

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



МАКАРОВ ГЕОРГИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ  
ТЕОРИИ ПОДОБИЯ  
ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Лауреат Гос. премии СССР,  
заслуженный изобретатель РФ,  
доктор технических наук,  
профессор **Мышляев Л.П.**

Новокузнецк  
2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	12
ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	14
1.1. Состояние рассматриваемой проблемы подобия систем управления	14
1.2. Основные требования, понятия и условия подобия систем управления .....	26
1.3. Оценивание подобия систем управления .....	32
1.3.1. Методы оценивания подобия. Области применения .....	32
1.3.2. Общая схема алгоритма оценивания подобия.....	36
1.4. Управление подобием систем управления.....	38
ГЛАВА 2. МОДЕЛЬНЫЕ И НАТУРНО-МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДОБНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ.....	50
2.1. Задачи исследования.....	50
2.2. Определение соотношений подобия систем управления .....	56
2.3. Исследование и учет системных особенностей объектов управления.....	61
2.4. Имитационный моделирующий комплекс .....	68
2.4.1. Структура имитационного моделирующего комплекса .....	68
2.4.2. Генератор воздействий с заданными статистическими свойствами в виде замкнутой динамической системы .....	73
ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОДОБИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И НАСТРОЙКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ.....	84

3.1. Общая схема настройки систем управления с использованием методов подобия.....	84
3.2. Решение задачи совместного проектирования объекта управления и управляющей системы методами теории подобия.....	92
3.3. Настройка систем автоматического регулирования .....	96
3.4. Настройка систем автоматического регулирования технологических агрегатов углеобогажительных фабрик с применением методов подобия и физико-математических моделей.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ .....	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	135

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы.**

К современным системам управления предъявляются все более жесткие требования по их эффективности. Поэтому при их создании большое значение придается этапу моделирования и, соответственно, широкому применению моделей объектов и систем управления. При этом возникает проблема обоснования пересчета полученных результатов модельных исследований на создаваемые натурные системы управления. Такой пересчет будет обоснованным, если доказано подобие натурной и модельной систем управления.

Известные методы современной теории подобия, опирающиеся на математические модели фундаментальных дисциплин (физики, химии и т.п.), хорошо разработаны, широко и эффективно применяются для подобия конструктивных характеристик неуправляемых объектов и протекающих в них процессов преобразования энергии и вещества. Сюда можно отнести работы известных отечественных и зарубежных ученых: М.В. Кирпичева, А.А. Гутмана, А.И. Гутенмахера, В.А. Веникова, Ж. Бертрана, Е. Бакингема и др.

Однако эти методы не могут быть успешно использованы для оценивания подобия систем управления, что объясняется принципиальным отличием структур математических моделей, применяемых в традиционной теории подобия и теории управления, а также присутствием управляющих элементов. Модели теории управления должны отображать не только динамику каналов преобразования внешних воздействий объекта, но и свойства самих этих воздействий. Такое отличие используемого в теории автоматического управления класса моделей требует существенных дополнений и развития современной теории подобия для эффективного ее применения в задачах подобия систем управления, что указывает на актуальность темы диссертационных исследований.

Диссертация выполнена по плану госбюджетных научно-исследовательских работ: постановления Правительства РФ № 218 «Разработка научно-технических

основ для создания технологии подготовки и сжигания суспензионного угольного топлива, приготовленного на основе отходов углеобогащения и пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса», договор № 322/2010 совместно с обществом с ограниченной ответственностью «Объединенная компания „Сибшахтострой”»; гранта РФФИ № 15-07-01972 «Развитие теории подобия систем управления техническими и социально-экономическими объектами»; в рамках государственного задания № 7.4916. на выполнение работы «Развитие теории подобия для систем управления»; гранта ректора Сибирского государственного индустриального университета «Разработка и модернизация алгоритмов и программ имитационного комбинированного комплекса для задач исследования систем управления» (№ госрегистрации 114110570044); а также создания систем автоматизации управления техническими комплексами углеобогачительных фабрик «Центральная обогатительная фабрика Берёзовская» (г. Березовский), «Калтанская-Энергетическая» (г. Калтан), «Матюшинская» (г. Прокопьевск), «Шахта №12» (г. Киселевск), перевооружения системы автоматизации управления углеобогачительной фабрики «Барзасская» (г. Березовский).

### **Цель и задачи диссертации.**

Развитие и применение методов, моделей и алгоритмов теории подобия для систем управления.

В рамках этой цели выделены задачи:

1. Анализ состояния проблемы подобия систем управления.
2. Развитие основных утверждений подобия систем управления и их составляющих.
3. Разработка методов и алгоритмов оценивания подобия систем управления.
4. Разработка общей структуры системы и алгоритмов управления подобием систем управления.
5. Определение соотношений (соотношений подобия) для оценивания подобия типовых систем автоматического регулирования.

6. Разработка структуры, алгоритмов и программного обеспечения имитационного моделирующего комплекса.

7. Разработка структуры многовариантной физико-математической модели объекта управления и процедур ее использования в задачах испытания и настройки систем автоматического управления.

8. Применение разработанных методов и алгоритмов для натуральных систем автоматизации управления технологическими процессами и производствами углеперерабатывающих предприятий.

#### **Методология и методы исследования.**

Методы традиционной теории подобия и теории автоматического управления; аналитического и численного моделирования; статистической обработки данных; натурно-математических и физико-математических исследований; обобщение практического опыта.

#### **Научная новизна.**

1. Утверждения подобия систем управления и их классификация на подобные, потенциально подобные и принципиально не подобные, составляющие основу для оценивания и управления подобием систем управления.

2. Методы и общие структуры системы оценивания и управления подобием потенциально подобных систем с введением функций формирования целенаправленных воздействий на изменения динамических свойств внешних воздействий, каналов их преобразования в объектах управления, структуры и настроечных коэффициентов алгоритмов управления потенциально подобных систем.

3. Соотношения подобия для типовых систем автоматического регулирования в виде равенств и неравенств характеристик внешних воздействий, параметров объектов регулирования, позволяющих осуществлять пересчет настроечных коэффициентов алгоритмов регулирования для обеспечения подобия систем.

4. Многовариантная физико-математическая модельная система управления, состоящая из физической модели объекта и конечного числа контуров управления,

в которых объектом является информационное отображение физической модели в комбинации с математическими моделями пересчета разницы управляющих воздействий разных алгоритмов управления и вариантов сгенерированных внешних воздействий, что позволяет одновременно моделировать конечное множество систем управления.

5. Методика настройки конечного множества систем управления на основе физико-математической модели, позволяющая для промышленных систем уменьшить время их разработки и испытания на 40-50% и точность настройки систем на 15-35%.

### **Практическая значимость работы.**

Предлагаемые методы и подходы целесообразно применять:

- при исследовании, проектировании, испытании и настройке систем автоматизации управления объектами;
- при разработке систем и алгоритмов управления с физическими и физико-математическими прогнозирующими моделями;
- для обучения студентов и повышения квалификации персонала соответствующих специальностей.

На этапе *предпроектных исследований* – для определения целесообразности и эффекта внедрения систем автоматизации управления.

На этапе *проектирования* – для решения задачи совместного синтеза объекта и системы управления; определения эффективной структуры системы управления для новых или недоступных для экспериментов объектов с помощью физических моделей.

На этапе *реализации* системы – для устранения ошибок и возможной несовместимости решений, принятых для объекта и системы управления.

На этапе *пусконаладочных работ* – для определения близких к оптимальным настроек систем для обеспечения заданной эффективности и качества продукции.

На этапе *эксплуатации и развития* – для определения возможных решений по оптимизации и совершенствованию систем и их эффективности.

### **Реализация результатов.**

1. Спроектированы, внедрены и успешно функционируют комплексные системы автоматизации управления на следующих объектах: ОФ «Матюшинская» (г. Прокопьевск), ОФ «Калтанская-Энергетическая» (г. Калтан), ОФ «Шахта №12» (г.Киселевск), в составе которых системы автоматического регулирования плотности суспензии, уровня сред в технологических емкостях и др., испытаны и настроены в соответствии с разработанной процедурой настройки с использованием многовариантной физико-математической модели натуральных систем и их подобия. Спроектирована комплексная система автоматизации на «Центральная обогатительная фабрика Берёзовская», г. Берёзовский. Проведено перевооружение системы автоматизации управления ОФ «Барзаская» (г. Березовский).

2. Разработки удостоены Гран-При и Золотой медали Международной выставки-ярмарки «Уголь и Майнинг 2016».

### **Положения, выносимые на защиту:**

- утверждения подобия систем управления;
- методы и структура алгоритма оценивания подобия систем управления;
- общая структура системы управления подобием систем управления;
- соотношения, характеризующие условия подобия типовых систем автоматического регулирования;
- многовариантный генератор случайных процессов с заданными статистическими свойствами в виде замкнутой динамической системы (ЗДС);
- структура многовариантной физико-математической модели системы управления (МвМСУ);
- методика одновременной настройки конечного множества систем автоматического регулирования и практические результаты ее использования;
- методика проектирования систем автоматического управления с учетом подобия.
- результаты применения методов теории подобия систем управления для создания АСУ.



### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность) в п. 3 – методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д., 5 – теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУТП, АСУП, АСТПП и др., 11 – методы планирования и оптимизации отладки, сопровождения, модификации и эксплуатации задач функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом, 13 – теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации, 15 – теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.), 18 – средства и методы проектирования технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ.

**Личный вклад автора** заключается в анализе состояния проблемы; разработке основных утверждений подобия систем управления; соотношений подобия типовых систем автоматического регулирования; структуры многовариантной модельной системы управления (МвМСУ); разработке методов и общей структуры алгоритма оценивания подобия систем управления и системы управления подобием этих систем; разработке и проверке эффективности многовариантного генератора случайных процессов с заданными статистическими свойствами; методики одновременной настройки конечного множества САР и ее практического применения; методики проектирования систем автоматического управления с учетом подобия.

### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение на 14-и конференциях, в том числе: VIII, IX, X и XI Всероссийских научно-практических конференциях «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (Новокузнецк, 2011 г., 2013 г., 2015 г., 2017 г., 2019 г.), Международных научно-практических конференциях «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2013 – 2019 гг.), Пятой, Шестой и Седьмой Всероссийских научно-практических конференциях «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника», (г. Новокузнецк, 2012г., 2014 г., 2016 г., 2018 г.), Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий» (г. Кемерово, 2014 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии» (г. Кемерово, 2014 г.), Всероссийских научных конференций студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (г. Новокузнецк, 2011г., 2012г., 2015г.). Разработки удостоены Гран-При и Золотой медали Международной выставки-ярмарки «Уголь и Майнинг» 2015 – 2017г.г.

### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 42 печатные работы, в том числе 5 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК, 7 статей в базе данных Scopus, 32 статьи в научно-технических сборниках и 2 свидетельства о регистрации программы ЭВМ.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка, приложения и содержит 135 страниц основного текста, в том числе 34 рисунка и 6 таблиц.

*В первой главе* диссертации «Развитие теории подобия для систем управления» проведена по результатам анализа доступных публикаций оценка современного состояния проблемы подобия систем управления; сформулированы в виде утверждений основные требования и условия подобия систем управления и их составляющих; разработаны новые методы и общая структура алгоритма

оценивания подобия систем управления; рассмотрены вопросы управления подобием систем управления.

*Во второй главе* диссертации «Модельные и натурно-модельные исследования подобных систем управления» поставлены и решены задачи определения соотношений подобия систем управления и соотношений совместного подобия объектов управления и внешних воздействий, позволяющие для указанных условий оценивать подобие систем управления с минимальными затратами средств и времени. Они решены для наиболее часто встречающихся на практике типовых САУ, в которых математические модели каналов преобразования регулирующих воздействий представлены динамическими структурами в виде типовых элементарных звеньев и их линейных комбинаций. Описано влияние системного эффекта на свойства каналов преобразования изменений регулирующих воздействий, возникающего при замыкании управляющих связей для некоторого класса объектов. Дано описание имитационного моделирующего комплекса, в составе которого предложены новые научные решения в виде многовариантного генератора модельных и натурно-модельных воздействий с заданными статистическими свойствами, а также МвМСУ.

*В третьей главе* диссертации «Применение методов подобия в задачах проектирования и настройки систем автоматизации управления» представлена общая схема настройки систем управления с использованием методов их подобия; поставлена и решена задача настройки САУ; предложен вариант решения задачи совместного проектирования объекта и управляющей системы с применением методов теории подобия; даны материалы по применению процедуры настройки САУ в процессе их испытаний и внедрения, а также по применению методов подобия при настройке систем автоматизации управления технологическим комплексом углеобогадательной фабрики «Матюшинская».

В *Приложении А* представлена Справка о выполненных и внедренных работах автора в составе коллектива ООО «Научно-исследовательский центр систем управления».

В *Приложении Б* представлена Справка о выполненных и внедренных работах автора на углеобогадательной фабрике ООО «Шахта №12».

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

*Подобие* – соответствие между оригиналом и моделью, при котором известны правила перехода от параметров модели к параметрам объекта и наоборот, а математическое описание (если оно известно или может быть получено) допускает преобразование их к тождественному виду.

*Адекватность модели* – это ее способность отображать заданные свойства и условия функционирования оригинала с требуемой (желаемой) точностью.

*Управление* – процесс выработки и осуществления управляющих воздействий.

*Регулирование* – частный случай управления, цель которого заключается в поддержании на заданном уровне одной или нескольких регулируемых величин.

*Объект управления* – объект, для достижения желаемых результатов функционирования которого необходимы и допустимы специально организованные воздействия.

*Управляющий объект* – объект, предназначенный для осуществления управления.

*Система управления* – система, состоящая из управляющего объекта и объекта управления.

*Структура системы управления* – совокупность и характер связей и отношений между элементами (подсистемами) системы управления.

*Синтез системы управления* – процесс создания (совершенствования, организации, проектирования) системы управления.

*Алгоритм* – точное предписание относительно порядка действий (шагов), преобразующих исходные данные в искомый результат.

*Техническое обеспечение (ТО)* – комплекс технических средств, предназначенных для работы автоматизированной информационной системы, а также соответствующая документация на эти средства и технологические процессы.

*Математическое обеспечение (МО)* – совокупность математических методов, моделей, алгоритмов и программ для реализации целей и задач автоматизированной системы, а также нормального функционирования комплекса технических средств.

*Программное обеспечение (ПО)* – совокупность программ и документов, необходимых для их эксплуатации. В состав программного обеспечения входят общесистемные, специальные и прикладные программные продукты, а также техническая документация.

*Модель объекта* – объект, свойства которого в определенном смысле соответствуют выделенным свойствам моделируемого объекта.

*Физическая модель* – это модель, создаваемая путем замены объектов моделирующими устройствами, которые имитируют определённые характеристики либо свойства этих объектов. При этом моделирующее устройство имеет ту же качественную природу, что и моделируемый объект.

*ОФ* – обогатительная фабрика.

*САУ ТК* – система автоматического управления технологическим комплексом.

*ПЛК* – программируемый логический контроллер.

# ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

## 1.1. Состояние рассматриваемой проблемы подобия систем управления

Понятие подобия в отношении физических величин применимо только к явлениям одного рода, которые качественно одинаковы, и аналитически описываются одними уравнениями и по форме, и по содержанию. Если аналитические уравнения двух каких-либо явлений одинаковы по форме, но различны по физическому содержанию, то такие явления называют аналогичными [1]. Такая аналогия существует, например, между явлениями теплопроводности и электричества. Основной закон и в том, и в другом случае формулируется одинаково: поток (тепла  $q$ , электричества  $i$ ) пропорционален градиенту (температуры -  $grad t$ , потенциала -  $grad U$ ) - соответственно законы Фурье и Ома

$$q = -\lambda grad t, i = -\sigma grad, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  и  $\sigma$  - коэффициенты пропорциональности, то есть коэффициент теплопроводности и коэффициент удельной проводимости.

Хотя конструкции уравнений (1.1) одинаковы по форме, но по содержанию они совершенно различны. Это позволяет явления переноса тепла и электричества отнести к явлениям аналогичным.

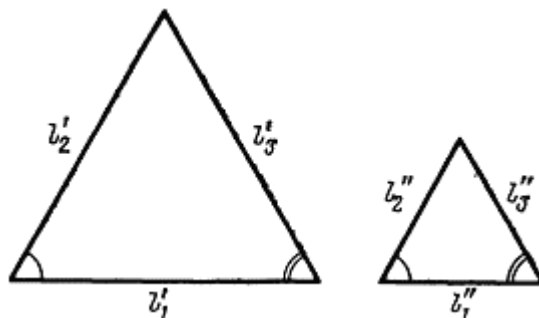


Рисунок 1.1 – Геометрически подобные треугольники

Теория подобия — это учение о подобии явлений. Впервые понятие подобия встречается в геометрии, откуда этот термин и заимствован. Как известно, геометрически подобные фигуры, например, треугольники на рис. 1.1, обладают

тем свойством, что их соответственные углы равны, а сходственные стороны пропорциональны, т. е.

$$l'_1/l'_1 = l'_2/l'_2 = l'_3/l'_3 = c_1, \quad (1.2)$$

где  $l'_1, l'_2, l'_3$  — линейные размеры одной фигуры;  $l''_1, l''_2, l''_3$  — сходственные линейные размеры другой фигуры, подобной первой;  $c_1$  — коэффициент пропорциональности или постоянная геометрического подобия.

Условие (1.2) является математической формулировкой геометрического подобия. Оно справедливо для любых сходственных отрезков подобных фигур, например, высот, медиан и др. Если к тому же подобные фигуры ориентированы одинаково, то вследствие равенства соответственных углов их сходственные стороны параллельны. Зная условия подобия, можно решить целый ряд практических задач. На основании свойств подобия треугольников, например, можно определить высоту дерева или ширину реки, не производя самих измерений высоты и ширины.

Понятие подобия может быть распространено на любые физические явления. Можно говорить, например, о подобии картины движения двух потоков жидкости — кинематическом подобии; о подобии сил, вызывающих подобные между собой движения — динамическом подобии; о подобии картины распределения температур и тепловых потоков — тепловом подобии и т. д.

В общем случае понятие подобия физических явлений сводится к следующим положениям:

а) Понятие подобия в отношении физических явлений применимо только к явлениям одного и того же рода, которые качественно одинаковы и аналитически описываются уравнениями, одинаковыми как по форме, так и по содержанию.

Если же математическое описание двух каких-либо явлений одинаково по форме, но различно по физическому содержанию, то такие явления называются аналогичными. Такая аналогия существует, например, между процессами теплопроводности, электропроводности и диффузии.

б) Обязательной предпосылкой подобия физических явлений должно быть геометрическое подобие. Последнее означает, что подобные явления всегда протекают в геометрически подобных системах.

в) При анализе подобных явлений сопоставлять между собой можно только однородные величины и лишь в сходственных точках пространства и в сходственные моменты времени.

Однородными называются такие величины, которые имеют один и тот же физический смысл и одинаковую размерность. Сходственными точками геометрически подобных систем называются такие, координаты которых удовлетворяют условию (1.3):

$$x'' = c_1 x', \quad y'' = c_1 y', \quad z'' = c_1 z'. \quad (1.3)$$

г) Подобие двух физических явлений означает подобие всех величин, характеризующих рассматриваемые явления, то есть любая величина  $\varphi'$  пропорциональна однородной с ней величине  $\varphi''$  второго явления

$$\varphi' = C_\varphi \varphi'',$$

где  $C_\varphi$  - коэффициент пропорциональности - называется *константой подобия* величины  $\varphi$ .  $C_\varphi$  же не зависит ни от координат, ни от времени.

Основные положения теории подобия формулируются в виде трех теорем.

**Первая теорема подобия:** подобные между собою явления имеют одинаковые критерии подобия.

Процесс определяется по характеризующим его уравнениям и условиям однозначности. К этим условиям относятся:

- 1) геометрическая форма и размеры системы;
- 2) физические свойства тел, участвующих в процессе;
- 3) характеристика начального состояния процесса;
- 4) характеристика особенностей протекания процесса во времени.

Критерии, составленные из величин, заданных условиями однозначности, и независимых переменных, называют определяющими.



**Вторая теорема подобия:** зависимость между переменными, характеризующими явление, может быть представлена в виде зависимости между критериями подобия  $K_1, K_2, \dots, K_n$

$$f(K_1, K_2, \dots, K_n) = 0 \quad (1.4)$$

Зависимость (1.4) называется критериальным уравнением. Помимо критериев подобия в это уравнение могут входить так называемые симплексы – безразмерные отношения однородных физических величин.

**Третья теорема подобия:** подобны те явления, условия однородности которых подобны, и критерии, составленные из условий однозначности, численно одинаковы [1].

*Критерии подобия* – это главное понятие в теории подобия. Они являются отношениями двух одинаковых по природе физических величин, имеющих одинаковые размерности. Величину, находящуюся в знаменателе отношения, называют базовой физической величиной. В современной метрологии критерии подобия относят к безразмерным физическим величинам.

В [2] различают такие четыре категории безразмерных величин: *константы подобия, параметрические критерии подобия, безразмерные комплексные переменные и критерии подобия*. Здесь считается, что термин «теория подобия» имеет скорее исторический характер. Он утверждает, что *критерии подобия* – это *обобщенные физические переменные величины*, а саму теорию подобия правильнее было бы назвать методом обобщенных переменных. Так что теория подобия – один из методов обобщения в науке.

К категории *констант подобия* следует отнести такую безразмерную физическую величину, у которой базовой физической величиной является величина с фиксированным размером. Такой базовой физической величиной может быть фундаментальная физическая константа (например, электродинамическая постоянная, элементарный электрический заряд, число Авогадро и т.п.).

К категории *параметрических критериев подобия* относят такую безразмерную физическую величину, у которой базовой физической величиной является характерный и общеизвестный параметр. Например, при оценке величины

перегрузки силами инерции при движении летательных аппаратов в качестве характерного значения ускорения принимают ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  и параметрический критерий подобия называют критерием перегрузки. Другой пример: для оценки скорости летательного аппарата в качестве базовой физической величины применяют скорость звука в воздухе.

И лишь в том случае, когда базовая физическая величина является не постоянной и не фиксируемой физической величиной, а представляет собой комбинацию физических величин, то переходят к рассмотрению такой категории, как *критерии подобия*. Таким образом, если уточнить определение, то *критерии подобия – это отношения двух однородных физических величин, изменяющихся независимо друг от друга*.

Два объекта подобны, если в соответствующие (сходственные) моменты времени в соответствующих точках пространства значения переменных величин, характеризующих состояние одного объекта, пропорциональны значениям соответствующих величин другого объекта. Коэффициенты пропорциональности соответствующих величин называются коэффициентами подобия.

**Виды подобия.** Различают [3] *геометрическое, физическое, физико-химическое и математическое подобие*. При геометрическом подобии пропорциональны геометрические характеристики соответствующих элементов объектов (например, длины, высоты или диаметры аппаратов). При физическом подобии в пространстве и времени подобны поля соответствующих физических величин (переменных) двух объектов, например, при кинематическом подобии – поля скоростей, при динамическом подобии – системы действующих сил или силовых полей (силы инерции, тяжести, вязкости, давления и др.); при механическом или гидромеханическом подобии, предполагающем наличие геометрического, кинематического и динамического подобия – упругие системы, потоки жидкостей, газов или их смесей и др.; при подобии тепловых процессов – соответствующие поля температур и тепловых потоков; при подобии массообменных процессов – потоки веществ и поля их концентраций и др.; при подобии химических процессов – поля концентраций, температур и др.; при

электродинамическом подобии – поля токов, нагрузок, мощностей, электромагнитных сил. Для сложных физических и физико-химических процессов, включающих механические, гидромеханические, тепло- и массообменные, а также химические явления, теория подобия устанавливает условия подобия, например, процессов трения при движении материальных потоков в трубах, каналах и аппаратах, кинетики физико-химических превращений и других явлений. При математическом подобии рассматриваемые объекты описываются одинаковыми уравнениями, что позволяет говорить, например, о подобии тепловых и массообменных процессов и т.п.

**Гидромеханика.** Гидродинамическое подобие возможно лишь при наложении некоторых условий на динамические и кинематические характеристики потоков [4]. Эти условия называют критериями гидродинамического подобия. Они определяются природой сил изучаемого явления. Для обеспечения динамического подобия необходимо обеспечить равенство критериев подобия у модели и природы.

Рассмотрим условия, которые должны быть выполнены для динамического подобия потоков жидкости. Движение жидкости в природе совершается под действием различных сил, которые можно приближенно классифицировать на три группы [5]:

- 1) внешние силы по отношению к жидкости, например, силы тяжести, инерции, силы, обусловленные перепадом давления;
- 2) силы, связанные с физическими свойствами самой жидкости, такие, как силы вязкости или силы поверхностного натяжения;
- 3) результирующие силы типа силы сопротивления воды движению тела или силы воздействия жидкости на гидротехническое сооружение.

Каждая из этих сил выражается через физические величины (размерные коэффициенты), характеризующие природу сил и жидкости. Влияние указанных сил проявляется в неодинаковой степени в различных явлениях. Одни явления протекают под преобладающим действием сил тяжести и сопротивления, другие – сил тяжести, сопротивления и поверхностного натяжения или только сил тяжести и поверхностного натяжения и т.д.

К критериям, используемым при подобии **гидромеханических процессов** можно отнести *критерий Ньютона* (представляет собой меру соотношения действующей на систему силы и силы инерции [6]), *критерий Вебера* (является мерой соотношения сил инерции и поверхностного натяжения и отражает влияние последней на движение потока [7]), *критерий Рейнольдса* (мера соотношения сил инерции и вязкости и отражает влияние силы трения на движение потока [8]), *критерий Фруда* (мера соотношения сил инерции и тяжести; отражает влияние последней на движение потока [9]), *критерий Эйлера* (представляет собой меру соотношения между изменением силы гидростатического давления и силой инерции; отражает влияние перепада давления на движение потока [10]), *критерий Галилея* (характеризует влияние сил тяжести и инерции при естественной конвекции [11]), *критерий Архимеда* (характеризует влияние на силу тяжести плотности потока при естественной конвекции [11]), *критерий гомохронности* (характеризует одинаковость протекания процессов во времени при нестационарном движении потока. Представляет собой величину, обратную числу Струхала [11]).

**Тепловые процессы.** *Критерий Нуссельта* (представляет собой меру интенсивности теплоотдачи на границе раздела фаз [12]), *критерий Прандтля* (мера соотношения вязкостных и температуропроводных свойств теплоносителей; мера соотношения полей скоростей и температур в потоке [13]), *критерий Рейнольдса* (характеризует режим движения теплоносителей), *критерий Пекле* (мера соотношения теплот, переносимых конвекцией и теплопроводностью [14]), *критерий Грасгофа* (мера соотношения сил трения, инерции и подъемной (архимедовой) силы, определяемой разностью плотностей в различных точках неизотермического потока при свободной конвекции), *критерий Фурье* (характеризует нестационарность переноса теплоты путем теплопроводности при изменении температуры во времени [15]), *критерий Био* (характеризует постоянство соотношения внутреннего термического сопротивления нестационарной теплопроводности к внешнему термическому сопротивлению теплоотдачи [16]).

**Теплообменные процессы.** При лучистом теплообмене используют следующие параметрические критерии подобия: поглощательную способность, или *коэффициент поглощения  $A$* , отражательную способность, или *коэффициент отражения  $R$*  и пропускную способность, или *коэффициент пропускания  $D$*  [17, 18, 19]. Они являются отношениями какой-либо компоненты энергии к полной энергии излучения, падающей на тело. Значения каждого из этих критериев подобия, равные 1, определяют состояние тела, как абсолютно черное, абсолютно белое или абсолютно прозрачное. *Степень черноты тела* характеризует поглощательную способность тела к падающему на него излучению при одной температуре и может считаться критерием подобия. *Показатель адиабаты (критерий Пуассона)* характеризует адиабатические свойства процесса и является критерием подобия для сходных процессов [20]. *Коэффициент полезного действия* – характеристика эффективности системы (устройства, машины) в отношении преобразования или передачи энергии, относится к критериям подобия. Таким образом, когда у двух различных машин или систем эти коэффициенты равны, то эти машины или системы подобны друг другу по фактору подводимой энергии [21]. *Холодильный коэффициент* не зависит от свойств рабочего тела и определяется только температурами охлаждаемой и охлаждающей среды. Характеризует энергетическую эффективность работы холодильной машины.

**Массообменные (диффузионные) процессы.** Здесь используются следующие критерии, описанные выше:

- *критерий Нуссельта* как безразмерный коэффициент массоотдачи;
- *критерий Пекле* как мера соотношения массы веществ, переносимых конвекцией и путем молекулярной диффузии;
- *критерий Прандтля* как мера постоянства соотношений физических свойств жидкостей (газов) в подобных потоках; мера подобия профилей скоростей и концентраций в процессах массоотдачи;
- *критерий Фурье*, характеризующий изменение во времени скорости переноса вещества при нестационарной;

– *критерий Био* как мера соотношения внутри- и внешнедиффузионных сопротивлений при массопередаче с участием твердой фазы. Кроме них используются также *критерий Стэнтона*, который характеризует подобие полей концентраций и скоростей в турбулентных потоках [21].

**Механика.** *Коэффициент трения скольжения* устанавливает пропорциональность между силой трения и силой нормального давления, прижимающей тело к опоре. Коэффициент трения является совокупной характеристикой пары материалов, которые соприкасаются, и не зависит от площади соприкосновения тел [22]. Собственно говоря, численное значение  $f$ , взятое из справочника, – ни что иное, как критическое значение этого критерия подобия. При превышении этого значения наступает состояние относительного движения контактирующих тел, а при значении, меньшем критического, контактирующие тела относительно друг друга неподвижны. *Критерий Пуассона* – абсолютная величина отношения поперечной к продольной относительной деформации образца материала. Этот коэффициент зависит не от размеров тела, а от природы материала, из которого изготовлен образец [23]. *Передаточное отношение* – отношение угловых скоростей ведущего и ведомого звеньев [24]. *Коэффициент неравномерности хода машины* представляет собой отношение диапазона изменения угловых скоростей вала машины к средней угловой скорости этого вала [25].

Общий недостаток рассмотренных методов подобия – неопределенность конкретных масштабов физических величин, что особенно важно при решении реальных задач. Поэтому указанными критериями подобия, как правило, нельзя пользоваться без специальной проверки. Кроме того, выбор масштабов во многих случаях довольно затруднителен.

Гухман А. А. в своей работе «Введение в теорию подобия» уделяет важное внимание вопросу зависимости темпа развития процесса в системе от размера (масштаба) самой системы [2, с.27].

В частности, это можно проследить на изложенным ранее критерии Фурье и критерии гомохронности:

$$Fo = \frac{\chi t}{l^2};$$

$$Ho = \frac{v\tau}{l};$$

Параметры  $t$  и  $\tau$  в данных критериях – это время протекания физического процесса, следовательно, эти параметры характеризуют темп (скорость) протекания процессов.

В частности, критерий Фурье выражает определенное соответствие между темпом изменения условий в окружающей среде и темпом перестройки температурного поля внутри тела. Таким образом параметр  $t$  отражает скорость изменения во времени внешней обстановки. Параметры  $\chi$ ,  $l$  в полной мере характеризуют развитие процесса внутри системы [2, с. 74].

Подобный смысл имеют параметры критерия гомохронности. Параметры  $v$ ,  $l$  в полной мере характеризуют развитие некоего процесса внутри системы, параметр  $\tau$  – характеристика темпа изменений во времени внешних сил.

Критерии подобия, которыми устанавливается соответствие между скоростью развития различных эффектов, влияющих на ход процесса, получаются при исследовании всех нестационарных процессов, независимо от их физической природы, иногда называют критериями гомохронности, т.е. критериями временной однородности (могут использоваться для определения масштаба в системе) [2, с. 75].

Несмотря на отсутствие конкретных рекомендаций о применении известных в теории подобия критериев для оценивания соответствия различных систем управления и их отдельных элементов следует отметить, что в практике решения инженерных задач часто используют безразмерные показатели как для отдельного сопоставления динамических свойств только каналов преобразования изменений входных воздействий объектов управления, и только характеристик этих воздействий, так и для их совместного рассмотрения. Ниже приведены некоторые примеры такого применения.

В первую очередь отметим, что при выборе оптимальных настроек регулятора динамические свойства различных объектов регулирования часто

оценивают с помощью отношения времени чистого запаздывания  $\tau$  к постоянной времени объекта  $T$ . При этом считается [26, 27], что качество регулирования не зависит от абсолютных значений этих характеристик, а определяется лишь величиной их отношения. Показано, что с увеличением отношения  $\frac{\tau}{T}$  объекта динамический коэффициент регулирования всегда быстро возрастает, стремясь к единице; эффективность воздействия регулятора на величину максимального отклонения при этом снижается. Чтобы обеспечить одно и то же значение динамического коэффициента регулирования при увеличении  $\frac{\tau}{T}$  объекта, приходится применять все более сложные регуляторы. Остаточное отклонение всегда резко убывает при уменьшении отношения величин  $\frac{\tau}{T}$ . Поэтому этот показатель может быть проверен как один из вариантов критерия либо его составляющей для оценки подобия объектов и/или систем управления.

Возможным вариантом показателя для проверки на использование его в качестве критерия подобия системы регулирования является показатель колебательности системы, в качестве которого принимают модуль отношения [26]

$$|\Phi(j\omega_{рез})/\Phi(j0)| \quad (1.27)$$

Здесь  $|\Phi(j\omega_{рез})|$  – величина резонансного пика модуля частотной характеристики замкнутой системы, которая практически используется как мера запаса устойчивости системы регулирования;

$|\Phi(j0)|$  – значение модуля частотной характеристики замкнутой системы регулирования при  $\omega = 0$ .

Как отмечается в [26], системы с одинаковыми показателями колебательности имеют в целом сходные по затуханию переходные процессы, даже если эти системы описываются совершенно различными дифференциальными уравнениями.

В [26, с. 152] показано в общем случае, что предельная точность регулирования системы с оптимальным в смысле минимума среднеквадратической



ошибки регулирования регулятором зависит от статистических характеристик входных воздействий (представленных в виде приведенного к выходу объекта возмущения) и величины запаздывания в регулирующем канале объекта определяется следующим выражением

$$\sigma_{\varepsilon \text{ мин}}^2 = \int_0^{\tau} r_{yy}^2(t) dt, \quad (1.28)$$

где  $\sigma_{\varepsilon \text{ мин}}^2$  – минимальное значение среднеквадратической ошибки регулирования;  $r_{yy}(t)$  – значение автокорреляционной функции приведенного возмущения при интервале сдвига, равного  $t$ ;  $\tau$  – величина чистого запаздывания в канале регулирования объекта.

Там же приведен пример, показывающий, что для случая, когда объект регулирования представлен последовательным соединением инерционного звена первого порядка с звеном чистого запаздывания с передаточной функцией  $W(s)$ , равной

$$W(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau s}}{Ts + 1}, \quad (1.29)$$

где  $k$  – коэффициент передачи объекта по регулируемому каналу;  $T$  – постоянная времени объекта по регулируемому каналу;  $s$  – оператор преобразования Лапласа, а автокорреляционная функция приведенного возмущения  $r_{yy}(t)$  определяется выражением

$$r_{yy}(t) = \sigma_y^2 e^{-\alpha |t|}, \quad (1.30)$$

где  $\sigma_y^2$  – дисперсия приведенного возмущения;  $\alpha$  – коэффициент спада автокорреляционной функции приведенного возмущения, дисперсия ошибки регулирования (предельная динамическая точность системы) определяется формулой

$$\sigma_{\varepsilon min}^2 = \sigma_y^2 (1 - e^{-2\alpha\tau}). \quad (1.31)$$

Это выражение указывает на то, что эффективность функционирования системы регулирования по отклонению в смысле обеспечения требуемой точности регулирования зависит совместно как от статистических свойств приведенного возмущения, в частности, характеристик автокорреляционной функции, так и величины запаздывания в канале преобразования регулирующих воздействий.

## 1.2. Основные требования, понятия и условия подобия систем управления

Определение динамического подобия систем управления является в настоящее время актуальной и далеко не тривиальной задачей. Актуальность ее заключается в том, что исследования систем управления, связанные с их анализом и синтезом, как правило, проводятся на модельном и натурно-модельном уровнях, и поэтому важной с практической точки зрения является задача переноса результатов модельных исследований на натурные системы управления и их основные составляющие, включая управляющие системы, объект управления, внешние и внутренние (контролируемые и неконтролируемые) воздействия, влияющие на его состояние и выходные переменные. Такой перенос будет являться обоснованным, если доказано подобие систем управления натурным объектом и его моделью.

Для определения подобия конструктивных характеристик неуправляемых объектов и протекающих в них процессов преобразования энергии и вещества в настоящее время хорошо разработаны и широко применяются методы и критерии теории подобия [28]. Однако они не могут быть успешно использованы для определения подобия систем управления [29], что требует их развития не только для систем в целом, но и для их основных составляющих (рисунок 1.2).

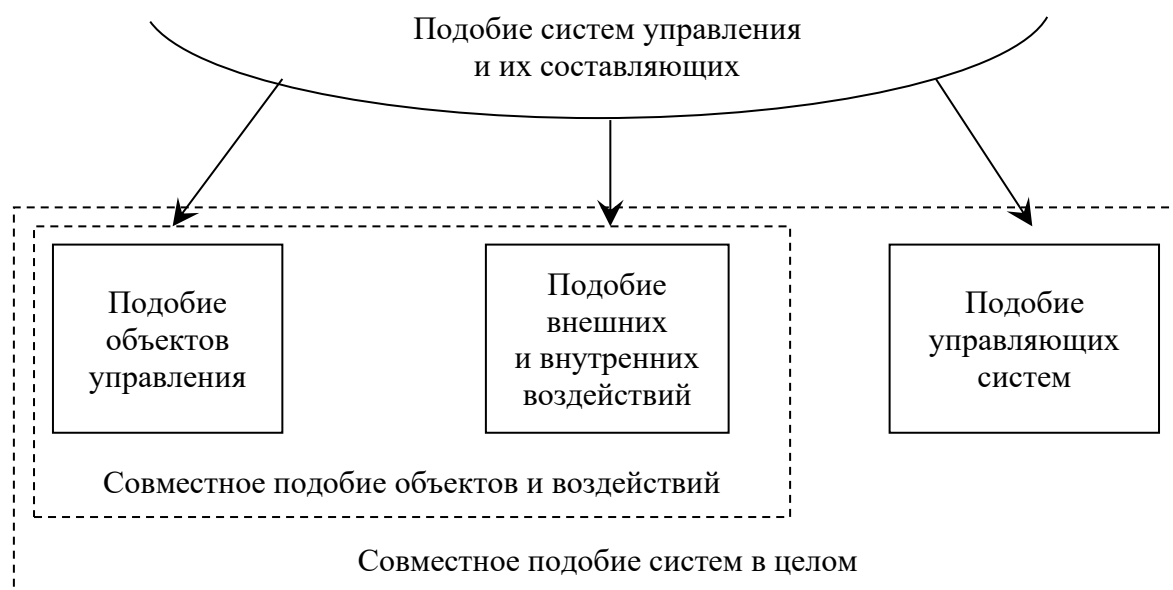


Рисунок 1.2 — Подобие систем управления и их составляющих

*1. Подобие систем управления в целом.* Объектом подобия в этом случае должна являться совокупность взаимосвязанных между собой объекта управления, управляющей системы, внешних и внутренних воздействий. По результатам анализа доступных отечественных и зарубежных публикаций можно сделать вывод о том, что в них не рассматривается и даже не ставится задача динамического подобия систем управления, соответственно, отсутствуют методы и критерии такого подобия.

В качестве одного из основных показателей подобия систем управления в целом следует, по нашему мнению, использовать целевые показатели их функционирования, считая, что функционирование подобных систем управления должно характеризоваться одинаковыми или близкими друг другу значениями целевых показателей эффективности. В этом случае системы управления следует считать подобными независимо от их качественного различия, вызванного различной физической природой систем и их основных составляющих, структурных различий, обусловленных различием структур объекта управления и системы в целом, внешних и внутренних воздействий и управляющих систем. Условие подобия систем управления может быть выражено либо непосредственно

через меру близости целевых показателей, либо по аналогии с [30] с помощью статистических оценок корреляционных моментов между этими показателями.

*2. Подобие объектов управления.* Современная теория подобия располагает методами и критериями лишь для неуправляемых объектов и является недостаточной для определения подобия свойств объектов в составе систем управления. В публикациях, посвященных теории и практике подобия, отсутствуют постановки задач и какие-либо схемы их решения применительно к объектам управления. Но при решении задач анализа и синтеза систем автоматического регулирования, используются количественные безразмерные показатели, отражающие динамические свойства каналов преобразования изменений входных воздействий, но ничего не говорится о них как о критериях подобия.

Исключение составляет [29], которая по существу является одной из первых публикаций, где говорится о динамическом подобии объектов управления. В частности, здесь для объектов управления, динамика преобразующих каналов которых описывается линейными дифференциальными уравнениями первого порядка с запаздывающими аргументами, предлагается в качестве условия подобия этих каналов использовать равенство отношений их времени запаздывания к постоянной времени инерции. Однако это условие является не исчерпывающим, соответствует лишь небольшому классу динамических объектов управления и требует дальнейшей проработки.

*3. Подобие внешних и внутренних воздействий.* Публикаций по разработке и применению методов и критериев подобия воздействий, представленных в виде реализаций процессов или рядов данных, не выявлено. Однако, при решении некоторых задач, где возникает необходимость сопоставления между собой конкретных участков временных рядов данных, используют для этого различные структурные или статистические характеристики, но они не рассматриваются как критерии подобия.

Для многих натуральных объектов управления, функционирующих в условиях неопределенности, большое значение имеет установление подобия

неконтролируемых внешних и внутренних воздействий. Здесь при установлении подобия воздействий необходимо дополнительно оценивать их реализации с использованием известных методов, в частности, в соответствии со схемами формирования приведенных к выходу [26] или одному из управляющих входов [31] объекта управления.

4. *Совместное подобие объектов управления и воздействий.* Важной особенностью подобия в системах управления является определение совместного подобия внешних и внутренних воздействий с динамическими свойствами каналов преобразования воздействий, так как может оказаться, что раздельное их подобие будет далеко не достаточным. Следовательно, еще одной основной задачей является разработка методов и критериев подобия воздействий, а также совместного подобия воздействий и преобразующих каналов объектов управления.

5. *Подобие управляющих систем.* Публикаций о подобии управляющих систем не отмечено, поэтому требуется разработка методов и критериев подобия и для этих важных составляющих систем управления.

Понятие подобия модели и ее оригинала в свою очередь связано с понятием адекватности модели. В дальнейшем будем ориентироваться на те понятия, которые изложены в [28], где под подобием понимается соответствие между оригиналом и моделью, при котором известны правила перехода от параметров модели к параметрам объекта и наоборот, а математическое описание (если оно известно или может быть получено) допускает преобразование их к тождественному виду. В то время как адекватность модели – это ее способность отображать заданные свойства и условия функционирования объекта с требуемой точностью. То есть можно считать, что адекватность модели является частным случаем подобия.

Современная теория подобия хорошо разработана и эффективно применяется лишь для определения подобия конструктивных характеристик объектов и протекающих в них процессов преобразования энергии и вещества [28]. Использование ее для систем управления в целом и отдельных ее элементов [29, 32] требует существенных дополнений и развития. В то же время можно отметить

некоторые примеры применения безразмерных показателей при решении инженерных задач анализа и синтеза систем управления, где возникает необходимость раздельного сопоставления динамических свойств только каналов преобразования изменений входных воздействий объектов управления, характеристик этих воздействий, а также совместное рассмотрение динамических свойств воздействий и каналов их преобразования [26].

В первом случае – это отношение времени чистого запаздывания к постоянной времени инерции, используемое, в частности, в инженерных методах параметрической настройки законов регулирования [26], с помощью которых при равных отношениях получают одинаковые значения параметров настройки для разных объектов регулирования. Во втором случае в задаче прогнозирования технических показателей циклических процессов на длительный интервал времени [33] предложено использовать показатели скейлинга [34] для сопоставления различных участков временных рядов данных. В третьем случае при оценивании области эффективной работы системы регулирования по отклонению сопоставляется время чистого запаздывания динамического канала преобразования воздействий с интервалом спада автокорреляционной функции этих воздействий [26].

Для развития основных положений подобия систем управления следует определить основные понятия и утверждения.

*Утверждение 1. Системы управления по признаку подобия разделяются на подобные, потенциально подобные и принципиально не подобные.*

Управление подобием систем и их составляющих есть процесс целенаправленного воздействия на системы управления и их отдельные составляющие, направленный на достижение их подобия.

*Утверждение 2. Системы управления потенциально подобны, если их подобие может быть достигнуто за счет целенаправленных воздействий на изменение структуры и динамических свойств систем в целом и (или) их элементов, включая и внешние воздействия.*

*Утверждение 3. Системы управления принципиально не подобны, если имеются значительные структурные и (или) динамические отличия и их подобие не может быть достигнуто за счет целенаправленных воздействий на изменение структуры и динамических свойств систем в целом и (или) их элементов, включая и внешние воздействия.*

*Утверждение 4. Системы управления подобны, если показатели эффективности их функционирования равны с точностью до заданного значения.*

Для  $j$ -й и  $l$ -й систем управления из множества исследуемых систем  $S = \{s_1, \dots, s_K\}$ , характеризующихся соответствующими векторами целевых показателей  $Q_{j\{(t-T),t\}}$ ,  $Q_{l\{(t-T),t\}}$  это утверждение можно записать в виде

$$\begin{aligned} & \|Q_{j\{(t-T),t\}} - Q_{l\{(t-T),t\}}\| \leq \delta Q_{jl}^*, \\ & Q_j = \{q_{j1}^n, \dots, q_{jN}^n\}, Q_l = \{q_{l1}^n, \dots, q_{lN}^n\}, \delta Q_{jl}^* = \{\delta q_{j1}^{n*}, \dots, \delta q_{jN}^{n*}\}, \\ & j \neq l; j \in (1, K); l \in (1, K), \end{aligned} \quad (1.32)$$

где  $Q_{j\{(t-T),t\}}^n$ ,  $Q_{l\{(t-T),t\}}^n$  – векторы целевых показателей эффективности функционирования, соответственно,  $j$ -ой и  $l$ -ой систем управления;  $q_{jn}^n$  и  $q_{ln}^n$  – значение нормированного  $n$ -ого показателя эффективности функционирования, соответственно,  $j$ -ой и  $l$ -ой систем управления;  $K$  – число исследуемых систем;  $N$  – число различных показателей эффективности;  $\delta Q^{n*}$  – вектор величин, определяющих предельно допустимый (заданный) порог близости нормированных показателей  $q_j^{nn}$  и  $q_l^{nn}$  при котором эффективность этих систем считается одинаковой,.

Это утверждение может быть использовано не только для чисто технических, но и для организационных (активных) систем управления. Подтверждением этого является определение адекватности модели активной системы управления, приведенное в [35], где сказано, что для такой модели «критерием адекватности является эффективность управления».

*Утверждение 5. Подобие систем управления разделяется на полное, частичное и приближенное.*

Полное подобие систем управления – подобие в пространстве всех составляющих векторного показателя эффективности. Частичное (неполное) подобие систем управления – подобие в пространстве некоторых составляющих векторного показателя эффективности. Приближенное подобие систем управления – подобие в пространстве некоторых (или всех) составляющих векторного показателя эффективности с разницей больше допустимой.

### **1.3. Оценивание подобия систем управления**

Сформулированные утверждения являются основой для разработки методов и алгоритмов подобия систем управления и, соответственно, их исследования, а также оценивания подобия систем управления.

#### ***1.3.1. Методы оценивания подобия. Области применения***

Оценивание подобия систем управления является важной задачей, например, в процессе их исследования и настройки, особенно если они осуществляются с использованием натуральных, физических или комбинированных (натурно-математических и/или физико-математических) моделей. Подобие этих систем обеспечивает обоснованный перенос результатов исследований и настройки с модельных систем на натурные.

Ниже, в кратком изложении, приведена процедура оценивания подобия систем управления. Логической основой для разработки и исследования методов, процедур и алгоритмов подобия систем управления, в том числе и его оценивания, являются *утверждения* подобия, сформулированные в разделе 1.2. На их основе разработаны две группы методов оценивания подобия систем управления.

В основу *первой группы* положены соотношения (1.32), практическая реализация которого требует достоверной оценки значений целевых показателей эффективности функционирования систем управления с последующим их



сравнением с соответствующей величиной  $\delta Q^{**}$ . Эти методы применимы практически для любых систем управления одинаковых структур. Однако они требуют существенных затрат средств и времени для достоверного определения целевых показателей эффективности их функционирования.

Методы *второй группы* используют так называемых соотношения подобия, описывающие условия, выполнение которых справедливо для подобных систем управления. Их применение связаны со значительно меньшими затратами. Однако в настоящее время они разработаны лишь для сравнительно узкого класса систем автоматического регулирования, что требует дальнейшего расширения исследований в этом направлении. Эти условия могут быть получены либо аналитическими методами, либо с использованием методов численного моделирования и поисковой оптимизации.

Практическая реализация первого варианта оценивания подобия требует выполнения следующих основных операций:

– нормирования значений целевых показателей  $q_j^H$  и  $q_l^H$  с целью их приведение в единый координатный масштаб изменения. Здесь можно использовать известную операцию нормирования [36] путем отношения разности полученной на заданном интервале времени оценки показателя эффективности функционирования рассматриваемой системы и минимально возможного его значения к разности максимально  $q_j^{\max}$  и минимально  $q_j^{\min}$  возможных их значений, т.е.

$$q_j^H \{(i-N), i\} = \frac{q_j \{(i-N), i\} - q_j^{\min}}{q_j^{\max} - q_j^{\min}}, \quad (1.33)$$

где  $q \{(i-N), i\}$  – текущее значение целевого критерия на интервале  $N$  дискретного времени  $i$ ;

$q_j^{\min}$  и  $q_j^{\max}$  – соответственно, минимально и максимально возможные значения целевых критериев функционирования  $j$ -ой системы управления;

– согласование входных, выходных воздействий и переменных состояния  $j$ -ой и  $l$ -ой систем управления. Объекты управления этих систем могут

функционировать в различных координатных и временных масштабах. Поэтому для обеспечения единого координатно-временного пространства функционирования обеих систем управления необходимо предварительно согласовать между собой траектории изменения входных, выходных воздействий и переменных состояния их объектов управления. Такое согласование можно обеспечить, в частности, за счет преобразования значений входных  $V_j(i)$ , выходных  $Y_j(i)$  воздействий и переменных состояния  $S_j(i)$   $j$ -го объекта управления, представленных в виде  $Z_j(i) = \{V_j(i); Y_j(i); S_j(i)\}$ , с помощью функции масштабирования  $F_M^Z \{ \}$  в масштаб изменения значений выходных воздействий  $l$ -го объекта управления  $Z_{jl}(i)$

$$Z_{jl}(i) = F_M^Z \{ Z_j(i) \} \quad (1.34)$$

Полученные в результате преобразования (1.34) значения  $Z_{jl}(i)$  изменяются в одном и том же диапазоне значений и масштабе времени, что и значения  $Z_j(i)$   $j$ -го объекта управления.

Выполнение операций с использованием соотношений (1.33, 1.34), является необходимым условием реализации первого варианта процедуры оценивания подобия, независимо от метода определения конкретных значений целевых показателей функционирования систем управления;

– определение значений целевых показателей эффективности функционирования систем управления, оценивание которых может быть выполнено путем обработки натуральных, модельных или натурно-модельных данных, с использованием, в том числе и рекуррентных процедур.

Результаты обобщения опыта оценивания и исследования подобия систем управления [29,4,5,7] позволили сформировать конечное множество методов оценивания подобия систем управления (см. рисунок 1.3), отличия между которыми для первого варианта, в основном, определяются возможными способами оценивания значений их показателей эффективности.



Рисунок 1.3 – Классификация методов оценивания подобия систем управления

Первая группа методов оценивания подобия систем управления, базирующаяся на непосредственном использовании целевых показателей эффективности их функционирования с помощью соотношения (1), является более универсальной с точки зрения практического применения. Он может быть использован для оценивания подобия практически любых систем управления, имеющих разные структуры и функционирующих в различных условиях, если значения целевых показателей оценивать на конечном интервале времени с привлечением натуральных, модельных и натурно-модельных данных. Однако для получения адекватных результатов оценивания здесь необходимо располагать значительным числом массивов с большим объемом достоверных данных, что требует значительных вычислительных и временных затрат. Кроме того, получение достоверных натуральных данных в действующих системах управления связано со значительными трудностями и не всегда может быть реализовано.

Наиболее предпочтительными с точки зрения затрат на реализацию являются расчетные методы оценивания подобия систем управления, куда отнесены такие, с помощью которых можно получить аналитическое решение математических уравнений с выходом на целевой показатель функционирования систем управления. Для реализации расчетного метода исходная информация должна быть

представлена в виде математических моделей каналов преобразования входных воздействий и самих воздействий, в том числе и неконтролируемых, с достаточно жесткими ограничениями на их структуры и область изменения параметров. Зачастую получить такое решение интегрального уравнения с подынтегральной функцией, содержащей иррациональность в знаменателе, возможно лишь в крайне редких случаях [8], в которых на область эффективного применения расчетного метода накладываются существенные ограничения, связанные, в основном, со структурой и диапазоном изменения значений параметров моделей преобразующих каналов объектов управления, их входных воздействиями, алгоритмов управления и др. Обычно эти ограничения также крайне редко выполняются на практике. Область расчетных методов может быть несколько расширена в случаях, когда численное решение такого рода интегральных уравнений связано с меньшими затратами по сравнению с затратами на реализацию методов моделирования систем управления.

Вторая группа методов оценивания подобия систем управления, основанная на специальных *соотношениях подобия* требует значительно меньших вычислительных и временных затрат и с этой точки зрения является более предпочтительным. Однако он, также как и аналитические методы, существенно ограничен в практическом применении. Такого рода соотношения получены лишь для небольшого класса систем регулирования. В частности, к ним относятся системы регулирования по отклонению с типовыми законами регулирования, соотношения подобия для которых и область их применения приведены в [2].

### ***1.3.2. Общая схема алгоритма оценивания подобия***

Предлагаемый укрупненный алгоритм оценивания подобия на примере систем автоматического регулирования (САР) представлен на рисунке 1.4. Обе рассматриваемые системы имеют одинаковую структуру.

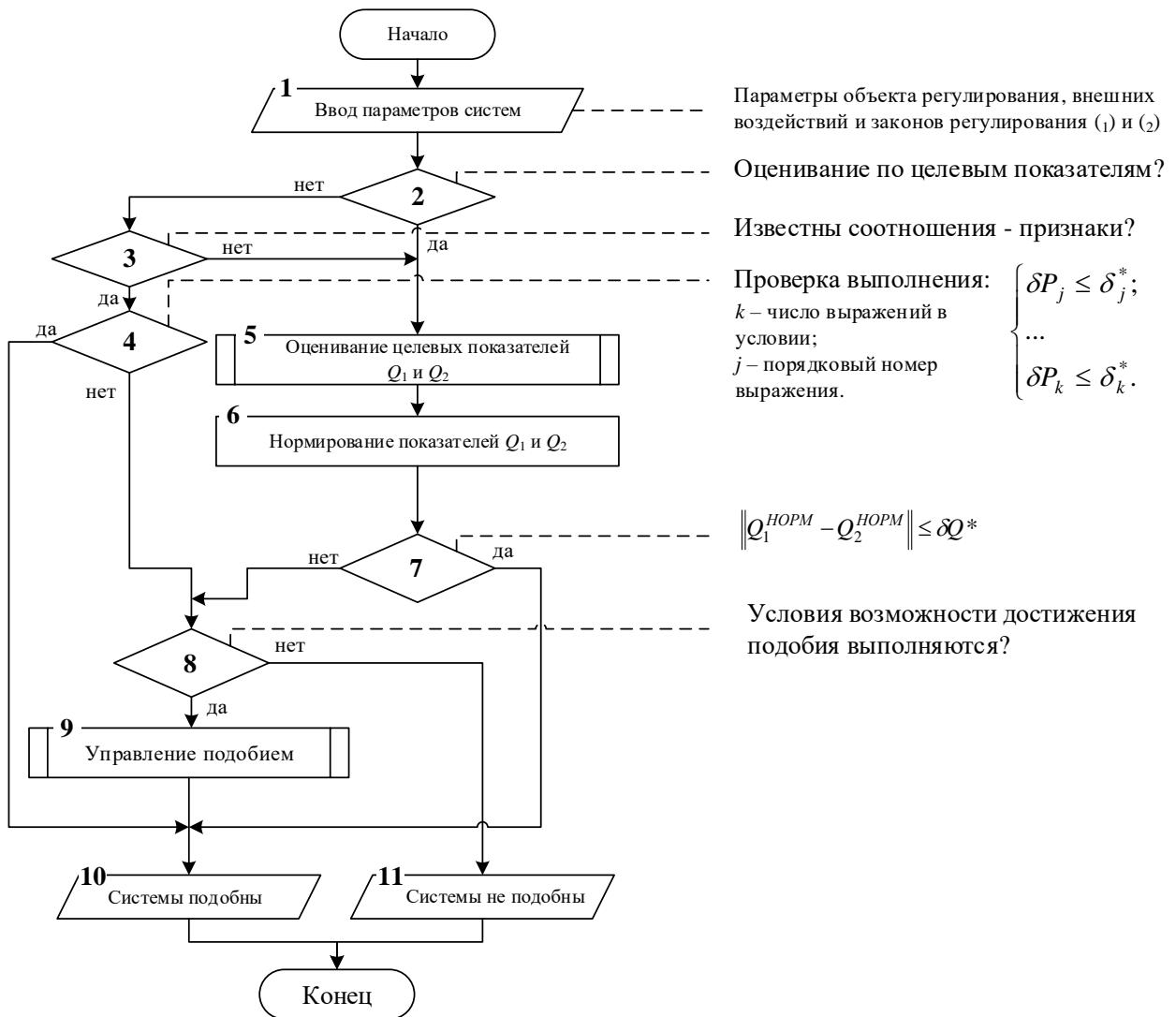


Рисунок 1.4 – Укрупненный алгоритм оценивания подобия САР

Действия, указанные в блоках, выполняются в представленной последовательности.

1. Параметры САР включают свойства каналов преобразования регулирующих воздействий (моделей объектов регулирования), внешних воздействий (контролируемых и неконтролируемых) и значения коэффициентов закона регулирования.

2. Оценивание по целевым показателям более универсально, но и более трудозатратно, и практически всегда невозможно (за исключением редких случаев, когда предоставлена возможность проведения активных экспериментов на действующем или налаживаемом производстве, или наличии физической модели с достаточной структурной и параметрической гибкостью).

3. Соотношения оценивания подобия должны разрабатываться для каждой структуры САР и типа объекта регулирования.

4. Если соотношения известны, то сравнение производится по ряду признаков, в случае наличия которых делается вывод о подобии систем.

5. По информации от действующей системы оцениваются показатели эффективности регулирования.

6. Нормирование целевых показателей с целью их приведения в единый координатный масштаб изменения, например, по выражению (1.33).

7. Если выражение близости показателей выполнено, то делается вывод о подобии систем.

8. Если выражение близости показателей не выполнено, производится попытка управления подобием с помощью соотношений подобия.

9. Если соотношения подобия известны и, то проводятся операции управления подобием. Если соотношения неизвестны, или не позволяют добиться подобия – делается вывод о невозможности достичь подобия и факт, что системы не подобны.

10 (11). Устанавливается факт подобия или отсутствия подобия систем.

#### **1.4. Управление подобием систем управления**

В нестационарных условиях функционирования систем управления численные значения выражений, устанавливающих подобие, будут изменяться. Это, естественно, приведет к тому, что первоначально подобные системы управления перестанут быть подобными, и тогда перенос результатов исследования или выработки управляющих воздействий [37] с одной системы на другую становится не обоснованным.

В таких ситуациях необходимо изменять динамические свойства одной из систем управления, в частности, системы управления натурным объектом и/или его моделью, а также соответствующие характеристики воздействий с целью выполнения условия (1.32). Естественно, что такого рода целенаправленные

воздействия являются предпочтительными для модели и приложенных к ней воздействий с точки зрения простоты и затрат на реализацию.

Процесс воздействия на систему управления и ее отдельные составляющие, направленный на выполнение условий подобия, является *управлением подобием систем управления и их составляющих*, и по аналогии с [37] такие системы можно отнести к *системам управления с новым типом обратных связей*.

Содержательную постановку задачи управления подобием систем управления в общем виде можно представить следующим образом.

*Дано.*

1. Две системы управления одинаковой структуры, функционирующие в условиях неопределенности, вызванных наличием постоянно действующих неконтролируемых возмущений и отсутствием полных математических моделей (моделей внутреннего механизма процессов) объекта управления.

2. Одна из этих систем является системой управления натурным объектом, а другая – системой управления его (натурного объекта) физической моделью. Первую из них в дальнейшем будем называть натурной системой управления (НСУ), а вторую – модельной системой управления (МСУ).

3. НСУ является нестационарной в широком смысле, и, следовательно, ее свойства и свойства ее отдельных составляющих, а также условия их функционирования могут претерпевать существенные изменения, что потребует соответствующих изменений в МСУ. При этом естественно предположить, что существующие ограничения и условия функционирования НСУ, в основном касающиеся натурного объекта управления (НОУ), направлены на получение требуемого объема продукции заданного качества и потому позволяют изменять их в относительно малом диапазоне значений. В то же время МСУ и, соответственно, физическая модель объекта управления (ФМ), ее внешние и внутренние воздействия имеют существенно большую свободу действия с точки зрения изменения их свойств и условий функционирования.

4. Процессы преобразования энергии и вещества как в НОУ, так и в его ФМ являются подобными, в том смысле, что удовлетворяют соответствующим, известным в традиционной теории подобия критериям.

5. Эффективность функционирования обеих систем управления оценивается одинаковыми по своей структуре показателями, а система располагает необходимыми ресурсами для обеспечения как их эффективной работы, так и целенаправленных изменений их свойств и условий функционирования.

6. Математические модели в малом (кибернетические модели) каналов преобразования входных воздействий объектов управления (НОУ и ФМ), а также характеристики их контролируемых входных воздействий и неконтролируемых возмущений.

7. Методы и алгоритмы, разработанные в теории управления для анализа и синтеза систем управления.

*Требуется.* 1. Разработать схему управления подобием систем управления.

2. Разработать методы и алгоритмы пересчета результатов исследований, полученных с использованием физического (физико-математического) моделирования, на натурные объект и систему управления.

Такого рода задачи могут быть актуальными в тех практических случаях, когда требуется, в частности, разработать новый режим ведения технологического объекта управления в связи с предстоящим существенным изменением условий его функционирования, что как следствие, может повлечь за собой изменения структуры и значений параметров соответствующих алгоритмов управления. Необходимые для этого исследования как для технологического объекта, так и для системы его управления непосредственно в натуральных условиях повлечет за собой значительно больше затрат, чем с использованием физических моделей, если таковые имеются.

Рассмотрим далее схему управления подобием систем управления, которое (управление) неизбежно возникает в задачах исследования и управления натурными объектами с использованием физических моделей.



Функционирование системы управления подобием систем управления кратко поясним с помощью укрупненной схемы, изображенной на рисунке 1.5. Структурно это система, как и любая другая система управления, состоит из двух основных подсистем: объекта управления (управляемой части системы) и управляющей части системы управления подобием систем управления.

Считая, что объект управления подобием в принципе может состоять из любого конечного числа систем управления, ограничимся для его простоты изображением, состоящим всего лишь из двух систем управления. Кроме того, имея в виду, что понятие подобия чаще используется для выражения соответствия между физической моделью и ее оригиналом, примем, что одна из систем является системой управления натурным объектом, а другая – системой управления его физической моделью.

В этом случае естественно положить, что целенаправленные воздействия на систему управления физической моделью являются более предпочтительными с точки зрения простоты и затрат на их реализацию по сравнению с натурной системой. Однако для общности изложения на рисунке представлено, что управляющие воздействия подобием вырабатываются не только для системы управления физической моделью, но и для натурального объекта. Чтобы подчеркнуть отличительную особенность управляющих воздействий подобием систем управления, они на схеме выполнены двойными стрелками, в то время как остальные воздействия – обычными, одинарными стрелками.

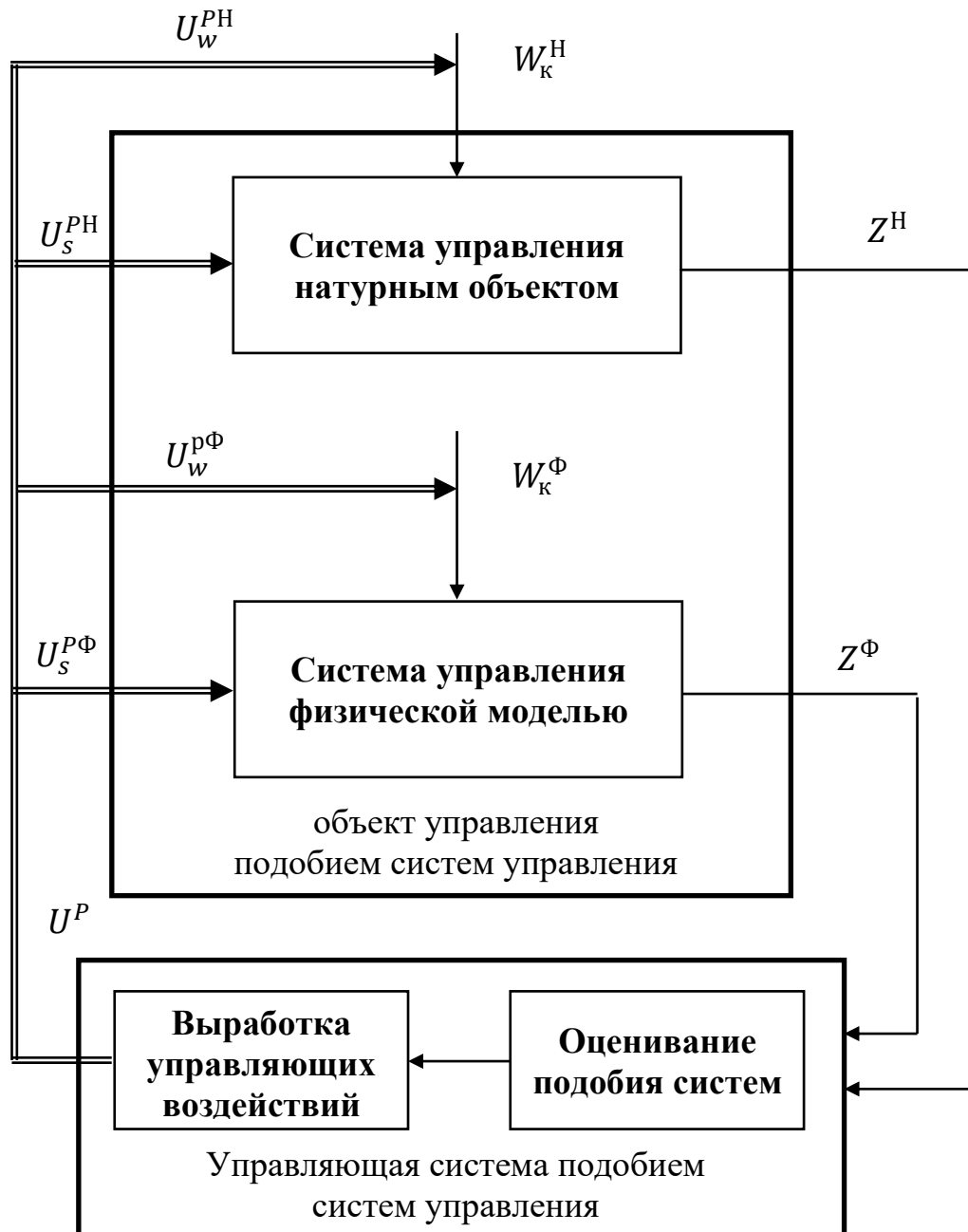


Рисунок 1.5 – Укрупненная схема системы управления подобием систем управления

На рисунке 1.5 приняты следующие обозначения

$Z = \{U; W_k; Y; Y^*\}$  – обобщенный вектор, характеризующий всю доступную информацию, получаемую из действующей системы управления, включая управляющие  $U$ , контролируемые внешние  $W_k$ , выходные  $Y$  и задающие  $Y^*$  воздействия;

$U^P = \{U_w^{PO}; U_w^{P\Phi}; U_s^{PO}; U_s^{P\Phi}\}$ ; – общий вектор управляющих воздействий подобием систем управления включающий

$U_S^{PO}; U_S^{P\Phi}$  – векторы управляющих воздействий, направленные на натуральный объект управления и его координатную управляющую систему, на физическую модель и ее координатную управляющую систему, соответственно;

$U_W^{PO}; U_W^{P\Phi}$  – векторы управляющих воздействий, направленные на целенаправленное изменение свойств внешних воздействий натурального объекта и его физической модели, соответственно;

надстрочные индексы «Н», «Ф» означают принадлежность, соответственно, к натурному объекту управления и его физической модели, а подстрочный индекс «к» – принадлежность к контролируемым внешним воздействиям.

К основным функциям при практическом использовании таких систем следует отнести

- оценивание степени подобия систем управления, в частности, натурным объектом управления и его физической моделью,
- управление подобием систем, если это подобие в силу изменившихся условий было нарушено.

В процессе функционирования такой системы осуществляется текущая оценка степени подобия систем управления и, если подобие нарушено, осуществляется выработка управляющих воздействий подобием  $U^P$ . Подобие этих систем может быть достигнуто с помощью совокупности управляющих воздействий  $U_W^{PO}; U_W^{P\Phi}$ , целенаправленно влияющих на свойства контролируемых внешних воздействий,  $U_S^{PO}(t); U_S^{P\Phi}(t)$ , влияющих непосредственно на состояние натурального объекта управления и его физической модели, а также на алгоритм управления натурным объектом управления, и его физической моделью.

В свою очередь каждая компонента вектора управляющих воздействий подобием состоит из трех составляющих: структурных, координатных и параметрических управляющих воздействий подобием.

Первоочередными задачами при управлении и исследовании систем управления с использованием физического моделирования следует считать

- оценивание степени подобия систем управления натурным объектом управления и его физической моделью, для чего целесообразно использовать

рекуррентные выражения расчета оценок целевых показателей  $r_{12}$  эффективности функционирования  $q_{1T}$  и  $q_{2T}$ , а также показателя  $r_{12}$ ;

– управление подобием систем.

Более подробная структура системы управления подобием систем управления представлена на рисунке 1.6 и предназначена для выработки и реализации управляющих воздействий на изменение динамических свойств объектов, внешних воздействий и алгоритмов управления. Для простоты и наглядности представления эта структура дана состоящей из двух объектов управления подобием систем. Один из них – натурная система управления (НСУ), а другой – модельная система управления (МСУ), в которой объектом управления выступает физическая модель натурального объекта. Но сущность процесса управления подобием систем не изменится, если его объектом будут выступать не две системы управления, а несколько, а вместо МСУ – другая натурная система.

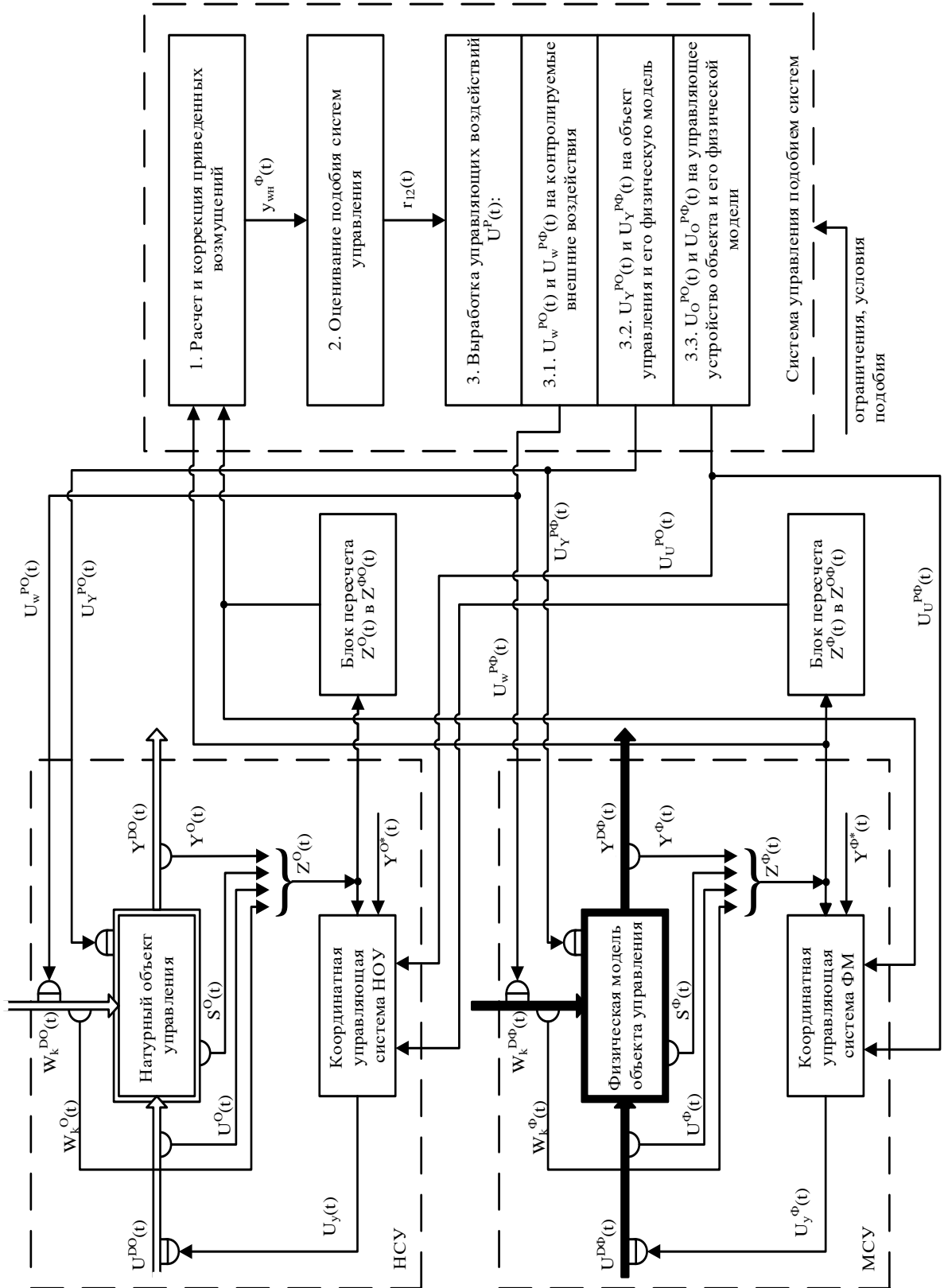


Рисунок 1.6 – Общая структура системы управления подобием систем управления

На рисунке 1.6 приняты следующие обозначения:

 – элементы натурной системы управления;

$\rightarrow$  – информационные воздействия;

$\cup$  – измерительные блоки, включая неполноту контроля и ошибки измерения;

$\ominus$  – исполнительные блоки, включая ошибки реализации управляющих сигналов (команд);

 – элементы модельной системы управления;

$\Rightarrow$  – материальные и энергетические воздействия натурального объекта;

$\rightarrow$  – материальные и энергетические воздействия физической модели;

 – расчетные блоки обработки данных;

$U(t); W(t); Y(t); S(t)$  – управляющие, внешние, выходные воздействия и переменные состояния в момент времени  $t$ ;

$$Z(t) = \{U(t); W_k(t); Y(t); S(t)\};$$

$y_{\text{вн}}(t)$  – приведенные к выходу возмущающие воздействия в момент времени  $t$  как интегральная оценка неконтролируемых возмущений, выраженная в масштабе изменения выходных воздействий;

$r_{12}(t)$  – показатель степени подобия систем управления или их элементов, выраженный через коэффициент корреляции между целевыми показателями систем управления;

$U^P(t)$  – управляющие воздействия на натурный объект управления, его физическую модель, внешние контролируемые воздействия натурального объекта и его физической модели, управляющее устройство, направленные на достижение подобия систем управления или повышения степени их подобия;

$U^P(t) = \{U_W^{PO}(t); U_W^{P\Phi}(t); U_Y^{PO}(t); U_Y^{P\Phi}(t); U_U^{PO}(t); U_U^{P\Phi}(t)\}$  – совокупность управляющих воздействий подобием контролируемых внешних воздействий, непосредственно натурального объекта управления и его физической модели,

управляющего устройства, соответственно, натурального объекта управления и его физической модели;

$Z^{\phi 0}(t)$  – значения векторного воздействия в момент времени  $t$  натурального объекта управления  $Z^0(t)$ , пересчитанные в масштаб их изменений для физической модели;

$Z^{0\phi}(t)$  – значения векторного воздействия в момент времени  $t$  физической модели  $Z^{\phi}(t)$ , пересчитанные в масштаб их изменений для натурального объекта управления;

надстрочные индексы « $D$ », « $O$ », « $\Phi$ » означают принадлежность, соответственно, к действительным значениям воздействий, натуральному объекту управления и его физической модели;

подстрочные индексы « $k$ », « $Y$ », « $w$ », « $w_n$ » означают принадлежность к контролируемому, координатным, внешним и внешним неконтролируемым воздействиям.

Как видно из схемы, представленной на рисунке, система управления подобием реализует функции расчета и коррекции приведенных возмущений натурального объекта управления и его физической модели, оценивания подобия НСУ и МСУ и управления их подобием.

Расчет приведенных возмущений осуществляется по известным схемам, изложенным для расчета приведенных к выходу объекта в [26], а для приведенных к одному из управляющих его входов [31]. При этом, чтобы можно было сравнивать между собой приведенные возмущения НОУ и его ФМ, они должны быть также приведены к единому масштабу изменения. В данном случае целесообразно приведенные возмущения НОУ приводить к масштабу изменения его ФМ.

Оценивание совместного подобия систем управления НОУ и его ФМ первоначально осуществляется путем проверки выполнения условия подобия

(1.32), для чего значения  $Z^0(t)$  должны быть предварительно пересчитаны в масштаб изменения ФМ, т.е в  $Z^{\Phi 0}(t)$ .

Если условие подобия систем не выполняется, рассчитывается степень подобия  $r_{12}$  и осуществляется выработка управляющих воздействий подобием как НСУ, так и МСУ. Подобие этих систем может быть достигнуто с помощью совокупности управляющих воздействий  $U_W^{PO}(t)$ ;  $U_W^{P\Phi}(t)$ , целенаправленно воздействующих на свойства контролируемых внешних воздействий,  $U_Y^{PO}(t)$ ;  $U_Y^{P\Phi}(t)$ , воздействующих непосредственно на натуральный объект управления и его физическую модель, а также  $U_U^{PO}(t)$ ;  $U_U^{P\Phi}(t)$ , изменяющие алгоритм управления НОУ и его ФМ.

В свою очередь каждая из этих компонент вектора управляющих воздействий подобием состоит из трех составляющих: структурных  $U_S^P(t)$ , координатных  $U_Z^P(t)$  и параметрических  $U_{\Pi}^P(t)$  управляющих воздействий подобием.

Система управления подобием систем управления позволяет в рамках класса потенциально подобных систем обеспечивать их подобие, что дает возможность обоснованно переносить результаты исследований с подобной системы на другую или обеспечивать требуемую точность управления, например, в системах с прогнозирующей физической моделью в случае нестационарного объекта управления.

## **Выводы**

1. При разработке и внедрении систем управления широкое применение находят методы моделирования. Одним из важных требований к моделям является обеспечение переноса (пересчета) результатов модельных решений на натурные системы управления и их составляющие. Такой перенос для физических и натуральных моделей систем управления является обоснованным, если они подобны.



2. Традиционные методы и критерии теории подобия, опирающиеся на математические модели фундаментальных дисциплин, хорошо разработаны и являются эффективным инструментом в теории и практике определения подобия конструктивных характеристик неуправляемых объектов и протекающих в них процессов преобразования энергии и вещества.

3. В доступных источниках информации отсутствуют публикации, в которых ставятся и решаются задачи оценивания и применения подобия систем управления с учетом моделей каналов преобразования управляющих воздействий и возмущений, соответственно, отсутствуют методы и критерии такого подобия.

4. Известные методы теории подобия не могут быть успешно использованы для систем управления, требуется их существенное дополнение и развитие, поскольку существуют принципиальные отличия между структурами математических моделей, применяемых в традиционной теории подобия и теории управления, а также присутствием в последней управляющих элементов.

5. Предложены методы оценивания подобия систем управления, в основу которых положены как процедуры сравнения значений целевых системных показателей (выражение (1.32)), так и специальные соотношения подобия, которые отражают существующие в подобных системах управления взаимосвязи между характеристиками внешних воздействий, каналов их преобразования в объекте и алгоритмами управления. Разработана схема укрупненного алгоритма оценивания подобия систем управления, который может быть положен в основу реализации любого метода оценивания.

6. Разработана общая структура системы управления подобием систем управления, предназначенная для выработки и реализации целенаправленных воздействий на изменение динамических свойств объектов, внешних воздействий и алгоритмов управления, направленных на выполнение условий их подобия.

## ГЛАВА 2. МОДЕЛЬНЫЕ И НАТУРНО-МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДОБНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

### 2.1. Задачи исследования

Различие свойств и условий функционирования объектов и систем управления требует соответственно разнообразных методов моделирования. Многолетний опыт разработки новых технологических процессов и производств показывает, что, прежде чем их реализовывать в промышленности, целесообразно строить их действующие лабораторные или полупромышленные физические модели. Для таких случаев одновременно с задачами моделирования приходится решать задачи подобия технологических объектов и их физических моделей. Решение таких задач подобия осуществляется на базе хорошо разработанных и широко используемых на практике критериев подобия применительно к механическим, теплоэнергетическим, энергетическим процессам и др. [38,39].

Развитие систем автоматизации технологических процессов и производственных комплексов в настоящее время приводит к тому, что наряду с разработкой технологических объектов необходимо параллельно разрабатывать и системы автоматизации управления ими, как на этапе построения физической модели, так и натуральных комплексов.

Однако учет особенностей объектов и систем управления [29, 40] не позволяет решить задачу подобия с использованием только средств физического моделирования, а приводит к необходимости построения и использования физико-математических моделей.

Результаты предварительного анализа соответствующих литературных источников по этой тематике показывают, что критерии подобия систем и объектов управления разработаны крайне слабо. В практике инженерного проектирования систем автоматического регулирования используют некоторые показатели, которые каким-то образом соотносятся с подобием объектов регулирования, однако в явном виде о подобии объектов и систем в практике не говорится.

Таким образом, чтобы было целесообразно строить на действующей физической модели систему автоматизации управления, а затем переносить результаты исследований системы управления на натурную систему, необходимо решить проблему подобия натурной и модельной систем автоматизации управления.

Понятие подобия модели и ее оригинала связано с понятием адекватности модели.

В дальнейшем будем ориентироваться на те понятия, которые изложены в [28], где под подобием понимается соответствие между оригиналом и моделью, при котором известны правила перехода от параметров модели к параметрам объекта и наоборот, а математическое описание (если оно известно или может быть получено) допускает преобразование их к тождественному виду. Адекватность же модели – это ее способность отображать заданные свойства и условия функционирования объекта с требуемой точностью, т.е. можно считать, что адекватность модели является частным случаем подобия.

Современная теория подобия хорошо разработана и эффективно применяется лишь для определения подобия конструктивных характеристик объектов и протекающих в них процессов преобразования энергии и вещества [28]. Использование ее для систем управления в целом и отдельных ее элементов [32, 40] требует существенных дополнений и развития. В то же время можно отметить некоторые примеры применения безразмерных показателей при решении инженерных задач анализа и синтеза систем управления, где возникает необходимость раздельного сопоставления динамических свойств только каналов преобразования изменений входных воздействий объектов управления, характеристик этих воздействий, а также совместное рассмотрение динамических свойств воздействий и каналов их преобразования [26].

При этом основной особенностью такого подобия является необходимость совместно с динамическими свойствами каналов преобразования отражать и динамику внешних воздействий. Отметим, что раздельное подобие динамических свойств преобразующих каналов модели и оригинала и подобие внешних

воздействий еще не означает их совокупного подобия для оригинала и модели. Следовательно, одной из важных задач при создании физических моделей объектов и систем управления является разработка условий подобия модельных и натуральных систем регулирования, включающих совместное подобие свойств внешних возмущений и характеристик объекта.

Эффективность САР любой структуры зависит как от характеристик, действующих на объект возмущений (контролируемых и неконтролируемых), так и динамических свойств каналов преобразования входных воздействий, в том числе и регулирующих. В частности, в [26] при оценивании области эффективной работы САР по отклонению сопоставляется время чистого запаздывания динамического канала преобразования регулирующих воздействий с интервалом спада автокорреляционной функции (АКФ) приведенных к выходу объекта возмущений.

С этой точки зрения являются важными исследования влияния совместных изменений статистических свойств приведенных возмущений как интегральной характеристики неконтролируемых возмущений, выраженных в масштабе изменений выходных воздействий, так и динамических характеристик регулирующих каналов объекта.

Сведения, полученные из доступных литературных источников, например, [26] показали, что наиболее существенное влияние на качество функционирования САР оказывают такие характеристики неконтролируемых возмущений, как форма спада нормированной АКФ и дисперсия приведенного возмущения, а также запаздывание динамического канала преобразования регулирующих воздействий объекта регулирования.

Таким образом, главной задачей исследования подобия систем управления является определение *соотношений подобия* систем управления и *соотношений совместного подобия* объектов управления и внешних воздействий, позволяющие для указанных условий оценивать подобие систем управления с минимальными затратами средств и времени.

**Общая постановка задачи.** Определение соотношений подобия систем управления.

**Дано.**

1. САР по отклонению одинаковой структуры, объекты которых функционируют в условиях неконтролируемых возмущений, представленных в виде эквивалентных приведенных к выходу объекта возмущений (рисунок 2.1). Приведение возмущений к выходу позволяет исследовать их свойства без учета влияния динамических свойств объекта.

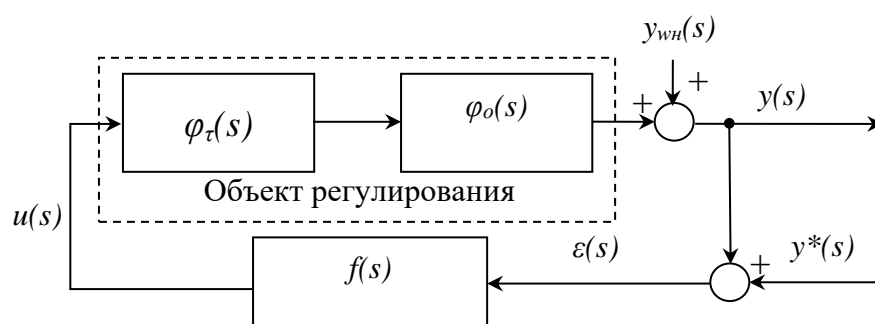


Рисунок 2.1 – Структура САР по отклонению

$u(s)$ ,  $y(s)$  и  $y^*(s)$  – регулирующие, выходные и задающие воздействия,  $\varepsilon(s)$  – ошибка регулирования,  $\varphi_o(s)$ ,  $\varphi_\tau(s)$  и  $f(s)$  – операторы каналов преобразования регулирующих воздействий без запаздывания, звена запаздывания и закона регулирования.

2. Операторы  $\varphi_o(s)$  исследуемых САР представлены структурами типовых моделей звеньев теории автоматического регулирования:

$$\varphi_o(s) = k; \quad \varphi_o(s) = \frac{k}{s}; \quad \varphi_o(s) = \frac{k}{Ts + 1}; \quad \varphi_o(s) = \frac{k}{T_2^2 s^2 + Ts + 1}, \quad (2.1)$$

где  $k$  – коэффициент передачи,  $T$  и  $T_2$  – постоянные времени,  $s$  – оператор Лапласа.

Оператор звена запаздывания  $\varphi_\tau(s)$ :

$$\varphi_\tau(s) = e^{-\tau s};$$

$\tau$  – время чистого запаздывания канала преобразования регулирующих воздействий.

3. Приведенные возмущения аддитивной композицией случайной и детерминированной составляющих (модельный случай). Первая из них –

стационарный процесс с нулевым математическим ожиданием, постоянной дисперсией и экспоненциальной автокорреляционной функцией (АКФ)

$$r_{np}(\theta) = \sigma_{np}^2 \cdot e^{-\alpha \cdot |\theta|}, \quad (2.2)$$

где  $\sigma_{np}^2$  – дисперсия приведенного возмущения,  $\alpha$  – коэффициент спада АКФ,  $\theta$  – время сдвига между сечениями ряда приведенных возмущений. Детерминированная компонента имела вид ступеньки, линейного тренда и периодической составляющей. Для натурно-модельных данных исходные реализации таких возмущений оценивали по данным работы натуральных САР процессов углеобогащения.

4. В качестве операторов  $f(s)$  использовали типовые законы регулирования, определяемые согласно методике проф. В.Я. Ротача [26] в зависимости от структуры оператора  $\varphi(s) = \varphi_\tau(s) \cdot \varphi_o(s)$ , где  $\varphi_o(s)$  последовательно выбирали из (2.1), а также оптимальный по среднеквадратическому критерию закон регулирования,

$$f_{opt.}(s) = \frac{e^{-\alpha\tau}}{1 - e^{-\alpha\tau} \cdot e^{-\tau s}} \frac{1}{\phi_o(s)}. \quad (2.3)$$

взятый в качестве примера аналитического решения поставленной задачи.

5. Метод численного моделирования. Разностные формы выражений для модели объекта и закона регулирования получены методом Z-преобразований.

6. Начальные условия для численного моделирования

$$y_u(0) = 0; u(0) = 0; y_{np}(0) = 0; y^* = 0. \quad (2.4)$$

7. Среднеквадратичный критерий точности регулирования

$$q = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [y^*(i) - y(i)]^2}, \quad (2.5)$$

где  $N$  – интервал моделирования.

В качестве критерия эффективности из всех возможных показателей функционирования САР для примера выбран точностной среднеквадратический критерий, поскольку для систем регулирования производственными процессами его можно считать достаточно удовлетворительной мерой точности работы

системы при регулировании величин, определяющих технико-экономический показатель работы объекта [26].

Предельная динамическая точность регулирования (в виде среднеквадратического критерия) для САР с оптимальным регулятором (2.3) соответствует выражению

$$q = \sqrt{\sigma_{np}^2 (1 - e^{-2\alpha\tau})} \quad (2.6)$$

## 8. Ограничения.

8.1. Условие эффективности работы САР, выраженное неравенством

$$q < \gamma \cdot \sigma_{np}^2; \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (2.7)$$

8.2. Условие оптимальности настройки САР

$$q \rightarrow q_{\min}.$$

Данное ограничение позволяет говорить о предельной динамической точности исследуемой системы.

8.3. Приближенное равенство целевых критериев эффективности подобных САР выражается соотношением

$$|q_j^n - q_i^n| \leq 0,05, \quad (2.8)$$

где  $j$  и  $l$  – номера подобных САР.

8.4. Интервал моделирования  $I^M$ , обусловленный затрачиваемыми на вычисление ресурсами, ограниченными участками натурных и натурно-модельных данных.

**Требуется.** Сформировать соотношения подобия и выражения для пересчета результатов рассмотренных типовых САР.

**Решение** поставленной задачи осуществляли для САР с оптимальным регулятором (2.3) аналитически, а для САР с типовыми законами регулирования – с помощью комбинированной процедуры, включающей численное моделирование, поисковую оптимизацию методом деформируемых конфигураций и статистическую обработку результатов численного моделирования работы оптимальных САР, представленных в виде значений параметров моделей

приведенных возмущений, каналов преобразования регулирующих воздействий, выбранных из областей эффективной работы подобных САР, и параметров настройки законов регулирования.

## 2.2. Определение соотношений подобия систем управления

Для определения соотношений подобия систем управления проводились аналитические и численные исследования. Они заключались в последовательном определении влияния параметров системы на показатель эффективности. Для этого в качестве рассматриваемых систем были выбраны САР по отклонению с типовыми моделями объектов регулирования и структур законов регулирования и среднеквадратический критерий точности. Проводились эксперименты по последовательному изменению значений параметров моделей каналов преобразования регулирующих воздействий, свойств приведенных к выходу возмущений и коэффициентов законов регулирования при зафиксированных остальных параметрах в заданных диапазонах в замкнутых действующих САР.

Область изменения значений параметров модели преобразующих каналов объекта выбирали с учетом диапазонов их изменения:

$$k_u = \text{const} = 1; 10 \leq T_u \leq 500; 1 \leq \tau_u \leq 50; \quad \frac{\tau_u}{T_u} = \text{const} = \frac{1}{10}.$$

Для аналитических исследований использовались выражения, полученные в [26]. Среднеквадратичный критерий точности регулирования:

$$q = \sqrt{\sigma_{\varepsilon \min}^2} = \sqrt{\sigma_{\text{пр}}^2 (1 - e^{-2\alpha\tau_u})} \quad (2.9)$$

Численные исследования проводили в два этапа при тех же условиях, что и аналитические, в разработанном моделирующем комплексе.

На **первом этапе** оценивали эффективность (по критерию точности) используемого программного моделирующего комплекса путем сравнения результатов аналитического и численного исследования оптимального регулятора.

На рисунке 2.2 представлен график изменения аналитически найденной ошибки регулирования в зависимости от величины запаздывания пунктирной



линией, изменение ошибки регулирования по результатам численных исследований представлен сплошной линией. Значение СКО системы, выраженное формулой (2.9), характеризует предельную динамическую точность регулирования. Отклонения результатов численных исследования от аналитических расчетов составили менее 5%, что вполне удовлетворительно. Данная погрешность включает в себя погрешности, связанные с приближенной реализацией модели объекта и оптимального регулятора, дискретизацией сигналов, неточностью оценки и другими факторами.

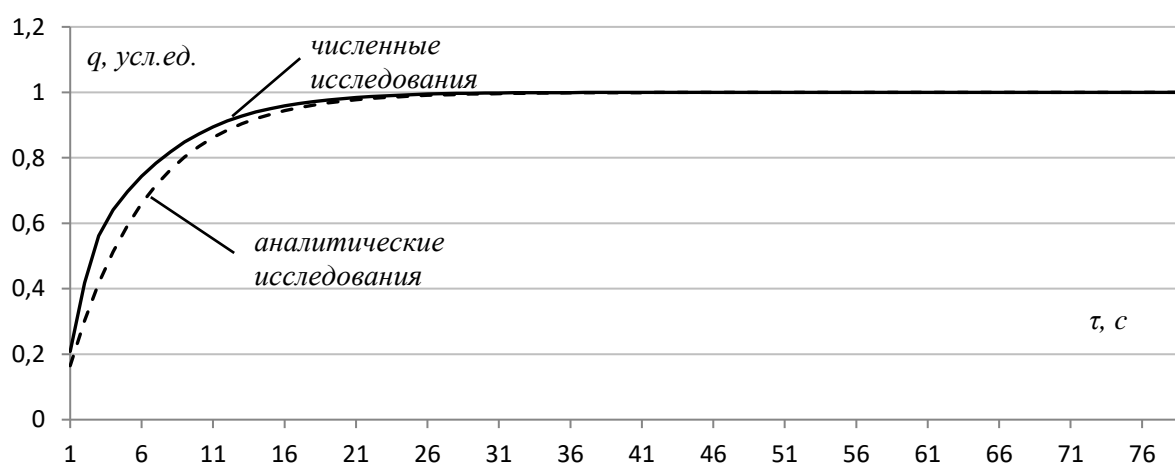
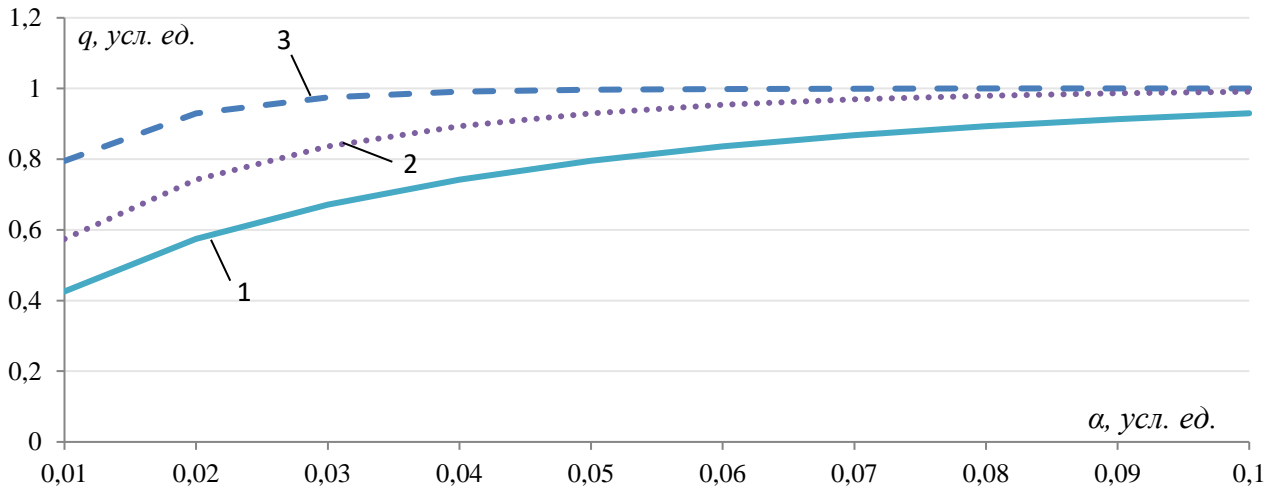


Рисунок 2.2 – Графики зависимости критерия качества регулирования системы  $q$  от запаздывания  $\tau$

Для возмущений с другими параметрами картина существенно не меняется, величина отклонений между результатами аналитических и численных исследований, также составляет менее 5%.

На рисунке 2.3 представлен результат исследования влияния коэффициента спада АКФ  $\alpha$  на критерий качества регулирования при различных значения запаздывания в системе регулирования.

Зависимость критерия качества системы от параметра спада АКФ возмущения носит экспоненциальный характер.



Результаты представлены для следующих условий:

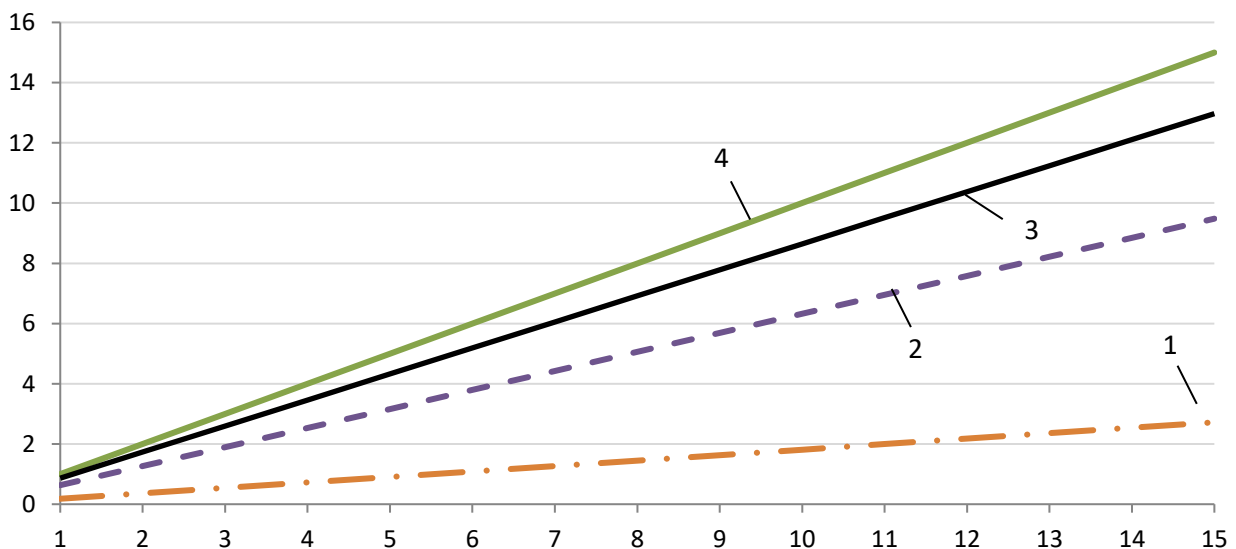
1 – запаздывание  $\tau=10$ , дисперсия возмущения  $\sigma=1$ ;

2 – запаздывание  $\tau=20$ , дисперсия возмущения  $\sigma=1$ ;

3 – запаздывание  $\tau=50$ , дисперсия возмущения  $\sigma=1$

Рисунок 2.3 – Влияние изменения коэффициента спада АКФ  $\alpha$   
на критерий качества регулирования системы  $q$

На рисунке 2.4 представлен результат исследования влияния дисперсии приведенного возмущения  $\sigma$  на критерий качества регулирования при различных значения коэффициента спада АКФ  $\alpha$  и запаздывания  $\tau$ .



Результаты представлены для следующих условий:

1 – коэффициента спада АКФ  $\alpha=0,01$ , запаздывание  $\tau=10$ ;

2 – коэффициента спада АКФ  $\alpha=0,01$ , запаздывание  $\tau=50$ ;

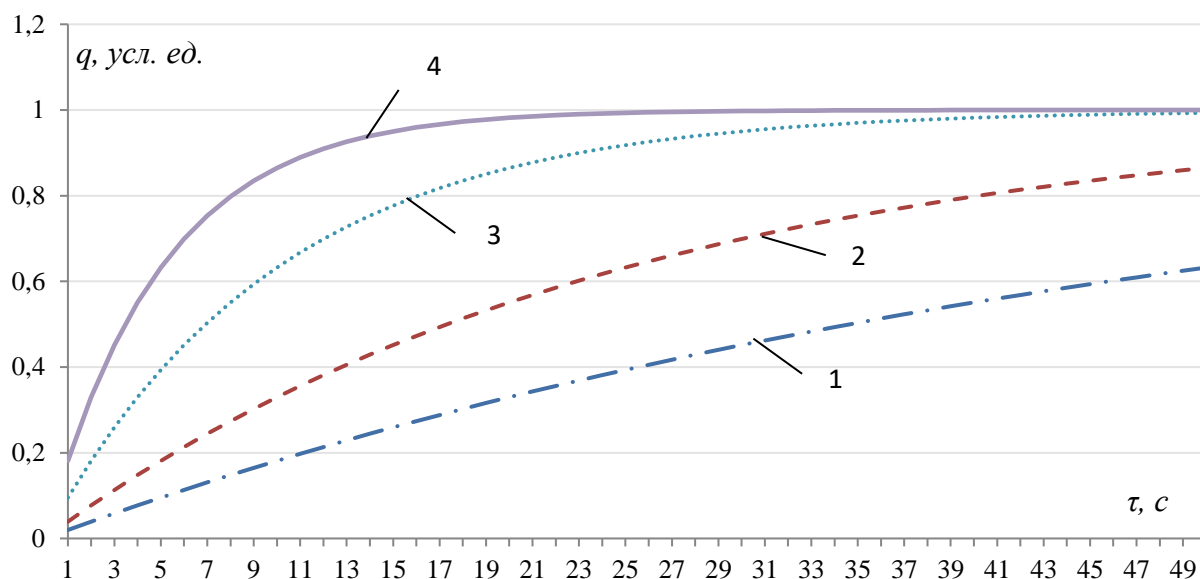
3 – коэффициента спада АКФ  $\alpha=0,1$ , запаздывание  $\tau=10$ ;

4 – коэффициента спада АКФ  $\alpha=0,1$ , запаздывание  $\tau=50$ ;

Рисунок 2.4 – Влияние изменения дисперсии возмущения  $\sigma$   
на критерий качества регулирования системы  $q$

Значение СКО прямо пропорционально дисперсии приведенного возмущения, что было видно из выражения предельной точности системы (2.4). Угол  $\varphi$  зависит от параметров  $\tau$ ,  $\alpha$ , т.е.  $\varphi=f(\tau, \alpha)$ .

На рисунке 2.5 представлен результат исследования влияния запаздывания системы  $\tau$  на критерий качества регулирования при различных значениях коэффициента спада АКФ  $\alpha$  и запаздывания  $\tau$ .



Результаты представлены для следующих условий:

- 1 – коэффициента спада АКФ  $\alpha=0,01$ , дисперсия возмущения  $\sigma=1$ ;
- 2 – коэффициента спада АКФ  $\alpha=0,02$ , дисперсия возмущения  $\sigma=1$ ;
- 3 – коэффициента спада АКФ  $\alpha=0,05$ , дисперсия возмущения  $\sigma=1$ ;
- 4 – коэффициента спада АКФ  $\alpha=0,1$ , дисперсия возмущения  $\sigma=1$

Рисунок 2.5 – Влияние запаздывания  $\tau$

на критерий качества регулирования системы  $q$

Зависимость критерия качества системы от запаздывания канала регулирования носит экспоненциальный характер, критерий растет по мере увеличения запаздывания.

Результаты исследований систем управления показали, что на качество регулирования влияет сильнее всего запаздывание канала регулирования (как характеристика объекта), форма АКФ и дисперсия (как характеристики приведенных возмущений).

Коэффициенты законов регулирования определяются методами оптимизации, поэтому всегда достигается «оптимальная точность», близкая к

предельной динамической точности САР при данных параметрах объекта регулирования и внешних воздействий.

Исходя из проведенных экспериментов были определены выражения, характеризующие условия подобия систем управления и представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношения подобия для типовых САР

Модели преобразующих каналов $\phi_o(s)$	Закон регулирования	Соотношения подобия САР	
		Соотношения совместного подобия объектов и воздействий	Соотношения подобия законов регулирования
$k$	$f_{II}(s) = \frac{k_{II}}{s}$	$ \sigma_{npj} - \sigma_{npl}  \leq 0,05;$ $ \alpha_{npj} \tau_j - \alpha_{npl} \cdot \tau_l  \leq 0,05$	$k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j \tau_j}{k_j \tau_j} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$
$\frac{k}{s}$	$f_{II}(s) = k_{II}$	$ \sigma_{npj} - \sigma_{npl}  \leq 0,05;$ $ \alpha_{npj} \tau_j - \alpha_{npl} \cdot \tau_l  \leq 0,05$ $ k_j \cdot \tau_j - k_l \cdot \tau_l  \leq 0,05$	$k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j r_j T_l}{k_l r_l T_l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$ ;
$\frac{k}{Ts+1}$	$f_{III}(s) = k_{II} + \frac{k_{II}}{s}$	$ \sigma_{npj} - \sigma_{npl}  \leq 0,05,$ $\left  \frac{\tau_j}{T_j} - \frac{\tau_l}{T_l} \right  \leq 0,05,$ $ \alpha_{npj} \cdot \tau_j - \alpha_{npl} \tau_l  \leq 0,05.$	$k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j r_j T_l}{k_l r_l T_l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$ $k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j \tau_j}{k_j \tau_j} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$
$\frac{k}{T^2 s^2 + T_1 s + 1}$	$f_{IIID}(s) = k_{II} + \frac{k_{II}}{s} + k_{II} \cdot s$	$ \sigma_{npj} - \sigma_{npl}  \leq \delta;$ $ \alpha_{npj} \cdot \tau_j - \alpha_{npl} \tau_l  \leq \delta;$ $\left  \frac{\tau_j}{T_{1j}} - \frac{\tau_l}{T_{1l}} \right  \leq \delta,$ $\left  \frac{\tau_j}{T_{2j}} - \frac{\tau_l}{T_{2l}} \right  \leq \delta.$	$k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j r_j T_l}{k_l r_l T_l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$ ; $k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j \tau_j}{k_l \tau_l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$ ; $k_{II} = k_{IIj} \cdot \frac{T_{2j}^2 \cdot T_{1l}}{T_{2l}^2 \cdot T_{1j}} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$ .

В таблице 1 приведены выражения, определяющие подобие и формулы пересчета коэффициентов законов регулирования для типовых звеньев САР.

### 2.3. Исследование и учет системных особенностей объектов управления

Общепринятая последовательность разработки систем автоматического управления включает этапы разработки математической модели объекта, подбора закона управления и проведение имитационного эксперимента на основе этой модели, техническая реализация системы, проведение натурального (полунатурного) эксперимента и отладки системы [37]. Такая последовательность вносит дополнительные неопределенности в разработку систем, обусловленную изменением свойств объекта управления при введении прямых и обратных управляющих связей, то есть, проявляется так называемый системный эффект [26]. Уменьшить влияние такого рода неопределенности можно за счет адаптации алгоритмов управления. Но эти процедуры могут занимать достаточно длительный период. В то же время к системам управления предъявляются требования эффективности функционирования с начала их введения в эксплуатацию. Такое положение дел требует подходов и методов к разработке систем автоматизации управления с уделением особенного внимания к стадиям испытания и проведения пусконаладочных работ. Одним из возможных путей решения представленной задачи включает испытание и настройка систем управления на физических моделях объекта управления с обеспечением подобия модельной (натурно-модельной) и натуральных систем и соответствующим перенесением результатов, полученных на модельной системе на натурную. При таком подходе необходимо развитие традиционной теории подобия на системы управления и разработка процедур переноса результатов с модельной системы на натурную.

Влияние такого рода неопределенности на качество функционирования САР поясняется примером в следующей постановке.

**Дано.**

1. Структура САР по отклонению, соответствующая рисунку 2.1.
2. Модель объекта регулирования

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k(t) \cdot u(t - \tau), \quad (2.10)$$

$$k(t) = k^o + \delta k(t), \quad (2.11)$$

$$\delta k(t) = \beta \cdot \frac{1}{\sigma_y(t-\tau)}, \quad (2.12)$$

где  $k(t)$  – коэффициент передачи,  $T$  – постоянная времени,  $\tau$  – время чистого запаздывания,  $\beta$  – коэффициент учета неопределенности,  $\sigma_y$  – критерий точности регулирования.

Значения параметров приняты следующие:

$$k^o = 1 \frac{\text{отн.ед.}(y)}{\text{отн.ед.}(u)}; \tau = 2 \text{ с}; T = 20 \text{ с}; \beta = 0,2.$$

3. Приведенные к выходу объекта возмущения в виде случайного сигнала с автокорреляционной функцией (АКФ)

$$r_{np}(\theta) = \sigma_{np}^2 \cdot e^{-\alpha_{np} \cdot |\theta|}, \quad (2.13)$$

где  $\sigma_{np}^2$  – дисперсия приведенного возмущения,  $\alpha$  – коэффициент спада АКФ,  $\alpha = 0,01$ ,  $\theta$  – интервал временного сдвига между значениями приведенного возмущения,  $\sigma_{np} = 1 \text{ усл. ед.}$

4. Алгоритм регулирования  $f$  представлен пропорционально-интегральным законом

$$u(t) = k_{II}(t) \cdot \varepsilon(t) + k_{II}(t) \cdot \int \varepsilon(t) dt, \quad (2.14)$$

$$\varepsilon(t) = y^*(t) - y(t),$$

$$k_{II}(t) = \frac{T}{k(t) \cdot \tau}, \quad k_{II} = \frac{k_{II}(t)}{T}, \quad (2.15)$$

где  $k_{II}$  и  $k_{II}$  – коэффициенты пропорциональной и интегральной части.

5. Критерий точности регулирования

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{t} \int_{t_u}^t [y^*(t) - y(t)]^2 dt}. \quad (2.16)$$

Для численного моделирования формулы (2.10) – (2.16) представлены в рекуррентно-разностной форме, полученной методом конечных разностей с интервалом дискретизации  $\Delta t = 1 \text{ с}$ . Коэффициенты  $k_{II}$  и  $k_{II}$  рассчитаны по методике проф. В.Я. Ротаца [26].

Проведены исследования трех вариантов работы САР (обозначены как САР с номерами 1, 2, 3).

1. Коэффициент модели  $k(t) = k^o = const$ . Коэффициенты закона регулирования рассчитаны по формулам (2.15).

2. Коэффициент модели  $k(t)$  меняется в зависимости от  $\sigma(t)$  по выражениям (2.11), (2.12). Коэффициенты закона регулирования рассчитаны для значения  $k^o$ , как и в варианте 1.

3. Коэффициент  $k(t)$  меняется в зависимости от  $\sigma(t)$  по выражениям (2.11), (2.12). Коэффициенты закона регулирования непрерывно рассчитываются для значения  $k(t)$ .

Пример функционирования различных САР представлен на рисунке 2.6. На интервале 3000 отсчетов получены следующие значения критерия  $\sigma$ : для первого варианта – 0,31 ед.; для второго варианта – 0,42 ед. Из этого следует, что учет изменений свойств объекта в зависимости от эффективности управления позволяет повысить критерий точности регулирования более чем на 10% и приблизить эффективность управления к оптимальной.

Численно на всем интервале моделирования ( $N=3000$ ) критерии равны

$$\sigma_1 = 0,31 \text{ усл. ед}; \quad \sigma_2 = 0,42 \text{ усл. ед}; \quad \sigma_3 = 0,32 \text{ усл. ед}.$$

В реально действующих объектах диапазон изменения коэффициентов модели может быть довольно значительным, например, для тяжелосреднего сепаратора [41]

$$-2,3 \leq k \leq -1,8 \frac{\text{кг}}{\% \text{ хода} \cdot \text{м}^3}.$$

Особенно сильно свойства объектов изменяются в периоды пусконаладочных испытаний и начальных стадий эксплуатации систем, поскольку именно тогда происходит замыкание контуров регулирования, корректировка технологических схем, поиск оптимальных технологических режимов.

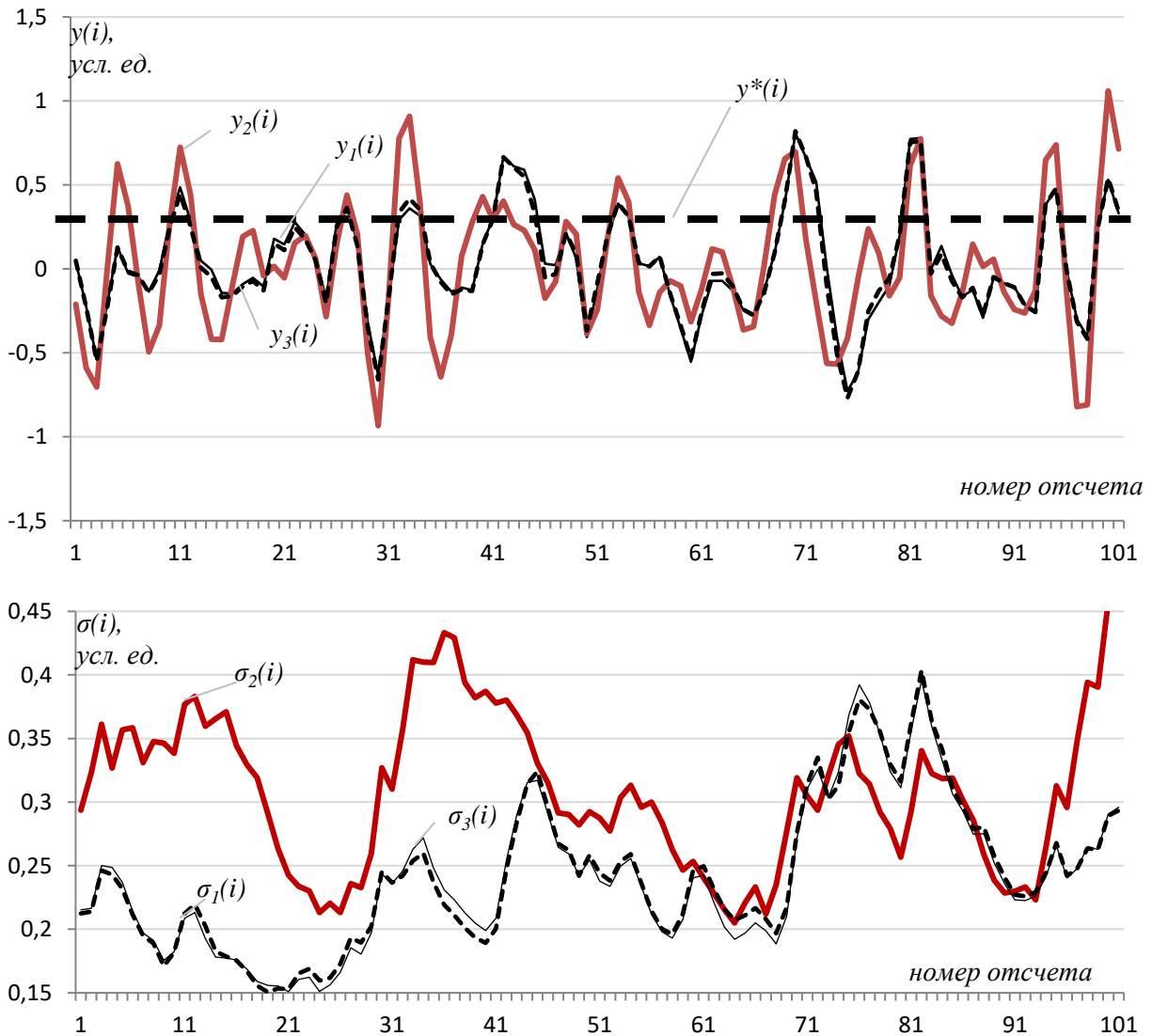


Рисунок 2.6 – Пример динамики функционирования САР

Для уменьшения негативного влияния этих периодов необходимо итерационно рассчитывать настроечные коэффициенты законов регулирования. Это можно делать на основе имитационного моделирования систем с именно физической моделью объекта. Последующий перенос полученных результатов моделирования на натурные системы правомерен с применением положений теории подобия систем управления [2, 42]. В частности, пересчет коэффициентов пропорционально-интегрального алгоритма регулирования (2.14) осуществляется по выражениям из таблицы 1:

$$k_{II}^n = k_{II}^\phi \cdot \frac{k^n \tau^n T^\phi}{k^\phi \tau^\phi T^n} \cdot e^{\frac{1}{\lambda}(\alpha^n \cdot \tau^n - \alpha^\phi \cdot \tau^\phi)} ;$$

$$k_{II}^n = k_{II}^\phi \cdot \frac{y_{cp}^\phi k^\phi \tau^\phi}{y_{cp}^n k^n \tau^n} \cdot e^{\frac{1}{\lambda}(\alpha^n \cdot \tau^n - \alpha^\phi \cdot \tau^\phi)} .$$



где  $\phi$  – индекс, отображающий принадлежность к физической модели,  $n$  – индекс, отображающий принадлежность к натурному объекту,  $y_{cp}$  – среднее значение выходной переменной,  $\lambda$  – настроечный коэффициент, зависит от соотношения  $\tau / T$ .

Известно, и подтверждено выше, что замыкание объекта управления обратным связями (отрицательными, положительными) ведет к изменению закона преобразования внешних воздействий без какого-либо вмешательства в структуру и параметры самого объекта [37]. Операторная зависимость выходного воздействия объекта от управляющих и возмущающих воздействий в этом случае принимает вид

$$y(s) = \frac{\varphi_u(s)}{1 + \varphi_u(s) \cdot f(s)} \cdot u(s) + \frac{\varphi_w(s)}{1 + \varphi_w(s) \cdot f(s)} \cdot w(s), \quad (2.17)$$

где  $\varphi_u(s)$ ,  $\varphi_w(s)$  – операторы преобразования управляющих и возмущающих воздействий,

$f(s)$  – оператор обратной связи (регулятора).

Использование этой зависимости для стабилизации объектов эффективно и дает большие возможности для объектов управления, в которых отсутствует связь между операторами  $\varphi_u(s)$ ,  $\varphi_w(s)$ . Во многих технических и социально-экономических объектах параметры (коэффициенты), а порой и структура объекта управления зависит от *эффективности управляющих воздействий*. Простым и достаточно наглядным примером этому может служить система управления уровнем материала (рисунок 2.7) в емкостях (бункерах, зумпфах) со сложной геометрией.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

ЛТ — измеритель уровня;

ТХ — технологический процесс;

ГЦ — тяжелосредний гидроциклон;

$y^*$  — заданный уровень материала;

$h_1, h_2, r_{max}, r_{min}$  — геометрические размеры.

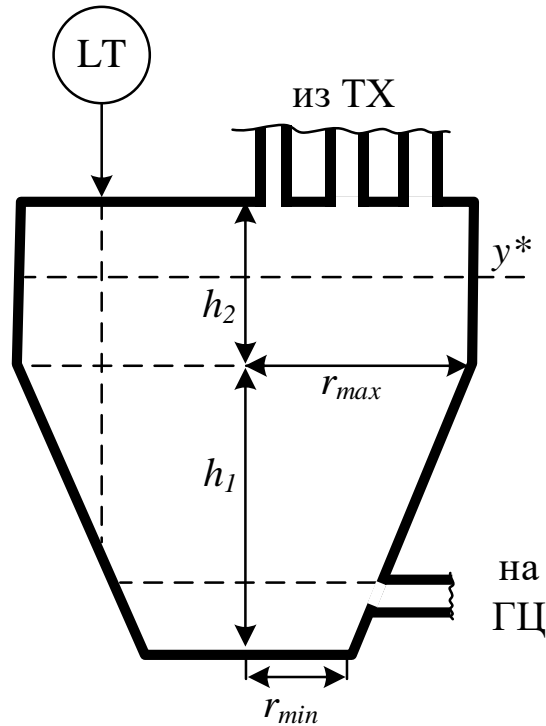
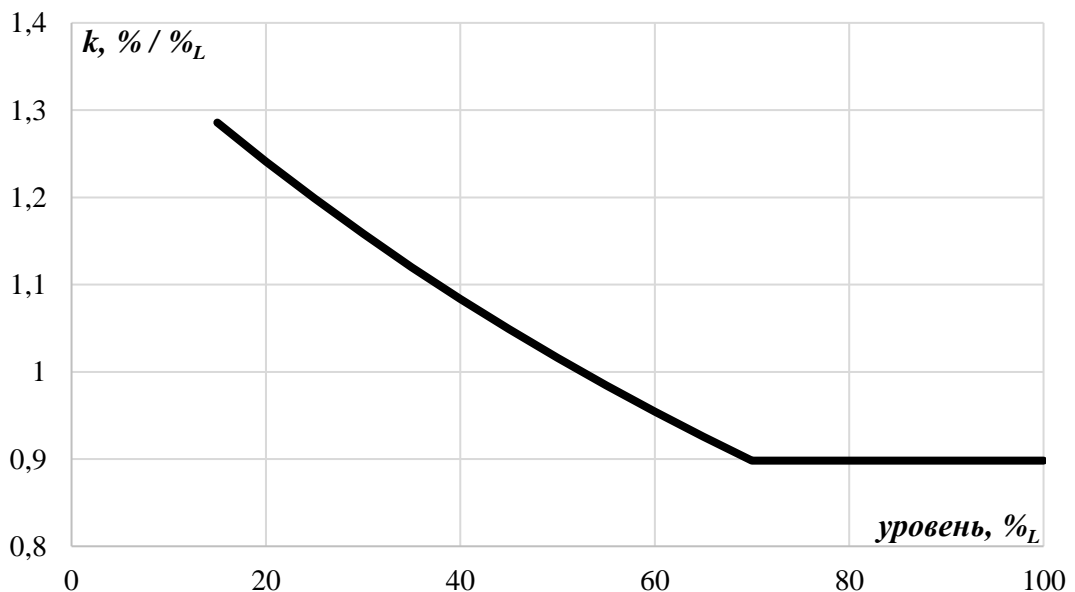


Рисунок 2.7 – Конструкция ёмкости

При высокой точности регулирования, то есть поддержании заданного уровня  $y$  в небольшой окрестности  $y^*$ , коэффициент передачи  $k$  остается постоянным. При больших отклонениях  $y$  от  $y^*$  в сторону уменьшения уровня коэффициент передачи увеличивается (рисунок 2.8).

Рисунок 2.8 – Пример нелинейности коэффициента передачи  $k$ 

Тогда операторы  $\varphi_u(s)$ ,  $\varphi_w(s)$  необходимо подстраивать в зависимости, например, от показателя

$$q(t) = \frac{1}{\Theta} \int_{t-\Theta}^t \varepsilon(t) \cdot dt,$$

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } (y^* - y) \leq -\delta y; \\ (y^* - y) & \text{при } (y^* - y) > -\delta y. \end{cases} \quad (2.18)$$

где  $\Theta$  – интервал усреднения ошибки регулирования,  $\delta$  – допустимое ограничение.

То есть необходимо в систему управления введение дополнительного параметрического контура регулирования в зависимости от эффективности управления – иначе нового типа обратной связи.

Аналогичная ситуация возникает и в объектах управления с рециклом (положительной обратной связью), когда величина рецикла влияет на параметры составных элементов в объекте [43] (рисунок 2.9).

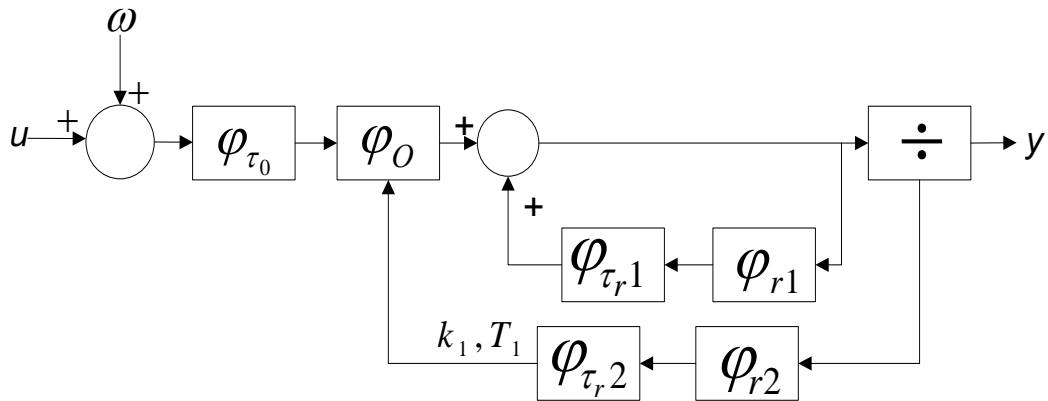


Рисунок 2.9 – Структура объекта с рециклом «по параметрам»

На рисунке 2.9 приняты следующие обозначения:  $w$ ,  $y$ ,  $u$  – возмущающее, выходное и входное воздействие;  $\varphi_0, \varphi_\tau, \varphi_r$  – операторы объекта без учета запаздывания, запаздывания и цепей рецикла; " $\tau_0$ ", " $\tau_r$ " – время запаздывания в прямой цепи объекта, в цепи рецикла.

С учетом этой особенности синтезируется и закон управления такого объекта [43].

Также отчетливо прослеживается связь свойств социально-экономических объектов с эффективностью управления. Например, поведение студентов на занятиях зависит от требований преподавателя и контроля исполнения этих требований; исполнительная дисциплина работников предприятия – от управленческих решений администрации. Такие свойства «активности» человека (коллектива людей) учитываются в методах теории активных систем [44].

## 2.4. Имитационный моделирующий комплекс

Для проведения численных исследований объектов и систем регулирования, а также оценивания статистических характеристик был разработан учебно-исследовательский комплекс [45].

Разработанный моделирующий комплекс является учебно-исследовательским и изначально был создан для решения задач моделирования объектов и систем автоматического регулирования. В дальнейшем функциональные возможности расширились за счет интегрированных модулей и алгоритмов. На данный момент комплекс применяется для моделирования объектов и систем, оценивания статистических характеристик натуральных данных, генерирования сигналов с заданными свойствами. В комплексе реализован ряд функций и механизмов, применимый также и в рамках изучения студентами таких дисциплин, как «Содержательные основы автоматизации», «Моделирование» для решения различных учебно-исследовательских задач:

- моделирования систем автоматического регулирования (САР);
- генерирование сигналов;
- анализ и обработка натуральных данных;
- выявление нестационарности характеристик каналов регулирования и приведенных к выходу возмущений.

### 2.4.1. Структура имитационного моделирующего комплекса

Разработанный моделирующий комплекс имеет возможность расширения, постоянно модернизируется и дополняется новыми алгоритмами. Принципы объектно-ориентированного программирования позволяют разрабатывать модули для комплекса отдельно и интегрировать их в общую структуру с минимальными трудозатратами. На данный момент комплекс включает следующие модули.

#### **Блок управления.**

Предназначен для получения от пользователя «указаний» и параметров для модулей и алгоритмов комплекса.

## Формирование временных рядов данных (ВРД) с заданными свойствами.

Задаются математическое ожидание, дисперсия, форма нормированной автокорреляционной функции (АКФ). Для этого используются различные алгоритмы и модели генерирования, в частности, генератор процесса Орнштейна-Уленбека, авторегрессионная модель высокого порядка.

### Моделирование САР по отклонению и контролируемому возмущению.

Данные САР являются наиболее распространенными и их модели подходят как для обучения студентов, так и для научных исследований. Реализация этих САР позволяет вводить в качестве внешних воздействий натурные данные, что позволяет использовать их для различных исследований с пересчетными моделями.

### Модуль оптимизации.

Алгоритмы оптимизации встроены в модуль моделирования САР и выделяются в отдельный «подмодуль». Критерием оптимизации является среднеквадратическое отклонение моделируемой системы как целевой критерий эффективности ее функционирования. В основу положен алгоритм поисковой оптимизации методом покоординатного спуска для поиска оптимальных настроек  $K_I$  и  $K_P$ . [46].

На рисунке 2.17 представлены графики целевого критерия эффективности САР по отклонению от времени запаздывания в канале регулирования с настройками по методике проф. В.Я. Ротача и с найденными оптимальными значениями настроек регулятора.

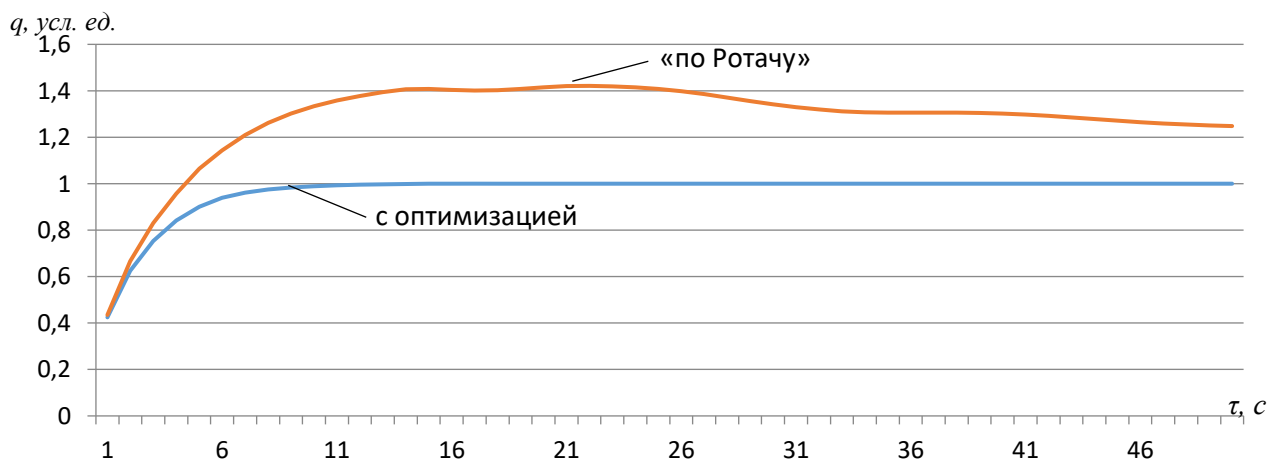


Рисунок 2.17 – Значения целевого критерия качества при различных методиках настройки

На данном интервале исследования поисковые методы оптимизации позволили достигнуть повышения качества регулирования до 42% и достигнута предельная динамическая точность для данной системы.

### **Оценивание эффективности работы САР.**

В качестве критериев используются среднеквадратическое и среднемодульное отклонение как на всем интервале, так и вычисляемые рекуррентно.

### **Выявление нестационарности.**

В комплекс включен алгоритм, позволяющий производить оценку нестационарности динамических свойств каналов преобразования объекта и статистических характеристик приведенных возмущений с одновременным установлением ее причин.

### **Анализ временных рядов данных (ВРД).**

Анализ статистических величин, R/S-анализ Хёрста как натуральных, так и любых модельных данных.

### **Частотный анализ ВРД.**

Прямое и обратное преобразование Фурье с возможностью частотной фильтрации и построения спектра плотности мощности.

### **Цифровая обработка ВРД.**

Включает на данный момент наиболее распространенные алгоритмы фильтрации, сглаживания, экстраполяции.

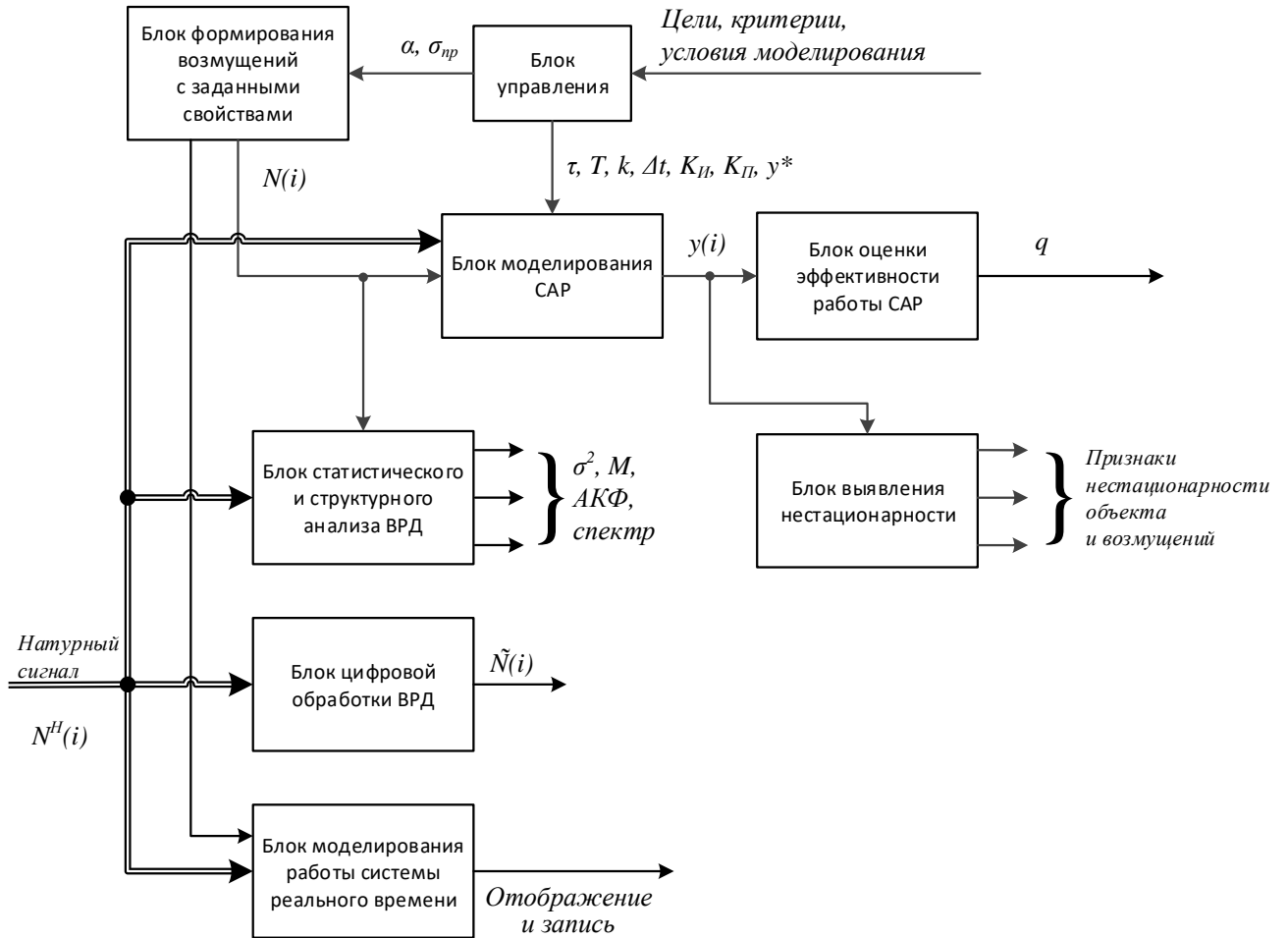
### **Моделирование переходных процессов в объектах и системах реального времени.**

Данный модуль предназначен для моделирования переходных процессов в режиме псевдореального времени в учебных целях. Позволяет также записать сигнал для дальнейшей обработки (выделения полезной составляющей, идентификации характеристик и т.д.)

Укрупненная структура комплекса представлена на рисунке 2.10.

Возможность ввода натуральных данных позволяет решать ряд как учебных, так и исследовательских задач, в частности, реализовывать пересчетные модели,

идентифицировать характеристики натуральных объектов, оценивать статистические характеристики приведенных возмущений для дальнейшего использования их при моделировании.



$\alpha, \sigma_{пр}$  – параметры генерируемого ряда;  $\tau, T, k, \Delta t, K_{II}, K_{II}, y^*$  – параметры объекта и системы регулирования;  $y(i)$  – выходное воздействие;  $q$  – значения критерия;  $\sigma^2, M$  – оценки статистических характеристик;  $\tilde{N}(i)$  – обработанный (сглаженный) сигнал;  $N(i)$  – сгенерированный сигнал;  $N^H(i)$  – натуральный сигнал.

Рисунок 2.10 — Структура комплекса

Модули комплекса реализованы на языке программирования высокого уровня С#. Скриншот основной программы с графическим интерфейсом пользователя представлен на рисунке 2.11. Из основного окна открываются вкладки с различными функциями. Все они взаимосвязаны между собой для обмена данными.

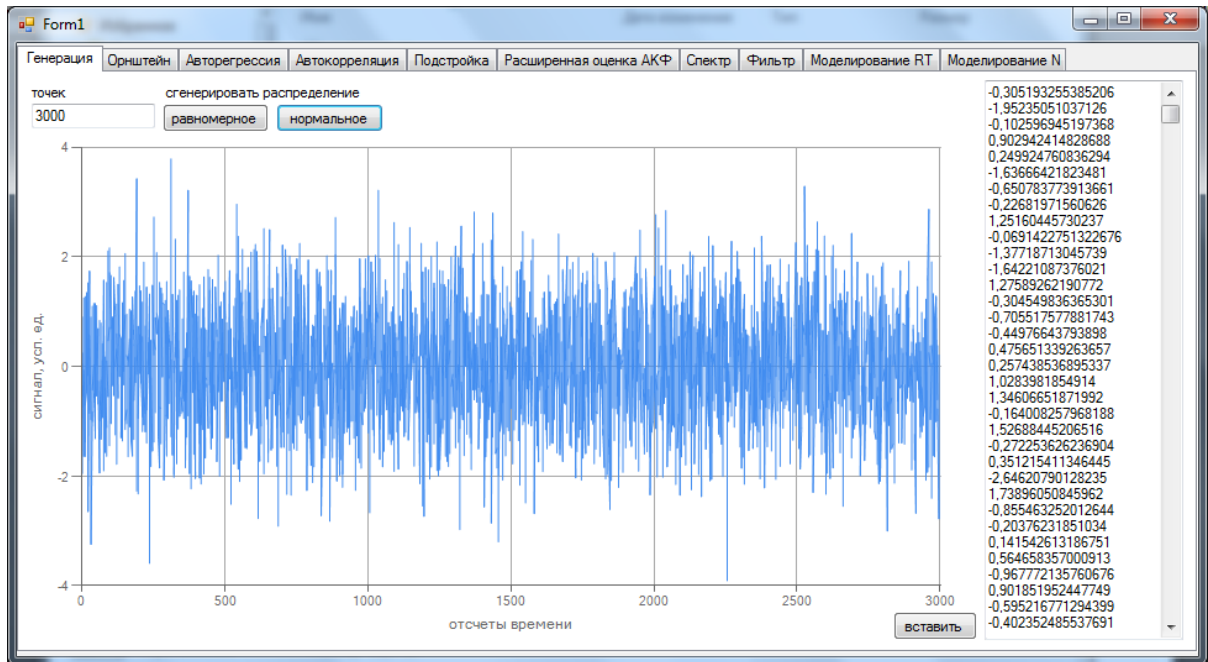


Рисунок 2.11 — Скриншот графического интерфейса пользователя

Все данные, полученные в результате работы комплекса выводятся как в виде графиков в программе, так и в виде численных значений, готовых к экспорту в текстовые файлы, либо в программу MS Excel, что позволяет сохранить и использовать их в дальнейшем в самом комплексе и в сторонних приложениях.

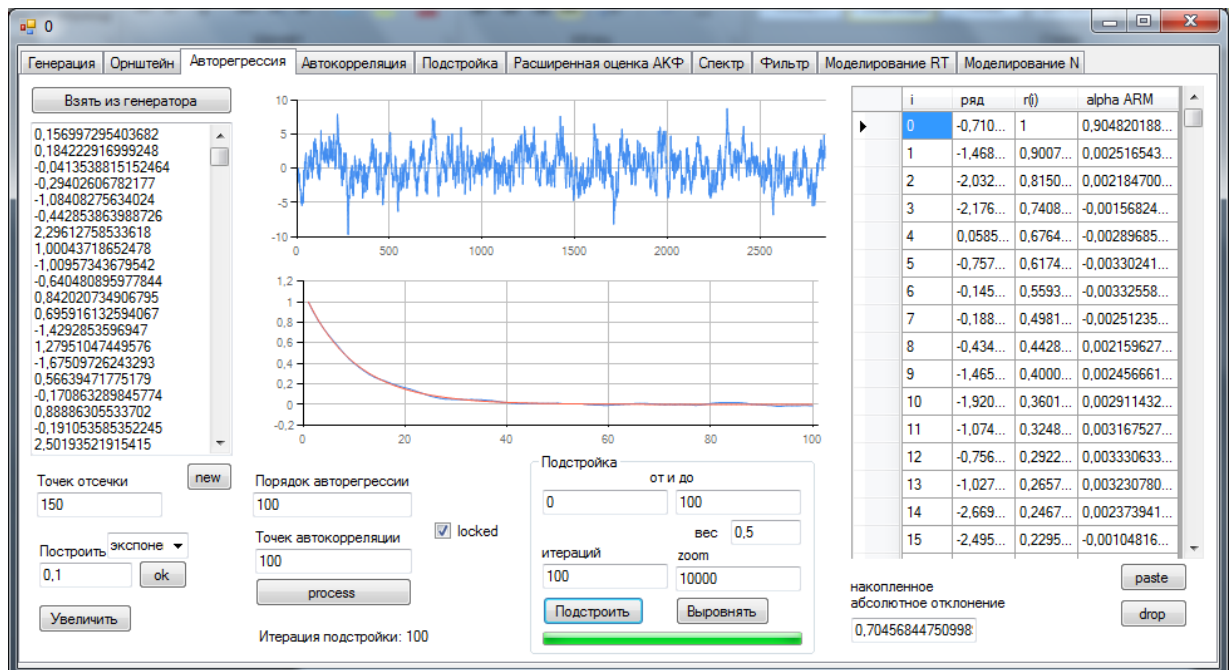


Рисунок 2.12 — Скриншот вкладки генерирования временного ряда данных с помощью авторегрессионной модели



### ***2.4.2. Генератор воздействий с заданными статистическими свойствами в виде замкнутой динамической системы***

При решении задач анализа и синтеза систем управления используются как аналитические, так и численные методы. С прикладной точки зрения основным недостатком аналитических исследований является узкая область их эффективного применения. Поэтому более распространенными являются численные исследования, особенно для моделирования систем, функционирующих в условиях неопределенности, вызванной как отсутствием математических моделей исследуемого объекта «в большом», так и наличием постоянно действующих неконтролируемых возмущающих воздействий (ПДВ). Одним из основных требований при таком моделировании является заданная точность воспроизводимости реализаций контролируемых и приведенных возмущений при стационарных условиях функционирования систем автоматического регулирования (САР). Условие воспроизводимости реализаций возмущений выражено через близость целевых критериев эффективности САР:

$$|q_j^H - q_l^H| \leq \Delta q, \quad j \neq l \quad (2.19)$$

где  $q^H$  — нормализованные значения критерия, определенные как отношение текущих значений к средневыборочному,  $\Delta q$  — допустимое отклонение, индексы  $j$  и  $l$  — номера реализаций.

В качестве целевого критерия эффективности САР использован среднеквадратичный критерий точности регулирования (2.5).

В начале исследований было предположено, что для достижения воспроизводимости реализаций возмущений необходимо равенство значений их автокорреляционных функций (АКФ) в момент запаздывания в канале преобразования регулирующих воздействий:

$$r(\theta) = r(\tau_u), \quad (2.20)$$

где  $r(\theta)$  — значение АКФ,  $\tau_u$  — запаздывание в канале преобразования регулирующих воздействий. При генерировании временных рядов данных добиться этого равенства позволяли авторегрессионные модели (АРМ) первого и

второго порядка. Однако, отклонения критериев  $|q_j^H - q_l^H|$  при таких условиях превышали  $\Delta q = 0,5$ , что не позволяет говорить о достаточной воспроизводимости и приводит к отклонениям в дальнейших исследованиях (2.19).

На следующем этапе добивались равенства времени спада нормированной АКФ возмущений –  $\Theta_S$ , которое оценивали по соотношению  $\Theta_S = \theta$  при значении коэффициента АКФ  $r(\theta) = 0,2$ . Отклонения критериев в этом случае также составляли  $|q_j^H - q_l^H| > 0,5$ .

В процессе исследования была поставлена задача достижения воспроизводимости формы АКФ реализаций возмущений. В соответствии с этим, условие воспроизводимости нормированной АКФ:

$$|r_3 - r_l| \leq \Delta r, \quad (2.22)$$

где  $r_3$  — значения коэффициентов заданной АКФ,  $\Delta r$  – допустимое отклонение,  $r_l$  — значение коэффициента автокорреляции сгенерированного ряда.

Форму АКФ возмущений задавали в форме экспоненты (2.2):

$$R_{\text{пр}}(\theta) = \sigma_{\text{пр}}^2 e^{-\alpha|\theta|},$$

где  $\sigma_{\text{пр}}^2$  – дисперсия приведенного возмущения,  $\alpha$  – коэффициент спада АКФ,  $\theta$  – время сдвига между сечениями ряда приведенных возмущений.

Результаты анализа доступных источников, в частности, [47-48], показали, что существующие программы и методы генерирования псевдослучайных последовательностей с заданными статистическими свойствами не удовлетворяли условию (2.10), либо удовлетворяли условию (2.10), но отклонения критериев составляли 0,2 и более, либо вовсе были недоступны для использования и оценивания. Основной проблемой являлось генерирование таких возмущений, коэффициент спада экспоненты АКФ  $\alpha$  которых был меньше значения 0,1.

Используя АРМ первого порядка для генерирования процесса Орнштейна-Уленбека [48] с коэффициентом спада АКФ  $\alpha = 0,1$  была получена воспроизводимость АКФ по условию (2.10) до времени ее спада  $\theta_s$  – рисунок 2.9. На рисунках представлены значения критериев для множества реализаций приведенных к выходу возмущений.

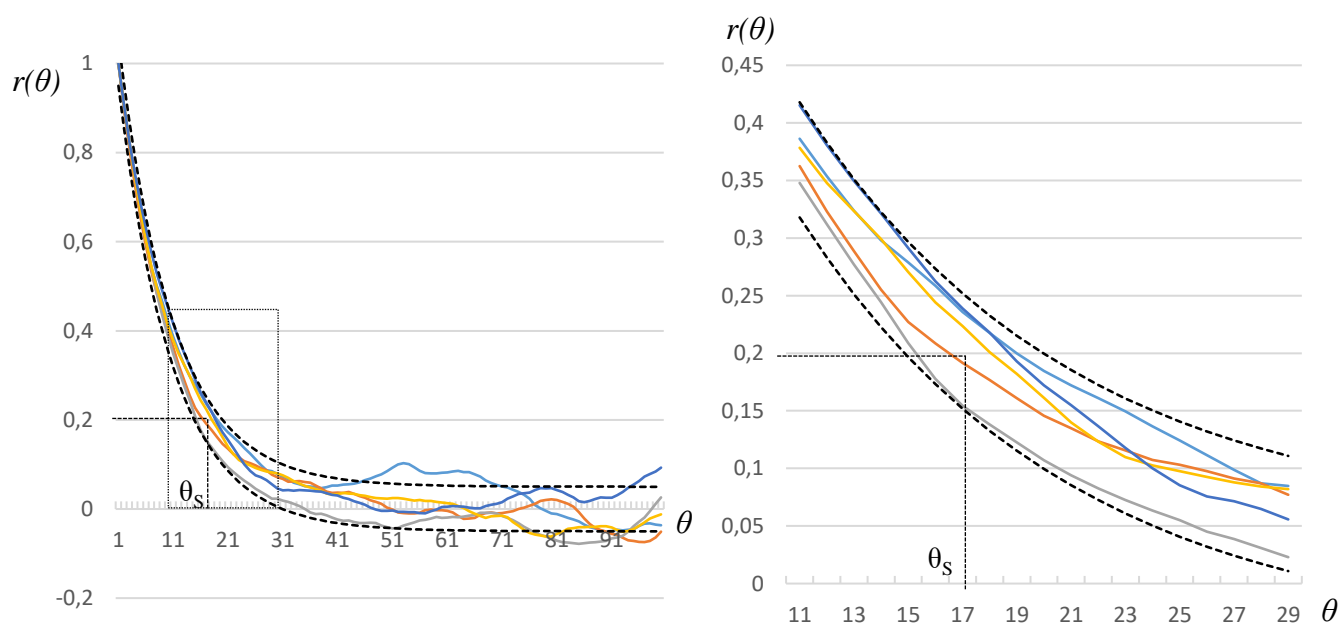


Рисунок 2.9 – Автокорреляционные функции сгенерированных с помощью АРМ первого порядка возмущений

Для определения выполнения условия (2.10) воспроизводимости реализаций возмущений использовали модель САР по отклонению с приведенным к выходу возмущением и настройками регулятора, найденными по методике проф. В.Я. Ротача [26]. Объект регулирования представлял собой последовательное соединение звена запаздывания и инерционного звена 1 порядка.

Однако, условие воспроизводимости реализаций возмущений (2.7) не было выполнено, поскольку значения средневыборочных отклонений  $|q_j^H - q_i^H|$  достигали 0,182, рисунки 2.10-2.11.

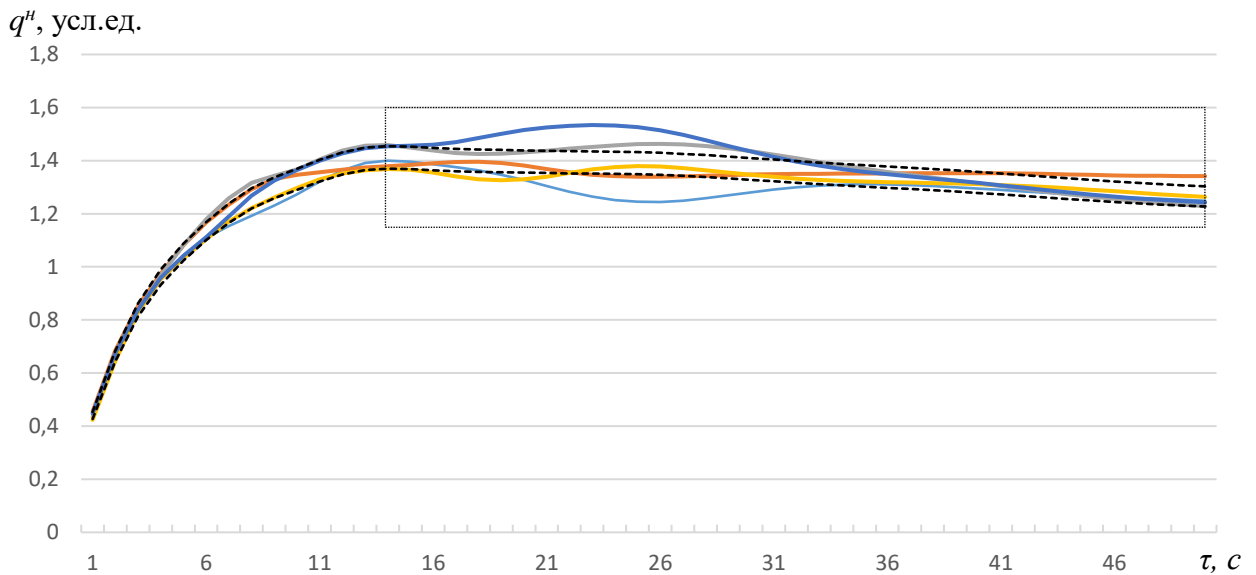


Рисунок 2.10 – Критерии качества регулирования САР  
для значений  $\tau$  в диапазоне  $0 \div 50$  с.

На рисунке 2.11 показан фрагмент этого графика в увеличенном масштабе.

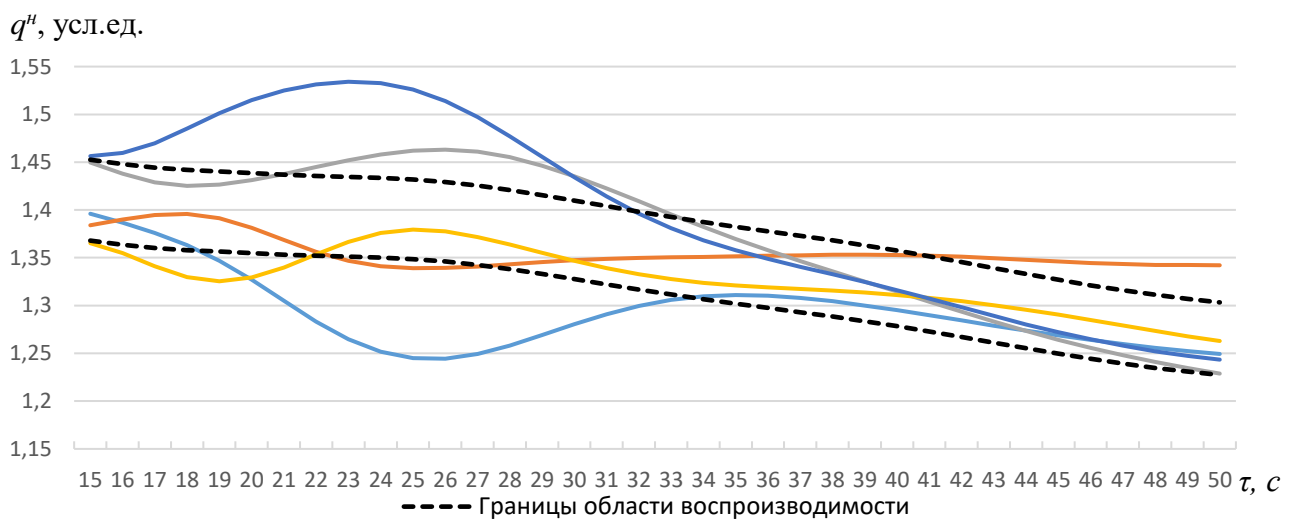


Рисунок 2.11 – Критерии качества регулирования САР  
для значений  $\tau$  в диапазоне  $15 \div 50$  с.

Таким образом, выяснилось, что для выполнения условия воспроизводимости реализаций возмущений (2.7) необходимо выполнение условия воспроизводимости АКФ (2.10) в диапазоне, большем, чем  $0 \div \Theta_S$ . Экспериментально было установлено, что необходимо выполнение этого условия примерно до  $4 \cdot \Theta_S$ . В связи с чем требовалось найти алгоритм, позволяющий для сгенерированного возмущения обеспечить условие воспроизводимости АКФ (2.10)

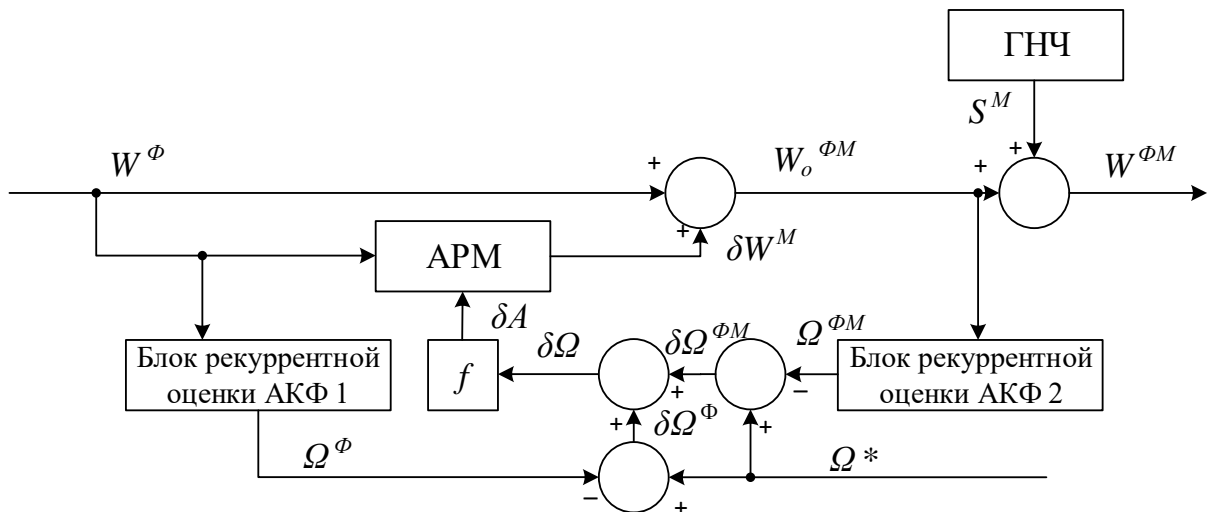
на заданном интервале моделирования. Интервал моделирования выбрали  $N = 5000$  точек.

Для формирования возмущений с заданной формой нормированной АКФ использовали авторегрессионную модель (АРМ) порядка  $n$ :

$$X(i) = \sum_{j=1}^n (\alpha(j) \cdot X(i-j)) + \varepsilon(i) \quad (2.11)$$

где  $\alpha(j)$  – параметры модели (коэффициенты авторегрессии) порядка  $n$ ,  $\varepsilon(i)$  – белый шум.

Наилучших результатов с точки зрения условий (2.7) и (2.9) удалось добиться при помощи коррекции коэффициентов авторегрессии по обратной связи. Схема подстройки представлена на рисунке 2.12.



$\Omega$  – вектор свойств (значений) АКФ),  $A$  – вектор параметров авторегрессионной модели (АРМ), \* – заданные значения, ГНЧ – генератор низкой частоты,  $S^M$  – низкочастотная составляющая воздействия, надстрочные индексы: индексы «Ф», «М» и «ФМ» означают, соответственно, физическую, модельную и физико-математическую реализацию.

Рисунок 2.12 — Генератор воздействий в виде ЗДС

К числу новых, разработанных в диссертации модулей в составе ИМК, обладающих научной новизной, относятся генератор стационарных воздействий с заданными статистическими свойствами, который может работать и в многовариантном режиме, каждый контур представлен в виде ЗДС.

Предложенный генератор (рисунок 2.12) позволяет в процессе функционирования ИМК формировать с заданной точностью параллельно во времени конечное число  $L$  стационарных рядов данных с различными свойствами на гораздо меньшем интервале моделирования, чем аналогичные известные разработки. В качестве воздействия на вход генератора подаются значения  $W^\Phi$ , полученные в системе управления физической моделью или некоррелированная генерирующая последовательность белого шума. В блоке рекуррентной оценки АКФ определяются свойства входного сигнала и их отклонение от заданных. С помощью АРМ генерируют модельные значения приращений к физическому сигналу  $\delta W^M$ . В каждом контуре готовую реализацию физико-математического сигнала  $W_o^{\Phi M}$  получают суммированием значений реализации физического сигнала и выходов различной АРМ в каждом «варианте». Второй блок рекуррентной оценки АКФ с помощью отрицательной обратной связи позволяет устранить отклонение полученных свойств физико-математического сигнала от заданных и провести многоитерационную коррекцию до заданного допустимого отклонения. Оператор  $f$  замкнутой динамической системы формирует коэффициенты АРМ по разности заданной и фактической АКФ [49].

Корректировка по обратной связи в алгоритме осуществляется заданное количество итераций, коэффициенты корректируются нормированными приращениями разности значений заданной и фактической АКФ:

$$\tilde{\alpha}(j) = \delta^H \alpha(j) + \alpha(j) \quad (2.12)$$

где  $\alpha(j)$  – текущий коэффициент авторегрессии,  $\tilde{\alpha}(j)$  – скорректированный коэффициент авторегрессии,  $\delta^H \alpha(j)$  – нормализованное отклонение.

При генерировании временных рядов данных немалую роль играет объем выборки, качество генерирования псевдослучайных чисел (что является проблемой и постоянно совершенствуется в современной криптографии) и другие условия. Для реализации белого шума использовался генератор псевдослучайных чисел открытой кроссплатформенной библиотеки Alglib с нормальным распределением,

основанный на комбинированном линейном конгруэнтном генераторе Пьера Л'Экайера [50].

При использовании данного метода генерирования, легко реализуется выполнение условия воспроизводимости АКФ (2.10) на интервале  $4 \cdot \Theta_S$  и более. Однако, экспериментально выяснилось, что дальнейшая подстройка не влияет на условие воспроизводимости (2.7).

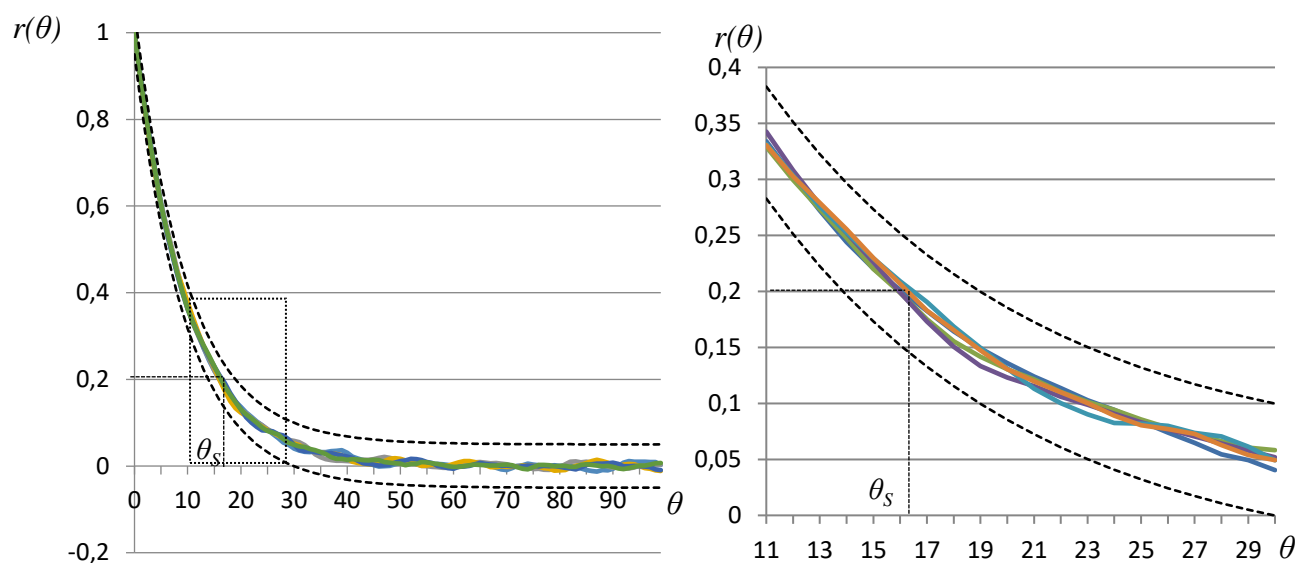


Рисунок 2.13 – Автокорреляционные функции сгенерированных с помощью авторегрессионной модели с подстройкой возмущений

Средневыборочные отклонения  $|q_j^H - q_l^H|$  при этом достигают значения 0,027, следовательно, при соблюдении условия воспроизводимости АКФ (2.10) выполняется условие воспроизводимости критерия качества (2.7), рисунки 2.14-2.15.

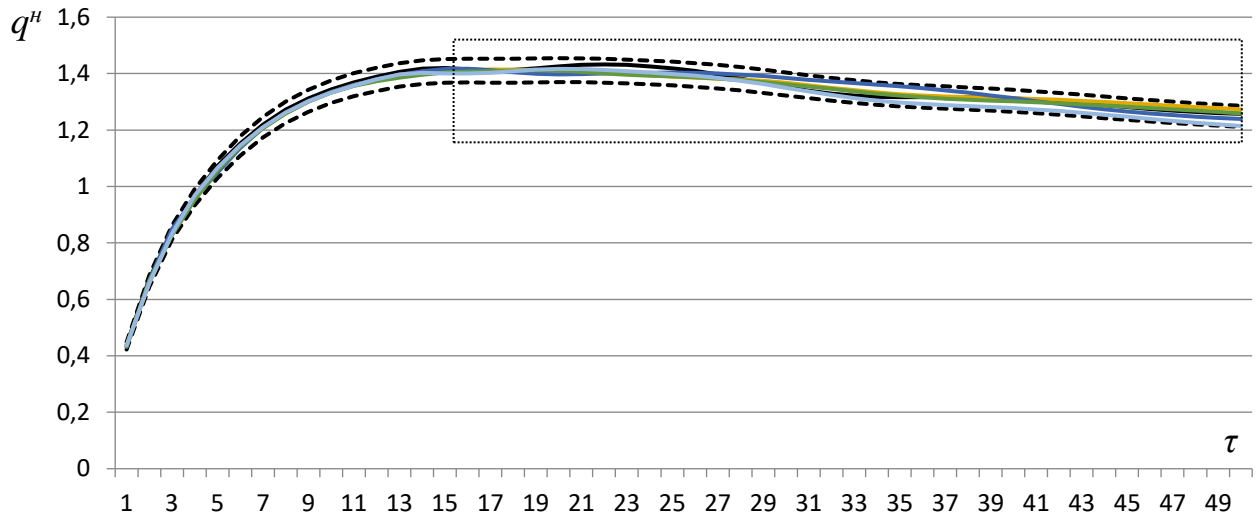


Рисунок 2.14 – Критерии качества регулирования САР  
для значений  $\tau$  в диапазоне  $0 \div 50$  с.

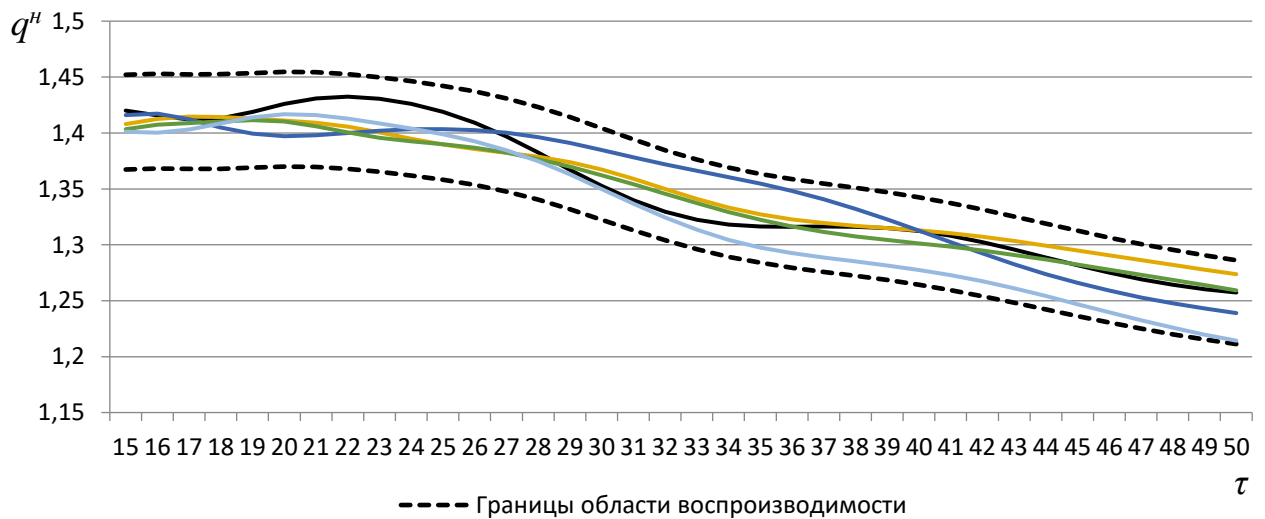


Рисунок 2.15 — Критерии качества регулирования САР  
для значений  $\tau$  в диапазоне  $15 \div 50$  с.

При этом для задания дисперсии возмущений в алгоритме применялась следующая схема масштабирования:



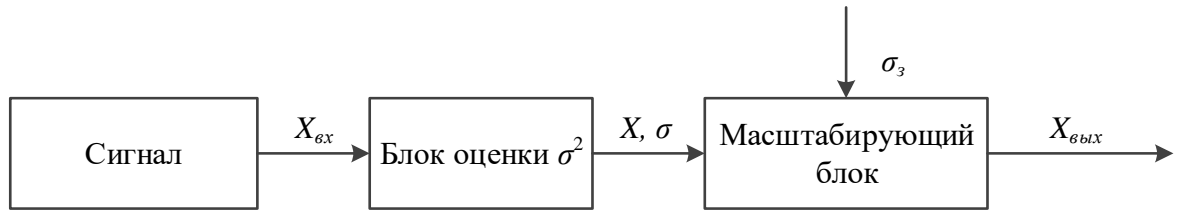


Рисунок 2.16 – Схема масштабирования сигнала

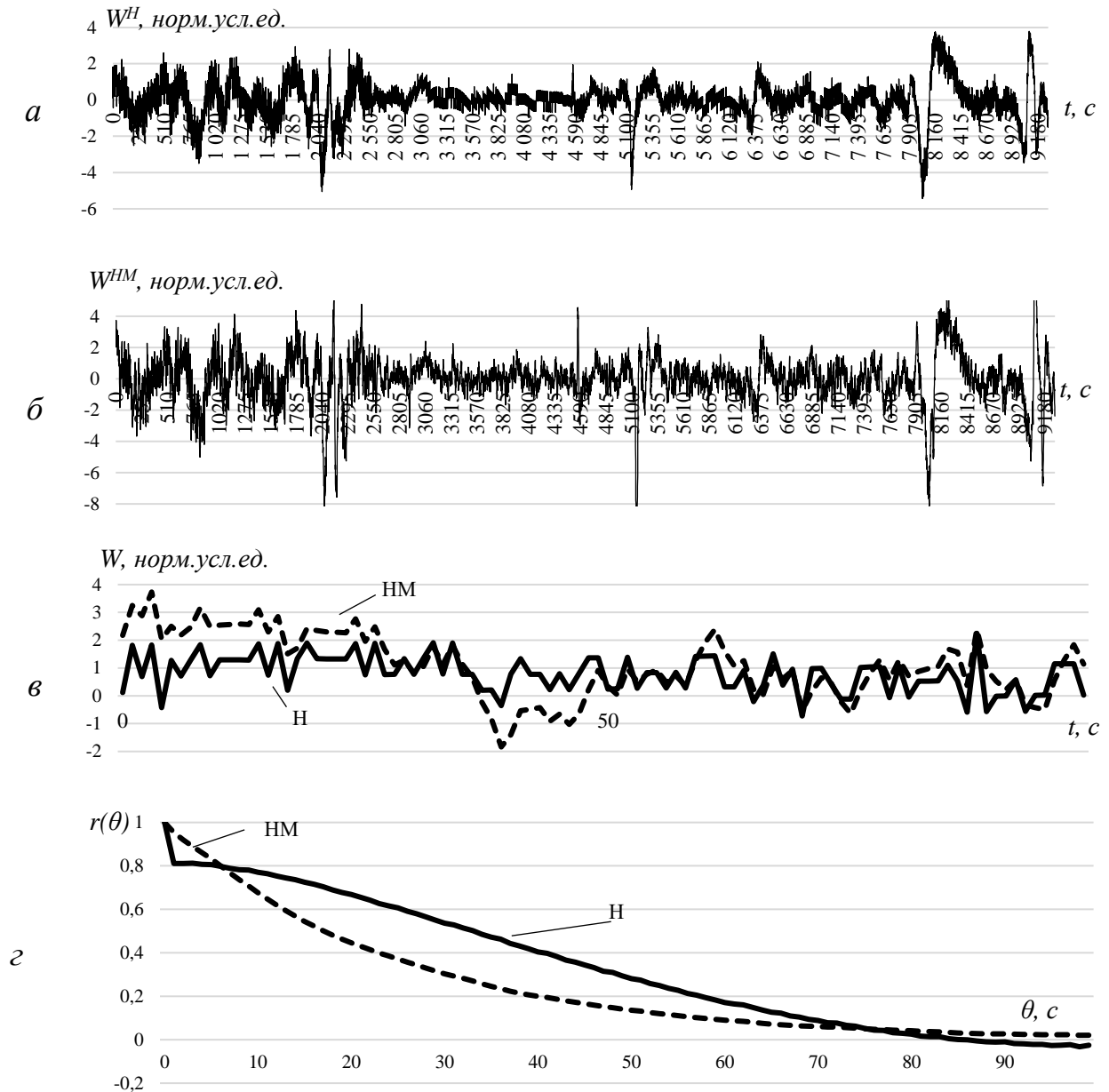
$$X_{\text{ВЫХ}}(i) = \frac{\sigma}{\sigma_3} \cdot X(i) \quad (2.13)$$

где  $\sigma_3$  – заданное СКО,  $\sigma$  – СКО сигнала,  $X_{\text{ВХ}}$  – входной сигнал,  $X_{\text{ВЫХ}}$  – выходной сигнал.

Для реализации данного алгоритма был создан программный модуль, интегрированный в информационный моделирующий комплекс.

Данный генератор позволяет формировать ряды данных  $W^{HM}$  не только на основе белого некоррелированного шума, как в традиционных аналогах [8–10], но и приняв за входной ряд значения физического (или натурального) сигнала, полученного из АСУ ТП  $W^H$ , характеризующегося уже имеющимися динамическими свойствами  $\Omega^H$ , оцениваемыми в блоке рекуррентной оценки АКФ, которые учитываются в блоке прямой цепи. Блок обратной связи позволяет оперативно корректировать параметры формирующей модели  $\delta A$  по отклонению свойств итогового сигнала  $\Omega^{HM}$  от заданных  $\Omega^*$ . Полученный сигнал  $W_o^{HM}$  затем суммируется со сгенерированной в генераторе низких частот (ГНЧ) составляющей  $S^M$ .

Сформированный сигнал отличается от натурального незначительными отклонениями, но сохраняет структуру и его особенности (рисунок 2.17).



$a$  – исходной натурной реализации;  $б$  – натурно-модельной реализации;

$в$  – увеличенный фрагмент сигналов;

$z$  – автокорреляционные функции исходного и полученного сигналов

Рисунок 2.17 – Натурный (H) и натурно-модельный (HM) сигнал

К недостаткам данного метода можно отнести существенное время генерирования по сравнению с другими, в зависимости от условий – от нескольких секунд, до нескольких десятков, в связи с необходимостью оценивать характеристики больших объемов данных на каждой заданной итерации [51].

## **Выводы**

1. Полученные соотношения совместного подобия объектов и воздействий и соотношения подобия законов регулирования (табл.1) необходимо рассматривать как соотношения подобия САР в целом, которые позволяют оценить подобие САР для зафиксированных моделей преобразующих каналов, законов регулирования и приведенных к выходу объекта возмущений с экспоненциальной АКФ. Полученные выражения могут быть использованы для пересчета результатов настройки САР с одной подобной системы на другую.

2. Разработан в составе ИМК многовариантный генератор стационарных воздействий с заданными статистическими свойствами, каждый вариант которого представлен в виде ЗДС, что позволяет одновременно формировать конечное число стационарных рядов данных с различными свойствами на гораздо меньшем интервале моделирования, чем аналогичные известные разработки.

3. Предложена на базе физической модели натурального объекта управления структура МвМСУ, в которой каждый параллельно работающий физико-математический контур регулирования с управляемым подобием (модельная САР) отражает с требуемой точностью динамические свойства и условия функционирования соответствующей этому контуру натурной САР.

4. Выделен класс объектов с системными особенностями, требующих специальных систем управления с новыми типами обратных связей.

## **ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОДОБИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И НАСТРОЙКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ**

### **3.1. Общая схема настройки систем управления с использованием методов подобия**

Подобие систем управление, оценивание и применение которого в задачах управления предложено и развивается в работах [29, 52-55], позволяет осуществлять обоснованный перенос (пересчет) результатов исследования и настройки с одной подобной системы управления на другую. В [56] приведены классы задач в теории и практике управления, где достаточно часто используют соответствующие процедуры пересчета, которые приобретают важное значение особенно в тех случаях, когда размерности (координатные и временные) существенно различаются.

В частности, такая разномасштабность имеет место, когда одна из систем управления является модельной, где управляемая часть представлена моделью объекта управления: натурной, физической или их комбинацией с математической. В [57] приведен пример использования в задачах настройки систем технологического управления специального испытательно-наладочного полигона, включающего в своем составе многовариантную физико-математическую модель натурального объекта. Одновременное согласованное функционирование такого комплекса, естественно, потребует его предварительной подготовки, в частности, согласования временных и координатных масштабов работы для каждой пары систем управления (натурной и модельной), управления их подобием, приведения в соответствие их начальных условий и других корректирующих операций с целью приведения их в подобное согласованное состояние.

Ниже приведена общая схема и краткое описание методов и алгоритмов предварительной подготовки натуральных и модельных систем управления для решения задач исследования и/или настройки модельной системы с последующим

пересчетом полученных результатов на подобную ей натурную систему управления. Эта схема включает выполнение следующих операций:

- 1) согласование входных (контролируемых и неконтролируемых) и выходных воздействий  $j$ -й и  $l$ -й систем управления;
- 2) оценивание и оперативное управление подобием  $j$ -й и  $l$ -й систем управления;
- 3) корректировка начальных условий  $j$ -й и  $l$ -й систем управления;
- 4) использование подобных систем для решения целевых задач управления, включая и пересчет результатов с  $j$ -й на  $l$ -ю систему управления.

При этом информационное отображение одной из систем, включающее траектории изменения управляющих, контролируемых внешних, выходных воздействий и переменных состояния, а также скорректированных траекторий приведенных к выходу объекта возмущений [26] будет согласовано с информационным отображением, а следовательно с траекториями соответствующих воздействий, другой системы. Это дает основание после соответствующего пересчета использовать на одной из систем управления результаты исследований, полученные с помощью другой, подобной ей системы.

Преимущество подхода исследования систем управления с использованием основных положений их подобия является особенно значимым, когда одна из них представляет собой модельную систему, объектом управления которой служит действующая физическая модель натурального объекта. Это связано с тем, что затраты на реализацию программы исследования и настройки, а также на управление подобием модельной и натурной систем, если они не будут подобными, для модельной системы будут существенно меньше, чем для натурной.

Рассмотрим кратко описание указанных выше операций с указанием методов и алгоритмов их реализации.

1. *Согласование входных и выходных воздействий  $j$ -й и  $l$ -й систем управления.* Объекты управления  $j$ -й и  $l$ -й систем управления могут функционировать в различных координатных и временных масштабах. Поэтому для последующего оценивания их подобия необходимо согласовать между собой траектории

изменения входных, выходных воздействий и переменных состояния  $j$ -го и  $l$ -го объектов управления.

В случае контролируемых входных воздействий такое согласование можно обеспечить за счет преобразования значений входных  $V^j(t)$ , выходных  $Y^j(t)$  воздействий и переменных состояния  $S^j(t)$   $j$ -го объекта управления, представленных в виде  $Z^j(t) = \{V^j(t); Y^j(t); S^j(t)\}$ , в частности, с помощью функции масштабирования  $F_M^Z\{\cdot\}$ , либо более сложных процедур скейлинга [34] в масштаб изменения значений соответствующих воздействий  $l$ -го объекта  $Z^{jl}(t)$

$$Z^{jl}(t) = F_M^Z \{Z^j(t)\} \quad Z^{jl}(t) = \{V^{jl}(t); Y^{jl}(t); S^{jl}(t)\}. \quad (3.1)$$

Полученные в результате преобразования (3.1) значения  $Z^{jl}(t)$  изменяются в одном и том же диапазоне значений и масштабе времени, что и значения  $Z^l(t)$   $l$ -го объекта управления.

Согласование неконтролируемых возмущений, приведенных, в частности, к выходу объекта управления, с предварительной их оценкой и корректировкой осуществляется по схеме [26].

Первоначально для расчета приведенных возмущений  $l$ -го объекта на основе значений о его воздействиях  $Y^l(t)$ ,  $S^l(t)$ ,  $W_K^l(t)$ , осуществляется расчет  $y_{np}^l(t)$  в соответствии с выражением

$$y_{np}^l(t) = Y^l(t) - Y_0^l(t) - \varphi_S^l \{ \delta S^l(t) \} - \varphi_U^l \{ \delta U^l(t) \} - \varphi_W^l \{ \delta W_K^l(t) \} \quad (3.2)$$

где  $Y_0^l(t)$  – опорный уровень выходных воздействий  $l$ -го объекта управления;  $\varphi_S^l$ ;  $\varphi_U^l$ ;  $\varphi_W^l$  – математические модели каналов преобразования  $l$ -го объекта отклонений состояний  $\delta S^l(t) = S^l(t) - S_0^l(t)$ , управляющих воздействий,  $\delta U^l(t) = U^l(t) - U_0^l(t)$ , контролируемых возмущений  $\delta W_K^l(t) = W_K^l(t) - W_{K0}^l(t)$  (относительно их

соответствующих опорных уровней  $S_0^l(t)$ ,  $U_0^l(t)$ ,  $W_{K0}^l(t)$ ) в соответствующие отклонения выходных воздействий  $l$ -го объекта  $\delta Y_S^l(t)$ ;  $\delta Y_U^l(t)$ ;  $\delta Y_W^l(t)$ . При этом предполагается, что  $Y^l(t) = Y_0^l(t) + \delta Y_S^l(t) + \delta Y_U^l(t) + \delta Y_W^l(t) + y_{np}^l(t)$ .

Аналогичным образом при расчете приведенных к выходу  $j$ -го объекта возмущений на основе данных о  $Y^j(t_j)$ ,  $S^j(t)$ ,  $W_K^j(t)$ ,  $U^j(t)$  и математических моделей  $\varphi_S^j$ ;  $\varphi_U^j$ ;  $\varphi_W^j$  каналов преобразования отклонений переменных состояния  $\delta S^j(t)$ , управляющих воздействий  $\delta U^j(t)$  и контролируемых возмущений  $\delta W_K^j(t)$ , в отклонения выходных воздействий рассчитываются приведенные к выходу натурального объекта возмущения  $y_{np}^j(t)$  по выражению, аналогичному (2).

Полученные при этом значения приведенных возмущений натурального  $j$ -го объекта управления преобразуются, в частности, с помощью функции масштабирования  $F_M^Y$ , либо скейлинга в значения  $y_{np}^{jl}(t)$ , которые отражают изменение приведенного возмущения  $j$ -го объекта в масштабе выходного воздействия  $l$ -го объекта

$$y_{np}^{jl}(t) = F_M^Y \{y_{np}^j(t)\} \quad (3.3)$$

2. *Оценивание и оперативное управление подобием  $j$ -й и  $l$ -й систем.* Эта операция связана с оцениванием подобия  $j$ -й и  $l$ -й систем управления, траектории воздействий и состояний которых согласованы между собой во времени и по координатам, а также управления подобием этих систем, если они не удовлетворяют условиям подобия.

Можно выделить два варианта процедур оценивания подобия систем управления. Первый заключается в непосредственном использовании соотношения (3.1), практическая реализация которого требует достоверной оценки, а в случае нестационарного объекта управления – непрерывного или периодического отслеживания, значений целевых показателей эффективности функционирования систем управления с последующим их сравнением с соответствующей величиной

$\delta q_{jl}^{n*}$ . Этот вариант является более универсальным с точки зрения его практического применения. Он может быть использован для оценивания подобия практически любых систем управления, имеющих разные структуры и функционирующих в различных условиях, если значения целевых показателей оценивать на конечном интервале времени с привлечением достоверных натуральных, модельных и натурно-модельных данных. Отметим, что получение достоверных натуральных данных в действующих системах управления связано с трудностями и не всегда может быть реализовано.

Наиболее предпочтительными с точки зрения затрат на реализацию являются расчетные методы оценивания подобия систем управления, куда отнесены такие, с помощью которых можно получить аналитическое решение математических уравнений в виде целевого показателя функционирования систем управления. Для реализации расчетного метода исходная информация должна быть представлена в виде математических моделей каналов преобразования входных воздействий и самих воздействий, в том числе и неконтролируемых, с достаточно жесткими ограничениями на их структуры и область изменения параметров.

В частности, для оценивания значений среднеквадратического критерия точности работы системы зачастую требуется получить решение интегрального уравнения с подынтегральной функцией, содержащей иррациональность в знаменателе, что возможно лишь в крайне редких случаях [26], в которых на область эффективного применения расчетного метода накладываются существенные ограничения. Они связаны, в основном, со структурой и диапазоном изменения значений параметров моделей преобразующих каналов объектов управления, их входных воздействий, алгоритмов управления и др. Обычно эти ограничения также крайне редко выполняются на практике. Область расчетных методов может быть несколько расширена в случаях, когда численное решение такого рода интегральных уравнений связано с меньшими затратами по сравнению с затратами на реализацию методов моделирования систем управления.



Второй вариант процедуры оценивания подобия систем управления, основанный на специальных *соотношениях подобия*, требует значительно меньших вычислительных и временных затрат и с этой точки зрения является более предпочтительным. Однако он, также как и аналитические методы, существенно ограничен в практическом применении. Такого рода соотношения получены лишь для небольшого класса систем регулирования. В частности, к ним относятся системы регулирования по отклонению с типовыми законами регулирования, соотношения подобия для которых и область их применения приведены в [58].

Приведем два примера таких соотношений. Первое, полученное аналитически, характеризует подобие двух систем автоматического регулирования (САР) с оптимальным по средней квадратической ошибке законом регулирования [26]. Модель канала преобразования регулирующих воздействий объекта здесь представлена последовательным соединением инерционного звена первого порядка с звеном чистого запаздывания, а приведенные к выходу объекта возмущения описываются стационарным динамическим рядом с автокорреляционной функцией, спадающей по экспоненте. Соотношение подобия для таких систем имеет вид [58]

$$\left| \sqrt{\sigma_{np}^{jH2} (1 - e^{-2\alpha^j \tau^j})} - \sqrt{\sigma_{np}^{lH2} (1 - e^{-2\alpha^l \tau^l})} \right| \leq \delta_o^*, \quad (3.4)$$

где  $\tau^j; \tau^l$  – время чистого запаздывания модели каналов преобразования регулирующих воздействий  $j$ -го и  $l$ -го объектов регулирования;  $\sigma_{np}^{jH2}$ ;  $\sigma_{np}^{lH2}$ ;  $\alpha^j$  и  $\alpha^l$  – нормированные значения дисперсии и коэффициента автокорреляционной функции приведенного к выходу  $j$ -го и  $l$ -го объектов регулирования возмущения;  $\delta_o^*$  – допустимый порог близости соотношений левой части выражения (3.4).

Наличие в структуре оптимального закона регулирования обратной модели канала преобразования регулирующих воздействий позволило избавиться от иррациональности в знаменателе подынтегральной функции математического выражения для расчета среднеквадратической ошибки регулирования и получить формулу для ее расчета аналитически. Полученное соотношение (3.4) не содержит

в явном виде параметров модели, за исключением времени чистого запаздывания  $\tau^j$  и  $\tau^l$ . Однако косвенное влияние коэффициента передачи отражено в виде  $\sigma_{np}^{jn2}$ ;  $\sigma_{np}^{ln2}$ , а инерционности преобразующего канала – в коэффициентах  $\alpha^j$  и  $\alpha^l$ .

Второе соотношение подобия, полученное путем численного моделирования и поисковых процедур оптимизации, характеризует подобие двух САР, где модели объекта регулирования и приведенного возмущения такие же, как и в первом примере, но с пропорционально-интегральным законом регулирования. Это соотношение представлено в виде [57-58]

$$\begin{cases} |\sigma_{np}^{jn} - \sigma_{np}^{ln}| \leq \delta_o^*; \\ |\alpha_{np}^j \cdot \tau^j - \alpha_{np}^l \cdot \tau^l| \leq \delta_\alpha^*; \\ \left| \frac{\tau^j}{T^j} - \frac{\tau^l}{T^l} \right| \leq \delta_\tau^*; \end{cases} \quad (3.5)$$

$$k_{II}^l = k_{II}^j \cdot \frac{k^j \tau^j T^l}{k^l \tau^l T^j} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha^l \cdot \tau^l - \alpha^j \cdot \tau^j)}; \quad (3.6)$$

$$k_{II}^l = k_{II}^j \cdot \frac{\bar{y}_{np}^j k^j \tau^j}{y_{np}^j k^l \tau^l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha^l \cdot \tau^l - \alpha^j \cdot \tau^j)}, \quad (3.7)$$

где  $k^j$  и  $k^l$ ;  $T^j$  и  $T^l$  – соответственно, коэффициент передачи и постоянная времени модели каналов преобразования регулирующих воздействий  $j$ -го и  $l$ -го объектов регулирования;  $\delta_o^*$ ;  $\delta_\alpha^*$ ;  $\delta_\tau^*$  – допустимый порог близости характеристик  $\sigma_{np}^n$ ;  $\alpha_{np}$ ;  $\tau/T$ , соответственно, приведенных возмущений и каналов преобразования регулирующих воздействий;  $\beta$  – параметр настройки, зависящий от соотношения  $\tau/T$ ;  $k_{II}^j$ ;  $k_{II}^l$ ;  $k_{II}^j$ ;  $k_{II}^l$  – коэффициенты при пропорциональной и интегральной частях законов регулирования САР  $j$ -го и  $l$ -го объектов регулирования. Соотношения (3.6) и (3.7) в случае подобия двух САР могут быть использованы для пересчета значений коэффициентов закона регулирования  $j$ -ой САР в значения этих же параметров  $k_{II}^l$   $k_{II}^l$   $l$ -ой САР.

3. *Корректировка начальных условий  $j$ -й и  $l$ -й систем управления.* Для того чтобы  $j$ -й и  $l$ -й объект управления в начале исследований имели одинаковые начальные условия, значения  $Z_1^{jl}(t_0)$  и  $Z_1^l(t_0)$ , где  $t_0$  – время начала исследований, сравниваются между собой и рассчитывается их отклонение

$$\begin{aligned}\delta Z^K(t_0) &= Z_1^{jl}(t_0) - Z_1^l(t_0). \\ Z_1^{jl}(t_0) &= \{Y^{jl}(t_0); S^{jl}(t_0)\} \\ Z_1^l(t_0) &= \{Y^l(t_0); S^l(t_0)\}\end{aligned}\quad (3.8)$$

Если  $\delta Z^K(t_0) \neq 0$ , то осуществляется расчет и реализация корректирующих управляющих воздействий  $\delta U^{lK}(t_0)$

$$\delta U^{lK}(t_0) = f^K \{ \delta Z^K(t_0) \}, \quad (3.9)$$

где  $f^K$  – алгоритм корректировки начальных условий  $l$ -го объекта управления с целью приведения значений его выходных воздействий и переменных состояния  $Z^{lK}(t_0)$  до уровня, соответствующего (с точностью до погрешностей контроля и исполнения управляющих команд) значениям  $j$ -го объекта.

Сущность методов и алгоритмов, составляющих содержание операции 4 схемы исследований, определяется постановкой конкретных задач исследования и используемых для их решения процедур. В частности, с помощью соотношений (3.6) и (3.7) может быть осуществлен пересчет полученных в результате исследований на объекте управления  $j$ -ой САР значений параметров настройки пропорционально-интегрального закона регулирования, на  $l$ -ю систему. Обоснованность такого пересчета достигается за счет реализации всех операций описанной выше схемы исследований и настройки систем управления на основе их подобия.

1. Предварительная подготовка двух или более систем управления одинаковой или близкой структуры позволяет обеспечить их подобие и, соответственно, обоснованный пересчет результатов исследований или настройки, полученных на одной из систем, на другую, подобную ей систему.

2. Процедура такой подготовки должна включать выполнение следующих операций: согласование входных (контролируемых и неконтролируемых), выходных воздействий и переменных состояний объектов управления; оценивание и оперативное управление подобием систем управления и корректировка начальных условий их функционирования.

### **3.2. Решение задачи совместного проектирования объекта управления и управляющей системы методами теории подобия**

Эффективность разработки современных технологических комплексов зависит от слаженной работы по проектированию технологической и управляющей составляющей. Проектирование технологии в отрыве от управляющей системы не позволит достичь поставленных целей по качеству продукции, если для управления не обеспечены возможности или диапазон возможных управляющих воздействий недостаточен. Еще более серьезным недостатком может являться неправильный выбор структуры управляющей системы. В таком случае, говорить о каком-либо эффективном управлении бессмысленно.

Решение данных проблем предложено в подходе совместного синтеза объекта управления и управляющей системы [59]. При таком подходе появляется возможность корректировки технологического контура, состава средств КИП для контроля технологических параметров, структуры и алгоритмов системы управления еще до этапа наладки, что обеспечивает возможность эффективного управления сразу после окончания строительно-монтажных работ. Однако, даже при таком подходе задачи настройки системы управления осложняются так называемым «системным эффектом», когда после введения в действие прямых и обратных связей параметры (или даже структура) объекта управления меняется [60]. Для решения этой проблемы эффективно применение методов теории подобия систем управления [61]. Однако их использование возможно только при установленном подобии между рассматриваемыми системами. Чтобы иметь возможность применить данные методы, необходимо обеспечить подобие проектируемой системы с готовой и исследованной системой, которая прошла

этапы введения прямых и обратных связей и была эффективно настроена уже под измененные свойства объекта. Для этого может служить физическая модель системы управления (в случае нового технологического процесса) или же введенная в эксплуатацию ранее промышленная система.

В рамках реконструкции ОФ «Барзасская» [62] был предусмотрен ввод в действие контура обогащения угля в тяжелосредном сепараторе. Этот объект является сложным для управления и характеризуется распределенным управлением, переменной структурой, наличием прямых и обратных управляющих связей, а также рециклом. Синтез системы управления для такого объекта – задача нетривиальная. Однако, для управления подобного вида объектами (объектами с рециклом) была предложена и успешно внедрена на ОФ «Матюшинская» система управления [63].

Типовая схема технологического контура обогащения угля в тяжелосредном сепараторе представлена на рисунке 3.1. Представленный объект для новой разрабатываемой системы на ОФ «Барзасская» по структуре идентичен известному объекту, но отличается габаритами зумпфов, длиной трубопроводов и производительностью оборудования, что влияет на динамические и статические характеристики его как объекта управления. Управление данным объектом осуществляется в нескольких контурах, с разными задачами и на разных уровнях. Например, управление отдельными технологическими агрегатами (насосы, задвижки, грохоты, тяжелосредный и магнитные сепараторы) осуществляется в локальных системах логического управления, которые можно охарактеризовать как «типовые», применив соответствующие структуры и подходы к управлению, сократив сроки разработки, число ошибок, а также повысив оперативность корректировки при отладке программ на этапе пусконаладочных работ [64]. Следующими контурами является поддержание заданных уровней в зумпфах, осуществляющиеся посредством изменения производительности насосов. Также в системе поддерживается заданное давление, плотность и общая производительность, которые могут меняться в зависимости от технологических режимов или нагрузки на фабрику.

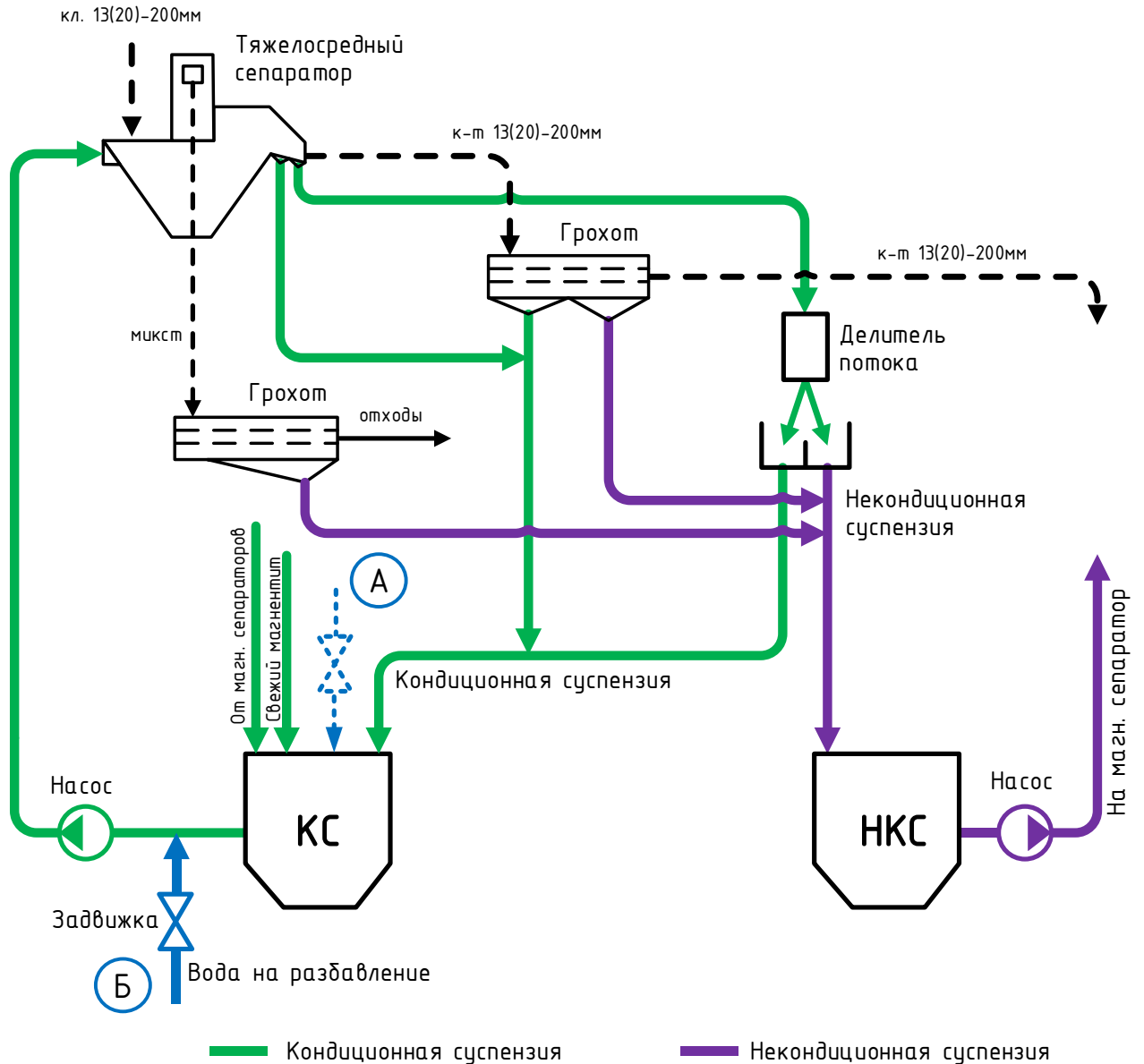


Рисунок 3.1 – Схема цепей агрегатов обогащения угля  
в тяжелосредном сепараторе

Рассмотрим обеспечение подобия на примере контура поддержания заданной плотности суспензии. Управление осуществляется посредством поворотной задвижки на трубопроводе воды на разбавление суспензии до заданной плотности. Параметры известного объекта управления описаны в [63]. С точки зрения управления данный объект можно описать последовательным соединением инерционного звена первого порядка и звена чистого запаздывания. Для обеспечения подобия систем регулирования такого объекта необходимо выполнить условия (3.5).

В случае установленного подобия по соотношениям (3.5) контура регулирования с ОФ «Матюшинская» (индекс «1») и проектируемого контура на ОФ «Барзасская» (индекс «2») настройки пропорционально-интегрального закона регулирования можно пересчитать по формулам (3.6-3.7).

Сложность данного контура состоит в том, что система работает только на поддержание плотности разбавлением. В этом случае необходимо не допускать перерегулирование (т.е. «переразбавление»). Однако, для более эффективной работы вводится контур регенерации суспензии через магнитные сепараторы, что требует рассматривать объект уже как объект с управляемой переменной структурой и положительной обратной связью с рециклом [60].

### **Постановка задачи проектирования САР плотности для ООО «Шахта №12».**

*Дано.*

1. Схема цепей аппаратов ОФ «Шахта №12».
2. Схема цепей аппаратов ОФ «Барзасская».
3. Условия и соотношения подобия (таблица 1).

*Требуется.*

Скорректировать схему цепей аппаратов на ОФ «Шахта №12» так, чтобы обеспечить подобие контура обогащения в тяжелосреднем сепараторе.

*Решение.*

При проектировании контура обогащения в тяжелосреднем сепараторе на ОФ «Шахта №12» (индекс «2») задвижка на разбавление кондиционной суспензии по решению технологов была расположена непосредственно над баком кондиционной суспензии (рисунок 3.1, расположение А), что вводило в объект управления значительное время запаздывания и инерции. По технологическим схемам и фактическим длинам и размерам трубопроводов были сделаны предварительные оценки параметров каналов преобразования регулирующих воздействий и определено, что это решение в десятки раз изменило бы их свойства. С помощью методов натурно-модельного подхода было проведено испытание на аналогичном контуре ОФ «Барзасская» (индекс «1») и выявлено, что эффективного

управления в таком случае будет невозможно добиться, а выражение (3.5) для установления подобия не выполнится, т.к. соотношение  $\frac{\tau_u}{T_u}$  еще может выполниться, но возмущения, возникающие из-за турбулентности и неравномерности среды при одном диаметре трубопровода, примерно равной мощности насоса и рабочей плотности пульпы будут одинаковы, что сделает соотношение показателей  $\alpha_{np} \cdot \tau_u$  невыполненным.

На этапе монтажа оборудования и наладки в проект были внесены изменения по переносу задвижки так, чтобы выполнялись условия (1) для контуров на ОФ «Шахта №12» и ОФ «Барзасская» (рисунок 3.1, расположение Б), что позволило обеспечить высокую точность регулирования и ввести данный контур в действие практически без подстройки.

Как показано в [60], при таком подходе к настройке контуров регулирования можно получить эффективность первичной настройки контура на 20-30% выше, чем традиционными методами, не учитывающими «системный эффект». Это позволяет сократить сроки пуско-наладочных работ системы, а также снизить количество некондиционной продукции и расхода магнетита (или других реагентов) в начальной стадии эксплуатации.

Этапы и результаты настройки приведены в разделе 3.4.

### **3.3. Настройка систем автоматического регулирования**

Одной из важных задач при создании систем автоматизации управления является их структурная и параметрическая настройка, для решения которой используют, как правило, специальные полигоны, исследовательские стенды, а также действующие физические модели объектов управления, функционирующие в составе систем управления физической моделью (СУФМ). В [61,65] рассмотрены особенности, условия и процедура применения таких систем в задачах испытания, настройки и исследования натуральных систем управления. Эффективность использования предложенных здесь процедур может быть существенно повышена, если СУФМ обобщить на случай управления многовариантной физико-



математической моделью натурального объекта управления, – многовариантной системой управления физической моделью (МвСУФМ).

Управляемой частью в МвСУФМ является комбинация (по аналогии с натурно-математической [66]) физической модели технологического объекта управления, представленной в виде ее информационного отображения [67], и математической пересчетной модели, функционирующей в приращениях к данным об изменении входных и выходных воздействий физической модели.

Многовариантность [68] создается тем, что к одной действующей физической модели с помощью указанной выше комбинации можно подключить, в принципе, любое конечное число пересчетных математических моделей, и таким образом сформировать конечное множество одновременно функционирующих физико-математических моделей натуральных объектов любой физической природы и, соответственно, систем управления, но они сами и их пересчетные математические модели должны иметь близкую структуру.

Основным достоинством МвСУФМ является то, что ее использование позволит одновременно исследовать, испытывать и настраивать несколько натуральных систем управления (НСУ), при условии, что каждая НСУ и соответствующая ей система управления физико-математической моделью будут подобными [54]. Другой положительной особенностью физико-математического моделирования является возможность достаточно просто изменять технологические режимы работы физической модели, что не всегда выполнимо или связано с большими затратами для натуральных объектов.

Далее рассматривается одна из возможных процедур, конкретизированная к решению задач одновременной настройки конечного множества систем автоматического регулирования (САР) выходных воздействий и состояний технологических агрегатов углеобогатительной фабрики, которые являются важной составляющей автоматизированных технологических комплексов, во многом определяющей эффективность их функционирования.

Предлагаемый вариант базируется на многовариантном физико-математическом моделировании с использованием натуральных данных, получаемых

с помощью действующих систем контроля, а также модельных и натурно-модельных данных с заданными статистическими свойствами, формируемых многовариантным генератором в виде замкнутой динамической системы (МВ-генератором (ЗДС) [69-71]); подобии систем управления [53, 72-73], в том числе и на управлении их подобием за счет целенаправленного изменения как динамических свойств каналов преобразования внешних воздействий, так и свойств самих этих воздействий, в том числе и неконтролируемых; поисковых процедурах.

На рисунке 3.2 приведена укрупненная структура МвСУФМ и приняты следующие обозначения

$\square$  – элементы физической модели объекта управления;

$\rightarrow$  – материальные и энергетические воздействия физической модели;

$\rightarrow$  – информационные воздействия;

$\cup$  – измерительные блоки, включая неполноту контроля и ошибки измерения;

$\ominus$  – исполнительные блоки, включая ошибки реализации управляющих сигналов (команд);

$\square$  – расчетные блоки обработки данных;

$Z = \{U; W; Y\}$  – обобщенный вектор воздействий, включающий, соответственно, управляющие, внешние и выходные воздействия физической модели;

$y_{np}$  – приведенные к выходу возмущающие воздействия как интегральная оценка неконтролируемых возмущений, выраженная в масштабе изменения выходных воздействий;

надстрочные индексы «D», «Н», «С», «Ф», «ФМ», и «\*» означают принадлежность, соответственно, к действительным, натурным, согласованным значениям воздействий натурального объекта управления, воздействиям его физической, физико-математической модели и заданным значениям;

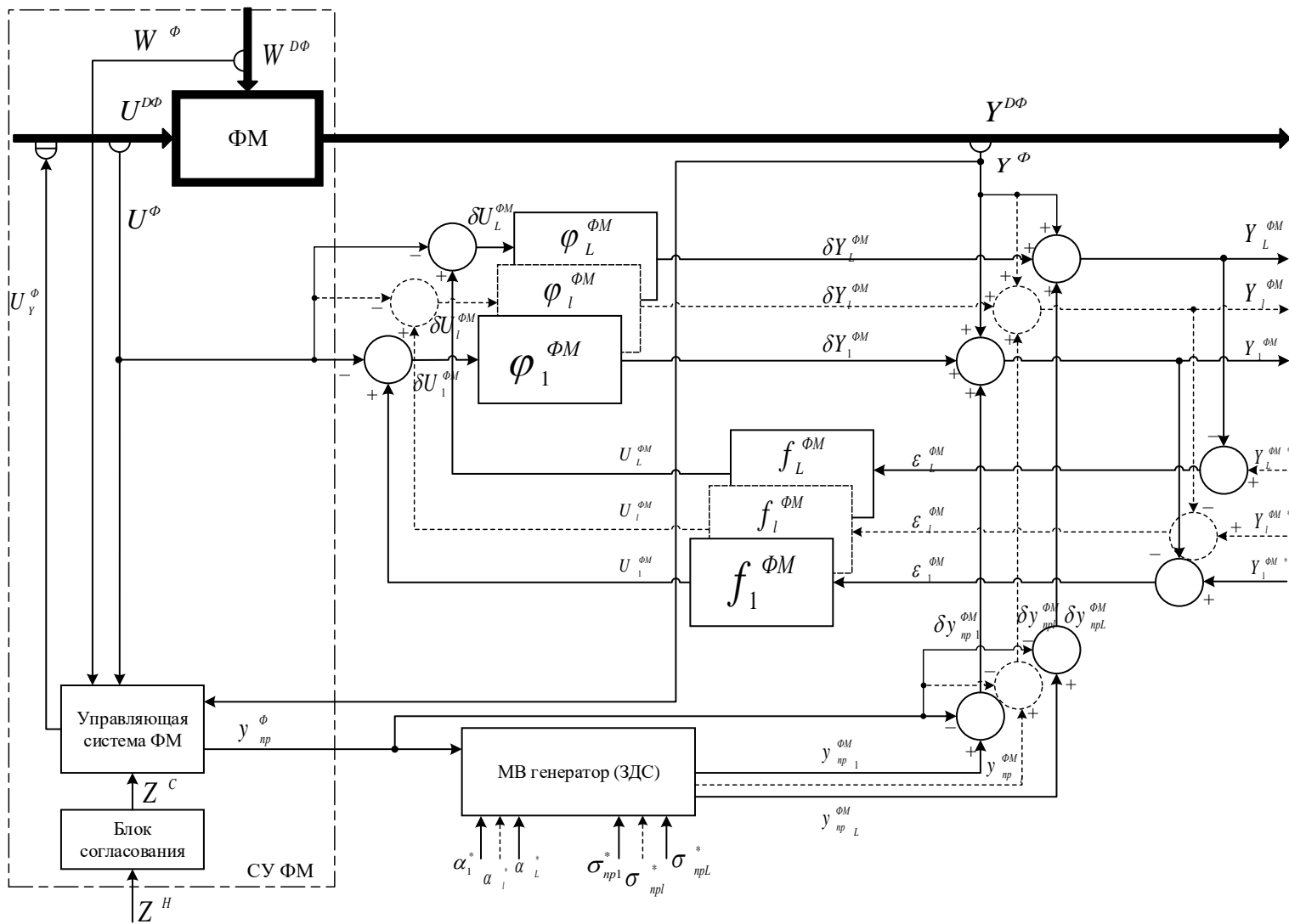


Рисунок 3.2 – Многовариантная модельная система управления

подстрочные индексы « $np$ » и « $l$ » означают принадлежность к приведенным воздействиям и номер физико-модельной САР;

пунктирной линией условно показано наличие других параллельно подключенных к ФМ контуров, число которых равно  $L$ .

Структура представленной на рисунке 3.2 САР соответствует системе регулирования по отклонению, объект которой подвержен влиянию неконтролируемых возмущений.

Математическая часть МвСУФМ в общем виде представлена следующими соотношениями

$$Y_l^{\Phi M} = Y^{\Phi} + \delta Y_{ul}^{\Phi M} + \delta y_{npl}^{\Phi M}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (3.10)$$

$$\delta Y_{ul}^{\Phi M} = \varphi_{ul}^{\Phi M} \{ \delta U_l^{\Phi M} \}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (3.11)$$

$$\delta U_l^{\Phi M} = U_l^{\Phi M} - U^{\Phi}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (3.12)$$

$$\delta U_l^{\Phi M} = f_l^{\Phi M} \{ \varepsilon_l^{\Phi M} \}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_l^{\Phi M} = Y_l^{\Phi M*} - Y_l^{\Phi M}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (3.14)$$

$$y_{npl}^{\Phi M} = y_{npl}^{\Phi M*} - y_{npl}^{\Phi}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (3.15)$$

$$\delta y_{npl}^{\Phi M} = Y^{\Phi} - Y_u^{\Phi} - Y_w^{\Phi}; \quad (3.16)$$

$$y_{npl}^{\Phi M} = F \{ y_{np}^{\Phi}; \alpha_l^*; \sigma_l^* \}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (3.17)$$

где  $\varphi_l \{ \}$  – оператор пересчетной математической модели  $l$ -ой ( $l = \overline{1, L}$ ,  $L$  – число моделируемых САР) физико-математической модели объекта управления;

$f_l \{ \}$  – закон регулирования  $l$ -ой САР;

$F \{ \}$  – алгоритм функционирования многовариантного генератора динамических рядов данных с заданными статистическими свойствами;

$Y_u^{\Phi}$  – эффекты влияния регулирующих воздействий физической модели.

Каждая ( $l$ -я из  $L$ ) одновременно работающая в МвСУФМ физико-математическая САР должна отражать динамические свойства и условия функционирования соответствующей  $l$ -ой натурной системы,  $l = \overline{1, L}$ , которые в общем случае различны. Для этого  $l$ -я модельная и  $l$ -я натурная САР должны быть подобными [65]. Их подобие достигается в математической части физико-

математической модели за счет целенаправленного изменения (управление подобием САР [65]) либо значений коэффициентов оператора  $\varphi_{ul}^{\Phi M} \{\}$ , либо свойств динамического ряда приведенных к выходу физико-математической модели возмущений  $\delta y_{npl}^{\Phi M}$ , либо и тех и других.

Формирование  $\varphi_{ul}^{\Phi M} \{\}$  осуществляется за счет изменения математической модели канала преобразования регулирующих воздействий физической модели  $\varphi_u^{\Phi} \{\}$ , в частности, путем применения специальных корректирующих операторов  $\varphi_{uk}^{\Phi} \{\}$  [29]. Приведенные возмущения  $\delta y_{npl}^{\Phi M}$  с заданными свойствами формируются с помощью многовариантного генератора динамических рядов данных с заданными свойствами, в основу которого положен алгоритм [68], адаптированный для многовариантного случая.

Укрупненная схема процедуры настройки натуральных САР с применением многовариантной физико-математической модели объекта регулирования, являющейся частью МвСУФМ, приведена на рисунке 3.3. Она была применена при настройке систем регулирования технологического комплекса обогатительной фабрики «Матюшинская». Описание технической реализации комплекса представлено в [41]. Ниже рассмотрим пример применения этой процедуры для двух САР: плотности суспензии тяжелосредного сепаратора и тяжелосредного гидроциклона. Регулирование плотности рабочей суспензии, подаваемой на сепаратор и зумпф питания гидроциклонов, осуществляется в САР по отклонению путем разбавления кондиционной суспензии добавочной водой. Структура этих натуральных и физико-математических (рисунок 3.3) САР одинакова.

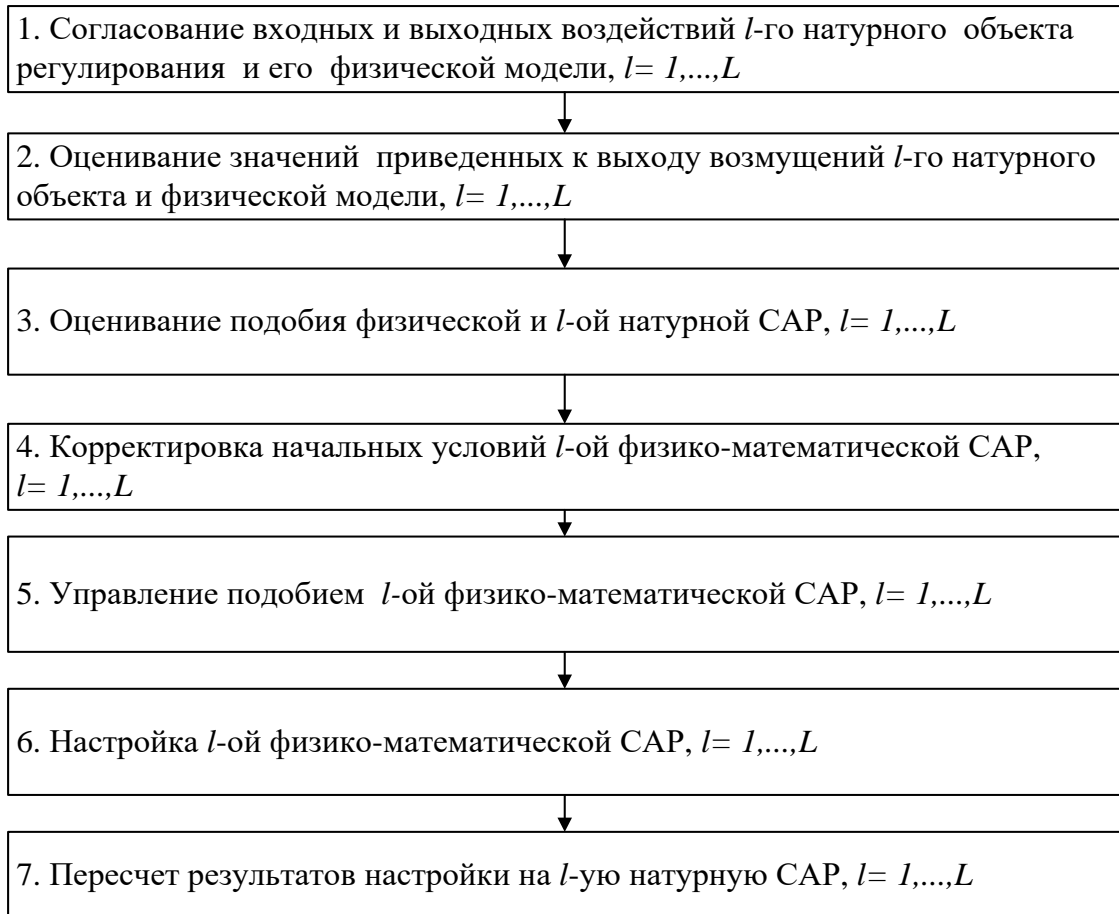


Рисунок 3.3 – Схема процедуры настройки натуральных САР с применением МВСУФМ

Примеры настройки представлены в разделе 3.4.

**Заключение.** Применение многовариантных систем управления физико-математическими моделями является целесообразным для настройки систем автоматического регулирования технологических объектов, в том числе и углеобогачительных фабрик, а также в процессах обучения студентов вузов и работников соответствующих служб промышленных предприятий и организаций.

### **3.4. Настройка систем автоматического регулирования технологических агрегатов углеобогачительных фабрик с применением методов подобия и физико-математических моделей**

Современный темп строительства и ввода в эксплуатацию промышленных объектов не позволяет заниматься традиционной поэтапной настройкой систем управления. Пусконаладочные испытания технологического оборудования

проводятся уже с действующей системой автоматизации, от которой требуется корректная работа [74]. Прокрутка оборудования «вхолостую» или на наладочных базовых уровнях (низкая производительность, вода вместо тяжелой среды и т.д.) не позволяет оценивать фактические параметры объекта и проводить его корректную идентификацию. Методы подобия позволяют учесть уже существующие контуры регулирования и опираться на полученные ранее результаты. Ниже приведена постановка задачи такой настройки.

Обогащение в тяжелых средах – метод обогащения полезных ископаемых, основанный на различной плотности разделяемых компонентов и тяжёлой среды (плотность которой больше плотности воды). Применяется для всех видов твёрдых горючих ископаемых (углей, сланцев), руд чёрных и цветных металлов, фосфатных руд и строительного щебня. Для эффективного ведения процесса обработки руд в тяжелых средах достаточно иметь разницу в плотности руды и породы, равную 0,1 [75].

В углеобогащении широкое распространение получили тяжелосредные сепараторы и тяжелосредные гидроциклоны, которые применяют практически на всех современных обогатительных фабриках. Вопросы управления данными агрегатами как объектами с положительной обратной связью подробно рассматриваются в [80-84].

Подробное решение задачи настройки системы автоматического регулирования рассмотрим на примере контура обогащения угля в тяжелосредном сепараторе и гидроциклоне на ОФ «Матюшинская» с помощью физической модели.

Постановка задачи настройки САР.

**Дано.**

1. Математическая модель каналов преобразования регулирующих воздействий для тяжелосредного сепаратора и для тяжелосредного циклона, представленная в виде

$$\varphi(s) = \frac{k}{Ts + 1} \cdot e^{-\tau s}, \quad (3.18)$$

где  $k$  – коэффициент передачи,  $T$  – постоянная времени инерции,  $\tau$  – время чистого запаздывания.

2. Параметры  $k$ ,  $T$  и  $\tau$  модели объектов регулирования (тяжелосреднего сепаратора и тяжелосреднего гидроциклона), оценки которых приведены в виде следующих диапазонов [41].

Диапазоны значений параметров каналов преобразования регулирующих воздействий для тяжелосреднего сепаратора следующие:

$$\begin{aligned} -2,34 \leq k_1 \leq -1,78 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\% \text{ хода}}; k_1^{cp} = -2; \\ 8 \leq T_1 \leq 14 \text{ с}; T_1^{cp} = 12; \\ 5 \leq \tau_1 \leq 8 \text{ с}; \tau_1^{cp} = 7. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Диапазоны значений параметров каналов преобразования регулирующих воздействий для тяжелосредних гидроциклонов:

$$\begin{aligned} -2,03 \leq k_2 \leq -1,37 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\% \text{ хода}}; k_1^{cp} = -1,8; \\ 7 \leq T_2 \leq 12 \text{ с}; T_1^{cp} = 11; \\ 5 \leq \tau_2 \leq 7 \text{ с}; \tau_1^{cp} = 6. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Значения этих коэффициентов были оценены на этапе проектирования и в дальнейшем уточнены экспериментально при внедрении, в «местном» и «дистанционном» режимах их функционирования [85-86].

3. Приведенные к выходу натуральных объектов возмущения, оценки которых были рассчитаны по известной схеме [26] на основе исходных данных о функционировании натуральных САР с использованием средних значений коэффициентов  $k$ ,  $T$  и  $\tau$  из диапазонов (3.19) и (3.20).



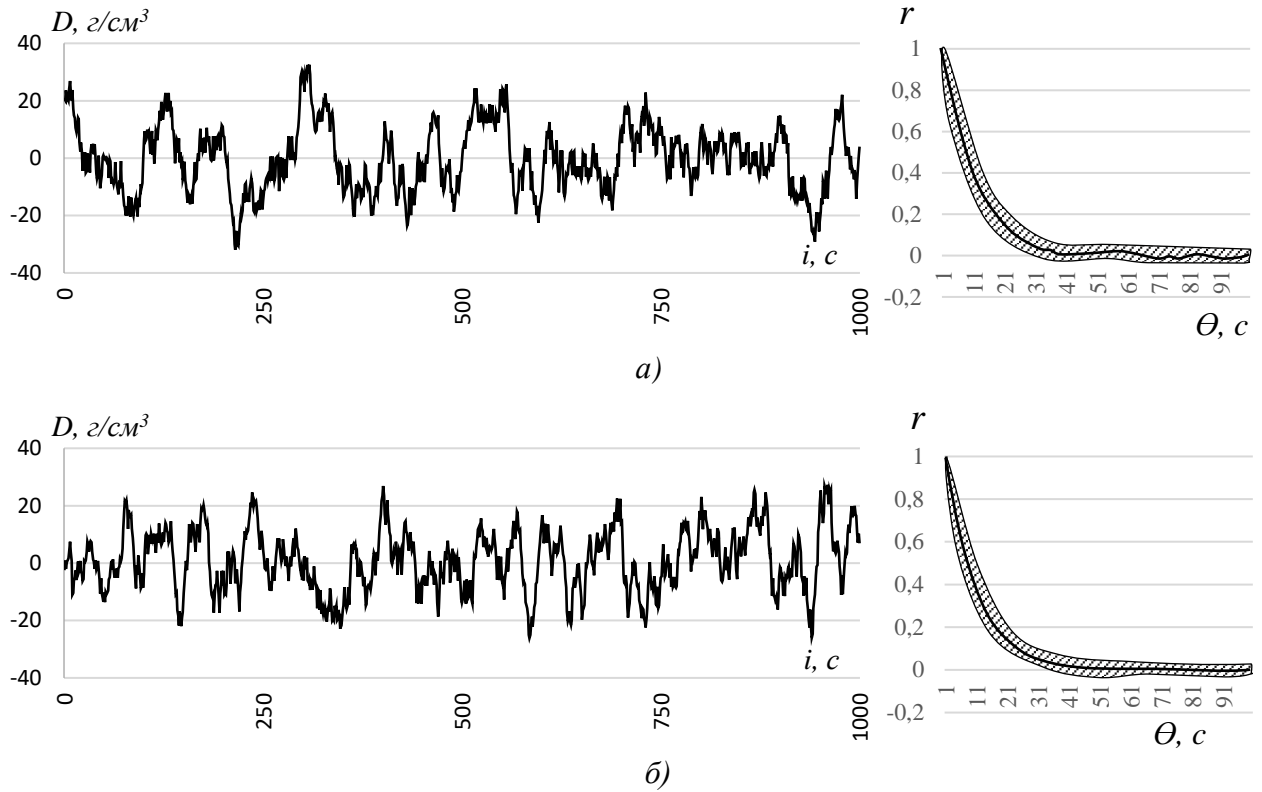


Рисунок 3.4 — Приведенные к выходу возмущения и их нормированные АКФ  
 а) тяжелосреднего сепаратора; б) тяжелосреднего гидроциклона

Автокорреляционные функции (АКФ) приведенных возмущений (рисунок 3.4) были аппроксимированы выражением:

$$r_{np}(\theta) = \sigma_{np}^2 \cdot e^{-\alpha_{np} \cdot |\theta|}, \quad (3.21)$$

где  $\sigma_{np}^2$  – дисперсия приведенного возмущения,  $\alpha$  – коэффициент АКФ,  $\theta$  – время сдвига между сечениями ряда приведенного возмущения.

Средние значения характеристик приведенного возмущения

– для тяжелосреднего сепаратора

$$\sigma_{np} = 11,05 \left( \frac{kg}{m^3} \right); \quad \alpha_{np} = 0,11; \quad (3.22)$$

– для тяжелосреднего гидроциклона

$$\sigma_{np} = 10,10 \left( \frac{kg}{m^3} \right); \quad \alpha_{np} = 0,17. \quad (3.23)$$

4. Пропорционально-интегральный закон регулирования с передаточной функцией

$$f_{nu}(s) = k_n + \frac{k_u}{s}, \quad (3.24)$$

где  $k_n$  и  $k_u$  – коэффициенты при его пропорциональной и интегральной части.

5. Критерии качества функционирования САР в виде среднеквадратических ошибок регулирования

- для тяжелосреднего сепаратора:  $q_1^H$ ;
- для тяжелосреднего гидроциклона  $q_2^H$ ;
- для физической модели  $q^\Phi$ ,

$$q_1^H = 1,104; \quad q_2^H = 1,064; \quad q^\Phi = 0,720;$$

где надстрочные индексы «<sup>H</sup>», «<sup>FM</sup>», «<sup>Φ</sup>» означают «натурный», «физико-математический и «физический», а подстрочный индекс «<sub>1</sub>» и «<sub>2</sub>» – принадлежность к тяжелосреднему сепаратору и тяжелосреднему гидроциклону, соответственно.

6. Многовариантная физико-математическая модель системы управления – МвСУФМ, структура которой соответствует схеме рисунку 3.2. Основой управляемой части МвСУФМ является физическая модель технологической установки [87-88]. Модель канала преобразования регулирующих воздействий физической модели объекта соответствует выражению (3.18); значения ее коэффициентов  $k^\phi = 1,6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}/\%$ ;  $T^\phi = 3,0 \text{ с.}$ ;  $\tau^\phi = 1,0 \text{ с.}$  Приведенные к выходу физической модели возмущения рассчитывали аналогично натурному объекту по схеме [26]. Так же как и для натуральных объектов регулирования нормированная АКФ была аппроксимирована выражением (3.21) со значениями параметров  $\sigma_{np}^\Phi = 1,4 \text{ (}^\circ\text{C)}$ ;  $y_{cp}^\Phi = 1,1 \text{ (}^\circ\text{C)}$ ;  $\alpha_{np}^\Phi = 0,3$ .

Закон регулирования модельной САР описывается выражением (3.24), со следующими значениями его настроечных коэффициентов, соответствующими минимуму среднеквадратической ошибки регулирования:  $k_n^\phi = 1,875$ ;  $k_u^\phi = 0,625$ .

7. Многовариантный генератор модельных и натурно-модельных воздействий (рядов данных) с заданными статистическими свойствами,

позволяющий одновременно формировать требуемое конечное число таких рядов данных.

**Требуется.** Определить значения настроечных коэффициентов  $k_{II}$  и  $k_{III}$  пропорционально-интегрального закона регулирования для натуральных САР плотности суспензии тяжелосредного сепаратора и тяжелосредного гидроциклона.

**Решение** поставленной задачи осуществляли с использованием МвСУФМ, конкретизированной для САР технологических объектов, и процедуры одновременной настройки обеих физико-математических систем в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.4 для  $l = \overline{1,2}$ .

1. Согласование входных и выходных воздействий натурального объекта регулирования и физической модели возмущений осуществляли в данном примере приведением их к безразмерным данным путем нормирования по выражению

$$Z_n = \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}}; \quad Z = \{Y; y_{np}; U\}, \quad (3.25)$$

где  $Z_{\max}$  и  $Z_{\min}$  – максимальные и минимальные значения соответствующих переменных.

2. Расчет приведенных к выходу рассматриваемых натуральных объектов и физической модели возмущений осуществляли по единой схеме [26] для безразмерных данных.

3. Подобие натуральных САР плотности суспензии тяжелосредного сепаратора и тяжелосредного гидроциклона с модельной САР, регулируемой частью которой является физическая модель, оценивали с помощью коэффициента корреляции между характеристиками и по мере близости значений характеристик целевых показателей, отражающих эффективность функционирования этих систем [72]. В качестве последних использовали среднеквадратические ошибки регулирования.

В результате оценивания подобия этих САР получены следующие средневыворочные оценки характеристик:

$$q_1^H = 1,104; \quad q_2^H = 1,064; \quad q^\Phi = 0,720; \quad r_{\Phi n1} = 0,72; \quad r_{\Phi n2} = 0,65,$$

где  $r_{\phi n1}$  и  $r_{\phi n2}$  – соответственно, коэффициент корреляции между  $q_1^H$  и  $q^\phi$ ,  $q_2^H$  и  $q^\phi$ .

Сравнение полученных значений коэффициентов корреляции и характеристик эффективности функционирования САР с требуемыми для их подобия [53, 72-73] позволяет сделать вывод об отсутствии подобия между натурными и модельной САР. Значения коэффициента корреляции между среднеквадратическими ошибками регулирования натуральных и модельной САР существенно меньше требуемого  $r_{\phi} = 0,95 \pm 0,5$ . Этот вывод подтверждают и значения  $\delta q_1^H = |q_1^H - q^\phi| = 0,387$  и  $\delta q_2^H = |q_2^H - q^\phi| = 0,344$ , что намного превышает допустимый уровень их отклонения (10%).

Таким образом отсутствие подобия между обеими натурными системами и модельной САР приводит к необходимости целенаправленно изменять (управлять подобием) динамические свойства модельной САР для установления их подобия.

4. Корректировка начальных условий физико-математической САР была реализована с помощью следующей последовательности операций: 1) размыкание отрицательной обратной связи физико-математической САР; 2) оценивание отклонений регулирующих воздействий натурной и физической САР; 3) пересчет этих отклонений с использованием оператора  $\varphi^{\Phi M} \{ \}$  для расчета  $\delta Y^{\Phi M} \{ \}$ ; 4) далее, в соответствии со схемой на рисунке 3.4, расчет значения выходного воздействия  $Y^{\Phi M} \{ \}$  физико-математической системы регулирования.

Реализация указанных выше операций позволяет установить на выходе физико-математической модели САР значение выходного воздействия, соответствующего его значению натурной системы.

5. Управление подобием для обеих натуральных САР осуществляли как за счет изменений свойств приведенных возмущений с помощью МВ генератора (ЗДС), так и за счет изменений значений параметров оператора  $\varphi^{\Phi M} \{ \}$ . Полученные результаты в виде значений характеристик моделей каналов преобразования регулирующих воздействий и приведенных возмущений подобных САР приведены

ниже в таблице 2. Цифры (1) и (2), приведенные в скобках первой строки таблицы, означают, что все характеристики и параметры, относящиеся к тяжелосредным сепараторам, обозначены в тексте цифрой 1, а к тяжелосредным гидроциклонам – цифрой 2.

Таблица 2 – Значения характеристик подобных САР

	Тяжелосредный сепаратор (1)		Тяжелосредный гидроциклон (2)	
	натурные данные	данные физико-математического моделирования	натурные данные	данные физико-математического моделирования
$\sigma_{np}$	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha_{np}$	0,09	0,54	0,10	0,50
$k$	-2,00	-1,60	-1,80	-1,60
$T$	12,00	2,00	11,00	2,20
$\tau$	6,00	1,00	5,00	1,00
$k_n$	-0,618	0,773	-0,767	0,863
$k_u$	-0,001	0,011	-0,007	0,010
$q$	0,870	0,871	0,883	0,883

На рисунке 3.5 представлена физико-математическая реализация приведенных к выходу возмущений.

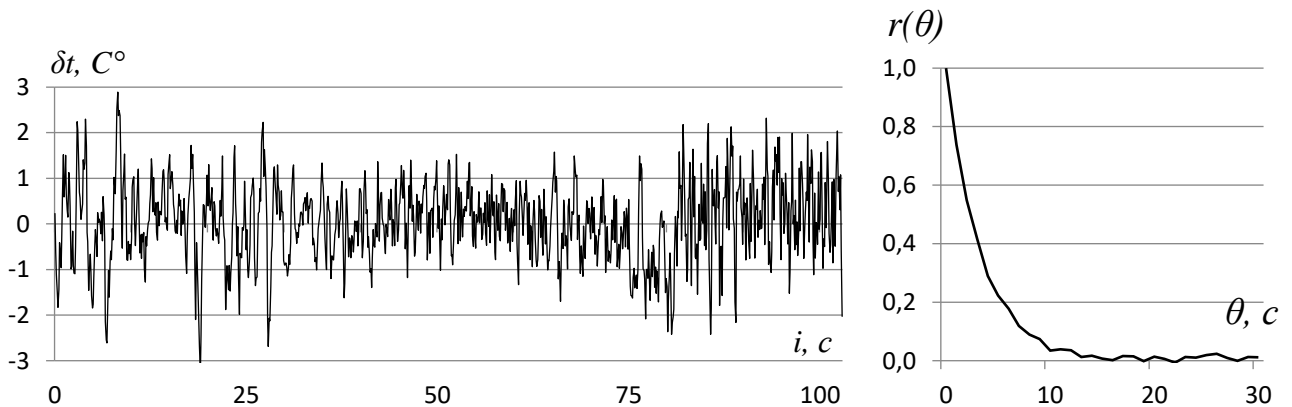


Рисунок 3.5 – Реализация приведенных к выходу ФМ возмущений

6. Настройку модельных САР проводили в режиме физико-математического моделирования с применением поисковых методов оптимизации (деформируемого многогранника [14]) по минимуму среднеквадратической ошибки регулирования. Получили следующие значения параметров настройки САР для безразмерных данных об изменении входных и выходных воздействий физико-математической модели САР

– для тяжелосреднего сепаратора

$$k_{n1}^{\Phi M} = 0,773 ; k_{u1}^{\Phi M} = 0,011 ; q_1^{\Phi M} = 0,871 ; \quad (3.26)$$

– для тяжелосреднего гидроциклона

$$k_{n2}^{\Phi M} = 0,863 ; k_{u2}^{\Phi M} = 0,01 ; q_2^{\Phi M} = 0,883 . \quad (3.27)$$

7. Пересчет значений параметров настройки (3.26) и (3.27) на условия функционирования натуральных САР осуществляли в соответствии с выражениями [65]

$$k_{П1} = k_{П2} \cdot \frac{k_1 \tau_1 T_2}{k_2 \tau_2 T_1} \cdot e^{\frac{1}{\beta} (\alpha_1 \cdot \tau_1 - \alpha_2 \cdot \tau_2)} ; \quad (3.28)$$

$$k_{И1} = K_{И2} \cdot \frac{y_{cp} k_2 \tau_2}{y_{cp} k_1 \tau_1} \cdot e^{\frac{1}{\beta} (\alpha_1 \cdot \tau_1 - \alpha_2 \cdot \tau_2)} . \quad (3.29)$$

Полученные значения указанных параметров также для безразмерных данных, характеризующих изменения воздействий САР приведены ниже под номерами (3.30) и (3.32); во второй строке под номерами (3.31) и (3.33) приведены значения этих же параметров в натуральном масштабе их изменения

– для тяжелосреднего сепаратора

$$k_{n1}^H = -0,618 ; k_{u1}^H = -0,001 ; q_1^H = 0,870 ; \quad (3.30)$$

$$k_{n1}^H = -0,618 \frac{\% \text{ хода} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}} ; k_{u1}^H = -0,001 \frac{\% \text{ хода} \cdot \text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}} ; q_1^H = 9,613 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} ; \quad (3.31)$$

– для тяжелосреднего гидроциклона

$$k_{n2}^H = -0,767 ; k_{u2}^H = -0,007 ; q_2^H = 0,883 . \quad (3.32)$$

$$k_{n2}^H = -0,767 \frac{\% \text{ хода} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}} ; k_{u2}^H = -0,007 \frac{\% \text{ хода} \cdot \text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}} ; q_2^H = 8,918 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} . \quad (3.33)$$

В результате использования значений параметров настройки САР (3.32) и (3.33) в натуральных условиях и их дальнейшего уточнения сделан вывод о высокой эффективности процедуры настройки с использованием физико-математического

моделирования. Отклонения натуральных значений коэффициентов от модельных и значения среднемодульной ошибки регулирования для обеих систем не превышали 10 %. Кроме того, одновременное выполнение модельных экспериментов в процессе настройки САР позволяет значительно сократить временные, а также материально-энергетические ресурсы, связанные с функционированием физической модели.

Немаловажным является и то, что имитационный моделирующий комплекс на базе МвСУФМ может явиться эффективным инструментом в процессе обучения для решения задач испытания, настройки и исследования САР [89].

*Настройка системы автоматического регулирования плотности в тяжелосредном сепараторе на обогатительной фабрике «Шахта №12».*

Постановка задачи и ход настройки САР плотности на ОФ «Шахта №12» (САР 2) соответствует указанной выше, но вместо физической модели используется настроенная ранее система автоматического регулирования на ОФ «Барзасская» (САР 1). Аналогично названия САР используются и далее.

Настройка САР проводилась аналогично, по схеме, указанной на рисунке 3.4. Подобие систем было обеспечено за счёт корректировки схем технологической цепи на этапе проектирования. Параметры объекта управления, приведенных к выходу возмущений, соотношения подобия (3.5), настроечные коэффициенты законов регулирования и отклонения между соответствующими величинами приведены в таблице 3. Примеры переходных процессов при реакции на ступенчатое изменение задания приведены на рисунке 3.6.

Эффективность по отношению к первоначальным параметрам, найденным по известным методикам выше на 33%. Дальнейшая подстройка коэффициентов законов регулирования существенных изменений не дала, что позволяет сделать вывод об оптимальности полученных значений коэффициентов.

Таблица 3 – Значения параметров САР

	САР 1	САР 2	Отклонение (САР1-САР2)
$k$	-1,500	-1,500	-
$T_I$	11,000	15,000	-
$\tau$	1,200	1,600	-
$\alpha_{np}$	0,150	0,150	-
$\sigma_{np}$	1,000	1,000	0,000 усл. ед.
$\tau / T_I$	0,109	0,107	0,002 усл. ед.
$\alpha \tau$	0,180	0,240	0,060 усл. ед.
$K_{II}$	-1,500	-1,320	-
$K_{II}$	-0,003	-0,003	-
$Q_{начальное}$	<b>1,117</b>	<b>1,223</b>	<b>9,490%</b>
$Q_{опт}$	<b>0,816</b>	<b>0,823</b>	<b>0,858%</b>
$ \Delta Q $	<b>27%</b>	<b>33%</b>	-

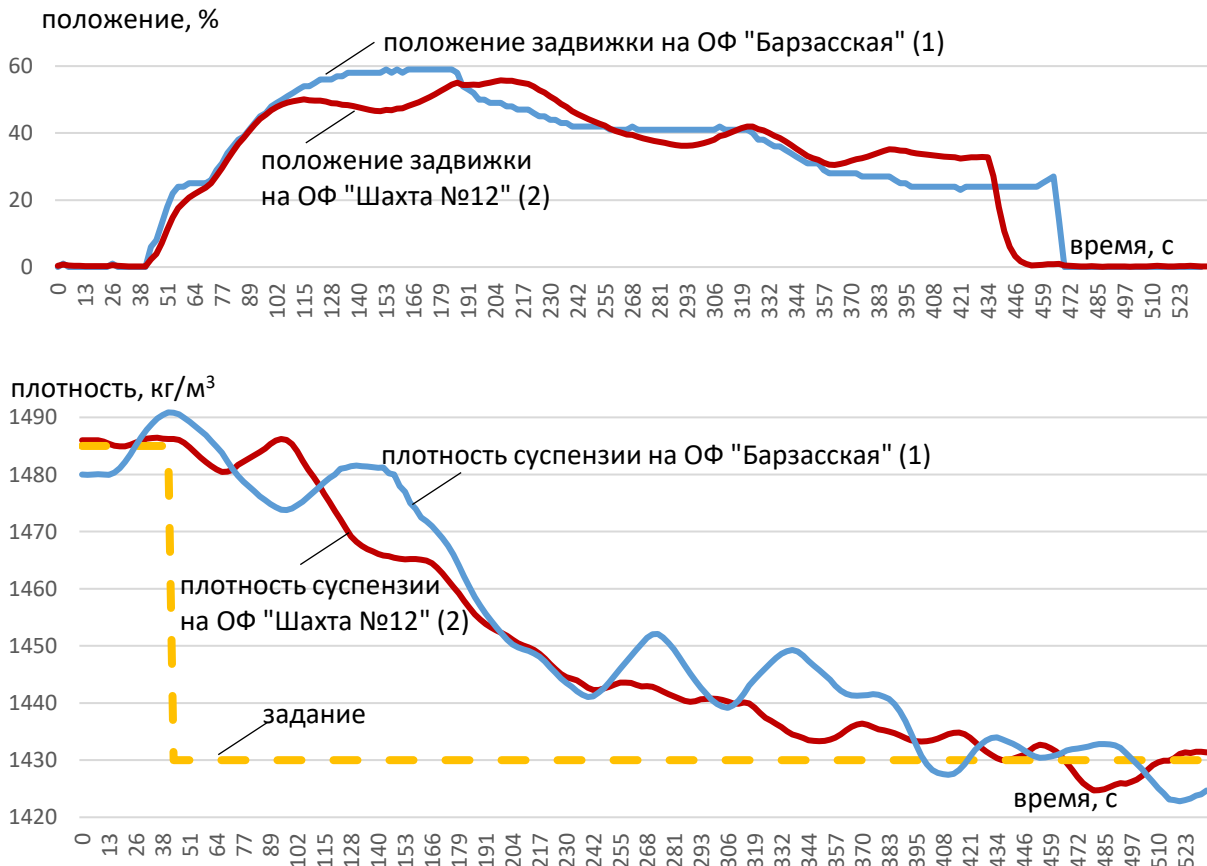


Рисунок 3.6 – Графики плотности суспензии на ОФ «Барзасская» и ОФ «Шахта №12»



*Настройка системы автоматического регулирования давления в тяжелосреднем гидроциклоне на обогатительной фабрике «Шахта №12».*

**Дано.**

1. Система автоматического регулирования давления шлама в тяжелосреднем гидроциклоне на ОФ «Шахта №12» (САР 2) и настроенная ранее система автоматического регулирования на ОФ «Барзаская» (САР 1). Схема цепей аппаратов аналогична и представлена на рисунке 3.7.

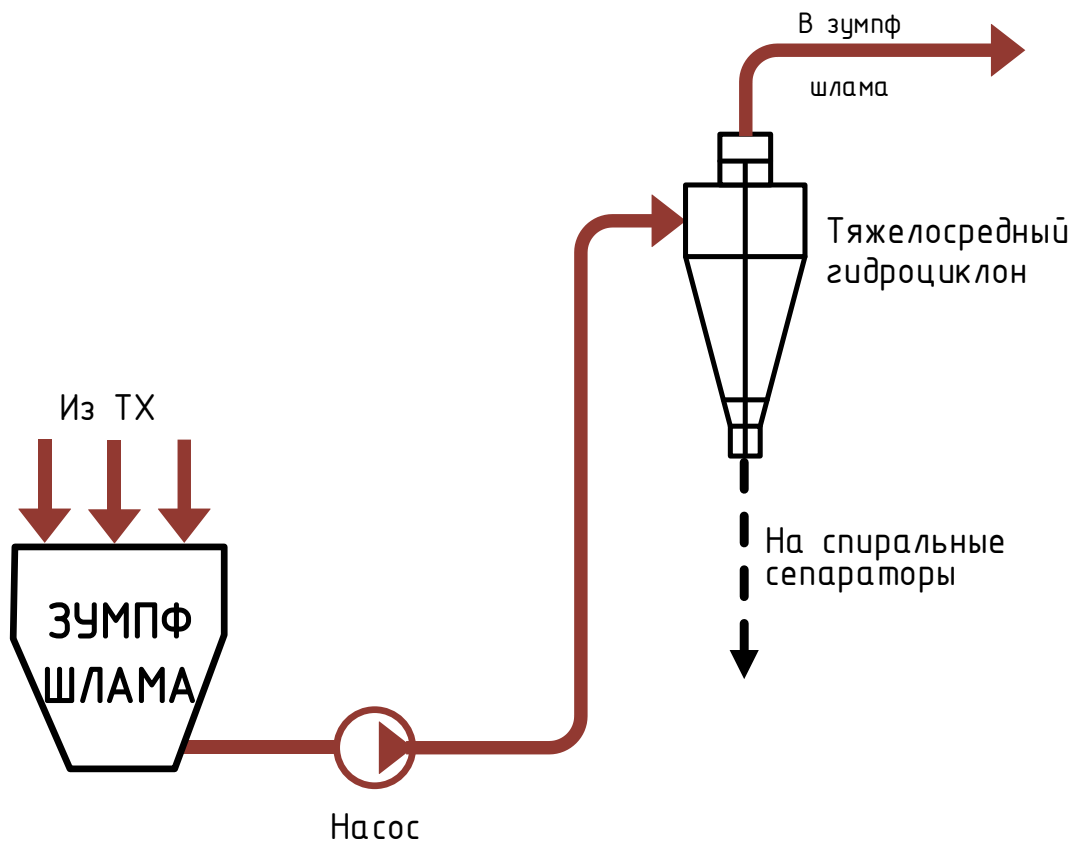


Рисунок 3.7 – Схема цепей агрегатов обогащения угля в тяжелосреднем гидроциклоне

2. Схема решения – рисунок 3.3.

**Требуется.**

Провести настройку системы автоматического регулирования давления.

**Решение.**

Модель объекта представляет собой последовательное соединение двух инерционных звеньев I порядка с запаздыванием, т.к. помимо самого давления в трубопроводе дополнительную инерционность добавляет настройка частотного

преобразователя, в которой установлен переходный процесс длительностью 30 секунд.

При этом в системе есть значительные возмущения, связанные с неравномерностью поступления шлама, плотности шлама, сильному влиянию текущего уровня в зумпфе и др. Пример возмущений на ОФ «Барзасская» при зафиксированных параметрах управляющего воздействия приведен на рисунке 3.8.

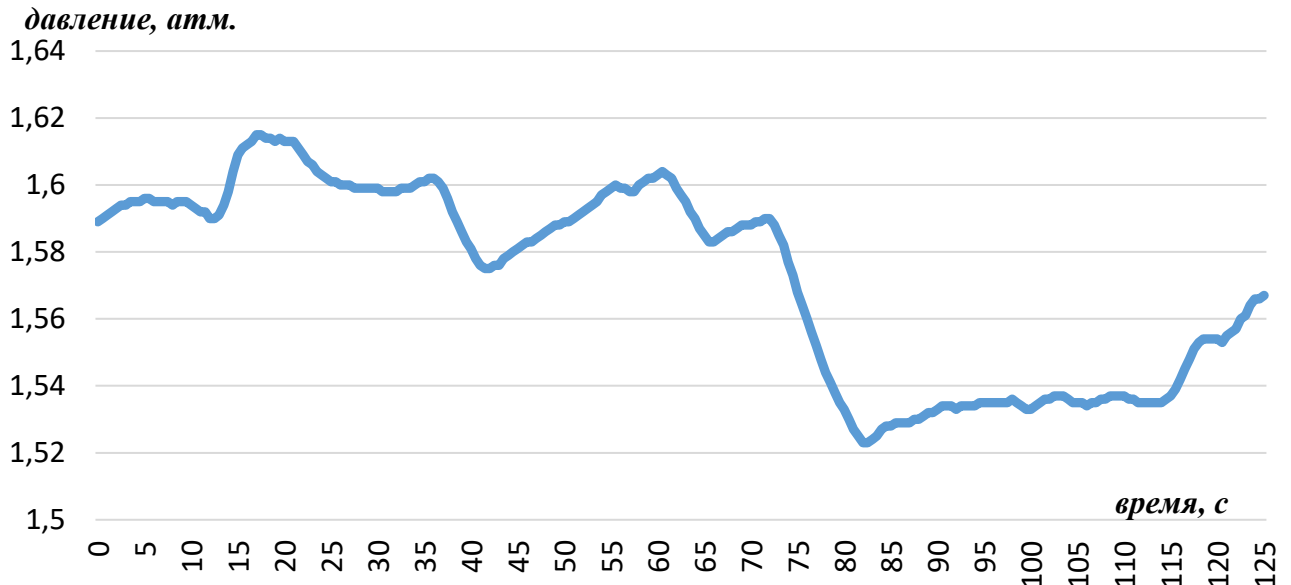


Рисунок 3.8 – Пример приведенных возмущений на ОФ «Барзасская»

В качестве закона регулирования выбран ПИД-закон.

$$f_{\text{ПИД}}(s) = k_{\text{П}} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + k_{\text{Д}}s, \quad (3.24)$$

где  $k_{\text{П}}, k_{\text{И}}, k_{\text{Д}}$  – коэффициенты при его пропорциональной, интегральной и дифференциальной части.

Коэффициенты настройки закона регулирования на ОФ «Барзасская» имеют следующие значения:

$$k_{\text{П}} = 0,246 \% / (\text{атм} \cdot 0,001), \quad k_{\text{И}} = 0,027\% / (\text{атм} \cdot 0,001 \cdot \text{с}), \quad k_{\text{Д}} = 0,061 \text{ 1} / \text{атм} \cdot 0,001 \cdot \text{с}.$$

Параметры объекта управления, приведенных к выходу возмущений, соотношения подобия (3.5), настроечные коэффициенты законов регулирования и отклонения между соответствующими величинами приведены в таблице 4. Примеры переходных процессов при реакции на ступенчатое изменение задания приведены на рисунке 3.9.

Таблица 4 – Значения параметров САР

	САР 1	САР 2	Отклонение (САР1-САР2)
$k$	10,000	14,000	-
$T_1$	30,000	30,000	-
$T_2$	9,000	11,000	-
$\tau$	1,500	2,000	-
$\alpha_{np}$	0,150	0,130	-
$\sigma_{np}$	1,000	1,000	0,000 усл. ед.
$\tau / T_1$	0,050	0,067	0,017 усл. ед.
$\tau / T_2$	0,167	0,182	0,015 усл. ед.
$\alpha \tau$	0,225	0,260	0,035 усл. ед.
$K_{II}$	0,246	0,121	-
$K_{II}$	0,027	0,046	-
$K_{Д}$	0,061	0,037	-
$Q_{начальное}$	<b>1,217</b>	<b>1,345</b>	<b>10,518%</b>
$Q_{опт}$	<b>0,827</b>	<b>0,791</b>	<b>4,353%</b>
$ \Delta Q $	<b>32%</b>	<b>41%</b>	-

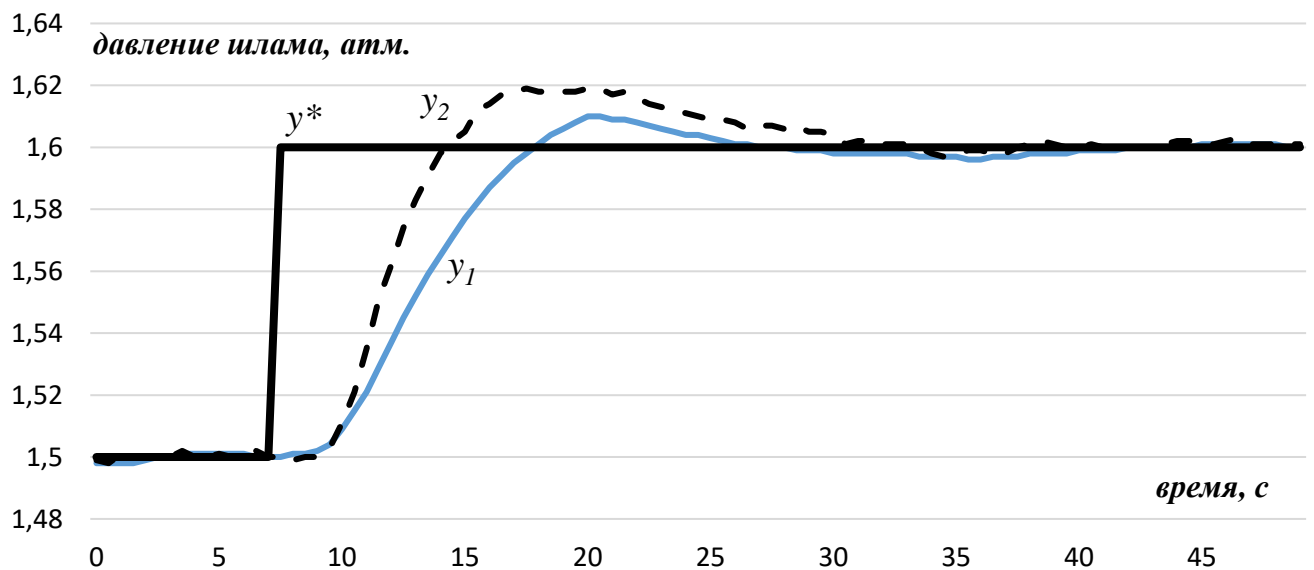
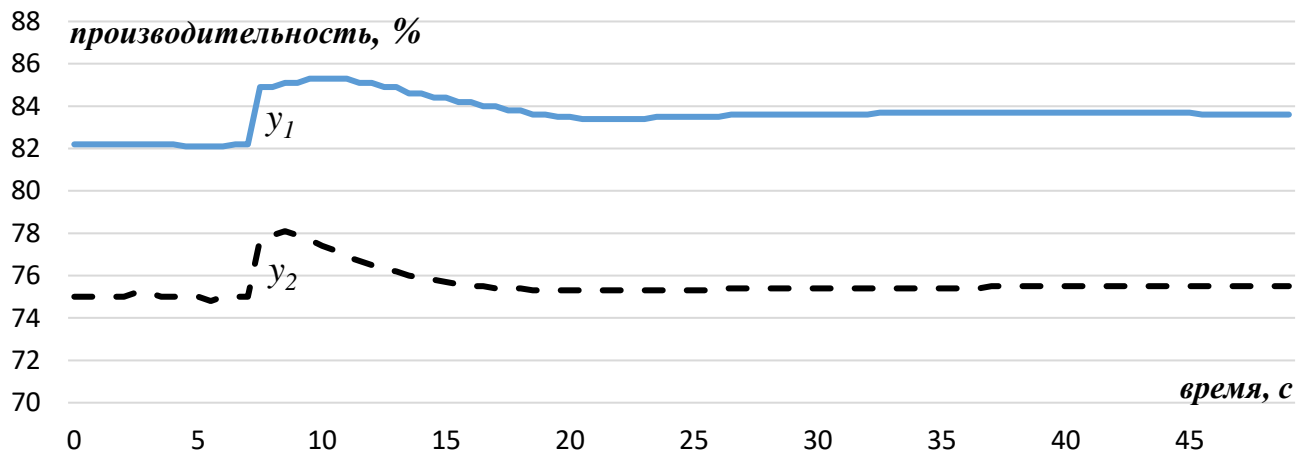


Рисунок 3.9 – Графики давления шлама на ОФ «Барзасская» и ОФ «Шахта №12»

Эффективность по отношению к первоначальным параметрам, найденным по инженерным методикам выше на 41%. Дальнейшая подстройка коэффициентов законов регулирования существенных изменений не дала, что позволяет сделать вывод об оптимальности полученных значений коэффициентов.

***Настройка системы автоматического регулирования уровня фильтра на обогатительной фабрике «Шахта №12».***

**Дано.**

1. Система автоматического регулирования уровня фильтра на ОФ «Шахта №12» (САР 2) и настроенная ранее система автоматического регулирования на ОФ «Барзасская» (САР 1). Схема цепей аппаратов аналогична и представлена на рисунке 3.10.

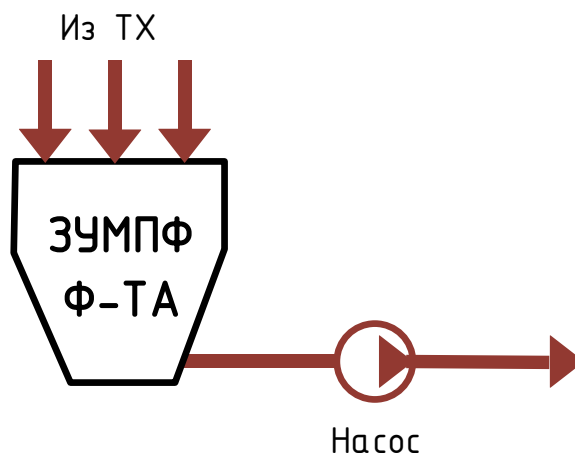


Рисунок 3.10 – Схема цепей агрегатов контура поддержания уровня

Число такого вида контуров на обогатительной фабрике может быть достаточно большое. Сложность регулирования заключается в нестационарности возмущений, поскольку в зумпф поступает фильтрат со многих источников, а его количество не контролируется – от различных локальных систем (например, дисковых вакуум-фильтров), насосов перекачки, локальных автоматических контуров откачки прямков и т.д.

Параметры модели объекта управления зависят от объема и формы бака, диаметра трубопровода, производительности насосов, настройки частотного преобразователя насоса. Возмущения чаще всего вызваны резкими включениями нескольких потоков из технологических контуров в различных сочетаниях.

Таблица 5 – Значения параметров САР

	САР 1	САР 2	Отклонение (САР1-САР2)
$k$	1,800	2,000	-
$T_I$	30,000	30,000	-
$\tau$	3,000	4,000	-
$\alpha_{np}$	0,150	0,130	-
$\sigma_{np}$	1,000	1,000	0,000
$\tau / T_I$	0,100	0,133	0,033
$\alpha \tau$	0,450	0,520	0,070
$K_{П}$	1,300	0,737	-
$K_{И}$	0,027	0,034	-
$Q_{начальное}$	<b>1,125</b>	<b>1,217</b>	<b>8,178%</b>
$Q_{опт}$	<b>0,876</b>	<b>0,854</b>	<b>2,511%</b>
$ \Delta Q $	<b>22%</b>	<b>30%</b>	-

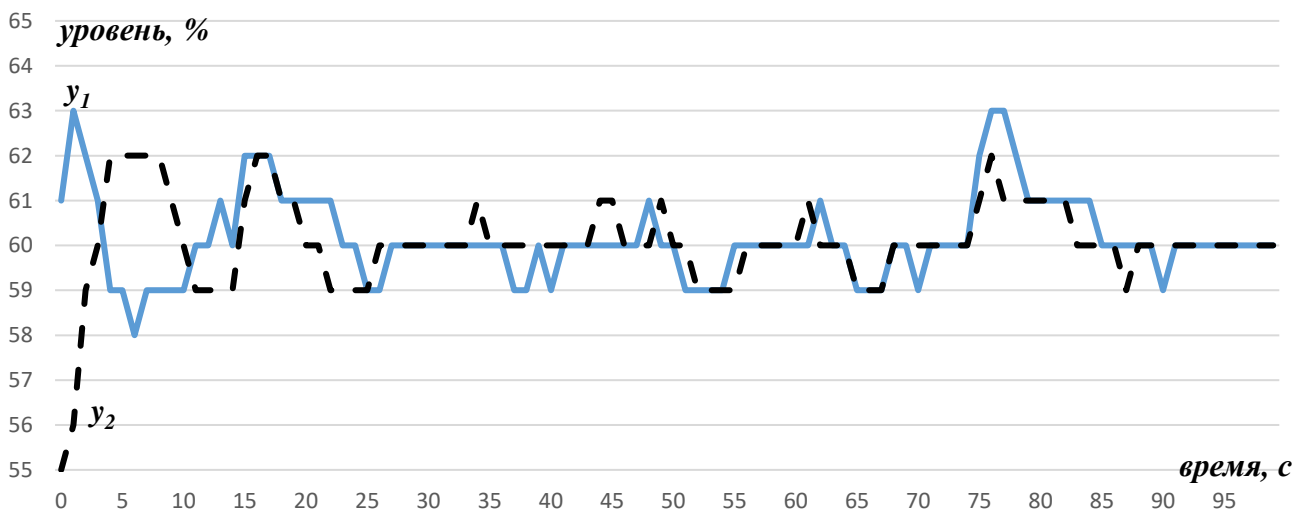
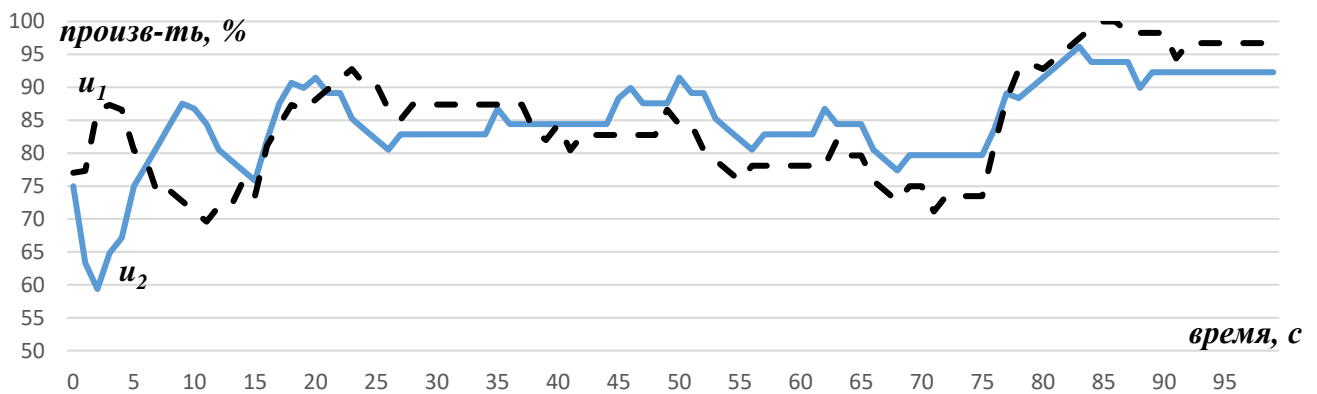


Рисунок 3.11 – Графики уровней фильтра на ОФ «Барзасская» и ОФ «Шахта №12»

В соответствии с представленными примерами были настроены аналогичные контуры поддержания плотности, давления и уровня на ОФ «Барзасская» и ОФ «Шахта №12».

Предложенные в работе методы и алгоритмы были применены для создания систем автоматизации управления на промышленных объектах, указанных в таблице 6.

Таблица 6 – Объекты и решенные задачи с помощью методов теории подобия систем управления

№	Наименование объекта	Задачи
1	ОФ «Матюшинская», г. Прокопьевск (2012 г.)	Настройка 2 контуров регулирования плотности суспензии на тяжелосредних сепараторе и гидроциклоне (+23% точности)
2	ОФ «Энергетическая», г. Калтан (2014 г.)	Проектирование и настройка 3 контуров регулирования плотности суспензии на тяжелосредних сепараторе и гидроциклоне (время разработки –40%, точность +25%)
3	ЦОФ «Берёзовская», г. Березовский (2017, 2018 гг.)	Проектирование контуров регулирования: - плотности суспензии на тяжелосреднем гидроциклоне; - давления пульпы на тяжелосреднем гидроциклоне; - подачи флотореагентов. Время разработки –40%.
4	ОФ «Барзасская», г. Березовский (2017- 2019 гг.)	Проектирование и настройка контуров регулирования: - подачи флотореагентов (точность +17%); - уровней в емкостях флото-фильтровального отделения (точность +15%); - давления пульпы на 2 тяжелосредних гидроциклонах (точность +30%); - плотности суспензии на тяжелосреднем сепараторе (точность +27%); - уровней в 5 емкостях главного корпуса и модуля обогащения (точность +35%). Общее время разработки –40%.
5	ОФ «Шахта №12», г. Киселевск (2019-2021 гг.)	Проектирование и настройка контуров регулирования: - давления и плотности пульпы на 2 тяжелосредних гидроциклонах (точность +41%); - плотности суспензии на 2 тяжелосредних сепараторах (точность +33%); - уровней в 15 емкостях главного корпуса (точность +35%). Общее время разработки –50%.

В таблице 6 указаны значения показателей точности и времени разработки относительно известных применяемых методов.

В приложениях А и Б представлены справки о внедрении описанных в работе методов и алгоритмов.

### **Выводы**

1. Разработанную общую схему настройки САР с применением МВМСУ и методов подбора целесообразно рассматривать как основу новой методики одновременной настройки конечного множества САР, применение которой позволит уменьшить затраты средств и времени на настройку этих САР при обеспечении требуемой точности их функционирования.

2. Предложенные в работе методы и алгоритмы были применены при создании систем автоматизации управления на следующих промышленных объектах ОФ «Матюшинская» (г. Прокопьевск, 2012 г.), ОФ «Энергетическая» (г. Калтан, 2014 г.), ЦОФ «Берёзовская» (г. Березовский, 2017-2018 гг.), ОФ «Барзасская» (г. Березовский, 2017- 2019 гг.), ОФ «Шахта №12» (г.Киселевск, 2019-2021 гг.), что позволило повысить точность регулирования на 15-30% и сократить время на проектирование и пусконаладочные работы на 40-50%.

Разработки удостоены Гран-При и Золотой медали Международной выставки-ярмарки «Уголь и Майнинг» 2015 – 2017г.г.

По материалам диссертации опубликовано 42 печатные работы, в том числе 5 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК, 7 статей в базе данных Scopus, 32 статьи в научно-технических сборниках и 2 свидетельства о регистрации программы ЭВМ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Для обоснованного пересчета результатов решения задач теории и практики управления с одной системы на другую необходимо, чтобы системы управления были подобны.

2. Традиционные методы подобия, опирающиеся на математические модели фундаментальных дисциплин, являются эффективными для неуправляемых объектов и протекающих в них процессов. Это требует их существенных дополнений и развития для систем управления, где используются принципиально отличные модели, совместно отображающие как динамику каналов преобразования внешних воздействий объекта, так и свойства самих воздействий.

3. Сформулированные утверждения (аксиомы) подобия систем управления, базирующиеся на анализе целевых показателей функционирования систем, целесообразно рассматривать как основу развития теории подобия систем управления и использовать для разработки методов и алгоритмов оценивания и управления их подобием.

4. Предложены методы оценивания подобия систем управления, в основу которых положены как процедуры сравнения значений целевых системных показателей (выражение (1.32)), так и специальные соотношения подобия, которые отражают существующие в подобных системах управления взаимосвязи между характеристиками внешних воздействий, каналов их преобразования в объекте и алгоритмами управления. Разработана схема укрупненного алгоритма оценивания подобия систем управления, который может быть положен в основу реализации любого метода оценивания.

5. Разработана общая структура системы управления подобием систем управления, предназначенная для выработки и реализации целенаправленных воздействий на изменение динамических свойств объектов, внешних воздействий и алгоритмов управления, направленных на выполнение условий их подобия.



6. Полученные соотношения совместного подобия объектов и воздействий и соотношения подобия законов регулирования (табл.1) необходимо рассматривать как соотношения подобия САР в целом, которые позволяют оценить подобие САР для зафиксированных моделей преобразующих каналов, законов регулирования и приведенных к выходу объекта возмущений с экспоненциальной АКФ. Полученные выражения могут быть использованы для пересчета результатов настройки САР с одной подобной системы на другую.

7. Разработан в составе ИМК многовариантный генератор стационарных воздействий с заданными статистическими свойствами, каждый вариант которого представлен в виде ЗДС, что позволяет одновременно формировать конечное число стационарных рядов данных с различными свойствами на гораздо меньшем интервале моделирования, чем аналогичные известные разработки.

8. Предложена на базе физической модели натурального объекта управления структура МвМСУ, в которой каждый параллельно работающий физико-математический контур регулирования с управляемым подобием (модельная САР) отражает с требуемой точностью динамические свойства и условия функционирования соответствующей этому контуру натурной САР.

9. Выделен класс объектов с системными особенностями, требующих специальных систем управления с новыми типами обратных связей.

10. Разработанную общую схему настройки САР с применением МвМСУ и методов подобия целесообразно рассматривать как основу методики одновременной настройки конечного множества САР, применение которой позволит уменьшить затраты средств и времени на настройку этих САР при обеспечении требуемой точности их функционирования.

11. Предложенные в работе методы и алгоритмы были применены при создании систем автоматизации управления на следующих промышленных объектах ОФ «Матюшинская» (г. Прокопьевск, 2012 г.), ОФ «Энергетическая» (г. Калтан, 2014 г.), ЦОФ «Берёзовская» (г. Березовский, 2017-2018 гг.), ОФ

«Барзасская» (г. Березовский, 2017- 2019 гг.), ОФ «Шахта №12» (г.Киселевск, 2019-2021 гг.), что позволило повысить точность регулирования на 15-30% и сократить время на проектирование и пусконаладочные работы на 40-50%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев, М. А. Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. - 344 с.
2. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия. Уч. пос. для втузов. М., «Высшая школа». 1973. – 296 с.
3. Подобия теория [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Химик» – Электрон. данные – Режим доступа: [<http://www.ximuk.ru/encyklopedia/2/3429.html>] – Загл. с экрана.
4. Гидродинамически подобные потоки [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Научная электронная библиотека. Монографии, изданные в издательстве Российской Академии Естествознания» – Электрон. данные – Режим доступа: [<http://www.monographies.ru/52-2038>] – Загл. с экрана.
5. Критерии гидродинамического подобия [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Научная электронная библиотека. Монографии, изданные в издательстве Российской Академии Естествознания» – Электрон. данные – Режим доступа: [<http://www.rae.ru/monographs/52-2039>] – Загл. с экрана.
6. Число Ньютона (физика) [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Критерий\\_Ньютона](http://ru.wikipedia.org/wiki/Критерий_Ньютона)] – Загл. с экрана.
7. Число Вебера [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Вебера](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Вебера)] – Загл. с экрана.
8. Число Рейнольдса [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Рейнольдса](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Рейнольдса)] – Загл. с экрана.
9. Число Фруда [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Фруда](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Фруда)] – Загл. с экрана.

10. Число Эйлера (физика) [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Эйлера\\_\(физика\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Эйлера_(физика))] – Загл. с экрана.

11. Число Галилея [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Галилея](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Галилея)] – Загл. с экрана.

12. Число Нуссельта [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Нуссельта](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Нуссельта)] – Загл. с экрана.

13. Число Прандтля [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Прандтля](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Прандтля)] – Загл. с экрана.

14. Число Пекле [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Пекле](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Пекле)] – Загл. с экрана.

15. Число Фурье [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Фурье](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Фурье)] – Загл. с экрана.

16. Число Био [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Число\\_Био](http://ru.wikipedia.org/wiki/Число_Био)] – Загл. с экрана.

17. Коэффициент поглощения (оптика) [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент\\_поглощения\\_\(оптика\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_поглощения_(оптика))] – Загл. с экрана.

18. Коэффициент пропускания [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент\\_пропускания](http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_пропускания)] – Загл. с экрана.

19. Коэффициент отражения (оптика) [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент\\_отражения\\_\(оптика\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_отражения_(оптика))] – Загл. с экрана.

20. Показатель адиабаты [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Показатель\\_адиабаты](http://ru.wikipedia.org/wiki/Показатель_адиабаты)] – Загл. с экрана.

21. Коэффициент полезного действия [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент\\_полезного\\_действия](http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_полезного_действия)] – Загл. с экрана.

22. Коэффициент трения (формула) [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Fxyz.ru» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://www.fxyz.ru/формулы\\_по\\_физике/механика/динамика/сила\\_силы/сила\\_трения/коэффициент\\_трения/](http://www.fxyz.ru/формулы_по_физике/механика/динамика/сила_силы/сила_трения/коэффициент_трения/)] – Загл. с экрана.

23. Коэффициент Пуассона [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент\\_Пуассона](http://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_Пуассона)] – Загл. с экрана.

24. Передаточное отношение [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Википедия. Свободная энциклопедия» – Электрон. данные – Режим доступа: [[http://ru.wikipedia.org/wiki/Передаточное\\_отношение](http://ru.wikipedia.org/wiki/Передаточное_отношение)] – Загл. с экрана.

25. Некорректно названные критерии подобия в механике [Электронный ресурс]: Материалы сайта «Физические величины и обобщения» – Электрон. данные – Режим доступа: [<http://physicalsystems.narod.ru/index07.09.2.html>] – Загл. с экрана.

26. Ротач, В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. / В.Я. Ротач. – М.: Энергия, 1973. – 439 с.

27. Копелович, А.П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов / А.П. Копелович. – М.: Гос издат литературы по черной и цветной металлургии, 1960. –192 с.

28. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). Уч. пос. для вузов. М., «Высшая школа», 1976. – 479 с.

29. Мышляев, Л.П. Применение физических моделей в схемах натурно-математического моделирования. / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, С.Р. Зельцер и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. № 11. – С. 65-67.

30. Пугачев, В.Н. Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. / В.Н. Пугачев. - М.: Сов. Радио, 1973. – 256 с.
31. Барковский, В.В. Методы синтеза систем управления. / В.В. Барковский, В.Н. Захаров, А.С. Шаталов.–М.: Машиностроение,1969. – 385 с.
32. Мышляев, Л.П. О динамическом подобии систем управления. / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Д.Г. Березин, Г.В. Макаров. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. Труды VIII Всероссийской научно–практической конференции. Сиб. гос. индустр. ун–т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2011. – С. 34-36.
33. Емельянов, С.В. Теория и практика прогнозирования в системах управления. / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. Кемерово, М.: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвузиздат – АСТШ, 2008. – 487 с.
34. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. 254 с.
35. Новиков, Д.А. Обобщенные решения задач стимулирования в активных системах./ Д.А. Новиков. М.: Институт проблем управления РАН, 1998. –68 с.
36. Рыков, А.С. Методы системного анализа: оптимизация / А.С. Рыков. – М.: НПО «Изд-во экономика», 1999. – 255 с.
37. Емельянов, С.В. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. / Емельянов, С.В., Коровин С.К. // М.: Наука. Физматлит, 1997. — 352 с.
38. Евтушенко, В.Ф. Исследования совместного влияния свойств возмущений и динамики объектов на эффективность системы регулирования (на примере установки сжигания водоугольного топлива) / В. Ф. Евтушенко, Л. П. Мышляев, К. А. Ивушкин, Е. В. Буркова / Научно-технические разработки и использование минеральных ресурсов: сборник научных статей. Сиб. гос. индустр. ун-т: — Новокузнецк, 2013, — с. 189–193. (294 с.)
39. Буркова, Е.В. Исследования совместного влияния свойств возмущений и динамических характеристик объекта на качество регулирования системы / Буркова Е.В., Макаров Г.В. / Сборник научных трудов международного форума-

конкурса молодых ученых «Проблемы недропользования». – Санкт-Петербург: Издательство Национального минерально-сырьевого университета «Горный», 2013. – стр. 274. ISBN 978-5-9421-16.

40. Подчуфаров, Ю.Б. Физико-математическое моделирование систем управления и комплексов / Под ред. А.Г. Шипунова. – М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2002. – 268 с.

41. Грачев, В.В. Разработка системы автоматизации управления углеобогачительной фабрики «Матюшинская» / В.В. Грачев, А.В. Циряпкина, К.Е. Барагичев, В.О. Дмитриев // В сборнике: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве Труды IX Всероссийской научно-практической конференции. 2013. С. 69-71.

42. Евтушенко, В. Ф. Настройка систем автоматического регулирования технологических агрегатов углеобогачительных фабрик с применением многовариантных физико-математических моделей / В. Ф. Евтушенко, Л. П. Мышляев, Г. В. Макаров и др. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов : научный журнал. – 2016. – № 2. - С. 270-279.

43. Циряпкина, А.В. Классификация объектов с рециклом и анализ влияния неопределенностей моделей на эффективность САР этих объектов / Циряпкина А.В., Мышляев Л.П., Ивушкин К.А., Грачев В.В. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 12. С. 925-931.

44. Бурков, В. Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. — 255 с.

45. Макаров, Г.В. Применение имитационного комплекса для совместного моделирования внешних воздействий, объектов и систем управления //Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 8-1. С. 34-39.

46. Банди, Б. Методы оптимизации / Банди Б. – М.: «Радио и связь», 1988. – 350 с.

47. Прикладной анализ случайных процессов / Под ред. С.А. Прохорова. – СНЦ РАН, 2007. – 582 с.

48. Карташов, В.Я. Цифровое моделирование стационарных случайных процессов с заданной корреляционной функцией на основе непрерывных дробей / Управление большими системами: сборник трудов, г. Москва, 2010 г. с.49-91

49. Макаров, Г.В. Генератор воздействий с заданными свойствами как замкнутая динамическая система / Г.В. Макаров, Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Е.В. Буркова // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника, 2014 г. С. 113-119.

50. L'Ecuyer, P. «Efficient and Portable Combined Random Number Generators» Communications of the ACM / Volume 31 Issue 6, June 1988 – p. 742-751.

51. Макаров, Г.В., Формирование временных рядов данных с заданными статистическими свойствами / Г. В. Макаров, Е. В. Буркова, А. В. Зайцев // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве, AS'2013», г. Новокузнецк, СибГИУ, 2013г. – с.403–408.

52. Myshlyayev, L.P. Similarity of control systems / Myshlyayev L.P., Evtushenko V.F., Berezin D.G., Makarov G.V., Ivushkin K.A. // Steel in Translation. 2012. Т. 42. № 12. С. 823-824.

53. Мышляев, Л.П. Подобие систем в задачах управления / Л.П Мышляев, В.Ф Евтушенко, К.А Ивушкин и др. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета, 2012, №2, С. 41-43.

54. Мышляев, Л.П. О подобии натурной и модельной систем при управлении с физической прогнозирующей моделью / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, К.А. Ивушкин, Г.В. Макаров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2013, №12, С. 40-42.

55. Евтушенко, В.Ф. Исследования совместного подобия объектов управления и внешних воздействий / Евтушенко В.Ф., Ивушкин К.А., Мышляев Л.П. и др. // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов сборник научных статей. Новокузнецк: СибГИУ, 2014. С. 195-201.

56. Мышляев Л.П. О развитии теории подобия для систем управления / Мышляев, Л.П., Евтушенко В.Ф., Макаров Г.В. // Системы автоматизации в



образовании, науке и производстве: Тр. X Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием, Новокузнецк, 2017.

57. Evtushenko, V.F., Myshlyayev L.P., Makarov G.V., Ivushkin K.A. and Burkova E.V. // Adjustment of automatic control systems of production facilities at coal processing plants using multivariate physico-mathematical models / V.F. Evtushenko, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, vol. 45, conference 1, 012010. <http://iopscience.iop.org> (SCOPUS).

58. Макаров, Г.В., Евтушенко В.Ф., Лысенко Н.Л. Исследование подобия систем автоматического регулирования с типовыми моделями объектов. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Тр. X Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием, Новокузнецк, 2015. С. 498– 501.

59. Ляховец, М.В. Совместный синтез объекта управления и управляющей подсистемы / Ляховец М.В., Ивушкин К.А., Мышляев Л.П. и др. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2014. Т. 57. № 12. С. 33-36.

60. Мышляев, Л.П. Системные особенности настройки алгоритмов управления / Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Ивушкин К.А. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 333-336.

61. Евтушенко, В.Ф. Исследование систем управления с применением физических моделей / Евтушенко В.Ф., Мышляев Л.П., Ивушкин К.А. и др. // В сборнике: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве Труды X Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). 2015. С. 159-165.

62. Мышляев, Л.П. Развитие автоматизированной системы управления технологическими процессами обогатительной фабрики / Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Ляховец М.В. и др. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 316-323.

63. Киселев, С.Ф. Регулирование плотности магнетитовой суспензии в условиях обогатительной фабрики «Матюшинская» / Киселев С.Ф., Циряпкина

А.В., Линков А.А. и др. // В сборнике: Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов сборник научных статей. 2013. С. 193-198.

64. Саламатин, А.С. Типовые решения по автоматизации технологических объектов на примере углеобогачительных фабрик / А.С. Саламатин, Г.В. Макаров, М.В. Ляховец и др. // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. - Новокузнецк. - 2018. - №4 - С. 331-334.

65. Мышляев, Л.П. Применение физических моделей в задачах испытания и настройки систем управления (на примере установки сжигания водоугольного топлива) / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, В.Ф. Евтушенко и др. // Сб. тр. Международной научно-практической конференции «Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов», г. Новокузнецк, – 2015. – С. 211–218.

66. Авдеев, В.П. К основам натурно – математического моделирования / В.П. Авдеев // Известия вузов. Черная металлургия, – 1979. – № 6. – С. 131– 134.

67. Мышляев, Л.П. Прогнозирование в системах управления. / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко. – Новокузнецк: СибГИУ, 2002. – 358 с.

68. Авдеев, В.П. Производственно-исследовательские системы с многовариантной структурой / В.П. Авдеев, Б.А. Кустов, Л.П. Мышляев / Кузбасский филиал Инж.академии. – Новокузнецк, 1992. – 188 с.

69. Мышляев, Л.П. Генератор модельных воздействий с заданными свойствами как замкнутая динамическая система // Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Г.В. Макаров, Е.В. Буркова. Информационно-телекоммуникационные системы и технологии. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 16-17 октября 2014 г.; Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, 2014. с.402-403.

70. Макаров, Г.В. Многовариантные генераторы сигналов с заданными свойствами / Макаров Г.В., Буркова Е.В. // Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения». Технические науки. Часть 4., г. Новокузнецк, СибГИУ, 2016г. – с.61-65.

71. Евтушенко, В.Ф. Формирование на основе замкнутой динамической системы модельных и натурно-модельных сигналов с заданными свойствами (Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ) / Евтушенко В.Ф., Мышляев Л.П., Макаров Г.В. // Свид. №2014661644 Российская Федерация. Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО СибГИУ (RU); заявл. 17.09.2014; опубл. 10.10.2014, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

72. Мышляев, Л.П. Понятия и условия подобия систем управления / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Д.Г. Березин и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2012, №12, С. 58-60.

73. Евтушенко, В.Ф. Подобие систем управления с прогнозирующими физическими моделями / В.Ф. Евтушенко, С.Н. Старовацкая, Л.П. Мышляев, К.А. Ивушкин // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве : тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. СибГИУ. - Новокузнецк, 2013. - С. 32–38.

74. Грачев, В.В. Испытание и наладка средств и систем автоматизации / Грачев В.В., Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф. и др. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2014. № 2 (8). С. 44-47.

75. Обогащение в тяжелых средах: [Электронный ресурс]: Горная энциклопедия. URL: <http://www.mining-enc.ru/o/obogaschenie-v-tyazhelyx-sredax>. (Дата обращения: 04.12.2020).

76. Глухих, С.Г. Анализ и перспективы обогащения углей в тяжелосредних гидроциклонах / Горный научно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2003. – том 3. – С. 141-142.

77. Поваров, А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках / А.И. Поваров. – М.: Недра., 1978. – 267 с.

78. Мышляев, Л.П. Автоматизация управления углеобогатительными фабриками / Л.П. Мышляев, С.Ф. Киселев, А.А. Ивушкин и др. / СибГИУ. – Новокузнецк, 2003. – 304 с.

79. Циряпкина, А.В. Автоматизация тяжелосредних установок углеобогащения как объектов с рециклом / А.В. Циряпкина, Л.П. Мышляев, К.А. Ивушкин // Сборник научных трудов международной конференции «Современные

инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2015», Украина, Днепрпетровск, 2015. – С. 243-250.

80. Циряпкина, А.В. Исследование САР объекта с рециклом «по параметрам» / А.В. Циряпкина, Л.П. Мышляев, К.А. Ивушкин, И.А. Леонтьев // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей международной научно-практической конференции. - Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2016. – С. 364-369.

81. Мышляев, Л.П. Регулирование плотности магнетитовой суспензии при обогащении углей / Мышляев Л.П., Макаров В.Н., Циряпкина А.В. и др. // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» AS'2013. - Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2013. - С. 131-134.

82. Ивушкин, К.А. Система координатно-параметрического управления объектом с рециклом / Ивушкин К.А., Циряпкина А.В., Киселев С.Ф., Ивушкин А.А. и др. / Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей международной научно-практической конференции. - Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2014. – С. 201-210.

83. Патент на изобретение 2457528 Российской Федерации, МПК G05B13/00 Система регулирования объекта с рециклом/ Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Циряпкина А.В.

84. Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Венгер К.Г. и др. Система регулирования объекта с рециклом // Бюллетень евразийского патентного ведомства 021192 В1, № 2011130360/08.

85. Емельянов, С.В. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления / Емельянов С.В., Коровин С.К., Мышляев Л.П. и др. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – 307 с.

86. Мышляев, Л.П. Опыт идентификации промышленных объектов в системах управления / Л.П. Мышляев, Е.И. Львова, А.А. Ивушкин // Изв.вузов. Черная металлургия, 2005. - №6. – С. 163 -166.

87. Мышляев, Л.П. Автоматизация управления подготовкой и сжиганием водно-шламового топлива / Мышляев Л.П., Мочалов С.П., Ивушкин К.А., Киселев С.Ф., Венгер К.Г., Березин Д.Г. // В сборнике: Научно-практические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. Сибирский государственный индустриальный университет. 2012. С. 49-52. 88. Мочалов, С.П. Система автоматизации управления технологическим процессом подготовки и сжигания водно-шламового топлива / Мочалов С.П., Мышляев Л.П., Ивушкин А.А. и др. // Уголь. 2012. № 10 (1039). С. 45-48.

89. Мышляев, Л.П. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: Монография в 3-х т. Т.2: Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин и др.; Под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

**НИЦ СУ**

ООО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ»

РФ, 654005 Кемеровская обл. – Кузбасс, г.Новокузнецк,  
пр. Строителей (Центральный р-он), 55А, оф 25,  
E-mail mail@nicsu.ru

Заместитель директора  
ООО «Научно-исследовательский  
центр систем управления»  
к.т.н., доцент В.В. Грачев

№ 10/06-21 от «16» июня 2021 г.  
на № \_\_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

### СПРАВКА

об использовании и внедрении результатов диссертационной работы Г.В. Макарова  
«Развитие методов и алгоритмов теории подобия для систем управления»

Результаты диссертационной работы Г.В. Макарова по математическому, алгоритмическому и информационному обеспечению использованы при проектировании систем автоматизации управления следующими углеобогатительными фабриками (ОФ).

№	Наименование объекта	Задачи
1	ОФ «Матюшинская», г. Прокопьевск (2012 г.)	Настройка 2 контуров регулирования плотности суспензии на тяжелосредных сепараторе и гидроциклоне (+23% точности)
2	ОФ «Энергетическая», г. Калтан (2014 г.)	Проектирование и настройка 3 контуров регулирования плотности суспензии на тяжелосредных сепараторе и гидроциклоне (время разработки –40%, точность +25%)
3	ЦОФ «Берёзовская», г. Березовский (2017, 2018 гг.)	Проектирование контуров регулирования: - плотности суспензии на тяжелосредном гидроциклоне; - давления пульпы на тяжелосредном гидроциклоне; - подачи флотореагентов. Время разработки –40%.
4	ОФ «Барзасская», г. Березовский (2017- 2019 гг.)	Проектирование и настройка контуров регулирования: - подачи флотореагентов (точность +17%); - уровней в емкостях флото-фильтровального отделения (точность +15%); - давления пульпы на 2 тяжелосредных гидроциклонах (точность +30%); - плотности суспензии на тяжелосредном сепараторе (точность +27%); - уровней в 5 емкостях главного корпуса и модуля обогащения (точность +35%). Общее время разработки –40%.
5	ОФ «Шахта №12», г. Киселевск (2019-2021 гг.)	Проектирование и настройка контуров регулирования: - давления и плотности пульпы на 2 тяжелосредных гидроциклонах (точность +41%); - плотности суспензии на 2 тяжелосредных сепараторах (точность +33%); - уровней в 15 емкостях главного корпуса (точность +35%). Общее время разработки –50%.

Заместитель директора,  
к.т.н., доцент

Главный инженер проектов,  
к.т.н., доцент



В.В. Грачев

М.В. Ляховец

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ШАХТА № 12» (ООО «ШАХТА № 12»)  
ул. Чумова, д. 2а, г. Киселевск, Кемеровская обл., 652705  
ОКПО 22928033, ОГРН 1034220000870, ИНН/КПП 4220023963/421101001

ГРУППА ПРЕДПРИЯТИЙ АО «СТРОЙСЕРВИС»

Тел./факс: (38464) 3-41-03, (38464) 3-41-04  
sh12priemnaya@stroysevis.com  
shahta12@stroysevis.com  
stroysevis.com

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



**Начальник отдела АСУ ТП  
ОФ ООО «Шахта №12»  
С.Ю. Коршунов**

*об использовании и  
внедрении результатов  
диссертационной  
работы Г.В. Макарова  
«Развитие методов и  
алгоритмов теории  
подобия для систем  
управления»*

### Справка

Результаты диссертационной работы Г.В. Макарова по математическому, алгоритмическому и информационному обеспечению использованы при проектировании и внедрении системы автоматизации управления углеобогадательной фабрикой «Шахта №12».

Проектирование и настройка контуров регулирования:

- давления и плотности пульпы на 2 тяжелосредных гидроциклонах (точность +41%);
- плотности суспензии на 2 тяжелосредных сепараторах (точность +33%);
- уровней в 15 емкостях главного корпуса (точность +35%).

**Начальник отдела АСУ ТП ОФ  
ООО «Шахта №12»**

**С.Ю. Коршунов**

