

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 (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Мышляев Леонид Павлович
Официальные оппоненты	Лавров Владислав Васильевич , доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург Майстренко Андрей Васильевич , кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, г. Томск
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

Защита состоится «10» февраля 2022 г. в 15:15 на заседании диссертационного совета 24.2.415.02 при «Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники» по адресу 634050, Томская область, Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу:

г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте:

<https://postgraduate.tusur.ru/urls/qsherykl>

Автореферат разослан _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Зайченко Татьяна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 переноса полученных результатов модельных исследований на создаваемые натурные системы управления. Такой перенос 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»; грантом ректора Сибирского государственного индустриального университета «Разработка и модернизация алгоритмов и программ имитационного комбинированного комплекса для задач исследования систем управления» (№ государственной регистрации 114110570044); создание систем автоматизации управления техническим комплексом углеобогачительных фабрик «Центральная обогатительная фабрика Берёзовская» (г. Березовский), «Калтанская-Энергетическая» (г. Калтан), «Матюшинская» (г. Прокопьевск), «Шахта №12» (г. Киселевск), перевооружение системы автоматизации управления углеобогачительной фабрики «Барзасская» (г. Березовский).

Цель и задачи диссертации. Развитие и применение для технологических комплексов 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 объекта 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 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 «ЦОФ Берёзовская», г. Берёзовский. Проведено перевооружение системы автоматизации управления ОФ «Барзасская» (г. Березовский). Результаты внедрения подтверждаются справками об использовании и внедрении результатов диссертационной работы Г.В. Макарова «Развитие методов и алгоритмов теории подобия для систем управления», выданной организацией ООО «НИЦ СУ» и ООО «Шахта №12». 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;
- 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 углеобогатительных фабрик.

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 систем автоматического регулирования (САР) и ее практического применения; методики проектирования систем автоматического управления с учетом подобия, разработка и внедрение промышленных систем автоматизации.

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» 2016 – 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы развития и применения методов, моделей и алгоритмов теории подобия для систем управления, сформулированы цель и задачи диссертации, ее научная новизна и практическая значимость.

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.

По результатам анализа доступных отечественных и зарубежных публикаций были сделаны выводы.

1. 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.

2. 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.

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.

Для конструктивного развития основных положений подобия систем управления сформулированы основополагающие 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

$$\begin{aligned} & \|Q_{j\{(t-T),t\}}^n - Q_{l\{(t-T),t\}}^n\| \leq \delta Q_{jl}^{n*}, \\ & Q_j^n = \{q_{j1}^n, \dots, q_{jN}^n\}, Q_l^n = \{q_{l1}^n, \dots, q_{lN}^n\}, \delta Q_{jl}^{n*} = \{\delta q_{jl1}^{n*}, \dots, \delta q_{jlN}^{n*}\}, \\ & j \neq l, j = \overline{1, J}, l = \overline{1, L}, n = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (1)$$

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; N – число различных показателей эффективности; δQ^{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; J и L – число систем 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.

Сформулированные утверждения являются основой для разработки методов и алгоритмов подобию систем управления и, соответственно, их исследования и оценивания систем управления на основе их подобию.

Предложены методы оценивания подобию систем управления, которые условно разделены на две группы. В основу первой группы положены соотношения (1), практическая реализация которого требует достоверной оценки значений целевых показателей эффективности функционирования систем управления с последующим их сравнением с соответствующей величиной δQ^{n*} . 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 подобию*, 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.

Предложена структура укрупненного алгоритма оценивания подобию систем управления, который может быть положен в основу реализации любого из предложенных методов оценивания. В нем предусмотрено выполнение основных

операций: оценивание и нормирование целевых показателей, определение степени подобия, управление подобием систем управления в случае необходимости и др.

Разработана общая структура системы управления подобием систем управления (рис. 1), назначение которой, связано с выработкой и реализацией 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.

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.

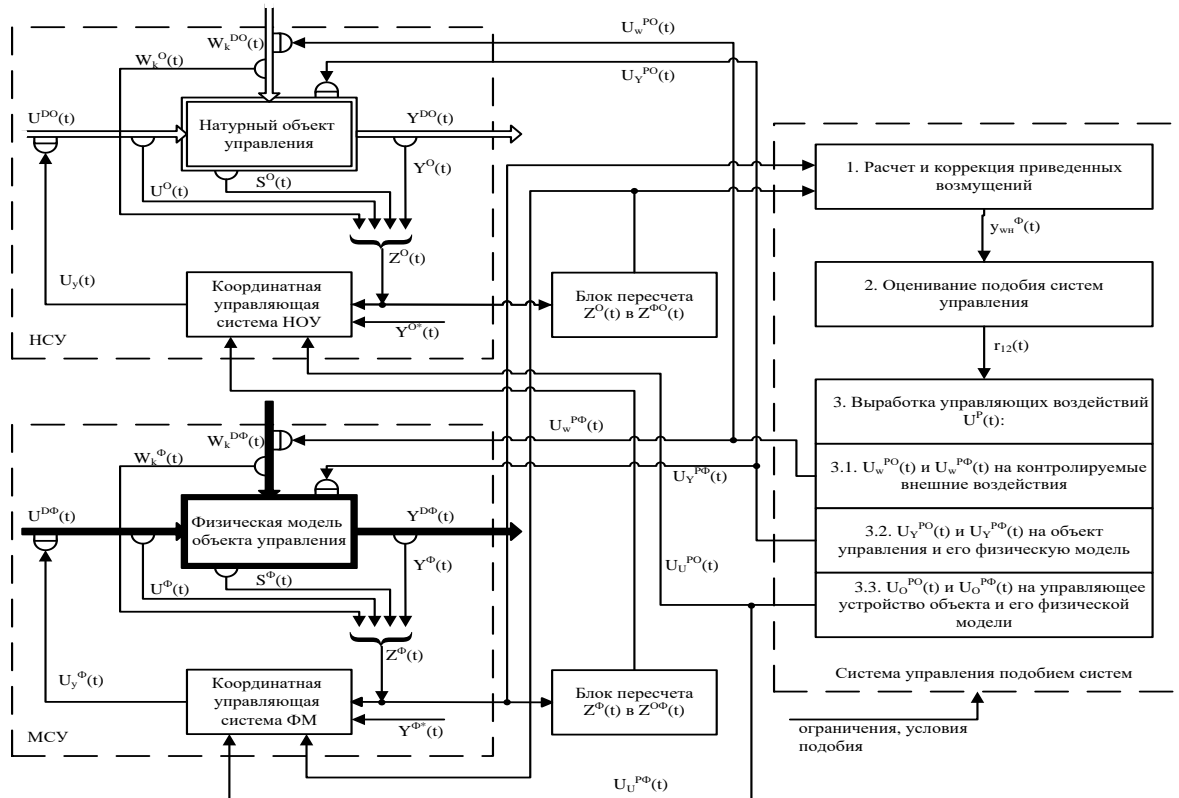


Рис. 1 – Общая структура системы управления подобием систем управления

\square – элементы натурной системы управления; \blacksquare – элементы модельной системы управления; \cup – исполнительные блоки, включая ошибки реализации управляющих сигналов (команд); \cup – измерительные блоки, включая неполноту контроля и ошибки измерения; \rightarrow – информационные воздействия; \Rightarrow – материальные и энергетические воздействия натурального объекта; \Rightarrow – материальные и энергетические воздействия физической модели; \square – расчетные блоки обработки данных; $U(t); W(t); Y(t); S(t)$ – управляющие, внешние, выходные воздействия и переменные состояния в момент времени t ; $Z(t) = \{U(t); W_k(t); Y(t); S(t)\}$; $y_{wn}(t)$ – 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 натуральный 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; $U^P(t) = \{U_W^{PH}(t); U_W^{PM}(t); U_Y^{PH}(t); U_Y^{PM}(t); U_U^{PH}(t); U_U^{PM}(t)\}$ – 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; $Z^{MH}(t)$ – значения векторного воздействия в момент времени t натурального объекта управления $Z^H(t)$, пересчитанные в масштаб их изменений для физической модели; $Z^{HM}(t)$ – значения векторного воздействия в момент времени t физической модели $Z^M(t)$, пересчитанные в масштаб их изменений для натурального объекта управления; надстрочные индексы «D», «H», «M» означают принадлежность, соответственно, к действительным значениям воздействий, натуральному объекту управления и его физической модели; подстрочные индексы «к», «Y», «w», «wn» означают принадлежность к контролируемым, координатным, внешним и приведенным к выходу объекта возмущающим воздействиям.

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 решения в виде многовариантного генератора модельных и натурно-модельных воздействий с заданными статистическими свойствами, а также МВМСУ.

Соотношения подобия систем управления представляют собой линейную или нелинейную комбинацию известных характеристик свойств воздействий, объектов и управляющих частей систем, таких как статистические и фрактальные показатели временных рядов, параметры динамических характеристик каналов преобразования этих воздействий объектов и алгоритмов управления. Необходимость разработки таких комплексных соотношений, учитывающих перечисленные выше свойства, вызвана сложностью оценивания подобия двух систем с учетом неопределенностей различного рода, в том числе неопределенностью, вызванной изменением свойств объекта управления при замыкании управляющих контуров для некоторого класса объектов, отмеченной проф. В.Я. Ротачем.

Выявлен класс технологических объектов с явно выраженным системным эффектом, связанным с изменением динамических свойств каналов преобразования входных воздействий при введении прямых и обратных управляющих связей. Т.е. объектов в составе систем, качество управления которыми в процессе их функционирования может существенно изменяться и влиять на величину изменений их свойств. Для таких объектов разработана методика настройки САУ с

использованием многовариантной физико-математической модели натурального объекта и основных положений теории подобия систем управления. Приведены натурные и натурно-модельные примеры влияния этого эффекта на каналы преобразования изменений управляющих воздействий.

В основу модельных и натурно-модельных исследований по определению соотношений подобия положено предположение о наличии связей между характеристиками динамических свойств воздействий, управляемых объектов и управляющих частей, которые должны иметь место в подобных системах управления.

Постановка задачи № 1. Определение соотношений подобия систем управления.

Дано. 1.1. САР по отклонению одинаковой структуры, объекты которых функционируют в условиях неконтролируемых возмущений (рис.2.).

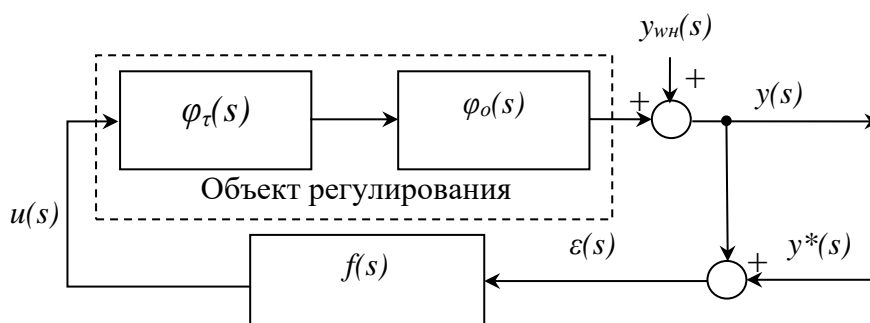


Рис.2 — Структура САР по отклонению

$u(s)$, $y(s)$ и $y^*(s)$ – регулирующие, выходные и задающие воздействия, $\epsilon(s)$ – 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

$$\varphi_o(s) = k; \quad \varphi_o(s) = \frac{k}{s}; \quad \varphi_o(s) = \frac{k}{Ts + 1}; \quad \varphi_o(s) = \frac{k}{T_2^2 s^2 + Ts + 1}, \quad (6)$$

где k – коэффициент передачи, T и T_2 – постоянные времени, τ – время чистого запаздывания канала преобразования регулирующих воздействий, s – оператор Лапласа.

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)

$$r_{np}(\theta) = \sigma_{np}^2 \cdot e^{-\alpha \cdot |\theta|}, \quad (7)$$

где σ_{np}^2 – дисперсия приведенного возмущения, α – коэффициент спада АКФ, θ – 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. Ротаца в зависимости от структуры оператора $\varphi(s) = \varphi_\tau(s) \cdot \varphi_o(s)$, где $\varphi_o(s)$ последовательно выбирали из множества (6), а также оптимальный по среднеквадратическому критерию закон регулирования,

$$f_{omn.}(s) = \frac{e^{-\alpha\tau}}{1 - e^{-\alpha\tau} \cdot e^{-\tau s}} \frac{1}{\phi_o(s)}. \quad (8)$$

взятый в качестве примера аналитического решения поставленной задачи.

5. Начальные условия

$$y_u(0) = 0; u(0) = 0; y_{np}(0) = 0; y^* = 0. \quad (9)$$

6. Среднеквадратичный критерий точности регулирования

$$q = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [y^*(i) - y(i)]^2, \quad (10)$$

где N – интервал моделирования.

Предельная динамическая точность регулирования для САР с оптимальным регулятором (8) соответствует выражению (1)

$$q = \sigma_{np}^2 (1 - e^{-2\alpha\tau}) \quad (11)$$

7. Ограничения.

7.1. Условие эффективности работы САР, выраженное неравенством

$$q < \gamma \cdot \sigma_{np}^2; \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (13)$$

7.2. Условие оптимальности настройки САР

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

7.3. Приближенное равенство целевых критериев эффективности подобных САР выражается соотношением

$$|q_j^H - q_i^H| \leq 0,05, \quad (15)$$

где j и l – номера подобных САР.

7.4. Ограниченный интервал моделирования I^M

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

Решение поставленной задачи осуществляли для САР с оптимальным регулятором (8) 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.

Для расчета использовали разностные выражения, полученные из (6-8) методом Z -преобразования. Предварительно перед оцениванием подобия САР и проведением численных экспериментов выполняли операции согласования входных (контролируемых и неконтролируемых) и выходных воздействий, оценивания подобия и оперативного (в случае необходимости) управления подобием систем, а также корректировки начальных условий их функционирования. Полученные результаты сведены в таблице 1. При этом соотношения подобия законов регулирования (пятый столбец таблицы 1) можно использовать для пересчета результатов настройки с одной подобной системы на другую.

По аналогии с задачей № 1 для той же структуры объекта, моделей его преобразующих каналов и приведенного к его выходу возмущения поставлена и

решена в соответствии с той же процедурой *задача определения соотношений совместного подобия объектов и воздействий*. Полученные результаты решения этой задачи совпадают с соотношениями, приведенными в 4-м столбце таблицы 1.

По результатам решения задачи сделаны выводы.

1. В подобных САР между характеристиками динамических свойств воздействий, каналов преобразования объектов и законов регулирования существуют в исследованных условиях достаточно тесные динамические связи.

2. Для типовых САР по отклонению (рис.1), объекты которых подвержены влиянию неконтролируемых воздействий, описываемых с помощью приведенных к выходу возмущений в виде стационарного случайного процесса с нулевым математическим ожиданием, постоянной дисперсией и экспоненциальной АКФ; преобразующие каналы объекта отображаются операторами (6), значения параметров которых изменяются в диапазонах $k_{min} \leq k_u \leq k_{max}$ усл.ед.; $T_{min} \leq T \leq T_{max}$ с; $\tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max}$ с; $\frac{\tau}{T} = \frac{1}{20}; \frac{1}{10}; \frac{1}{5}$, получены соотношения подобия (столбцы 4 и 5 таблицы 1), с помощью которых можно оценить для указанных выше условий их подобие с точностью до заданного уровня неопределенности δq_{jl}^{H*} .

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$	$k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j \tau_j}{k_l \tau_l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$
$\frac{k}{s}$	$f_{II}(s) = k_{II}$	$ \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.$	$k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j r_j T_l}{k_l r_l T_l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$ $k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j \tau_j}{k_l \tau_l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$
$\frac{k}{T \frac{2}{2} s^2 + T_1 s + 1}$	$f_{IIID}(s) = k_{II} + \frac{k_{II}}{s} + k_{II} \cdot s$	$ \sigma_{npj} - \sigma_{npl} \leq \delta;$ $ \alpha_{npj} \cdot \tau_j - \alpha_{npl} \tau_l \leq \delta;$ $\left \frac{\tau_j}{T_{1j}} - \frac{\tau_l}{T_{1l}} \right \leq \delta,$ $\left \frac{\tau_j}{T_{2j}} - \frac{\tau_l}{T_{2l}} \right \leq \delta.$	$k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j r_j T_l}{k_l r_l T_l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$; $k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{k_j \tau_j}{k_l \tau_l} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$; $k_{III} = k_{IIj} \cdot \frac{T_{2j}^2 \cdot T_{1l}}{T_{2l}^2 \cdot T_{1j}} \cdot e^{\frac{1}{\beta}(\alpha_j \tau_j - \alpha_l \tau_l)}$.

3. В подобных САР выполняются условия совместного подобия объектов и воздействий (столбец 3 таблицы 1). В свою очередь, САР, объекты и воздействия которых являются совместно подобными, будут подобны при выполнении соотношений подобия законов регулирования (столбец 4 таблицы 1).

4. Соотношения подобия законов регулирования, приведенные в 4-м столбце таблицы 1, целесообразно рассматривать как математические выражения для пересчета результатов решения любой конкретной задачи управления с одной подобной системы на другую.

На базе натурно-модельного подхода разработан имитационный моделирующий комплекс (ИМК) для решения широкого круга исследовательских задач теории и практики управления, которые связаны с целесообразностью использования имитационного моделирования, поисковых процедур оптимизации и т.п., а также при обучении в вузе. Основой его является гибкая модульная структура, которая позволяет расширять функциональные возможности ИМК, модернизировать и дополнять его новыми модулями, интегрировать их в общую структуру с минимальными трудозатратами.

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 (рис.3) 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^Φ , 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 авторегрессионной модели (АРМ) генерируют модельные значения приращений к физическому сигналу δW^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.

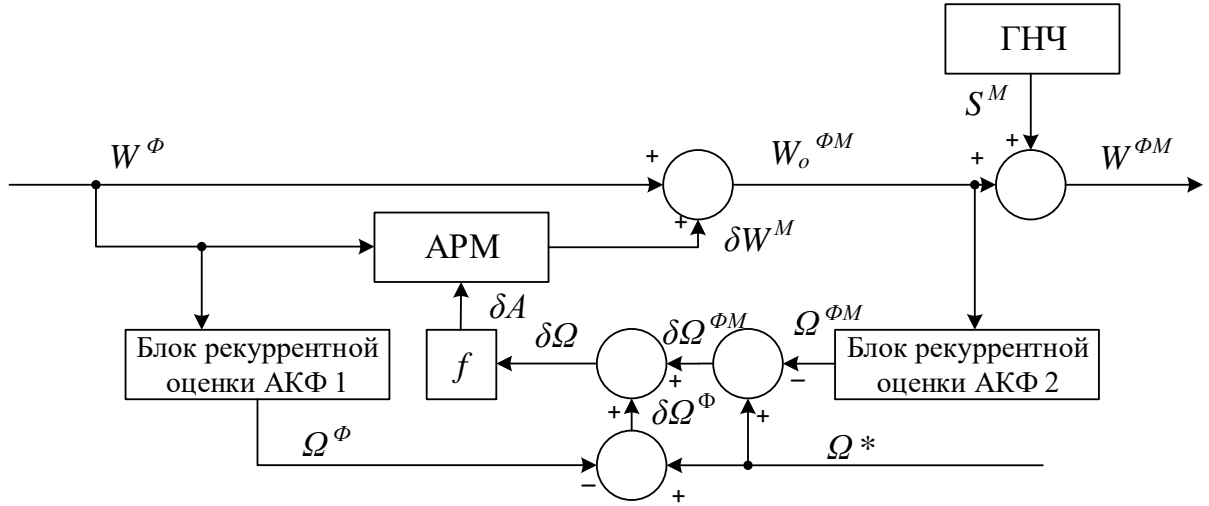


Рис.3 — Генератор воздействий в виде ЗДС

Ω – вектор свойств (значений) АКФ), A – вектор параметров авторегрессионной модели (АРМ), * – заданные значения, ГНЧ – генератор низкой частоты, S^M – низкочастотная составляющая воздействия, надстрочные индексы: ФМ – физико-математическая реализация, Ф – реализация значений сигнала от физической модели.

Структура МвМСУ представлена на рис.4. Основой управляемой части МвМСУ является физическая модель технологической установки, в которой реализуются типовые газодинамические и тепловые процессы. Установка выполнена так, что с ее помощью можно имитировать функционирование типовых технологических объектов с изменяющимися динамическими свойствами входных воздействий и каналов их преобразования, выраженными, например, через коэффициент передачи, постоянную времени инерции, время запаздывания и др.

Математическая часть МвМСУ представлена следующими соотношениями

$$Y_l^{\Phi M} = Y^{\Phi} + \delta Y_{ul}^{\Phi M} + \delta Y_{wl}^{\Phi M} + \delta y_{npl}^{\Phi M}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (16)$$

$$\delta Y_{ul}^{\Phi M} = \varphi_{ul}^{\Phi M} \left\{ \delta U_l^{\Phi M} \right\}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (17)$$

$$\delta U_l^{\Phi M} = U_l^{\Phi M} - U^{\Phi}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (18)$$

$$\delta U_l^{\Phi M} = f_l^{\Phi M} \left\{ \varepsilon_l^{\Phi M} \right\}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (19)$$

$$\varepsilon_l^{\Phi M} = Y_l^{\Phi M*} - Y_l^{\Phi M}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (20)$$

$$y_{npl}^{\Phi M} = y_{npl}^{\Phi M*} - y_{npl}^{\Phi}; \quad l = \overline{1, L}; \quad (21)$$

$$\delta y_{npl}^{\Phi M} = Y^{\Phi} - Y_u^{\Phi} - Y_w^{\Phi}; \quad (22)$$

$$y_{npl}^{\Phi M} = F \left\{ y_{np}^{\Phi}; \alpha_l^*; \sigma_l^* \right\} \quad (23)$$

где $F\{\cdot\}$ – алгоритм функционирования многовариантного генератора динамических рядов данных с заданными свойствами (МК – генератор (ЗДС)); $Y_u^{\Phi}; Y_w^{\Phi}$ – эффекты влияния регулирующих и контролируемых внешних возмущений физической модели, остальные обозначения соответствуют принятым ранее.

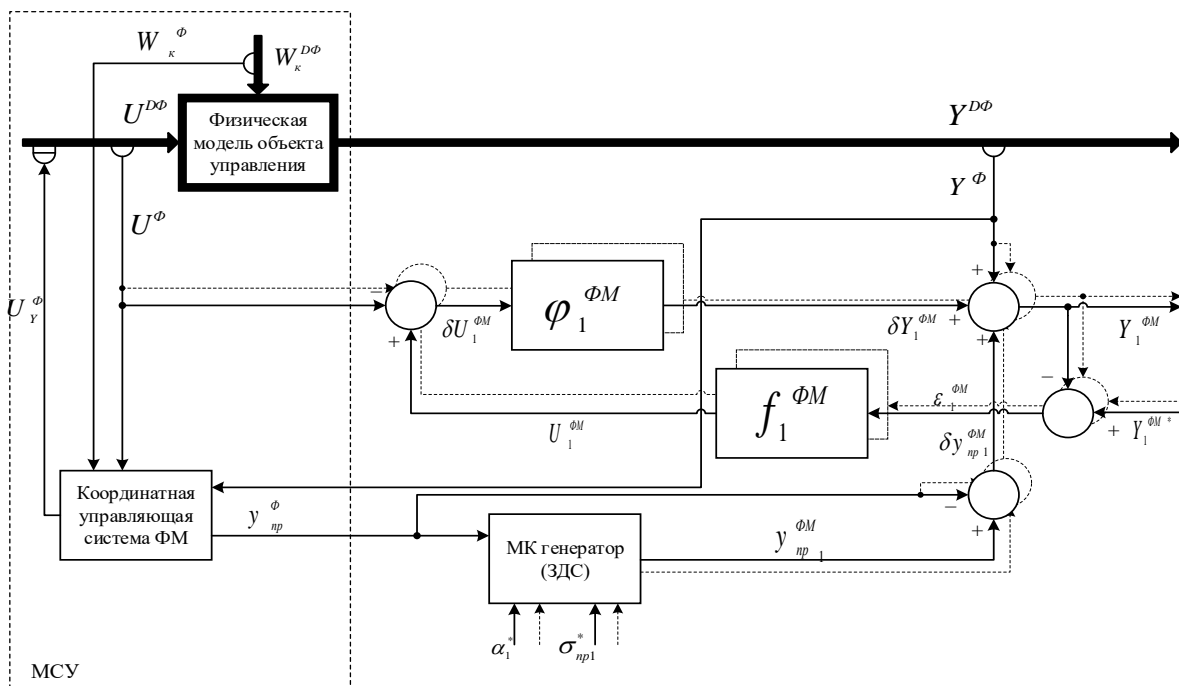


Рис. 4 — Структура МвМСУ

подстрочные индексы «к» и «l» означают принадлежность к контролируемым воздействиям и номер контура регулирования модельной САР; пунктирной линией условно показано наличие других параллельно подключенных к физической модели контуров, число которых равно L .

Каждый (l – й из L) параллельно работающий в МвМСУ контур регулирования – модельная САР – должен отражать динамические свойства и условия функционирования соответствующие 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. Их подобие достигается в математической части физико-математической модели за счет целенаправленного изменения динамических свойств оператора $\varphi_{ul}^{\phi M} \{ \}$, либо свойств динамического ряда приведенных к выходу физико-математической модели возмущений $\delta y_{np1}^{\phi M}$, либо и тех и других вместе.

Наличие в составе ИМК этих двух параллельно работающих модулей совместно с методами и алгоритмами оценивания и управления подобием САР позволяет расширить область его применения, существенно уменьшить затраты средств и времени на решение практических задач, в частности, испытания и настройки САР с обеспечением требуемого качества их функционирования.

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 САР; предложен вариант решения задачи совместного проектирования объекта и управляющей системы с применением методов теории подобия; даны материалы по применению процедуры настройки САР в процессе их испытаний и внедрения, а также по применению методов подобия при настройке систем автоматизации управления технологическим комплексом углеобогажительной фабрики «Матюшинская».

Разработан вариант схемы совместного проектирования объекта и управляющей системы с применением положений теории подобия систем управления и многовариантных физико-математических или натурно-математических моделей. По

такой схеме управление подобием системы осуществляется на этапе проектирования технологического объекта. С помощью технической и нормативной документации проводится предварительная оценка параметров моделей каналов преобразования объекта управления. Затем определяются значения параметров, необходимые для обеспечения подобия уже действующей натурной системе, или физико-математической установке. После этого принимаются решения о корректировке проектной документации технологической части, например, по производительности агрегатов, конструктивным особенностям соединений и ёмкостей, их расположению относительно друг друга.

Применение такой схемы проектирования контуров в строках 2-5 таблицы 2 (в конце автореферата), позволило значительно сократить затраты на их проектирование и наладку и уже на начальных этапах функционирования достичь удовлетворительного качества регулирования.

Процедура настройки САР с применением МвМСУ приведена на рис. 5.

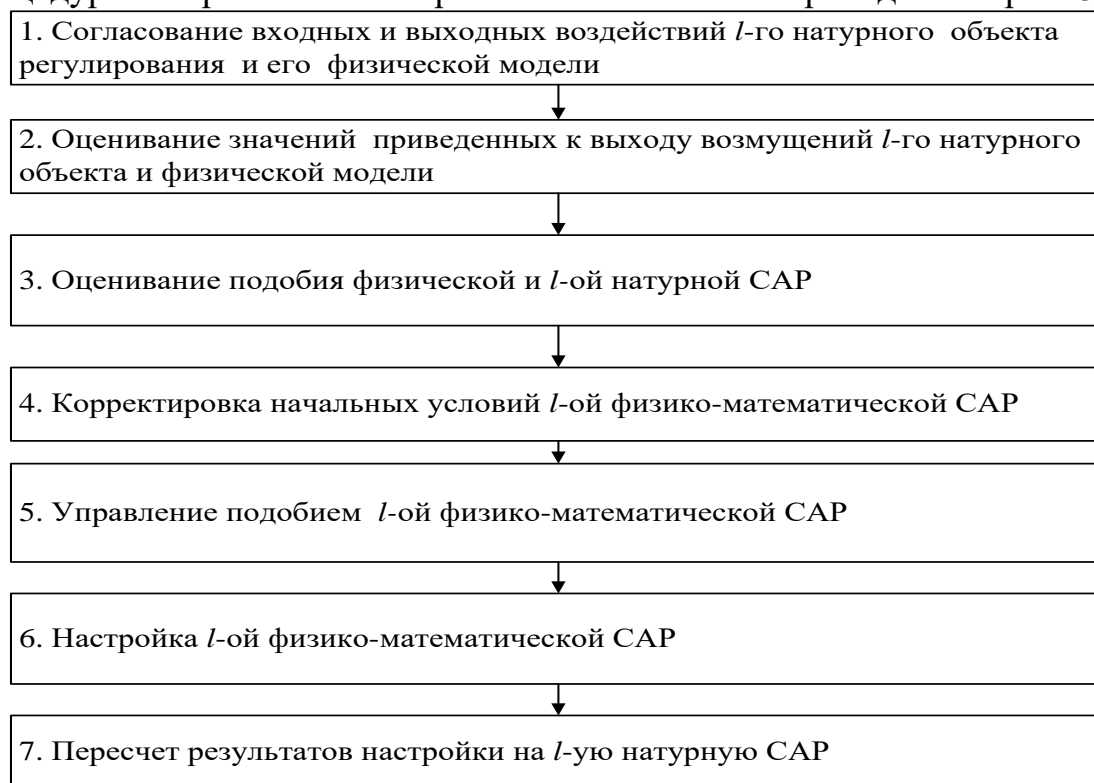


Рис. 5 — Процедура настройки САР

Показанные здесь этапы характеризуют процесс настройки лишь одного l -го ($l = \overline{1, L}$) физико-математического контура регулирования. Однако они являются типовыми, одинаковыми для настройки других физико-математических контуров и выполняются одновременно и независимо друг от друга.

Постановка задачи №3. *Настройка систем автоматического регулирования.* При постановке и решении задачи использовали данные работы САР плотности магнетитовой суспензии в условиях углеобогадательной фабрики «Матюшинская».

Дано.

1. Математические модели каналов преобразования регулирующих воздействий натуральных объектов – тяжелосреднего сепаратора и тяжелосреднего циклона,

представленные оператором $\varphi(s) = \frac{k}{Ts+1} \cdot e^{-\tau s}$, значения параметров k , T , τ которого принадлежат следующим диапазонам

для тяжелосреднего сепаратора

$$\begin{aligned} -2,3 \leq k \leq -1,8 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\% \text{ хода}}; \\ 7,0 \leq T \leq 12,0 \text{ с}; \\ 5,0 \leq \tau \leq 7,0 \text{ с}; \end{aligned}$$

для тяжелосреднего гидроциклона

$$\begin{aligned} -2,0 \leq k \leq -1,4 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\% \text{ хода}}; \\ 7,0 \leq T \leq 12,0 \text{ с}; \\ 5,0 \leq \tau \leq 7,0 \text{ с}. \end{aligned} \quad (24)$$

2. Приведенные к выходу натуральных объектов возмущения, нормированные АКФ которых были аппроксимированы выражением (7). Средние значения их параметров для тяжелосреднего сепаратора – $\sigma_{np} = 11,05(\frac{\%}{\text{см}^3})$; $\alpha_{np} = 0,11$; для тяжелосреднего гидроциклона – $\sigma_{np} = 10,10(\frac{\%}{\text{см}^3})$; $\alpha_{np} = 0,17$. Максимальная ошибка отклонений натуральных значений от их среднего уровня не превышала $\pm 2-3 \%$.

3. Пропорционально-интегральный закон регулирования, представленный оператором $f_{ПИ}(s) = k_{PI} + \frac{k_{II}}{s}$, где k_{PI} и k_{II} – коэффициенты при его пропорциональной и интегральной части.

4. Значения критериев качества регулирования с найденными по инженерной методике проф. В.Я. Ротача параметрами закона регулирования для сепаратора и гидроциклона:

$$q_1 = 10,02(\frac{\%}{\text{см}^3}), \quad q_2 = 8,96(\frac{\%}{\text{см}^3}).$$

Т.е. эффективность регуляторов 10% и 11% соответственно.

5. Многовариантная физико-математическая модель системы управления – МвМСУ, структура которой соответствует схеме рис.4. На МвМСУ были реализованы два физико-математических контура – модельные САР, объекты регулирования в которых отражают влияние изменений мощности электронагревателей, (кВт/час) на изменение температуры воздуха в трубопроводе, ($^{\circ}\text{C}$). Модели их каналов преобразования регулирующих воздействий представлены такими же операторами, как и натурные объекты (п. 3.1); значения их коэффициентов одинаковы и равны $k^M = 1,6 \text{ }^{\circ}\text{C/мин/\%}$; $T^M = 3,0 \text{ с}$; $\tau^M = 1,0 \text{ с}$, где надстрочный символ «М» означает «модельный». Приведенные к выходу физической модели возмущения оценивали по той же схеме, что и для натуральных объектов. На рис. 6 дан пример реализации возмущения и его нормированной АКФ, которая также была аппроксимирована выражением (7) со значениями параметров $\sigma_{np}^M = 1,4 \text{ } (^{\circ}\text{C})$; $\alpha_{np}^M = 1,1 \text{ } (^{\circ}\text{C})$; $\alpha_{np}^M = 0,3$.

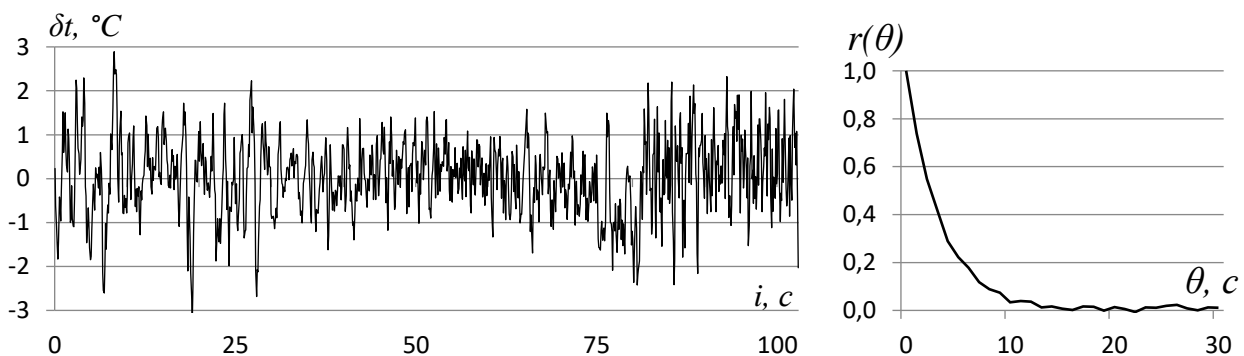


Рис. 6 – Реализация приведенных к выходу ФМ возмущений δt и их АКФ $r(\theta)$

6. Закон регулирования модельной САР – пропорционально-интегральный с настроечными коэффициентами, соответствующими минимуму среднеквадратической ошибки регулирования: $k_{II}^M = 1,875 \frac{\% \text{ хода}}{\text{кг} \cdot \text{м}^3}$; $k_{II}^M = 0,625 \frac{\% \text{ хода}}{\text{кг} \cdot \text{м}^3}$.

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

Решение задачи осуществляли с использованием МвМСУ, конкретизированной для типовых САР технологических объектов, и процедуры одновременной настройки обеих модельных систем в соответствии со схемой рис. 5 для $l = \overline{1,2}$.

Настройку модельных САР после реализации этапов 1-5 (рис.5) проводили в режиме физико-математического моделирования с применением поисковых методов оптимизации по минимуму среднеквадратической ошибки регулирования q_l^M . Полученные результаты для безразмерной формы данных об изменении входных и выходных воздействий модельных САР приведены ниже

– для тяжелосредного сепаратора

$$k_{II1}^M = 0,773 \text{ усл.ед.}; k_{II1}^M = 0,011 \text{ усл.ед.}; q_1^M = 0,871 \text{ усл.ед.}; \quad (25)$$

– для тяжелосредного гидроциклона

$$k_{II2}^M = 0,863 \text{ усл.ед.}; k_{II2}^M = 0,01 \text{ усл.ед.}; q_2^M = 0,883 \text{ усл.ед.} \quad (26)$$

Пересчет модельных значений параметров настройки (25,26) на условия функционирования натуральных САР осуществляли в соответствии с выражениями (табл. 1, строка 3, столбец 5). Результаты пересчета в натуральном масштабе их изменения представлены выражениями (27) для тяжелосредного сепаратора и (28) для тяжелосредного гидроциклона

$$k_{II1} = -0,618 \frac{\% \text{ хода}}{\text{кг} \cdot \text{м}^3}; k_{II1} = -0,001 \frac{\% \text{ хода}}{\text{кг} \cdot \text{м}^3}; q_1 = 8,61 \left(\frac{\text{с}}{\text{см}^3}\right); \quad (27)$$

$$k_{II2} = -0,767 \frac{\% \text{ хода}}{\text{кг} \cdot \text{м}^3}; k_{II2} = -0,007 \frac{\% \text{ хода}}{\text{кг} \cdot \text{м}^3}; q_2 = 7,63 \left(\frac{\text{с}}{\text{см}^3}\right). \quad (28)$$

Т.е. эффективность регуляторов 22% и 24% соответственно.

Последующее уточнение настроек (27,28) на действующей системе не привело к значительному улучшению результата.

В результате использования полученных значений параметров настройки САР (выражения 27,28) сделан вывод о высокой эффективности процедуры настройки с использованием физико-математического моделирования и методов подбора систем управления. По сравнению с САР, настроенными по инженерной методике, значение точностного критерия регулирования выше для тяжелосредного сепаратора на 14% и для тяжелосредного гидроциклона на 15%. При этом временные затраты на коррекцию параметров САР, найденными по известной методике, могут составлять несколько суток, поскольку в период ввода системы в эксплуатацию часто происходят остановки, сбои, ищется технологический баланс, оптимальные значения опорных уровней и др. Для предложенного метода время

пересчета настроек может составлять от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от наличия нужных данных и работы физической установки.

Одновременное выполнение модельных экспериментов в процессе настройки САР позволяет значительно сократить временные, а также материально-энергетические ресурсы, связанные с функционированием физической модели, что особенно эффективно при большом числе однотипных контуров.

Предложенные в работе методы и алгоритмы были применены для создания систем автоматизации управления на промышленных объектах, указанных в таблице 2.

Таблица 2 – 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 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%.

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)), 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 натуральной САР.

9. Разработанную общую схему настройки САР с применением МвМСУ и методов подобия 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.

10. 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%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Мышляев, Л.П. Понятия и условия подобия систем управления [Текст] / Л. П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Д.Г. Березин, Г.В. Макаров, К.А. Ивушкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. Журнал. №12 за 2012 г. с. 56-58.

2. Евтушенко, В.Ф. Численные исследования подобия систем регулирования по контролируемым возмущениям / В.Ф. Евтушенко, Г.В. Макаров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. Журнал. №12 за 2012 г. с. 65.

3. Евтушенко, В.Ф. О подобии натурной и модельной систем при управлении с физической прогнозирующей моделью [Текст] / В.Ф. Евтушенко, Л.П. Мышляев, Г.В. Макаров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. Журнал. №12 за 2013 г. с. 64-66

4. Евтушенко, В.Ф. О контроле нестационарности свойств объекта управления и его внешних воздействий [Текст] / В.Ф. Евтушенко, Г.В. Макаров, Е.В. Буркова // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 4 (29). – С.73-85.

5. Ляховец, М.В. Оценивание предаварийных состояний технологического оборудования и контрольноизмерительных приборов / Ляховец М.В., Макаров Г.В., Саламатин А.С., Шипунов М.В. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2020. № 3. С. 16-24.

Публикации в периодических изданиях, включенных в базу Scopus

6. 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.

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

8. Evtushenko, V.F. Specific aspects of evaluation of control systems similarity / Evtushenko, V.F., Burkov, V.N., Myshlyayev, L.P., Makarov, G.V. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, vol. 84, 012028. <http://iopscience.iop.org>

9. Myshlyayev, L.P. Development of similarity theory for control systems / Myshlyayev L.P., Evtushenko V.F., Makarov G.V., Ivushkin K.A. // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11, Automation Systems in Education, Science and Production. Сер. "XI All-Russian Scientific and Practical Conference "Automation Systems in Education, Science and Production, 2017"" 2018. С. 012005.

10. Makarov, G.V. Functional status technological equipments modelling / G. V. Makarov, E. V. Tamarkina, M. V. Lyakhovets and A. S. Salamatina // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 865 012010

11. Myshlyayev, L.P. Flotation reagent dosing control system at the coil preparation plant LLC JV "Barsasskoye Tovarischestvo" / L. P. Myshlyayev, M. V. Lyakhovets, G. V. Makarov, D. E. Korovin and G. A. Kulyushin // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 865 012010

12. Shipunov, M.V, Creation of a control automation system on the example of the coal processing plant / M. V. Shipunov, V. V. Grachev, L. P. Myshlyayev, K. A. Ivushkin, Sh. A. Fayrushin and G. V. Makarov // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 865 012010

Публикации в других периодических изданиях

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

14. Мышляев, Л.П. Развитие систем управления с прогнозирующими физическими моделями [Текст] / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, В.Н. Бурков, Г.В. Макаров, К.А. Ивушкин // Вестник Сибирского государственного индустриального университета, 2016. №3. – С. 47-55

15. Макаров, Г.В. Оценивание подобия типовых систем управления на примере объектов углеобогачительных фабрик [Текст] / Макаров Г.В., Ивушкин К.А., Евтушенко В.Ф., Мышляев Л.П. // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 285-288.

16. Мышляев, Л.П. Системные особенности настройки алгоритмов управления [Текст] / Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Ивушкин К.А. // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 333-336.

17. Мышляев, Л.П. Влияние эффективности управления на свойства объекта управления [Текст] / Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Файрушин Ш.А., Венгер М.К. // В сборнике: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019 Труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). 2019. С. 89-91.

18. Мышляев, Л.П. О динамическом подобии систем управления [Текст] / Л. П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Д.Г. Березин, Г.В. Макаров // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве, AS'2011», г. Новокузнецк, СибГИУ, 2011г. – с.34-36

19. Макаров, Г.В. Настройка систем регулирования типовых агрегатов обогачительных фабрик с использованием методов подобия [Текст] / Макаров Г.В., Линков А.А., Демченко Д.Г., Зайцев А.В. // В сборнике: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. Труды X Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). 2015. С. 213-215.

20. Макаров, Г.В. Проектирование и настройка технологических контуров с применением теории подобия систем управления [Текст] / Макаров Г.В., Мышляев Л.П., Венгер К.Г., Саламатин А.С. // В сборнике: Автоматизированный электропривод и промышленная электроника Труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляничика. 2018. С. 58-63.

21. Шипунов М.В. Информационное обеспечение автоматизированной системы управления технологическими процессами обогачительной фабрики «Барзасское товарищество» / М. В. Шипунов, Д. Е. Коровин, В. В. Грачев, Л. П. Мышляев, М. В. Ляховец, М. Ю. Мелкозеров, Г. В. Макаров // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2018. – № 4 (26). - С. 41-45. – Библиогр.: с. 45 (4 назв.).

22. Евтушенко, В.Ф. О натурно-модельном подходе и теории подобия применительно к системам управления [Текст] / Евтушенко В.Ф., Ивушкин А.А., Венгер

К.Г., Мышляев Л.П., Макаров Г.В. // В сборнике: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019 Труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). 2019. С. 21-24.

23. Шипунов, М.В. Система автоматизации управления обогатительной фабрикой ООО "Шахта №12" [Текст] / Шипунов М.В., Грачев В.В., Ивушкин К.А., Файрушин Ш.А., Мышляев Л.П., Макаров Г.В. // В сборнике: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019 Труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). 2019. С. 186-192.

24. Мышляев, Л.П. Развитие автоматизированной системы управления технологическими процессами обогатительной фабрики [Текст] / Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Ляховец М.В., Венгер К.Г., Леонтьев И.А., Мелкозеров М.Ю. // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2018. № 4. С. 316-323.

25. Мышляев, Л.П. Развитие теории подобия для систем управления [Текст] / Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Ивушкин К.А., Макаров Г.В. // В сборнике: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве Труды XI Всероссийской научно-практической конференции. Сибирский государственный индустриальный университет. 2017. С. 351-355.

26. Евтушенко, В.Ф. Методы оценивания подобия систем управления [Текст] / Евтушенко В.Ф., Бурков В.Н., Мышляев Л.П., Макаров Г.В. // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 278-281.

27. Евтушенко, В.Ф. Исследования подобия систем автоматического регулирования с типовыми моделями объектов [Текст] / Евтушенко В.Ф., Лысенко Н.Л. // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве, AS'2015», г. Новокузнецк, СибГИУ, 2015г. – с.498-501

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

29. Свид. №2015612929 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Моделирование систем управления, функционирующих в условиях неопределенности / Макаров Г.В., Евтушенко В.Ф., Мышляев Л.П., Буркова Е.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО СибГИУ (RU); заявл. 12.01.2015; опубл. 26.02.2015, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.