

На правах рукописи



Хрульков Владимир Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫМ ТРАЛОВЫМ
МЕХАНИЗМОМ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВЫСОКОТОННАЖНЫХ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Научный руководитель –

Черный Сергей Петрович,

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре

Официальные оппоненты:

Шилин Александр Анатольевич,

доктор технических наук, доцент, профессор отделения электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Снегирев Олег Юрьевич,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории систем управления технологическими процессами ФГБУН Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Ведущая организация –

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск

Защита диссертации состоится «2» июля 2025 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 99.2.140.02 на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681032, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 99.2.140.02,

кандидат технических наук, доцент



Гудим Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Транспортировка крупногабаритных и сверхтяжелых грузов по дорогам общего пользования с помощью модульных траловых механизмов представляет собой существенную проблему, связанную не только с наличием целого ряда технических особенностей, но и большим числом экономических и организационно-логистических задач. К таким техническим особенностям можно отнести: кривизну дорожного покрытия, отсутствие крепления грузов к платформе, высокий центр тяжести перевозимого груза, большую парусность. К экономическим и организационно-логистическим задачам относят ограничение трафика движения, разветвленность дорожной сети и удаленность места будущего использования. В настоящее время большинство задач, связанных с перечисленными ограничениями, решаются путем поиска альтернативных вариантов доставки, вплоть до строительства специального отдельного дорожного полотна, что представляет собой решения, ориентированные на уникальные строго определенные условия. Из-за несовершенства системы управления подвеской, основанной на классических методах регулирования, которая ориентирована на реализацию процедур управления отдельным узлом подвесной системы, нередко случаи, когда транспортируемый груз подвергался опрокидыванию, что приводило к повреждению самого перевозимого объекта, наносило непоправимый ущерб модульному траловому механизму, разрушало дорожное полотно. Совокупность обозначенных особенностей объекта регулирования связана с отсутствием комплексного подхода к реализации системы управления сложным многокоординатным объектом, таким как модульный траловый механизм, при его эксплуатации по дорогам общего пользования путем контроля ряда недетерминированных параметров. Таким образом, представляется актуальным применение интеллектуальных методов управления гидравлической подвеской, которые позволят решить большую часть проблем технического характера, связанных с наличием различных возмущающих воздействий, обусловленных как природным характером, так и вариацией технологических параметров.

Научная новизна предложенного подхода по созданию интеллектуальной системы управления основана на использовании комплекса специализированных нечетких модулей, образующих единую иерархическую многокаскадную структуру. Применение многокаскадной нечеткой системы управления таким сложным технологическим объектом, как модульный траловый механизм, позволит существенно повысить возможности его применения на дорогах общего пользования и снизить возможные риски, связанные с рядом внешних и внутренних возмущений, а также обеспечить независимость системы регулирования от компоновки его составных частей.

Научная новизна предлагаемых решений заключается в следующем:

1) предложено структурное решение и математическое описание многокаскадного нечеткого логического регулятора на основе операторов произведения и суммы для вложенных каскадов, которое позволяет сформировать требуемые зависимости между основными параметрами технологического процесса по перемещению высокотоннажных крупногабаритных грузов;

2) модель многокаскадной нечеткой системы управления модульным траловым механизмом, позволяющая повысить возможности по перемещению объекта управления под влияние недетерминированных факторов;

3) алгоритм функционирования системы управления процессом стабилизации модульным траловым механизмом, отличающийся от ранее известных тем, что формирование управляющих процедур осуществляется многокаскадным нечетким логическим регулятором.

Степень разработанности темы исследования. На сегодняшний день глубоко изучены способы поддержания заданного положения в пространстве гидроприводом, однако ряд способов имеют технологические ограничения и не обладают предиктивным управлением. Задачей управления процессом стабилизации высокотоннажных крупногабаритных грузов на передвижном модульном траловом механизме является поддержание стабильного устойчивого положения перемещаемого объекта в условиях недетерминированных возмущений, формируемых внешними факторами, что не позволяет использовать классические методы управления локально на нижнем уровне регулирования каждым отдельным активным элементом подвесной системы.

Работа основывается на достижениях отечественных и зарубежных ученых в области проектирования гидравлических систем, а также автоматизированных и интеллектуальных систем управления технологическими процессами: Опейко А.Ф., Белосусов Б.Н., Попов С.Д., Аверьянов О.И., Ермакова С.А., Амиров Ю.Д., Башта Т.М., Бесекерский В.А., Гинцбург Л.Л., Домогаров А.Ю., Гладов Г.И., Вихров А.В., Зайцев С. В., Кувшинов В. В., Павлов В. В., Афанасьев Б.А., Бочаров Н.Ф., Жеглов Л.Ф., Зузов В.Н., Полунгян А.А., Фоминых А.Б., Цыбин В.С., Навроцкий К.Л., Попов Д.Н., Штовба С.Д., Кудинов Ю.И., Мелихов А.Н., Блишун А.Ф., Захаров В.Н., Орлов А.И., Поспелов Д.А., Троценко В.В., D. Hrovat, Mahmoud Omar, M.M. El-kassaby, Walid Abdelghaffar, Musa Mohammed Bello, Amir Akramin Shafie, Raisuddin Khan, M. Senthil Kumar, S. Vijayarangan, Asai K., Zadeh L., Sugeno M., Takagi T., Mamdani E.A.

Объект исследования – система автоматического управления гидравлической подвеской модульного тралового механизма, обеспечивающая стабилизацию транспортируемого объекта.

Предмет исследования – процедуры управления, реализуемые многокаскадным нечетким регулятором, для формирования сложных законов управления подвесной системой модульного тралового механизма.

Цель работы – реализация сложных законов управления многокаскадным нечетким логическим регулятором по стабилизации комбинированного тралового механизма при перемещении высокотоннажных крупногабаритных грузов в движении с учетом действия недетерминированных возмущающих воздействий.

Задачи диссертации:

1) анализ существующих подходов в области управления составной многокоординатной системой на примере модульного тралового механизма, учитывающего функционирование объекта в условиях случайных возмущений и нестационарности параметров;

2) разработка математического описания многокаскадного нечеткого логического регулятора, отличающегося структурой построения, особенностью которой является формирование уставок для регуляторов вложенного каскада на основе операторов произведения и суммы;

3) разработка имитационной модели многокаскадной нечеткой системы управления, которая позволяет учесть продольные и поперечные крены составляющих по-

луплатформ и реализовать стабилизацию всех элементов модульного тралового механизма;

4) апробация предложенного алгоритма управления с использованием средств промышленной автоматики на имитационной модели.

Методология и методы исследования. В процессе синтеза и исследования интеллектуальной системы управления модульным траловым механизмом для перемещения высокотоннажных крупногабаритных грузов широко использовались методы математического анализа, теории автоматического управления и моделирования для описания динамики исследуемой системы, методы теории нечетких множеств при реализации сложных законов регулирования.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) по пунктам:

-«п. 4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами»;

-«п. 5. Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами»;

-«п. 6. Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами».

Положения, выносимые на защиту:

1) структурное решение и математическое описание многокаскадного нечеткого логического регулятора, реализующего сложный закон управления модульным траловым механизмом, особенностью которого является синтез уставок для регуляторов вложенного каскада на основе операторов произведения и суммы, позволяющего сформировать требуемые функциональные зависимости между параметрами, оказывающими наибольшее влияние на технологический процесс;

2) модель многокаскадной нечеткой системы управления модульным траловым механизмом, позволяющая учесть влияние большинства внешних факторов и повысить возможности по передвижению механизмов в условиях дорог общего пользования;

3) алгоритм функционирования системы управления процессом стабилизации модульным траловым механизмом, отличающийся от ранее известных тем, что формирование управляющего воздействия осуществляется с помощью многокаскадного нечеткого логического регулятора на основании контроля входных параметров, позволяющих стабилизировать транспортируемый объект.

Практическая значимость достигается разработанной системой управления процессом стабилизации модульного тралового механизма для перемещения высокотоннажных крупногабаритных грузов, обладающей возможностью снижения негативного влияния ряда возмущающих факторов технического и технологического плана, что позволяет сократить время транспортировки, повысить надежность и сохранность технологического оборудования. Практическая значимость подтверждается внедрением полученных результатов в части алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальных систем многоопорных транспортировочных машин и подкреплена актом внедрения на Комсомольской дистанции электроснабжения Дальневосточной дирекции по энергообеспечению ОАО «РЖД», а также в учебном

процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (Комсомольск-на-Амуре, 2021); V Международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (Комсомольск-на-Амуре, 2022); VI Международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (Комсомольск-на-Амуре, 2023); III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (Комсомольск-на-Амуре, 2020); Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2020» (Москва, 2020); IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (Комсомольск-на-Амуре, 2021); XLVII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2021» (Москва, 2021); 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020 (Владивосток, 2020); XXIV Краевом конкурсе молодых ученых и аспирантов Хабаровского края (Хабаровск, 2021); внутривузовском конкурсе молодых ученых в сфере научных исследований (Комсомольск-на-Амуре, 2022); 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon; Сочи, 2023); II Международной научно-практической конференции молодых учёных (Комсомольск-на-Амуре, 2023); научно-техническом семинаре высшей школы кибернетики и цифровых технологий ФГБОУ ВО «ТОГУ» – 2024 (Хабаровск, 2024).

Научные исследования выполнялись в рамках НИР № ВН010/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе отечественных и зарубежных научных публикаций по теме исследования; проведении имитационного моделирования и вычислительного эксперимента с применением общепромышленных средств автоматизации; разработке алгоритмов нечеткого многокаскадного управления стабилизацией комбинированного тралового механизма.

Публикации, патенты и свидетельства. Основные результаты исследования опубликованы в 20 работах, в том числе 4 – в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК, 5 – в изданиях, индексируемых в международных базах SCOPUS и Web of Science, 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего в себя 129 наименования, и 3 приложений. Основная часть диссертационной работы изложена на 132 страницах, содержит 88 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены основные положения, выносимые на защиту, сформированы цель, предмет и объект исследования, обоснованы актуальность темы дис-

сертации, научная новизна, практическая значимость, раскрыты методы исследования, приведены апробация работы и публикации по теме исследования, а также структура и объем работы.

В первой главе *«Аналитический обзор способов, устройств и систем транспортировки высокотоннажных крупногабаритных грузов»* выполнен анализ существующих способов перемещения различных объектов, имеющих нестандартные габариты и требующих специальных условий транспортировки, определены возмущающие воздействия, действующие на систему.

Анализируя сферы применения модульных траловых механизмов для перемещения сверхтяжелых грузов, можно выделить промышленные отрасли их использования, в числе которых электроэнергетика (транспортировка генератора электростанции, электрические трансформаторы, детали ветрогенераторов), горнодобывающая промышленность (транспортировка карьерных самосвалов, шагающих экскаваторов, бульдозеров), нефтеперерабатывающая отрасль (транспортировка реактора гидрокрекинга, нефтяных установок, ректификационных колонн).

В процессе развития технологического оборудования для добычи полезных ископаемых объемы и разнообразие сырья кратно увеличились, тем самым сформировались новые требования по максимальному количеству перевозимого сырья транспортировочными машинами до пункта переработки и сортировки. Исходя из образовавшихся условий, такими компаниями как Komatsu, Liebherr, Caterpillar, Unit Rig (Terex), Белаз были спроектированы и разработаны сверхтяжелые карьерные самосвалы, грузоподъемность которых составляет более 300 т. Транспортировка высокотоннажных грузов, таких как карьерные самосвалы, осуществляется нидерландской компанией Маммут, которая использует способ модульного составления тралов для перемещения их без разбора на составные части. Суть способа заключается в распределении массы перевозимого объекта в несколько сотен тонн на ряде соединенных между собой траловых полуплатформ. Общая длина такого модульного тралового механизма может составлять от 32 м и иметь более 22 осей (рисунок 1).

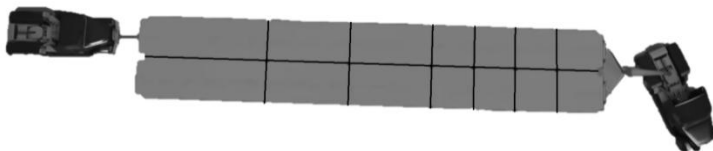


Рисунок 1 – Вариант компоновки модульного составного трала модулями различной конфигурации

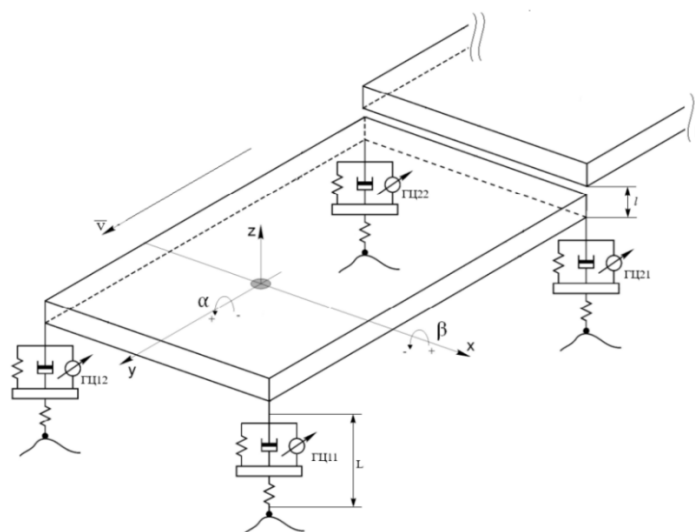
Проведенный анализ показал, что транспортировка сверхтяжелых крупногабаритных грузов может осуществляться следующими способами:

- 1) транспортировка по воде с помощью специализированных барж и грузовых судов;
- 2) с помощью железнодорожного транспорта;
- 3) наземным способом с помощью специализированных транспортировочных устройств, к которым относятся модульные траловые механизмы.

Наибольшей универсальностью отличается способ транспортировки с помощью модульных траловых механизмов.

Проанализировав функционирование модульного тралового механизма, можно выделить ряд возмущающих факторов, оказывающих наибольшее влияние на объект (рисунок 2):

- скорость перемещения платформы ($\bar{V}$);
- углы продольного и поперечного кренов (α, β);
- положение штоков гидроприводов подвески (L);
- положение полуплатформ при горизонтальном отклонении относительно друг друга (l).



ГЦ11 – ГЦ22 – гидроприводы подвески трала

Рисунок 2 – Схема действующих на объект возмущений

Модульный траловый механизм имеет сложную разветвленную гидравлическую систему, которая должна обеспечивать надежное положение установленного груза в пространстве, иметь высокую плавность хода, осуществлять демпфирование неровностей дорожного покрытия.

Учитывая требования к эксплуатации модульного тралового механизма, можно сформулировать следующую систему ограничений, действующих на объект управления:

- отсутствие возможности крепления груза и высокий центр тяжести;
- количество преодолеваемых перекрестков;
- величины радиусов проходимых поворотов.

При этом система управления объектом должна учитывать перечень недетерминированных возмущающих воздействий:

- качество дорожного покрытия магистралей общего пользования;
- кривизну дорожного покрытия в продольной и поперечной проекциях;
- особенности климатических условий функционирования (например, наличие бокового ветра, гололед, дождь, снег);
- неравномерность нагрузки на модули траловой системы.

На текущий момент модульные траловые механизмы оснащаются комплексными электронными системами мониторинга, выводящими на дисплей в кабине оператора изображение положения центра масс автомобиля при движении и погрузке/разгрузке, а также показывающими уровень загрузки опор по отношению к полной массе транспортируемого объекта. Система позволяет оператору правильно расположить груз на платформе и следить за состоянием нагруженности опор в движении. При возникновении перегрузок более 20 % от нормы подаются звуковой и световой сигналы. Наличие такой системы при перевозке высокотоннажных крупногабаритных конструкций необходимо для исключения опрокидывания груза и аварий-

ных поломок. Комплексная электронная система управления является в основном мониторинговой, так как большая часть поступающей информации обрабатывается самим оператором, на основании которой он корректирует положение платформы в реальном времени. В целом такой подход является времязатратным.

Результаты исследования системы управления технологическим процессом транспортировки тяжелых крупногабаритных объектов и анализа теоретических и практических разработок позволили сформулировать цель и задачи научного исследования.

Во второй главе «*Моделирование элементов распределенной гидравлической системы модульного тралового механизма*» на основании математической модели элементов гидравлической подвесной системы спроектирована имитационная модель каждого активного модуля объекта регулирования и получено формализованное описание многокаскадного нечеткого логического регулятора, содержащего в своей структуре два вложенных каскада.

В модуле активной подвески объекта регулирования можно выделить следующие основные элементы, такие как пропорциональный гидравлический распределитель и гидравлический привод. При составлении линейной модели были приняты следующие допущения: в цилиндре и распределителе отсутствуют утечки жидкости; эффективная площадь поршня постоянна; гидравлическая жидкость несжимаема; нагрузка не обладает упругостью; расход жидкости пропорционального распределителя линейно зависит от управляющего сигнала.

Гидравлический цилиндр двухстороннего действия преобразует давление жидкости в механическое движение поршня. Его динамика может быть описана следующим образом:

$$F = A \cdot P = m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k \cdot x, \quad (1)$$

где F – сила, создаваемая давлением жидкости, Н; A – эффективная площадь поршня, м^2 ; P – разность давлений в полостях цилиндра, Па; m – масса поршня и нагрузки, кг; b – коэффициент вязкого трения, Н·с/м; k – коэффициент упругости нагрузки, Н/м; x – положение поршня, м.

Расход жидкости в гидроцилиндре двухстороннего действия Q связан со скоростью движения поршня

$$Q = A \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (2)$$

Учитывая сжимаемость жидкости, изменение давления P связано с расходом Q и объемом жидкости V в цилиндре

$$Q = \frac{V}{\beta} \cdot \frac{dP}{dt} + A \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

где V – объем жидкости в цилиндре, м^3 ; β – модуль упругости жидкости, Па.

Пренебрегая упругостью нагрузки ($k = 0$) и сжимаемостью жидкости, передаточная функция цилиндра $W_{\text{цил}}(p)$ между давлением P и перемещением x будет иметь следующий вид:

$$W_{\text{цил}}(p) = \frac{X(p)}{P(p)} = \frac{A}{m \cdot p^2 + b \cdot p}. \quad (4)$$

Динамика пропорционального гидравлического распределителя, регулирующего поток жидкости в цилиндр, описывается следующим образом.

Расход жидкости Q пропорционален управляющему сигналу u

$$Q = K_v \cdot u, \quad (5)$$

где K_v – коэффициент пропорциональности, $\frac{\text{м}^3/\text{с}}{\text{В}}$; u – управляющий сигнал, В.

Пропорциональный распределитель имеет инерционность, связанную с электромагнитной системой управления. Его динамика может быть аппроксимирована передаточной функцией первого порядка

$$W_{\text{распр}}(p) = \frac{Q(p)}{U(p)} = \frac{K_v}{T \cdot p + 1}. \quad (6)$$

Рассматривая систему «пропорциональный распределитель – гидроцилиндр» как единое целое, общая передаточная функция $W_{\text{общ}}(p)$ будет произведением передаточных функций распределителя и цилиндра

$$W_{\text{общ}}(p) = W_{\text{распр}}(p) \cdot W_{\text{цил}}(p) = \frac{K_v}{T \cdot p + 1} \cdot \frac{A}{m \cdot p^2 + b \cdot p}. \quad (7)$$

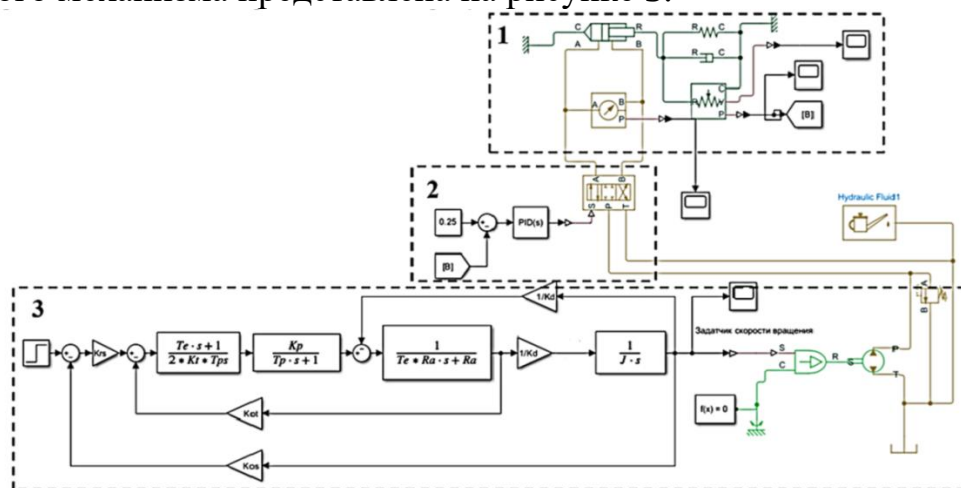
Введем в систему «пропорциональный распределитель – гидроцилиндр» ПИД-регулятор

$$W_{\text{ПИД}}(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d \cdot p. \quad (8)$$

Обобщенная передаточная функция системы «ПИД-регулятор – пропорциональный распределитель – гидроцилиндр» имеет вид

$$W_{\text{общ}}(p) = W_{\text{ПИД}}(p) \cdot W_{\text{распр}}(p) \cdot W_{\text{цил}}(p) = \frac{A \cdot K_v \cdot (K_d p^2 + K_p p + K_i)}{p \cdot (T \cdot p + 1) \cdot (m \cdot p^2 + b \cdot p)}. \quad (9)$$

На основе математического описания гидравлической подвески троса была получена имитационная модель активного элемента подвески с классическим ПИД-регулированием. Нулевой координатой и сигналом уставкой для регулятора является состояние штока подвески троса, соответствующей среднему его положению (0,25 м). Структурная схема имитационной модели одного модуля подвески модульного тросового механизма представлена на рисунке 3.



1 – гидроцилиндр с датчиком линейного перемещения; 2 – пропорциональный гидравлический распределитель с ПИД-регулятором; 3 – гидравлическая станция

Рисунок 3 – Имитационная модель элемента подвески модульного тросового механизма с классическим ПИД-законом управления

На рисунке 4 представлена форма возмущающего воздействия в виде усилия, подаваемого на шток гидравлического привода.

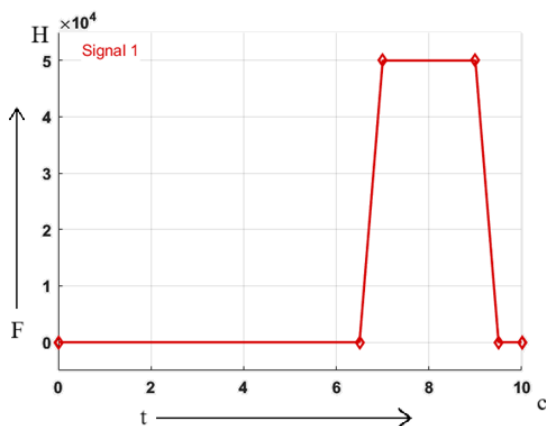


Рисунок 4 – Возмущающее воздействие трапецеидальной формы, подаваемое на шток гидропривода

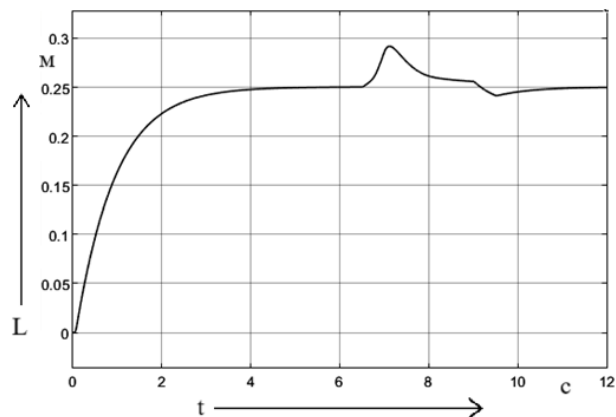
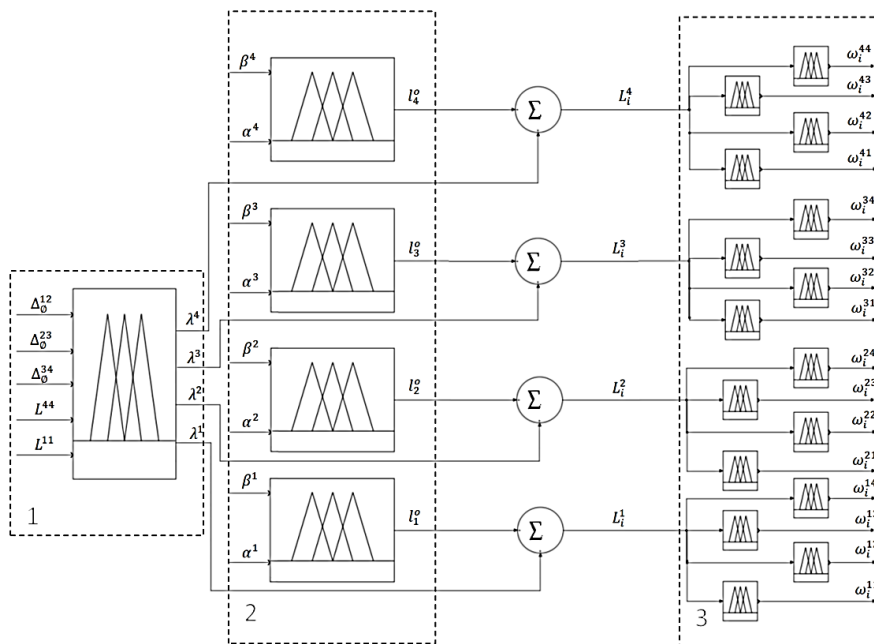


Рисунок 5 – График переходного процесса положения штока гидропривода

График, представленный на рисунке 5, иллюстрирует реакцию системы гидропривода на возмущающее воздействие в виде усилия, подаваемого на шток гидравлического привода. На графике видно, что при подаче возмущающего воздействия в виде усилия до 50 кН в момент времени 6,5 с шток привода выдвигается и классический ПИД-регулятор постепенно начинает компенсировать возникшее вытягивающее усилие путем изменения положения золотника гидравлического распределителя, тем самым меняя давление в полостях гидравлического цилиндра. При возникновении в момент времени 9,5 с подаваемого усилия регулятор изменяет положение золотника гидравлического распределителя и гидравлический цилиндр выходит в положение, соответствующее управляющему сигналу.

Наличие системы управления каждым элементом подвески на локальном уровне не позволяет решить задачу управления сложным многокоординатным объектом комплексно с учетом перечисленных ранее его особенностей, в соответствии с которыми тросовый механизм может состоять из нескольких полуплатформ, последовательно соединенных между собой. Каждая полуплатформа может содержать различное количество активных элементов гидравлической подвески с расположенными на них датчиками линейного перемещения, которые позволяют точно определить их положение в пространстве. Также на каждой платформе располагаются датчики горизонтального положения и датчик линейного рассогласования положения между платформами. На основе информации о конструктивных особенностях активной гидравлической подвески и параметров, поступающих на систему, была составлена функциональная схема компоновки модулей многокаскадного нечеткого логического регулятора, представленного на рисунке 6.

Регуляторы многокаскадной нечеткой системы (см. рисунок 6) решают следующие задачи: 1 – внешний каскад нечеткого регулятора отслеживает рассогласование между платформами и положение крайних элементов активной подвески; 2 – вложенный каскад первого уровня отслеживает положение по оси абсцисс и ординат для каждой платформы; 3 – вложенный каскад второго уровня, управляющий положением гидроприводов активной подвески.



1 – внешний каскад нечеткого регулятора; 2 – вложенный каскад первого уровня; 3 – вложенный каскад второго уровня

Рисунок 6 – Функциональная схема компоновки модулей многокаскадного нечеткого логического регулятора

Функционирование системы, показанной на рисунке 6, можно описать следующим образом. На внешний каскад нечеткого регулятора поступают сигналы с датчиков линейного рассогласования между платформами и положений крайних гидроприводов, находящихся на разных концах общей составной платформы. Синтезированный корректирующий выходной сигнал с внешнего каскада регулятора формируется индивидуально для каждой полуплатформы и суммируется с сигналом управления, сгенерированным регулятором первого уровня вложенности, на который поступает сигнал положения платформы в пространстве. Суммированный сигнал внешнего регулятора и регулятора первого уровня вложенности поступает на регуляторы второго уровня вложенности, которые контролируют положение гидроприводов на транспортных платформах.

Функцией нечеткой системы управления с алгоритмом вывода Такаги-Сугено нулевого порядка является стабилизация положения платформы с учетом различного рода возмущающих факторов, массогабаритных параметров груза, поперечного и продольного кренов. На основе полученной информации внешний регулятор и регулятор первого уровня вложенности синтезирует сигнал управления, который изменяет положение золотников пропорциональных гидравлических распределителей, тем самым изменяя положение штоков гидроприводов.

В общем виде степени истинности для предпосылок каждого правила нечеткого регулятора внешнего каскада можно формализовать следующим образом:

$$A_i(\Delta_\emptyset^{12}), B_i(\Delta_\emptyset^{23}), C_i(\Delta_\emptyset^{34}), D_i(L^{44}), E_i(L^{11}), \quad (10)$$

где $\Delta_\emptyset^{12}$, $\Delta_\emptyset^{23}$, $\Delta_\emptyset^{34}$ – величины отклонений между платформами; L^{44} , L^{11} – сигналы с датчиков положения крайних гидроприводов; A , B , C , D , E – входные функции принадлежности треугольной формы; i – номер правила в базе знаний ($i = 1 \dots N_1$).

На основе операции минимума определим уровни отсечения каждой нечеткой переменной для каждого нечеткого правила

$$\delta_i = \Lambda_i(A_i(\Delta_\emptyset^{12}); B_i(\Delta_\emptyset^{23}); C_i(\Delta_\emptyset^{34}); D_i(L^{44}); E_i(L^{11})). \quad (11)$$

Тогда значения выходной переменной, с учетом принятой базы правил, для регулятора верхнего уровня можно вычислить по формуле среднего взвешенного

$$\lambda^j = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \delta_i c_i}{\sum_{i=1}^{N_1} \delta_i}, \quad (12)$$

где j – количество выходов регулятора; c_i – выходные константы.

Степени истинности для базы знаний нечеткого логического регулятора (НЛР) внутреннего каскада, отслеживающего положение по осям абсцисс и ординат, для каждой платформы описывается следующим образом: $F_g(\alpha_\emptyset^k)$, $G_g(\beta_\emptyset^k)$, где g – номер правила в базе знаний регулятора второго уровня ($g = 1 \dots N_2$); $\alpha_\emptyset^k$ – текущий угол отклонения от нормали по оси абсцисс « k »-й полуплатформы; $\beta_\emptyset^k$ – текущий угол отклонения от нормали по оси ординат « k »-й полуплатформы.

Аналогично, как и у регулятора верхнего уровня, с помощью операции минимума определим уровни отсечения каждой нечеткой переменной для каждого нечеткого правила

$$\rho_g = \Lambda_g(F_g(\alpha_\emptyset^k), G_g(\beta_\emptyset^k)). \quad (13)$$

Значения выходной переменной, с учетом принятой базы правил, для регулятора внутреннего каскада можно вычислить по формуле среднего взвешенного

$$l_v^o = \frac{\sum_{g=1}^{N_2} \rho_g s_g}{\sum_{g=1}^{N_2} \rho_g}, \quad (14)$$

где o – количество выходов регулятора второго уровня; v – номер полуплатформы; s_g – выходные константы.

Управляющий сигнал для элементов внутреннего каскада второго уровня вложенности, управляющих положением гидроприводов, можно получить по формуле

$$L_i^k = \lambda^j + l_v^o. \quad (15)$$

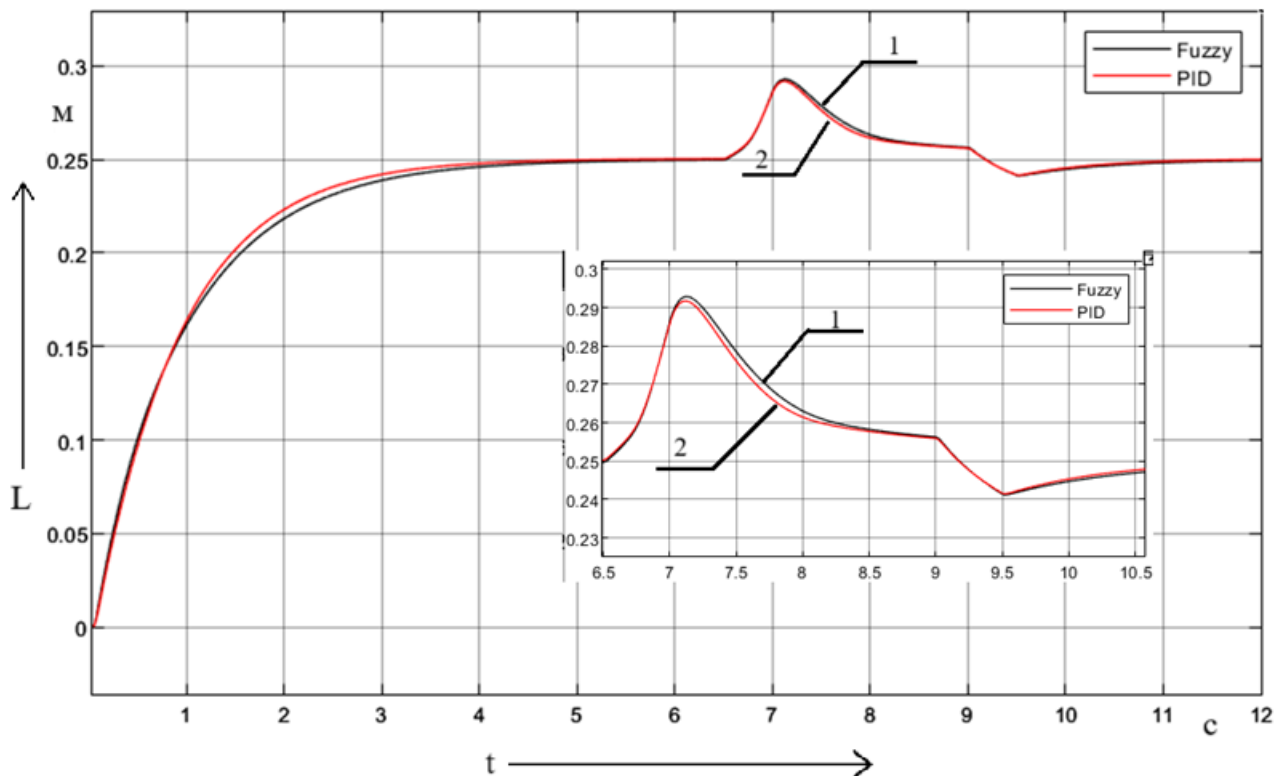
На основе полученного сигнала управления выходное воздействие регулятора второго уровня вложенности можно описать следующим образом:

$$\omega_r = \frac{\sum_{r=1}^{N_3} \min H_r(L^k) \sigma_r}{\sum_{r=1}^{N_3} \min \sigma_r}, \quad (16)$$

где r – номер правила в базе нечеткого модуля вложенного каскада ($r = 1 \dots N_3$); H – функции принадлежности; σ_r – выходные константы.

Из графика переходного процесса по положению штока привода, представленного на рисунке 7, можно сделать вывод, что нечеткий логический регулятор второго уровня вложенности имеет несущественные отклонения относительно эталонного графика переходного процесса с ПИД-законом управления и сохраняет при этом показатели системы по быстродействию и точности.

Таким образом, итоговое значение управляющего воздействия, формируемого многокаскадным нечетким логическим регулятором, представляет собой набор значений выходных лингвистических переменных вложенного каскада для отдельного элемента активной подвески каждой полуплатформы.



1 – классический ПИД-регулятор; 2 – НЛР второго уровня вложенности
Рисунок 7 – Графики переходного процесса по положению гидропривода с подачей возмущающего воздействия трапецеидальной формы

В третьей главе «Синтез и анализ имитационной модели гидравлической системы платформы модульного тралового механизма с многокаскадным нечетким логическим регулятором» реализована имитационная модель активной гидравлической подвески модульного тралового механизма, состоящего из четырех полуплатформ, настроен многокаскадный нечеткий логический регулятор, состоящий из внешнего регулятора с двумя уровнями вложенности, стабилизирующий положение платформы в пространстве.

При проектировании и моделировании системы управления были приняты следующие допущения:

- гидравлическая жидкость системы ISO VG 32(ESSO UNIVIS N32);
- конструктивно трал состоит из четырех полуплатформ, каждая из которых опирается на четыре гидравлических привода с датчиками линейного перемещения;
- каждая полуплатформа представляет собой абсолютно жесткую пластину, не подвергающуюся скручиванию и изгибам;
- целостность и твердость шин являются абсолютными;
- расстояние между соседними платформами (зазоры) настолько малы, что ими можно пренебречь.

Для стабилизации модульного тралового механизма, состоящего из четырехсекционной транспортной платформы на одном уровне в условиях изменения наклона дорожного полотна, были рассчитаны все ограничения, накладываемые на систему для ее корректной эксплуатации.

Задача системы управления, реализованной на основе нечеткого логического регулятора, формирующего уставки внутренних модулей управления за счет сумми-

рования значений сигналов регулирования, заключается в удержании всех четырех полуплатформ на одном уровне таким образом, чтобы при движении по дороге, имеющей наклон, не образовывалось вертикальное смещение платформ относительно друг друга (рисунок 8).

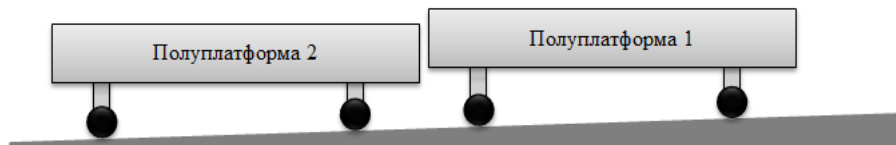


Рисунок 8 – Разница в высоте платформ

На основе принятых ранее допущений рассматриваемая модель трала состоит из четырех полуплатформ с четырьмя активными элементами подвески в каждой (рисунок 9, 10).



Рисунок 9 – Функциональная схема гидравлической системы трала при виде сверху

Условие для преодоления максимального угла наклона дорожного полотна определяется из условия, что гидроцилиндры 11 и 12 полностью втянуты, а гидроцилиндры 43 и 44 полностью выпущены. Исходя из математического расчета, максимальный допустимый угол наклона дорожного полотна не должен превышать $2,23^\circ$.

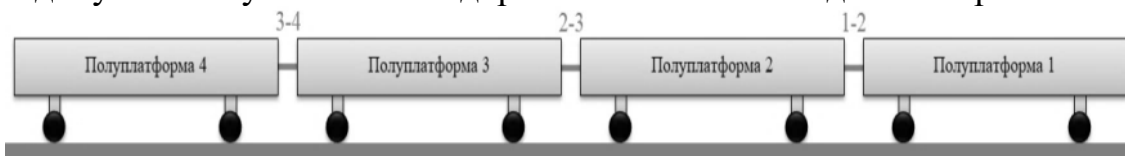
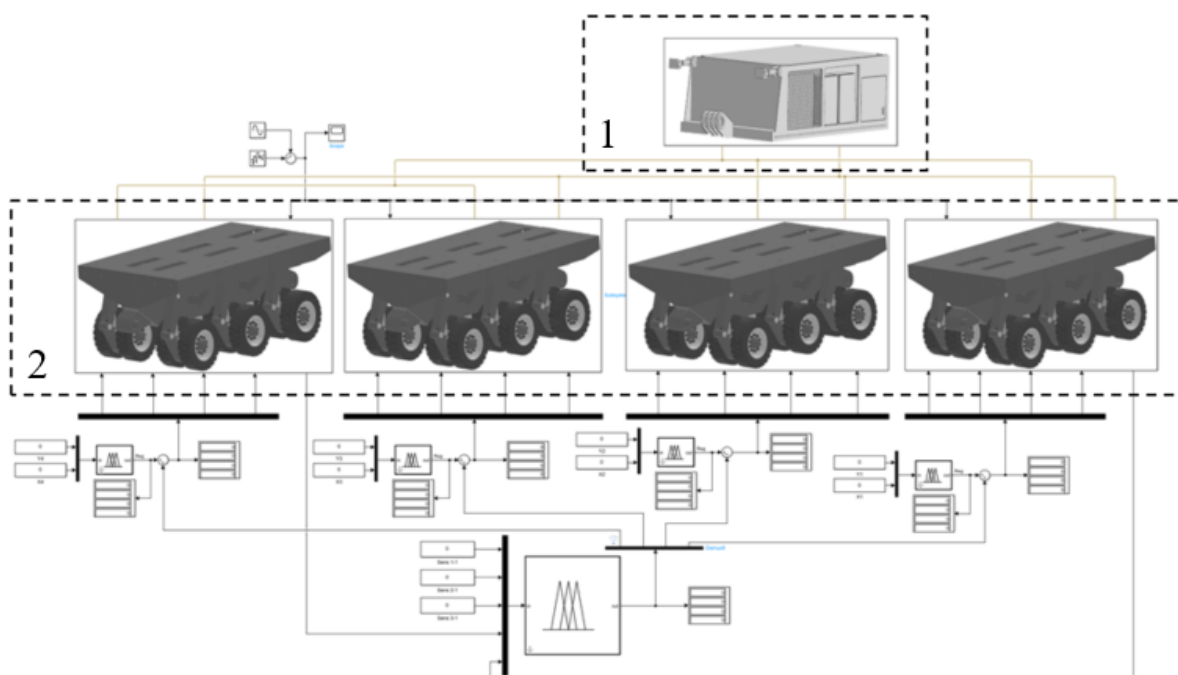


Рисунок 10 – Главный вид положения платформ при движении по ровной поверхности

При движении модульного тралового механизма, состоящего из нескольких полуплатформ, по наклонной поверхности неизбежно образовывается вертикальное рассогласование (см. рисунок 8). Для создания системы управления на базе внешнего нечеткого логического регулятора, которая позволит стабилизировать платформы, была сформирована продукционная база знаний, состоящая из 29 правил. Для этого были рассмотрены различные возможные варианты положения полуплатформ во время движения по дорожному полотну без наклона, с наклоном в подъем и с наклоном на спуске. На рисунке 11 представлена интеллектуальная система управления гидравлической подвеской модульного тралового механизма.

Имитационная модель нечеткой многокаскадной системы управления (см. рисунок 11) состоит из основных элементов, таких как гидравлическая станция, траловый механизм, состоящий из элементов активной гидравлической подвески с нечетким регулятором второго уровня вложенности (см. рисунок 3), и двух каскадов интеллектуальной системы управления.



1 – подструктура модели гидравлической станции;

2 – подструктуры талового модуля

Рисунок 11 – Интеллектуальная система управления гидравлической подвеской полуплатформ с нечетким логическим регулятором, формирующим уставки внутренних модулей за счет суммирования значений сигналов управления

На рисунке 12 представлена форма сигналов задания, поступающих на внешний нечеткий регулятор, имитирующих отклонения между платформами и линейное положение крайних гидроприводов на концах составного модульного троса 44 и 11.

Фрагмент базы правил нечеткого модуля, входящего в состав многокаскадного нечеткого логического регулятора, функцией которого является формирование уставок для регуляторов каскада первого уровня вложенности, может быть представлен в виде следующего набора:

1 If (sens_plato_1-2 is null) and (sens_plato_2-3 is null) and (sens_plato_3-4 is null) and (Platform4_Cilindr4 is null) and (Platform1_Cilindr1 is null) then (platform_1 = null) (platform_2 = null) (platform_3 = null) (platform_4 = null).

2 If (sens_plato_1-2 is null) and (sens_plato_2-3 is null) and (sens_plato_3-4 is null) and (Platform4_Cilindr4 is high_stop) and (Platform1_Cilindr1 is low_stop) then (platform_1 = null) (platform_2 = null) (platform_3 = null) (platform_4 = null).

3 If (sens_plato_1-2 is null) and (sens_plato_2-3 is null) and (sens_plato_3-4 is null) and (Platform4_Cilindr4 is low_stop) and (Platform1_Cilindr1 is high_stop) then (platform_1 = null) (platform_2 = null) (platform_3 = null) (platform_4 = null).

4 If (sens_plato_1-2 is null) and (sens_plato_2-3 is null) and (sens_plato_3-4 is null) and (Platform4_Cilindr4 is low_stop) then (platform_1 = null) (platform_2 = null) (platform_3 = null) (platform_4 = null);

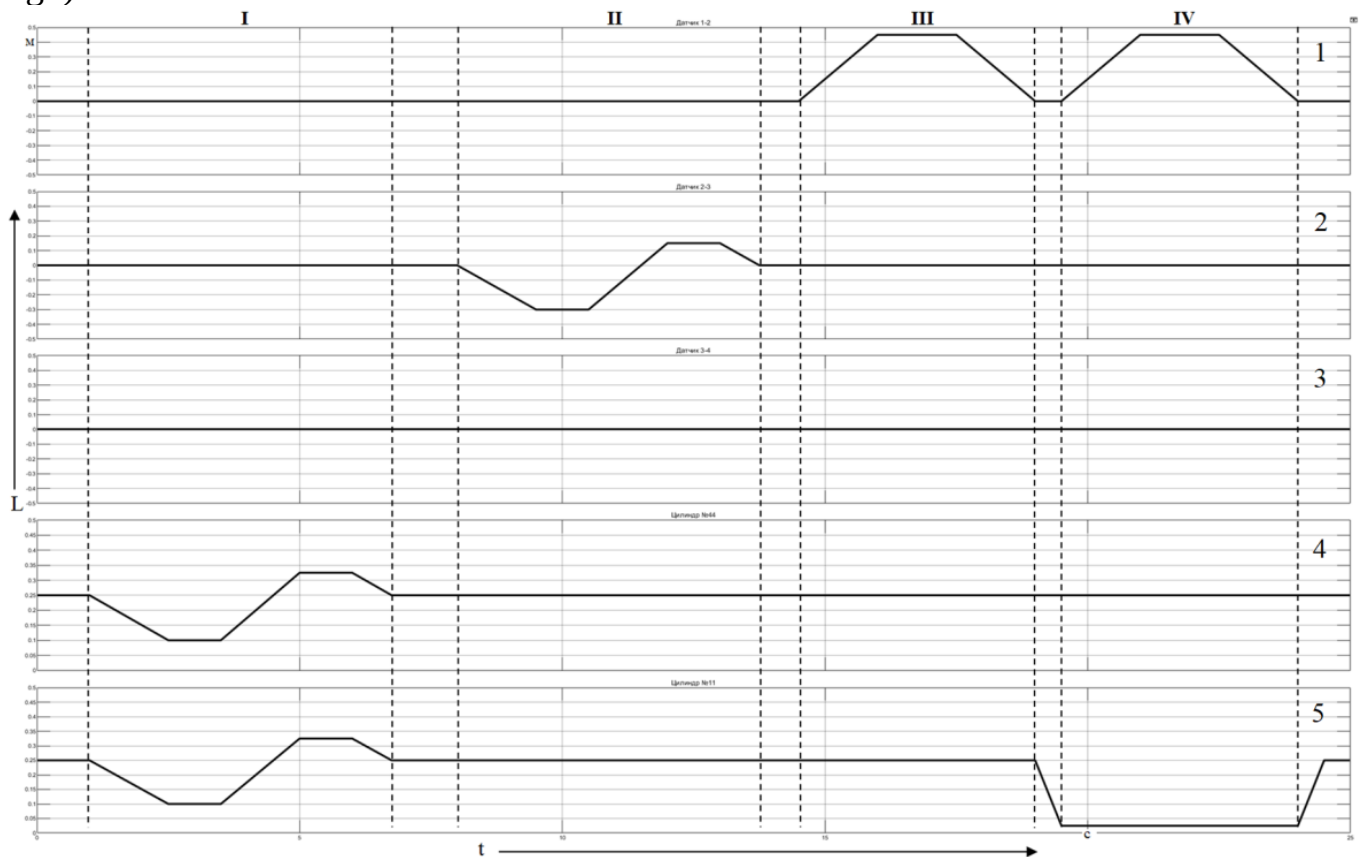
....

26 If (sens_plato_1-2 is null) and (sens_plato_2-3 is low) and (sens_plato_3-4 is null) and (Platform4_Cilindr4 is low_stop) and (Platform1_Cilindr1 not is high_stop) then (platform_1 = middle-low) (platform_2 = middle-low) (platform_3 = null) (platform_4 = null).

27 If (sens_plato_1-2 is null) and (sens_plato_2-3 is high) and (sens_plato_3-4 is null) and (Platform4_Cilindr4 not is high_stop) and (Platform1_Cilindr1 not is low_stop) then (platform_1 = middle-low) (platform_2 = middle-low) (platform_3 = middle-high) (platform_4= middle-high).

28 If (sens_plato_1-2 is null) and (sens_plato_2-3 is high) and (sens_plato_3-4 is null) and (Platform4_Cilindr4 is high_stop) and (Platform1_Cilindr1 not is low_stop) then (platform_1 = middle-low) (platform_2 = middle-low) (platform_3 = null) (platform_4= null).

29 If (sens_plato_1-2 is null) and (sens_plato_2-3 is high) and (sens_plato_3-4 is null) and (Platform4_Cilindr4 not is high_stop) and (Platform1_Cilindr1 is low_stop) then (platform_1 = null) (platform_2 = null) (platform_3 = middle-high) (platform_4= middle-high).



1 – отклонение между платформами 1 и 2; 2 – отклонение между платформами 2 и 3; 3 – отклонение между платформами 3 и 4; 4 и 5 – положения гидроприводов
Рисунок 12 – Графики сигналов задания входных параметров, поступающих в нечеткий логический регулятор

В интервале времени с 1 до 6,75 с (зона I) на вход нечеткого логического регулятора поступают сигналы с датчиков положения гидроцилиндров 11 и 44 об одновременном втягивании этих гидроцилиндров, при этом сигналы с датчиков 1-2, 2-3 и 3-4 равны нулю, что соответствует отсутствию наклона между полуплатформами. На основании входных значений НЛР формирует управляющий сигнал в соответствии с определенным правилом – выдвинуть все гидроцилиндры четырех полуплатформ, позволяя при этом скорректировать положение трала (рисунок 13).

Через некоторое время сигналы с датчиков положения гидроцилиндров 11 и 44 меняются на противоположные, что говорит о выдвигании гидроцилиндров. Реагируя на это, НЛР формирует управляющий сигнал в соответствии с заданным прави-

лом – втянуть все гидроцилиндры четырех полуплатформ, что также позволяет скорректировать положение трала.

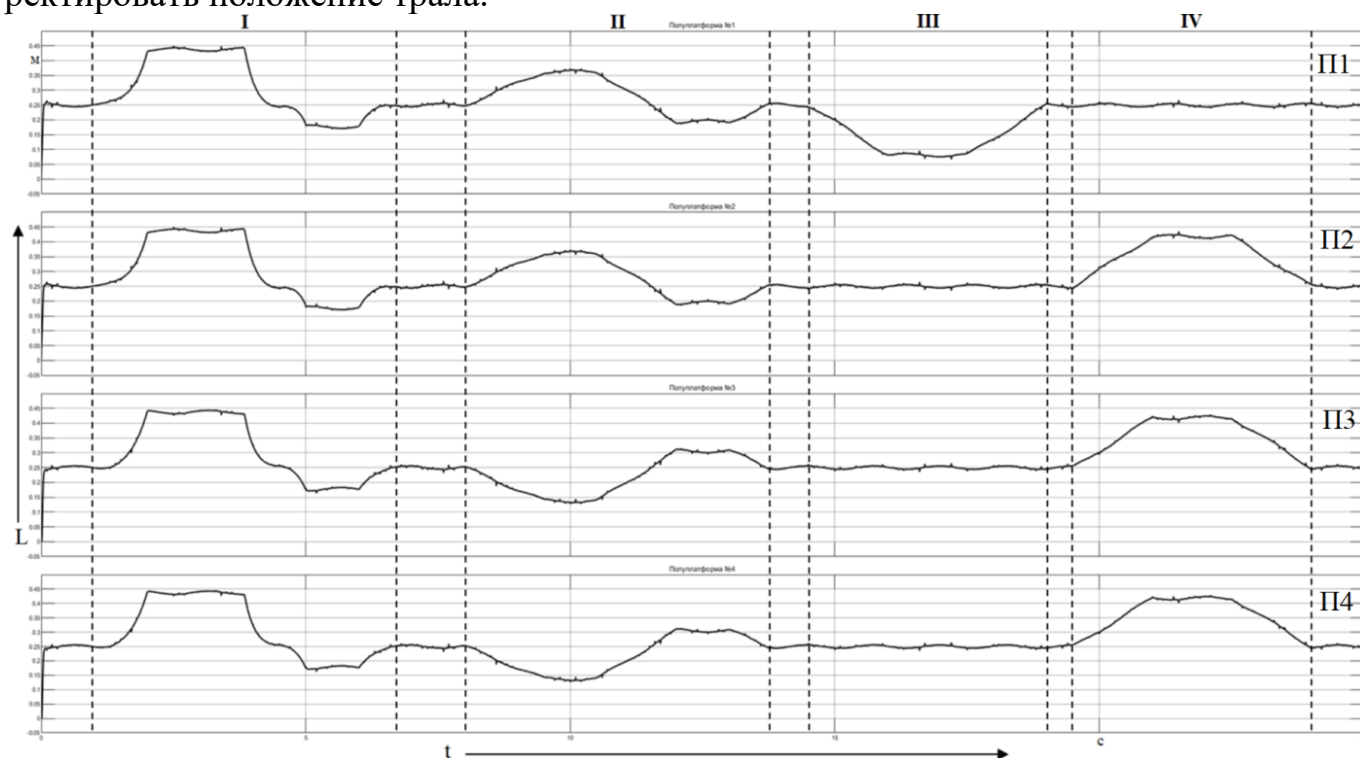


Рисунок 13 – Графики переходных процессов в гидроприводах при подаче на систему возмущающего воздействия в виде синусоидального сигнала с белым шумом

В интервале времени с 8 до 13,75 с (зона II) на вход НЛР поступает сигнал с датчика 2-3 положения полуплатформ 2 и 3, при этом сигналы с датчиков 1-2 и 3-4 равны нулю. Гидроцилиндры 11 и 44 находятся в среднем положении. Данный сигнал соответствует положению, когда полуплатформы 1 и 2 располагаются на одном уровне и одновременно выше уровня полуплатформ 3 и 4, полуплатформы 3 и 4 располагаются на одном уровне. На основании входных значений НЛР формирует управляющий сигнал в соответствии с правилом – выдвинуть все штоки полуплатформ 1 и 2 и втянуть все штоки полуплатформ 3 и 4, позволяя скорректировать положение трала. Через некоторое время сигнал с датчика 2-3 положения полуплатформ 2 и 3 меняется на противоположный, что соответствует положению, когда полуплатформы 1 и 2 располагаются на одном уровне и одновременно выше уровня полуплатформ 3 и 4, полуплатформы 3 и 4 располагаются на одном уровне. Реагируя на входные значения, НЛР формирует управляющий сигнал в соответствии с правилом – втянуть все штоки полуплатформ 1 и 2 и выдвинуть все штоки полуплатформ 3 и 4, позволяя скорректировать положение трала.

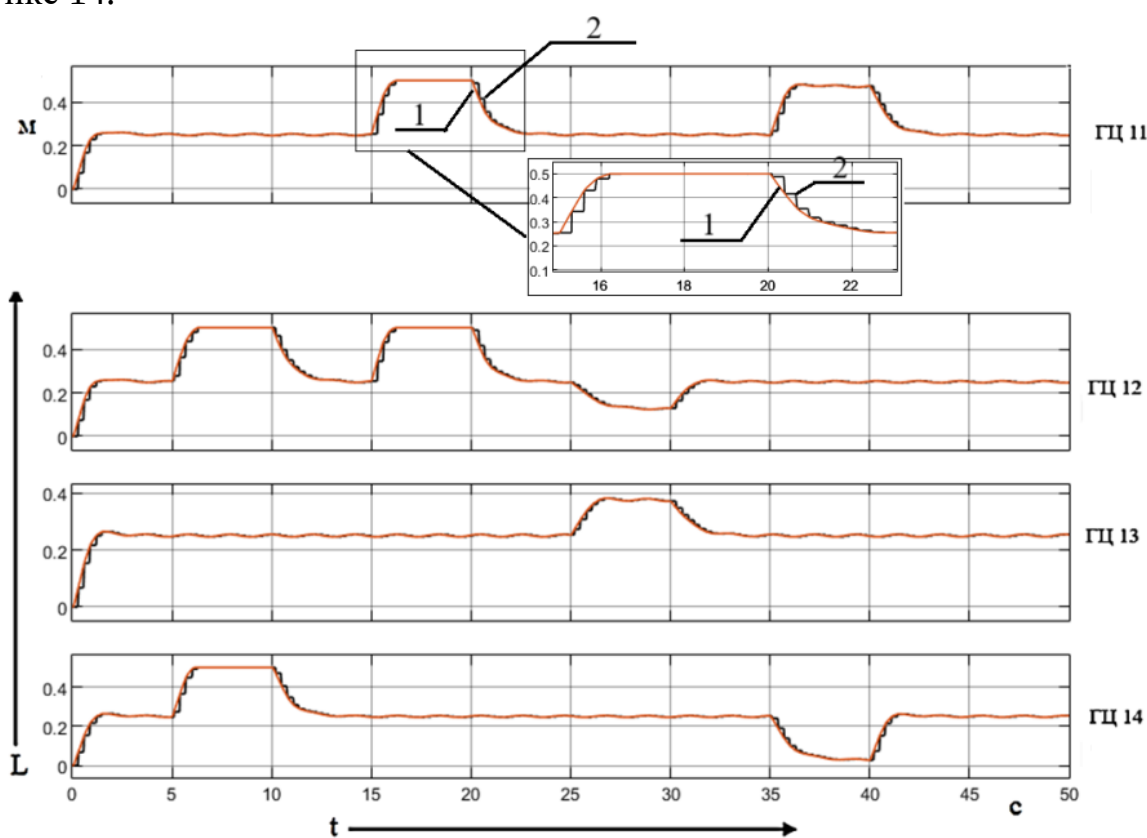
В интервале времени с 14,5 до 19 секунды (зона III) на вход НЛР поступает сигнал с датчика 1-2 положения полуплатформ 1 и 2, при этом сигналы с датчиков 2-3 и 3-4 равны нулю. Гидроцилиндры 11 и 44 находятся в среднем положении. Данный сигнал соответствует положению, когда полуплатформа 1 выше уровня остальных полуплатформ, полуплатформы 2, 3 и 4 располагаются на одном уровне. Реагируя на входные значения, НЛР формирует управляющий сигнал в соответствии с правилом – втянуть все штоки полуплатформы 1, не изменять положение гидроцилиндров полуплатформ 2, 3 и 4, позволяя скорректировать положение трала.

В интервале времени с 19,5 до 24 секунды (зона IV) на вход НЛР поступает сигнал с датчика 1-2 положения полуплатформ 1 и 2, при этом сигналы с датчиков 2-3 и 3-4 равны нулю. Гидроцилиндр 44 находится в среднем положении, гидроцилиндр 11 выдвинут практически на упор. Данный сигнал соответствует положению, когда полуплатформа 1 выше уровня остальных полуплатформ, полуплатформы 2, 3 и 4 располагаются на одном уровне, но так как гидроцилиндр 11 выдвигаться более не может, то использование правила невозможно. Реагируя на входные значения, НЛР формирует управляющий сигнал в соответствии с правилом – все штоки полуплатформ 2, 3 и 4 втянуть, не изменять положение гидроцилиндров полуплатформы 1, позволяя осуществить коррекцию положения трала.

В четвертой главе «Практическая реализация нечетких алгоритмов управления с использованием промышленных средств автоматизации» представлена реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора на базе предложенного подхода.

Многокаскадный нечеткий логический регулятор, отвечающий за управление одной четвертой части модульного тралового механизма платформы (см. рисунок 9), состоящий из каскада первого и второго уровней вложенности, реализован на базе программируемого микроконтроллера STM32F746ZGT6, ARM Cortex-M7. Синтезированный сигнал управления многокаскадного нечеткого логического регулятора на микроконтроллере передается на имитационную модель.

Графики переходных процессов в гидроприводах по положению представлены на рисунке 14.



1 – эталонная имитационная модель; 2 – аппаратная реализация многокаскадного нечеткого регулятора

Рисунок 14 – Графики переходных процессов по положению гидроприводов с НЛР второго и первого уровней вложенности

Регулятор стабилизирует положение платформы при возникновении продольных и поперечных возмущений в следующих временных периодах (см. рисунок 13): время с 5 до 10 с – отклонение $X=0^\circ$, $Y=+9^\circ$; время с 15 до 20 с – отклонение $X=-6^\circ$, $Y=0^\circ$; время с 25 до 30 с – отклонение $X=+3^\circ$, $Y=-4,5^\circ$; время с 35 до 40 с – отклонение $X=-5^\circ$, $Y=-6^\circ$.

Из анализа полученных графиков переходных процессов можно сделать вывод, что результаты моделирования системы управления с многокаскадным нечетким логическим регулятором, рассчитанные микроконтроллером, совпадают с графиками эталонной имитационной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научно-техническая задача по созданию многокаскадной нечеткой системы, реализующей сложные законы управления для стабилизации модульного тралового механизма при перемещении высокотоннажных грузов с учетом действия недетерминированных возмущений. Разработаны структурные и параметрические решения для моделей и алгоритмов, реализующих процедуры управления на основе многокаскадного нечеткого логического регулятора.

По результатам диссертационного исследования сделаны следующие выводы:

1) на основании проведенного анализа существующих моделей и алгоритмов управления составной многокоординатной системой на примере модульного тралового механизма определен ряд параметров, действующих на объект и оказывающих существенное влияние на его положение, учет которых при стандартных способах регулирования невозможен либо затруднен;

2) предложено математическое описание нечеткого логического регулятора с многокаскадной структурой построения, особенностью которой является формирование уставок для элементов вложенного каскада на основе операторов произведения и суммы, позволяющего повысить возможности применения модульного тралового механизма на дорогах общего пользования, а также обеспечить независимость системы регулирования от компоновки его составных частей;

3) разработана имитационная модель многокаскадной нечеткой системы управления, которая позволила выявить влияние продольных и поперечных кренов составляющих полуплатформ, а также сформировать интеллектуальную базу знаний регуляторов внешнего и внутреннего каскада первого и второго уровней вложенности, которая обеспечивает стабилизацию всех элементов модульного тралового механизма при различной компоновке и невыход продольных и поперечных отклонений каждой полуплатформы за пределы допустимых значений $[\pm 6^\circ; \pm 9^\circ]$;

4) показано, что применение иерархической многокаскадной структуры нечеткого логического регулятора позволяет сократить информационную нагрузку на средства промышленной автоматики, упростить реализацию интеллектуальной системы управления локального уровня и интегрировать в нее в существующие системы регулирования элементами подвесной системы модульного тралового механизма.

Перспективы дальнейшего развития работы. Предполагается развитие полученных результатов исследования с применением многокаскадного нечеткого логического регулятора с большим числом внутренних модулей для многодвигательных систем, штыревых машин, беспилотных аппаратов.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

- в научных изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:

1 **Хрульков, В. Н.** Особенности реализации нечетких алгоритмов управления на базе программируемых логических контроллеров / В. Н. Хрульков, С. П. Черный // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № 1(57). – С. 52–62.

2 **Хрульков, В. Н.** Моделирование многокаскадного нечеткого логического регулятора для управления многосоставным траловым механизмом на основе оператора сложения / В. Н. Хрульков, С. П. Черный // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № 5(69). – С. 53–60.

3 **Хрульков, В. Н.** Моделирование многокаскадного нечеткого логического регулятора для стабилизации модульного тралового механизма / С. П. Черный, В. Н. Хрульков, Б. Я. Мокрицкий // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 11. – С. 126–132. – DOI 10.17513/snt.40218. – EDN KMGSTW

4 **Хрульков, В. Н.** Разработка модели системы управления подвеской многоопорной транспортной машины с применением теории мягких вычислений / В. Н. Хрульков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 578–586.

- свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

5 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617058 Российская Федерация. Программная реализация нечеткого логического регулятора для управления модульной платформой по перемещению крупногабаритных высокотонажных объектов : № 2023615963 ; заявл. 28.03.2023 ; опубл. 05.04.2023 / В. Н. Хрульков, С. П. Черный, А. И. Бузикаева ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 1 с.

6 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617229 Российская Федерация. Программа реализации нечеткого регулятора для системы управления маломощным электроприводом : № 2023616075 ; заявл. 28.03.2023 ; опубл. 06.04.2023 / В. Н. Хрульков, С. П. Черный, А. И. Бузикаева ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 1 с.

7 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669082 Российская Федерация. Многокаскадная нечеткая система управления модульным тралом со стабилизацией горизонтального положения : № 2024668216 ; заявл. 31.07.2024 ; опубл. 14.08.2024 / В. Н. Хрульков, С. П. Черный, А. В. Охотников ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 1 с.

- в научных изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science:

8 **Khrulkov, V. N.** Method of Implementing a Fuzzy Logic Controller by Hardware / V. Khrulkov, S. Vasilchenko, S. Cherny // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2020. – P. 9271539. – DOI10.1109/FarEastCon50210.2020.9271539. – EDN RMKKKF.

9 **Khrulkov, V. N.** Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities / S. P. Cherniy, V. I. Susdorf, A. V. Buzikae-

va, V. N. Khrulkov // EAI Endorsed Transactions on Energy Web. – 2021. – No. 31. – P. 4. – DOI 10.4108/eai.13-7-2018.165496. – EDN RVZZPA.

10 **Khrulkov, V. N.** Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers / S. Vasilchenko, S. Cherny, V. Khrulkov // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 9111902. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902. – EDN JJRMXQ.

11 **Khrulkov, V. N.** High-speed energy-efficient power sources for electromechanical systems / S. A. Vasilchenko, S. P. Cherny, V. N. Khrulkov // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 126-135. – DOI 10.1007/978-3-030-69421-0_14. – EDN YVJQPI.

12 **Khrulkov, V. and Cherniy S.** "Intelligent Suspension Control System for Modular Trawl System," 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 315-319, doi: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272806.

- публикации в других научных изданиях:

13 **Хрульков, В. Н.** Анализ нечетких систем реализованных на ПЛК и средствами моделирования / В. Н. Хрульков, С. П. Черный, Т. А. Давудов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в 3-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 06 – 10 апреля 2020 года. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. – С. 352–354.

14 **Хрульков, В. Н.** Особенности реализации нечетких регуляторов с применением универсальных платформ ПЛК / В. Н. Хрульков // Гагаринские чтения – 2020 : сборник тезисов докладов, Москва, 27 декабря 2019 года – 17 2020 года. – М. : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 589.

15 **Хрульков, В. Н.** К вопросу моделирования нечетких систем управления гидравлической подвески троса / В. Н. Хрульков, С. П. Черный // XLVII Гагаринские чтения 2021 : сборник тезисов работ XLVII международной молодежной научной конференции, Москва, 20 – 23 апреля 2021 года. – Москва : Перо, 2021. – С. 756–757.

16 **Хрульков, В. Н.** Применение аппарата нечеткой логики для управления гидравлическими системами при транспортировке сверхтяжелых карьерных самосвалов / В. Н. Хрульков, С. П. Черный // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : материалы IV Международной научно-практической конференции, 16 – 26 февраля 2021 года / редколлегия : С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – С. 72–75.

17 **Хрульков, В. Н.** Один из подходов к моделированию процесса стабилизации высокотоннажной платформы / В. Н. Хрульков, С. П. Черный, А. В. Охотников // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : материалы V Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 06 – 11 декабря 2021 года / редколлегия : С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022. – С. 100–103.

18 **Хрульков, В. Н.** Разработка пневматической экспериментальной установки для стабилизации грузов в пространстве с помощью нечеткого логического регулятора / В. Н. Хрульков, И. А. Иванова // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : материалы VI Международной научно-практической конференции : в 2-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 05 – 11 декабря 2022 года / редколлегия : С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 109–111.

19 **Хрульков, В. Н.** Моделирование элементов гидравлической системы трала / В. Н. Хрульков, С. П. Черный // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 12 – 16 апреля 2021 года. Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 83–85.

20 **Хрульков, В. Н.** Особенности реализации интеллектуальной развитой системы управления модульным высокотоннажным тралом / В. Н. Хрульков, А. В. Бузикаева, С. П. Черный // Трансформация информационно-коммуникативной среды общества в условиях вызовов современности : материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 30 ноября – 01 2023 года. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2023. – С. 25–27.