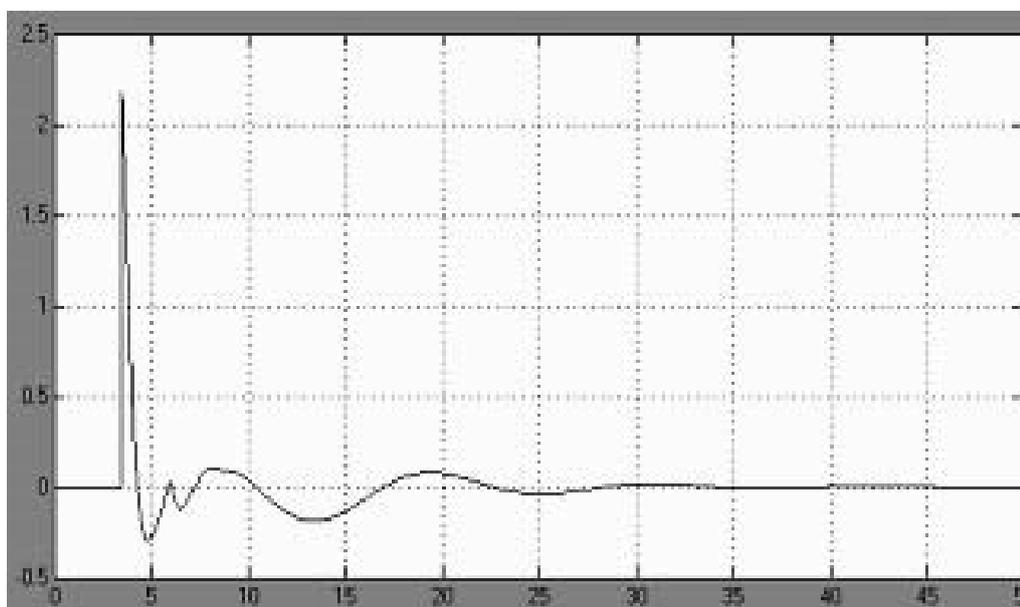


Рисунок П2.31 - Переходной процесс комбинированной АСР

**АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

ОАО
 "ДАЛЬНЕВОСТОЧНАЯ
 ГЕНЕРИРУЮЩАЯ
 КОМПАНИЯ"
 ФИЛИАЛ
 "АМУРСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ"
 СП "Благовещенская ТЭЦ"
 675007, г. Благовещенск
 ул. Загородная 177
 т. (4162) 398-751 факс 44-99-67
 ИНН/КПП 1434031363/280102001
 ОГРН 1051401746769
 ОКПО 94737356 ОКВЭД 40.10.11

№ _____
 на № _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор СП БТЭЦ

Сазанов А.В.

Дата "18" декабря 2013 г.

АКТ

об использовании результатов
 кандидатской диссертационной работы

Сачко Максима Анатольевича

Фамилия, имя, отчество

Комиссия в составе:

председатель главный инженер СП Благовещенская ТЭЦ, Стаховский С.В.

члены комиссии: начальник монтажно-наладочного участка автоматики Протасов С.В.,
 инженер монтажно-наладочного участка Теличенко Д.А.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы

«Интеллектуализация обучения параметрическому синтезу систем автоматического управления
 технологическими процессами»

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при
 организации самостоятельного обучения специалистов по автоматизации технологических процессов
Благовещенской теплоэлектроцентрали (ТЭЦ).

на основе:

- разработанной экспертной системы для автоматизации процесса самообучения параметрическому синтезу систем автоматического управления,
- метода интеллектуализации поэтапного контроля уровня знаний частотных методов параметрического синтеза одноконтурных, каскадных и комбинированных систем автоматического управления.

Использование указанных результатов позволяет организовать обучение специалистов на высоком научно-техническом уровне и обеспечить внедрение новых методов синтеза систем в технологический процесс производства тепловой и электрической энергии.

Председатель комиссии

Члены комиссии:



Стаховский С.В.

Протасов С.В.

Теличенко Д.А.



УТВЕРЖДАЮ
Ректор ВГУЭС

Лазарев Г.И.
2014 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы
Сачко Максима Анатольевича

Комиссия в составе:

председатель: Терентьева Татьяна Валерьевна,

члены комиссии: Шавлюгин Александр Иванович, Гриванова Ольга Владимировна,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы

«Интеллектуализация обучения параметрическому синтезу систем автоматического управления технологическими процессами»

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в научно-исследовательской и учебной работе

Владивостокского государственного университета экономики и сервиса,

в виде:

1. Метода интеллектуализации поэтапного контроля уровня знаний параметрического синтеза одноконтурных, каскадных и комбинированных систем управления (использован для организации процесса самостоятельного изучения параметрического синтеза).

2. Аналитического метода расчёта реальных компенсаторов и развязывающих устройств в виде реальных дифференцирующих, интегро-дифференцирующих и неминимальнофазовых инерционных звеньев (позволяет алгоритмизировать расчет настроечных параметров компенсатора, не прибегая к графическим построениям).

3. Алгоритмизированных методов частотного параметрического синтеза в экспертной обучающей системе «Студиум».

4. Экспериментальных данных по исследованию эффективности применения экспертной обучающей системы «Студиум», полученных при обучении специалистов по автоматизации.

На основе разработанных методов и алгоритмов созданы 4 программных продукта, зарегистрированных в федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Программные продукты использованы в качестве учебного материала дисциплин:

– «Основы теории управления» при подготовке инженеров по специальностям «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети» и «Информационные системы и технологии»;

– «Системы управления химико-технологическими процессами» по специальности «Основные процессы химических производств и химическая кибернетика».

Использование указанных результатов позволило повысить уровень знаний обучаемых и сократить временные затраты преподавателя на контроль уровня знаний на 20-30% за счет использования предложенного метода интеллектуализации обучения параметрическому синтезу систем автоматического управления технологическими процессами.

Результаты работы использованы при выполнении НИР 7.2704.2011 по теме «Параметрический синтез автоматических систем управления процессами химической технологии и теплоэнергетики».

Председатель комиссии

Члены комиссии:



Терентьева Т.В.

Шавлюгин А.И.

Гриванова О.В.

**СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ РАЗРАБОТАННЫХ В РАМКАХ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2009611165

РАСЧЕТ ОДНОКОНТУРНЫХ СИСТЕМ («РОС»)

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Владивостокский государственный университет экономики и сервиса (ГОУ ВПО ВГУЭС) (RU)*

Автор(ы): *Кривошеев Владимир Петрович, Сачко Максим Анатольевич (RU)*

Заявка № 2008616093

Дата поступления 22 декабря 2008 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

20 февраля 2009 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2009611166

РАСЧЕТ КАСКАДНЫХ СИСТЕМ («РКС»)

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Владивостокский государственный университет экономики и сервиса (ГОУ ВПО ВГУЭС) (RU)*

Автор(ы): *Кривошеев Владимир Петрович, Сачко Максим Анатольевич (RU)*

Заявка № 2008616094

Дата поступления 22 декабря 2008 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
20 февраля 2009 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2009616229

РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ (РКоС)

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Владивостокский государственный университет экономики и сервиса (ГОУ ВПО ВГУЭС) (RU)*

Автор(ы): *Кривошеев Владимир Петрович, Сачко Максим Анатольевич (RU)*

Заявка № 2009615036

Дата поступления 16 сентября 2009 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
11 ноября 2009 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2010615361

Учебно-методический комплекс «Студиум»

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Владивостокский государственный университет экономики и сервиса (ГОУ ВПО ВГУЭС) (RU)*

Автор(ы): *Кривошеев Владимир Петрович, Сачко Максим Анатольевич, Ким Владисан Владимирович (RU)*

Заявка № 2010613622

Дата поступления 21 июня 2010 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
20 августа 2010 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов