

Владимирский государственный университет

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ**

**Материалы I Международной научно-практической
конференции**

19 – 21 ноября 2025 г.

Владимир 2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Материалы I Международной научно-практической конференции

19 – 21 ноября 2025 г.

Электронное издание



Владимир 2026

ISBN 978-5-9984-1901-0

© ВлГУ, 2026

© Коллектив авторов, 2026

УДК 62-5

ББК 30

Редакционная коллегия:

Денисов М. С., к.т.н. зав. каф. АМиР (*отв. редактор*)

Сысоев С. Н., д.т.н., профессор каф. АМиР (*член редколлегии*)

Посаженников А. А., к.э.н., доцент каф. АМиР (*член редколлегии*)

Чеботарев П. А., ассистент каф. АМиР (*член редколлегии*)

Левина С. М., ассистент каф. АМиР (*секретарь*)

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Современные технологии промышленной автоматизации
[Электронный ресурс] : материалы I Междунар. науч.-практ. конф. 19 – 21
нояб. 2025 г. / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир :
Изд-во ВлГУ, 2026. – 363 с. – ISBN 978-5-9984-1901-0. – Электрон. дан. (7,23
Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3
ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул.
экрана.

Статьи, включенные в настоящий сборник, посвящены вопросам применения современных технологий в системах автоматизации производственных процессов. В сборнике рассматриваются проблемы применения промышленных роботов и мехатронных систем, контроллеров, разработки программного обеспечения для автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Материалы конференции будут полезны для исследователей и учёных в области автоматизации производства, инженеров, разработчиков систем управления, а также специалистов в области машиностроения, ракетно-космической техники, авиации, транспорта и др.

ISBN 978-5-9984-1901-0

© ВлГУ, 2026

© Коллектив авторов, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

М. С. Денисов

**ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАТРОНИКИ
И РОБОТОТЕХНИКИ ВЛГУ: ОТ ИСТОКОВ ДО НАШИХ ДНЕЙ 9**

М. С. Денисов

**СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОДГОТОВКИ
СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ
И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ 13**

В. С. Лагута

**КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ..... 18**

М. А. Горькавый, В. Д. Ворощенко

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ
ДВИЖЕНИЙ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА 24**

Л. И. Шеманаева

**АКУСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЫСТРЕЛА КАК МЕТОД
ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ 31**

К. Г. Семенов, В. В. Чернов, К. А. Батышев, С. Н. Панкратов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ
МОДЕЛЯМ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОЙ МЕДИ М1 37**

К. Г. Семенов, В. В. Чернов, К. А. Батышев, С. Н. Панкратов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОКИЛЬНОГО ЛИТЬЯ
ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОЙ МЕДИ М1 44**

С. Ю. Дудников, П. И. Михеев

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ПО ИЗВЛЕЧЕНИЮ
ИНФОРМАЦИИ ИЗ СКАНИРОВАННЫХ ТЕКСТОВЫХ
ДОКУМЕНТОВ С ТАБЛИЧНОЙ ЧАСТЬЮ 52**

А. И. Кучерова, М. А. Мельниченко

**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РОБОТИЗИРОВАННОГО
КОМПЛЕКСА ОКРАШИВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
ДЕТАЛЕЙ 63**

В. Д. Ворощенко, А. С. Гудим

**ФУНКЦИОНАЛ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО
ДВОЙНИКА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РЕСУРСОЗАТРАТНОСТИ
РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 70**

И. С. Бухарестов, А. А. Назаров

**МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК
ИЗ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ МАТЕРИАЛОВ 76**

Д. Ю. Орлов, Хэ Мэньяо

**МОНТАЖ, НАЛАДКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ: КОМПЛЕКСНЫЙ
ПОДХОД 82**

И. В. Румянцев

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
ДИАГНОСТИКИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ..... 92**

Е. С. Рыжаков, А. В. Федотова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
МАРКИРОВКИ И ПРИЁМКИ ПАЛЛЕТ НА ПРОИЗВОДСТВЕ
КОМБИКОРМОВ И СПОСОБОВ ЕГО АВТОМАТИЗАЦИИ..... 97**

А. С. Хижняк, А. В. Федотова

**НМИ-ЦЕНТРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ФАКЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ:
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИНТЕГРАЦИЯ И ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ..... 104**

И. С. Бухарестов, М. С. Денисов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСТАНЦИИ ХОЛОДНОГО
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НА АДГЕЗИЮ
ПОКРЫТИЯ С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ 110**

И. Р. Бакеев

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СЕРВО-ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ
СИСТЕМОЙ..... 117**

С. В. Стальмаков, И. И. Белоглазов

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
НАГРЕВА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ В ТРУБЧАТОЙ
ПЕЧИ 128**

А. Д. Петрушин

**ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ
ТЕРМИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ.....** 136

В. В. Фоменко, П. А. Чеботарев

**ЗНАЧЕНИЕ ERP-СИСТЕМ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ
АВТОМАТИЗАЦИИ В СОВРЕМЕННОМ
АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ** 142

В. В. Фоменко, С. М. Левина

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ 145

М. С. Денисов, К. Е. Давыдов, Г. С. Ленеvский

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МЛПД
С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ НА ГРАНИЦЕ
ОТЛИВКА-ФОРМА.....** 151

П. А. Чеботарев

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
ВАКУУМИРОВАНИЯ ПРЕСС-ФОРМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ ЛИТЬЯ
ПОД ДАВЛЕНИЕМ** 157

В. С. Воробьев, В. А. Петров, И. В. Емельянов

**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА
«ТЕЛЕЖКА – МАЯТНИК» С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕКТОРНОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ СДПМ** 162

А. А. Кобзев, И. Д. Филимонов

**САУ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
В УПРАВЛЯЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....** 167

А. А. Кобзев, М. С. Лабаев

**УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА НЕЙРОСЕТИ
С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ.....** 173

И. С. Бухарестов, А. А. Назаров

**ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ПРИВодОВ
ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ.....** 179

Д. А. Давыдов, М. Р. Максимов, В. П. Умнов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕР-РОБОТА С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА MATLAB.....** 182

М. Р. Максимов, В. П. Умнов

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
ПЛАТФОРМЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОПОРНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ** 190

Ю. А. Хопряников, М. С. Килина, А. Ю. Пелипенко

**ОБЗОР ВАРИАНТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ НА МОБИЛЬНЫХ МАШИНАХ** 198

А. В. Шабунин, Г. А. Котов

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ КОЛЕННОГО
СУСТАВА ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ.....** 206

Эрик Бисамба Мпенгеле, Е. В. Лукьянов

**ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ И ОДОМЕТРИЯ
В ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ.....** 210

С. В. Филимонов, И. О. Тёмкин, А. В. Рыбаков

**РОБОТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ВНУТРЕННЕГО
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТРУБ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ.....** 222

А. В. Лось, А. В. Щагин

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОСТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРОЙ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ В СРЕДЕ ENGEE.....** 230

Г. А. Малышев, В. А. Немонтов

**АЛГОРИТМЫ ФИКСАЦИИ ОБЪЕКТА В СИСТЕМАХ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ.....** 236

А. А. Григорьев, В. А. Немонтов

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ
LiFePO₄-АККУМУЛЯТОРА И КОМПАКТНОГО
БЕНЗОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ** 241

Д. А. Савин, В. А. Немонтов

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ РОБОТИЗИРОВАННОГО
КОМПЛЕКСА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ 247**

Д. М. Грабарь, Ю. С. Иванов

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ СРЕДЫ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОЛЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА
В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ 252**

М. А. Срыбник, К. А. Эльман

**АКТУАЛЬНОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ 259**

В. А. Степанищев, И. И. Белоглазов

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ «МИР ПИА ПРОЦЕСС+»
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕГОНКИ СЫРОЙ
НЕФТИ 264**

А. В. Тельный, М. Ю. Монахов, Е. А. Матвеева

**АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРА
КАК НАРУШИТЕЛЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА
ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЕ ТЕРРИТОРИЙ ОХРАНЯЕМЫХ
ОБЪЕКТОВ 270**

Е. А. Толокнов, М. Ю. Монахов

**АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ СПОРАДИЧЕСКИХ
КОНТЕКСТНЫХ СООБЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ
ПАТТЕРНОВ 277**

Н. Н. Бахтадзе, А. А. Быков, О. Б. Громов, П. И. Михеев, С. О. Травин

**МЕТОД СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ХИМИКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 282**

С. В. Кузнецов

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ КАК СРЕДСТВО ИДЕНТИФИКАЦИИ
ДИНАМИКИ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 296**

М. В. Баранчиков

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВУХКАСКАДНОЙ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ, ПОСТРОЕННОЙ НА БАЗЕ
ПОНИЖАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ
С ПИ-РЕГУЛЯТОРАМИ 303**

А. В. Чесноков, А. В. Ифанов

**РАЗРАБОТКА РС-КОНТРОЛЛЕРА
ДЛЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РАДИОУПРАВЛЕНИЯ
ЛЕТАЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ..... 310**

Ю. А. Фетисова, А. А. Назаров

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ..... 316**

Д. Д. Логинов

**ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ЭКЗОСКЕЛЕТА 324**

В. В. Фоменко, А. А. Посаженников

**ПРИМЕНИМОСТЬ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РФ 330**

С. И. Рыкалов, М. С. Килина

**ОБЗОР ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЖИДКОСТНЫХ
АММОТИЗАТОРОВ 335**

С. Н. Сысоев, Е. С. Енюхин, С. В. Жулин

**ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПУСКОВЫХ УСТАНОВОК
С КАМЕРНЫМ ТОРООБРАЗНЫМ ПРИВОДОМ..... 343**

Р. В. Романов, Р. В. Семин, М. С. Горячев

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СБОР ДАННЫХ О КАЧЕСТВЕ ВОДЫ
И САНИТАРНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ СИСТЕМ
ГОРЯЧЕГО И ХОЛОДНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ..... 350**

Т. В. Боровкова, С. С. Гаврюшин, М. В. Мурашев

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
НАНДОИНДЕНТИРОВАНИЯ ИЗОТРОПНЫХ
ВЯЗКОУПРУГОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ 356**

История кафедры автоматизации, мехатроники и робототехники ВлГУ: от истоков до наших дней

Денисов Максим Сергеевич заведующий кафедрой автоматизации, мехатроники и робототехники (АМиР) ВлГУ

Кафедра автоматизации, мехатроники и робототехники берет свое начало с 1972 года, когда в составе Владимирского политехнического института была образована кафедра «Станки-автоматы и автоматизация процессов в машиностроении», которая осуществляла подготовку инженеров - электромехаников по специальности 0636 «Автоматизация и комплексная механизация», специализация «РТК в машиностроении». Первым заведующим кафедрой был назначен к.т.н., доцент Игорь Николаевич Егоров.

В 1984 году кафедра получила название «Робототехника и автоматизированные производства». Начинается подготовка инженеров по специальности 0654 «Робототехнические системы и комплексы» со специализацией «Интеллектуальные робототехнические системы» (впоследствии, специальности 2106 и 2103).



Архив ВлГУ. Игорь Николаевич Егоров

В 1994 году кафедра получила название «Автоматизация технологических процессов» (АТП). Заведующим кафедрой назначен д.т.н., профессор Коростелев Владимир Федорович, начинается подготовка специалистов по направлению 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств».



Архив ВлГУ. Коростелев Владимир Федорович

В 2002 открыта специальность 071800 — «Мехатроника». Приказом по ВлГУ №75/1 от 30.05.2003 г открыта кафедра «Автоматические и мехатронные системы» (АиМС), которой первые несколько лет руководил проф. Егоров И.Н., а в последующем с 2006 по 2019 г д.т.н., проф. Кобзев Александр Архипович.



Архив ВлГУ. Кобзев Александр Архипович

В 2019 г. принято решение объединить кафедры «Мехатроника и электронные системы автомобилей» и «Автоматизация технологических процессов» и организовать кафедру «Автоматизация, мехатроника и робототехника» (АМиР). В 2023 году кафедру АМиР возглавил к.т.н., доцент Денисов Максим Сергеевич.



Архив ВлГУ. Денисов Максим Сергеевич

На сегодняшний день кафедра осуществляет подготовку по двум направлениям: «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Мехатроника и робототехника». На кафедре обучается более 700 студентов по всем уровням образования и формам обучения. В общей сложности в подготовке специалистов задействованы 39 сотрудников, включая учебно-вспомогательный персонал, 14 доцентов и 4 профессора.

Кафедра реализует несколько международных образовательных программ с Хэнаньским профессионально-техническим институтом промышленности (г. Хэнань) и Уханьским профессиональным институтом (г. Ухань), по которым обучается около 100 студентов из КНР, а преподаватели ежегодно выезжают в указанные образовательные учреждения для проведения практических занятий и чтения лекций.

Научные школы кафедры занимаются опытно-конструкторской и исследовательской работой в области автоматизации и роботизации

технологических процессов. Ежегодно по заказу предприятий и в рамках государственного задания выполняются опытно-конструкторские и научно-исследовательские работы. Молодые сотрудники и аспиранты кафедры активно занимаются инновационной деятельностью, на кафедре успешно функционирует малые инновационные предприятия.

По запросам предприятий Владимирского региона преподавателями кафедры проводятся курсы повышения квалификации и переподготовки кадров.

Кафедра располагает современной материально-технической базой, которая активно развивается при поддержке промышленных партнеров.

На сегодняшний день подписано и успешно реализуется более 20 соглашений с ведущими предприятиями Владимирского региона о стратегическом партнерстве, на которых студенты проходят производственную практику, а выпускники успешно трудоустраиваются.



Архив АМиР. Коллектив кафедры автоматизации, мехатроники и робототехники (АМиР)

Состояние, проблемы и перспективы подготовки специалистов в области автоматизации и управления технологическими процессами

Денисов Максим Сергеевич заведующий кафедрой автоматизации, мехатроники и робототехники (АМиР) ВлГУ

В современной России остро стоит вопрос подготовки высококвалифицированных инженерных кадров. Как отметил Президент России Владимир Путин на заседании Совета по науке и образованию в 2025 г., перед страной стоит конкретная цель — достичь конкурентоспособности по ключевым направлениям технологического развития. Для реализации этой амбициозной задачи требуется принципиально новый подход к подготовке специалистов. Речь идет не просто о квалифицированных работниках, а о профессионалах, способных генерировать уникальные решения для новых индустрий и работать с передовыми методами проектирования и конструирования [1].

Стоит напомнить и высказывание бывшего министра образования и науки Российской Федерации А. А. Фурсенко о том, что к российским брендам — конкурентоспособным, имеющим мировое признание, с которыми страна может выйти на мировой рынок как полноценный член, относится и российское инженерное образование [2].

Особую актуальность приобретает преодоление кадрового дефицита в промышленности, преодолеть который возможно за счет современных технологий в области автоматизации и управления технологическими процессами. Согласно исследованиям, предприятия, внедрившие автоматизацию ключевых процессов, демонстрируют рост производительности на 15-30% и сокращение операционных расходов на 20-25% [3]. По оценкам экспертов, в 2024 году российский рынок автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) достиг 124 млрд рублей, что на 49,7% больше по сравнению с позапрошлым годом. При положительной динамике уровня цифровизации этот процесс в промышленности, как уже было сказано, сдерживают острая нехватка специалистов, а также значительное отставание в области разработки отечественного ПО. Большое значение приобретает импортозамещение, но по состоянию на 2024 год доля отечественных АСУ ТП в ключевых отраслях промышленности составляет менее 10%. Прогнозируется, что в 2025 году эта цифра вырастет на 4–5% [4], что, с

одной стороны, недостаточно динамично, а с другой – подчеркивает огромный потенциал для дальнейшего развития.

Кроме количества, необходимо обратить внимание и на качество специалистов. Нужно отметить, что инженеры в области АСУ ТП должны обладать глубокими знаниями в области сложных технологических систем. В связи с этим необходимо создание единой системы подготовки соответствующих кадров, охватывающей все уровни образования — от школы до университета. В качестве одного из ключевых инструментов решения этой задачи может быть создание на базе школ инженерно-технических классов.

Еще одним ключевым направлением является ранняя профориентация студентов на рынке труда. Особую роль в этом процессе должны сыграть предлагаемые Правительством центры карьеры при вузах, которые станут связующим звеном между студентами и работодателями. В таком случае необходимо на порядок увеличить долю практического обучения, при этом устаревшие образовательные программы необходимо исключить из учебных планов.

Кроме дефицита кадров, существует еще одна проблема — несоответствие компетенций выпускников требованиям современного производства.

Для решения этой проблемы предлагается внедрить гибкую систему профессионального образования, позволяющую студентам после завершения определенного цикла обучения проходить аттестацию с получением квалификации, выходить на работу или продолжать обучение по программам образования. Для реализации такого подхода необходимо сформировать модель так называемого непрерывного образования, где промышленность и образование создают эффективный механизм взаимного развития: предприятия активно вовлекают молодежь через производственные практики, а образовательные учреждения получают поддержку в развитии профильных программ. Предприятия также способны обеспечить наличие современного высокотехнологичного оборудования и, соответственно, оказать содействие в подготовке специалистов, способных не только разрабатывать новую продукцию, но и работать на новом, высокотехнологичном оборудовании. Также производственные компании должны участвовать в общественно-профессиональной аккредитации учебных программ, проводить сертификацию инженеров – тех, кто прошел эти аккредитованные учебные программы.

Для эффективного взаимодействия предприятий и выпускающих технологических кафедр на базе последних должны функционировать научно-производственные лаборатории [5], которые в перспективе могут быть преобразованы в полноценные производственные комплексы. Это позволит повысить качество обучения студентов, а также поднять престиж и значимость инженерных специальностей в структурных подразделениях вузов. Кроме того, кадровый состав и созданная материальная база будут более востребованы со стороны предприятий при решении различных производственных проблем как в научном, так и в практическом плане.

Такая уверенность базируется на достигнутых за последние годы кафедрой АМиР ВлГУ научных и практических результатах в области автоматизации технологического оборудования, включая разработку новых технологий и получение с их помощью продукции с уникальными свойствами.

Примеры оснащённости технологическим оборудованием материальной базы научно-производственного комплекса кафедры АМиР ВлГУ показаны на рисунке 1.



Рисунок 1. Учебное оборудование



Рисунок 2. Учебно-производственное оборудование

Список источников

1. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/>.
2. "РИТМ машиностроения" № 2-2025, с 38-42.
3. Инженерное образование: состояние, проблемы, перспективы [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/inzhenernoe-obrazovanie-sostoyanie-problemy-perspektivy-1> (дата обращения: 10.09.2018).
4. <https://cyberleninka.ru/article/n/inzhenernoe-obrazovanie-v-rossii-podgotovka-kadrov-sostoyanie-i-perspektivy/viewer> (дата обращения: 10.09.2025).
5. Белов В.Д. Кафедра литейных технологий и художественной обработки материалов НИТУ «МИСиС» в современных условиях развития России. ТРУДЫ IX Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» НИТУ «МИСиС» 13-17 ноября 2017 г. с 8-13.

УДК 62; 658; 658.512

Концептуальное проектирование автоматизированного производства изделий ракетно-космической техники

Лагута Виктор Степанович¹

ipilp@mail.ru

SPIN-код: 7064-2640

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены возможности использования методологии концептуального проектирования компьютерно-интегрированных производственных систем для выбора наиболее эффективного варианта в условиях предстоящей эксплуатации. Показаны варианты построения производства на основе использования изотермической штамповки и электронно-лучевой наплавки. Обоснована необходимость использования моделирования функционирования концептуальных вариантов построения производственной системы для получения оценок эксплуатационных показателей и принятия решения о продолжении проектных работ.

Ключевые слова: роботизированное производство, изготовление шар-баллонов, изотермическая штамповка, электронно-лучевая наплавка, моделирование функционирования.

Conceptual Design of Automated Production of Rocket and Space Technology Products

Victor S. Laguta¹

ipilp@mail.ru

SPIN-код: 7064-2640

¹BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The possibilities of using the methodology of conceptual design of computer-integrated production systems for choosing the most effective option under the conditions of the upcoming operation are considered. The options of building production based on the use of isothermal stamping and electron beam welding are shown. The necessity of using the modeling of the functioning of conceptual options of building a production system for obtaining estimates of performance indicators and making a decision on the continuation of design work is substantiated.

Keywords: robotic production, balloon manufacturing, isothermal stamping, electron beam welding, and functional modeling.

Введение. Развитие современных технологий проектирования позволяет уже на начальных этапах анализировать концептуальные решения в достаточно подробной степени проработки – в том числе до

уровня маршрутных и операционных технологических процессов (ТП). А это в свою очередь дает возможность оценить поведение производственной системы (ПС) в будущих условиях эксплуатации, в том числе оценить конечную эффективность принимаемых технических решений. Особенно важным такой подход становится при проектировании ПС, ориентированных на изготовление заведомо ограниченной (но требующей безусловного выпуска!) номенклатуры. Как правило это касается производства вооружений и военной техники, в том числе изделий ракетно-космической техники (РКТ). Задача концептуального проектирования – не только определить параметры и внешний вид проектируемого объекта, но и рассмотреть весь спектр вопросов, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией объекта. Разработка концепции требует особого внимания именно потому, что «она является начальным этапом всего процесса проектирования и строительства объекта и, образно выражаясь, определяет генетику всех последующих процессов» [1].

Материалы и методы. Оценивая множество концептуальных вариантов реализации производственного процесса, Заказчик разработки (Инвестор) может уже на начальной стадии проекта принять решение о выборе основного варианта опираясь на достаточно точные расчеты эксплуатационных показателей будущего производства. Или отказаться о реализации проекта по временным, стоимостным и другим причинам. Концептуальные варианты будущей ПС могут охватывать достаточно большой спектр решений:

- по степени автоматизации ТП и производственных процессов (ПП);
- по вариантам реализуемых технологий получения заготовок, полуфабрикатов, методов выполнения контрольных операций и т.п.;
- по степени резервирования технологических и производственных процессов;
- возможности включения в производство дополнительных (коммерческих) заказов;
- способов организации управления на производственном уровне (MES-система) и управления верхнего уровня (ERP-система).

В настоящее время доступно использование различных методов, методик и соответствующего инструментального обеспечения проектирования в приведенной постановке [2, 3 и другие].

Рассмотрим концептуальные варианты создания производства одного из изделий РКТ – шар-баллонов (ШБ) высокого давления [4]. В настоящее

время отечественное ракетостроение столкнулось с задачей импортозамещения этого комплектующего изделия для производства ракет типа "Протон", "Ангара", разгонных блоков серии "Бриз" и "Фрегат". Типичная конструкция шар-баллона представляет собой герметичный шар, состоящий из двух сваренных между собой полусфер и приваренными в полюсах штуцерами, представлено на рисунке 1.



Рисунок 1. Типовая конструкция шар-баллона.

Концептуальные варианты создания производственной системы показаны на рисунке 2.



Рисунок 2. Концептуальные варианты создания производства шар-баллонов.

Поскольку предполагается эксплуатация ПС в рыночных условиях и в настоящее время накоплен достаточный опыт планирования и управления ресурсами предприятия, например на базе наиболее распространенной в России системы 1С:ERP, предполагается безусловная необходимость автоматизации процессов управления верхнего уровня. Поэтому будем говорить о создании компьютерно-интегрированного производства (КИП) - системы на уровне цеха, в которой все операции с информационными потоками по всем этапам производственной деятельности предприятия автоматизированы на основе компьютерных технологий. При этом материальные потоки могут быть, как автоматизированы, так и не автоматизированы» [2, 5]. В состав КИП могут входить отдельные производственные позиции с различной степенью автоматизации – от универсального оборудования до гибких производственных модулей (ГПМ).

Результаты. Для примера рассмотрим технически наиболее сложные концепции построения конфигурации ПС – на основе использования изотермической штамповки и технологии электронно-лучевой наплавки (ЭЛН) шар-баллонов, представлено на рисунках 3 и 4. Варианты отличаются составом оборудования, объемом требуемых капитальных затрат, возможностями для выполнения коммерческих заказов, требованиями к системам обеспечения функционирования и др.

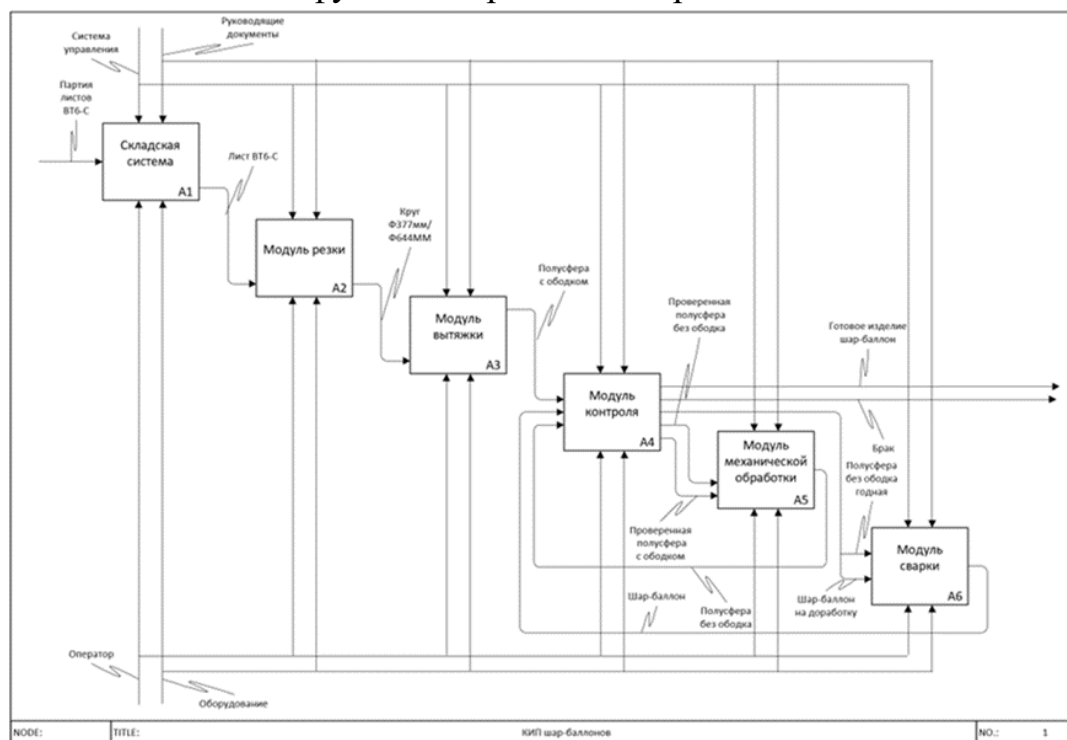


Рисунок 3. Диаграмма производственного процесса на основе технологии изготовления изотермической штамповкой (вытяжкой).

Заключение. В настоящее время на рынке инжиниринговых услуг в области проектирования производственных систем, в том числе КИП, все большее распространение получает использование методов концептуального проектирования – это увеличивает вероятность заключения инвестиционных контрактов и облегчает работы на последующих этапах реализации проекта. Однако это требует серьезной инженерной подготовки и эрудиции помимо владения инструментальными программными системами.

Список источников

1. Усов С.М. Новый поворот. О трендах в концептуальном проектировании. Портал «Строительный Эксперт», 11 января 2025. URL: ardexpert.ru/article/27665 (дата обращения 03.10.2025)

2. Лагута В.С., Ясиновский С.И. Проектирование компьютерно-интегрированных производств в составе систем управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении. Вопросы инновационной экономики, 2020, №3 (том 10), с. 1246-1257

3. Буханов С.А., Лагута В.С., Резниченко Д.С. Синтез конфигурации производственной системы по изготовлению технологической оснастки для выпуска резинотехнических изделий. Сб. трудов Межд. науч.-практ. конф. Комплексная автоматизация проектирования и производства (КАПП-2024), Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, с.41-45.

4. Выполнение работ и поставка оборудования по объекту «Создание централизованного производства шар-баллонов для изделий ракетно-космической техники». URL: <https://zakupki360.ru/tender/50610960> (дата обращения 07.10.25).

5. Горнев В.Ф. Проблемы и технология комплексной автоматизации. Автоматизация и проектирование, 1999, №1, С. 34–38.

6. Обобщенная архитектура предприятия и методология (GERAM). ГОСТ Р ИСО 15704-2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Моделирование и архитектура предприятия. Требования к стандартным архитектурам и методологиям предприятия. Утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 03.10.2022 N 1045-ст.

7. Горнев В.Ф., Емельянов В.В., Лагута В.С., Чуликов Е.И., Штейнберг Я.И. Экспертиза технических проектов ГПС механообработки с использованием имитационного моделирования. Методические указания. Москва: Изд-во НИИ тракторосельхозмаш, 1989, 76с.

УДК 004.021

Повышение производительности технологического процесса за счет оптимизации движений коллаборативного робота

Горькавый Михаил Александрович¹ mixkomsa@gmail.com

SPIN-код: 7825-3205

Ворощенко Василий Даниилович¹ v.voroshenko@yandex.ru

SPIN-код: 7975-9925

¹ФГБОУ ВО «КнАГУ», Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация. Сложность внедрения коллаборативных роботизированных технологических комплексов (КРТК) в производственные процессы промышленных предприятий, связана с высокими требованиями, предъявляемым к системам управления коллаборативным роботом. Низкая эффективность системы управления может превратить эффективный и перспективный механизм в набор простаивающего высокотехнологичного оборудования, снижающего производительность текущего и смежных технологических процессов. В работе представлен необходимый функционал систем управления КРТК, выделены ключевые параметры робота и его окружения, представлен концептуальный алгоритм, направленный на планирование и оптимизацию движений по реализации вспомогательных переходов технологических операций. Программная реализация алгоритма апробирована на имитационных моделях и лабораторном оборудовании. Результаты демонстрируют увеличение производительности и энергоэффективности технологического комплекса.

Ключевые слова: коллаборативный робот, технологический процесс, планирование и оптимизация движения, автоматизация управления

Improving Process Productivity By Optimizing Collaborative Robot Movements

Gorkavyi Mikhail Alexandrovich¹ mixkomsa@gmail.com

SPIN-code: 7825-3205

Voroshchenko Vasilii Daniilovich¹ v.voroshenko@yandex.ru

SPIN-code: 7975-9925

¹FSBEI HE "KnASU", Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The complexity of implementing collaborative robotic process systems (CRPS) into industrial production processes is associated with the high demands placed on collaborative robot control systems. Low control system

efficiency can transform an effective and promising mechanism into a set of idle high-tech equipment, reducing the productivity of the current and related technological processes. This paper presents the necessary functionality of CRPS control systems, highlights key parameters of the robot and its environment, and presents a conceptual algorithm aimed at planning and optimizing movements for implementing auxiliary transitions in technological operations. The software implementation of the algorithm was tested on simulation models and laboratory equipment. The results demonstrate increased productivity and energy efficiency of the technological complex.

Keywords: collaborative robot, technological process, motion planning and optimization, control automation.

Введение. Перспективным этапом развития технологий автоматизированного производства на базе общепромышленных роботов [1] согласно концепции Индустрии 5.0 является проектирование и внедрение коллаборативных роботизированных систем [2]. Несмотря на наличие большого числа несомненных преимуществ [3], технология коллаборации робота и оператора в совместном рабочем пространстве имеет и ряд существенных недостатков, в частности, повышенный уровень опасности для человека, сложность автоматического синтеза управляющих программ в реальном времени под нетривиальные локальные задачи технологического процесса (ТП), а также неэффективность стандартных алгоритмов планирования движений, ведущих к снижению производительности процесса и повышению его ресурсозатратности. Ключевым элементом к обеспечению эффективности КРТК должна являться система управления (АСУ), способная найти оптимальное решение в виде актуального движения робота под текущую задачу оператора с учетом критериев качества ТП и существенных ограничений пространства состояний (геометрических, кинематических, динамических ограничений).

В работе на концептуальном уровне представлены результаты исследований, направленные на выявление индикаторов состояния КРТК, являющиеся первичной информацией для принятия решения АСУ и, соответственно, варианты действий, способствующие достижению оптимального решения.

Материалы и методы. Полученные в работе выводы основаны на системном анализе результатов идентификации КРТП авиастроительного предприятия. Алгоритмические решения апробировались на имитационных

моделях, выполненных в Matlab/C++-ROS2-Webots. Планирование кинематики движений осуществлялось как на основе общепринятого математического аппарата, в частности, инерциального способа и решения нелинейной задачи оптимизации – обратной задачи кинематики с ограничениями, а также оригинальных алгоритмов, базирующихся на инструментах искусственного интеллекта. Обратная задача динамики для движений решалась на основе линеаризованных моделей взаимосвязанных систем электроприводов и редуцированных нейро-нечетких моделях. Разрешение коллизий выполнялось методами CHOMP, RRT и авторскими решениями. В задачах оптимизации движения робота в АСУ КРТП для выполнение частей ТО, в качестве значимых переменных были выделены следующие позиции: временные показатели движения, угловые и линейные перемещения и их производные; энергетические, силомоментные и стоимостные показатели; степень недетерминированности рабочей зоны (вероятность столкновения), показатели, отражающие состояние оператора; точностные требования; типы частей ТО; параметры алгоритмов планирования, оптимизации, интерполяции движений и алгоритмов разрешения коллизий.

Результаты. Вариационное поле режимов и параметров для задач планирования и оптимизации движений робота представлено в виде концептуальной схемы на рисунке 1.

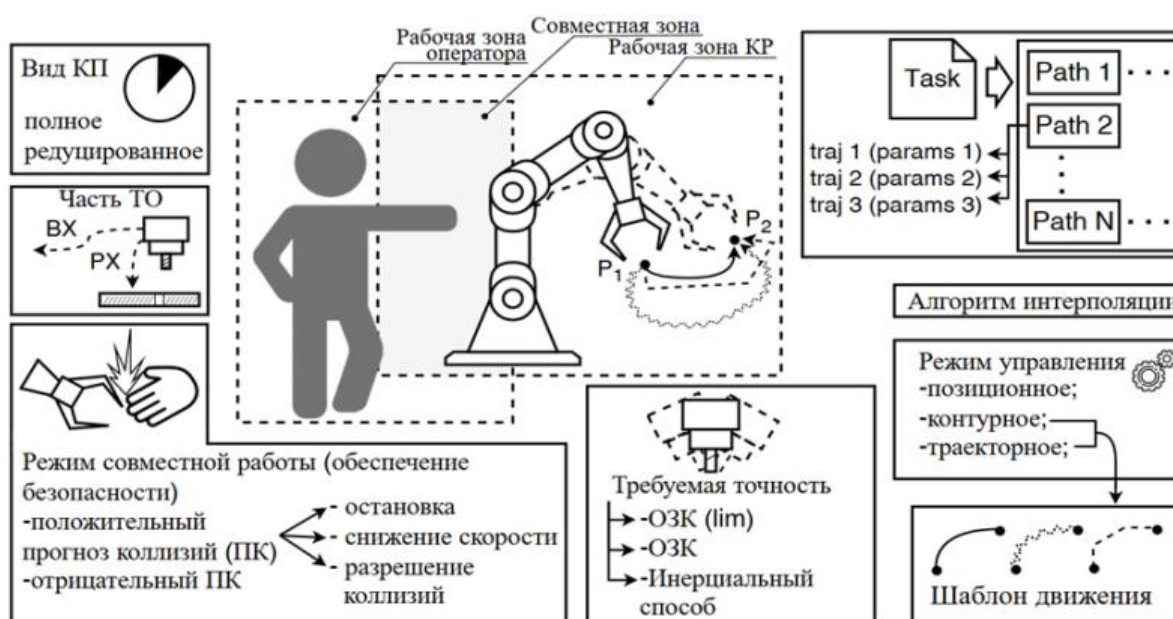


Рисунок 1. Концептуальная схема вариационного поля режимов и параметров для задач планирования и оптимизации движений робота

Исследование взаимосвязей между основными переменными состояния КРТК и компонентов вариационного поля управления, отраженные на схеме рисунка 1, используемыми инженерами-программистами (экспертов) при программировании роботов для задач исполнения частей ТО выполнялись в рамках ТП авиастроительного предприятия, что позволило сформировать некоторые механизмы по определению приоритетности тактических действий в АСУ. С учетом реалий производства интегральные показатели КРТК целесообразно выстроить в следующей приоритетности: обеспечение необходимого уровня безопасности оператора и оборудования; максимизация производительности; минимизация энергозатрат.

На рисунке 1 представлен алгоритм планирования и оптимизации движения робота, выборочно использующий компоненты вариационного поля режимов и параметров. Так, если задача идентифицирована как исполнимая в редуцированном конфигурационном пространстве (КП), выбирается соответствующее редуцированное пространство, и выполняются последующие действия. В противном случае действия выполняются в полном КП.

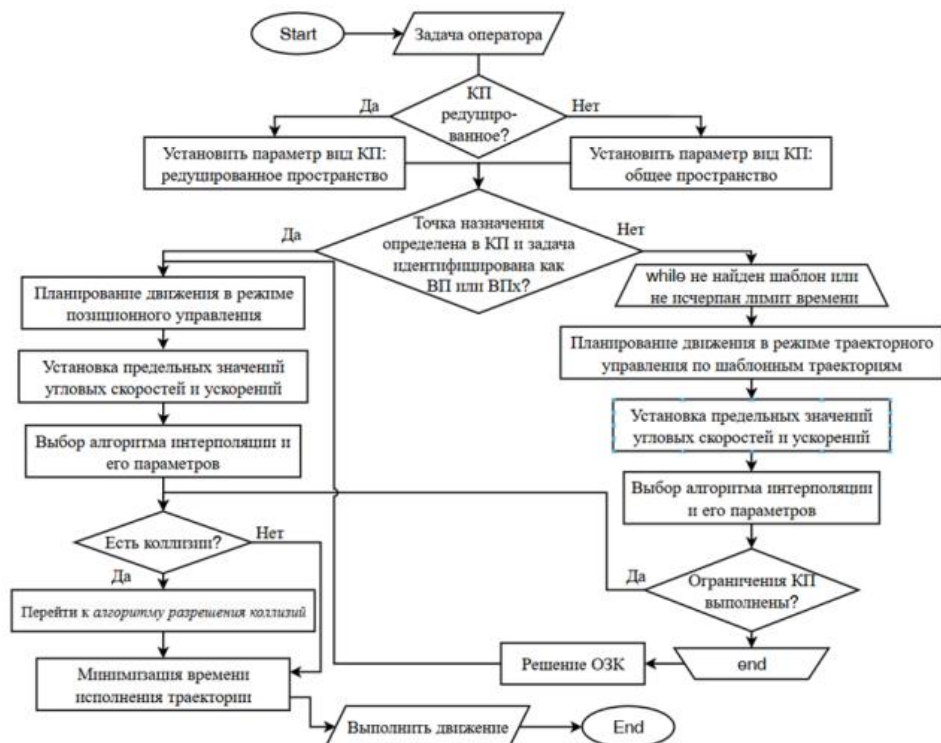


Рисунок 2. Алгоритм планирования и оптимизации движений коллаборативного робота

Если задача идентифицирована как ВП или ВХ и точка назначения определена в КП, то спланировать движение в режиме позиционного управления между двумя конфигурациями, установив, при этом, предельные значения угловых скоростей и ускорений и алгоритм интерполяции, получающий в сумме минимальное время на расчет и исполнение движения, выполнить прогноз коллизий с стационарными и низкоскоростными подвижными объектами, если прогноз отрицательный – выполнить движение, если положительный перейти к алгоритму разрешения коллизий.

Если точка назначения определена только в операционном пространстве, то спланировать движение в режиме траекторного управления по наиболее подходящей (определяется средствами ИИ на базе нейронной сети, обученной ранее) предустановленной шаблонной траектории инерциальным способом, выбрать наиболее подходящий алгоритм интерполяции, минимизировать время исполнения движения. Если планирование по первой приоритетной предустановленной траектории невозможно ввиду срабатывания ограничений КП, то выбрать следующую предустановленную шаблонную траекторию, и так до тех пор, пока не будет найдена необходимая шаблонная траектория или не будет исчерпан лимит времени. При получении неудовлетворительного результата отказаться от инерциального способа, решить ОЗК с ограничениями или без (зависит от пространства решения задачи) для точки назначения или в общем КП, или в редуцированном. Спланировать движение в режиме позиционного управления. Провести процедуру минимизации времени исполнения движения, проверить столкновения. При положительном прогнозе запустить алгоритм разрешения коллизий.

В случае положительного прогноза коллизии, локализовать зону возможного столкновения и выбрать соответствующие классы алгоритмов разрешения коллизий, для редуцированного пространства – специализированные, типа RLOS или PTS [4], для общего – универсальные, типа mRRT [5] и mCHOMP [6], с поддержкой базы опорных конфигураций или без нее в зависимости от наполненности базы знаний эффективных поз текущей ТО, если часть ТО крайне ответственная, то следует воспользоваться мультиалгоритмическим подходом для разрешения коллизий.

Параллельно с представленными блоками алгоритма, система автоматики отслеживает режимы совместной работы, ограничивая

динамику движения робота, либо формируя сигналы на аварийные режимы управления – остановки либо движения в заданном направлении или в заданную конфигурацию.

В случае, если АСУ идентифицирует задачу как несрочную, например, заданные части ТО робота не задерживают общий процесс работы – робот и оператор начинают работать в режиме сосуществования, при этом, длительность задач оператора значительно больше, чем оставшиеся задачи робота. В этом случае все вышеперечисленные блоки могут выполняться в рамках критерия энергоэффективности. Необходимо заметить, что энергоэффективность обеспечивается с учетом оборудования всего КРТК. Так достаточно часто, в случае высокой установленной мощности оснастки, для обеспечения энергоэффективности всего комплекса роботу необходимо двигаться в режиме максимальной производительности.

Обсуждение. Предложенный и апробированный в программном обеспечении АСУ в рамках КРТП механообработки и покраски авиастроительного предприятия имеет высокий потенциал дальнейшей модернизации и масштабирования на подобные ТП с применением коллаборативных роботов.

Заключение. В результате проведенных исследований в области инженерии знаний были получены эффективные последовательности действий инженерно-технических работников при разработке управляющих программ для общепромышленных и коллаборативных роботов. Часть знаний были интегрированы в экспертные модули и базы знаний автоматизированной АСУ по планированию и оптимизации движений для реализации частей технологических операций в КРТК. Были выявлены некоторые закономерности, позволяющие частично компенсировать проблемы неоднозначности выбора критерия эффективности для КРТК, и отработаны процедуры планирования и оптимизации движения. Концепции выявленных закономерностей представлены в оригинальном алгоритме, программная реализация которого была успешно апробирована на имитационных моделях и на лабораторном оборудовании. Для ТП с высокой степенью вовлеченности человека, увеличение производительности составила до 7 %, при этом наблюдается эффекта энергосбережения до 4,5 %.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 25-21-00292).

Список источников

1. Alonso, R., Sánchez, T. F., Alfaro, D. A., Cruz, Y. J., Villalonga, A., & Castaño, F. Automation and Robotics Pilot Lines in the Context of Industry 5.0 //Applied Sciences. – 2025. – Т. 15. – №. 5. – С. 2510.
2. Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., & Pirayesh, A. Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda //Journal of Intelligent Manufacturing. – 2024. – Т. 35. – №. 5. – С. 2065-2118.
3. Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G., Faccio, M., & Rosati, G. Human–robot collaboration in manufacturing applications: a review //Robotics. – 2019. – Т. 8. – №. 4. – С. 100.
4. Российский научный фонд. Разработка и синтез перспективных мультимодальных адаптивных алгоритмов и методов управления поведением коллаборативных робототехнических систем с учетом нештатных ситуаций и экстремальных условий в недетерминированной среде, грантовый отчёт по проекту №22 71 10093. URL: https://rscf.ru/prjcard_int?22-71-10093 (15.06.2025).
5. Karaman, S., Walter, M. R., Perez, A., Frazzoli, E., & Teller, S. Anytime motion planning using the RRT // 2011 IEEE international conference on robotics and automation. – IEEE, 2011. – С. 1478-1483.
6. Ratliff, N., Zucker, M., Bagnell, J. A., & Srinivasa, S. CHOMP: Gradient optimization techniques for efficient motion planning //2009 IEEE international conference on robotics and automation. – IEEE, 2009. – С. 489-494.

УДК 534.4:623.44:004.032.26

**Акустический анализ выстрела как метод диагностики состояния
стрелкового оружия**

Шеманаева Людмила Ивановна¹

sheluv@mail.ru

SPIN-код: 7926-1210

¹ФГБОУ ВО КГТА им. В.А.Дегтярева

Аннотация. В данной статье представлен комплексный подход к диагностике состояния стрелкового оружия на основе акустического анализа звука выстрела. Разработана методология разделения звукового сигнала на характерные этапы (удар бойка, основной выстрел, отзвук ствола, работа автоматики) с последующим спектральным анализом каждого компонента. Применение алгоритмов машинного обучения и цифровой обработки сигналов позволяет выявлять минимальные отклонения в акустической сигнатуре, свидетельствующие об износе механизмов. Экспериментально подтверждена возможность обнаружения дефектов затворной группы, износа ствола и нарушений в работе ударно-спускового механизма с точностью до 92%. Предложенный метод представляет собой неразрушающий контроль, применимый в полевых условиях.

Ключевые слова: акустическая диагностика, стрелковое оружие, спектральный анализ, машинное обучение, неразрушающий контроль, техническое состояние, выстрел, обработка сигналов.

**Acoustic Analysis of a Shot as a Method for Diagnosing the Condition
of Small Arms**

Shemanaeva Lyudmila Ivanovna¹

sheluv@mail.ru

SPIN code: 7926-1210

¹V.A. Degtyarev KSTU

Abstract This article presents a comprehensive approach to diagnosing the condition of small arms based on the acoustic analysis of shot sound. A methodology has been developed for separating the sound signal into its characteristic stages (striker impact, main shot, barrel echo, and automatic operation), followed by spectral analysis of each component. The use of machine learning algorithms and digital signal processing allows for the detection of minimal deviations in the acoustic signature indicating mechanism wear. The ability to detect bolt group defects, barrel wear, and trigger mechanism malfunctions with an accuracy of up to 92% has been experimentally confirmed.

The proposed method is a non-destructive testing method applicable in field conditions.

Keywords: acoustic diagnostics, small arms, spectral analysis, machine learning, non-destructive testing, technical condition, shot, signal processing.

Введение. Современные требования к надежности и безопасности стрелкового оружия обуславливают необходимость разработки эффективных методов диагностики его технического состояния. Традиционные методы контроля предполагают разборку оружия и визуальный осмотр, что требует значительных временных затрат и высокой квалификации персонала. Кроме того, многие виды износа сложно обнаружить визуально до наступления критического состояния.

Акустический анализ представляет приоритетное направление неразрушающего контроля, основанного на регистрации и анализе звуковых сигналов, сопровождающих работу механизмов оружия. Каждый этап выстрела формирует характерную акустическую сигнатуру, зависящую от технического состояния соответствующих узлов. Изменения в спектральном составе звука могут служить ранними индикаторами развивающихся дефектов.

В работе предложен комплексный подход к акустической диагностике, сочетающий методы цифровой обработки сигналов и машинного обучения для автоматизированного анализа состояния оружия по звуку выстрела.

Материалы и методы. Оборудование и программное обеспечение.

Для проведения исследований использовалось:

- Стрелковое оружие: пистолет Макарова (ПМ) 10 образцов (5 исправных, 5 с различными видами износа)
- Цифровой микрофон RODE NT-USB с частотой дискретизации 48 кГц
- Внешняя звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2
- Программное обеспечение: Python 3.8 с библиотеками Librosa, SciPy, NumPy, Matplotlib, Scikit-learn
- Разработанное специализированное приложение для анализа с графическим интерфейсом

Методика записи звуковых сигналов.

Запись проводилась в звукоизолированном помещении на расстоянии 1 м от оружия с углом 45° к плоскости стрельбы. Для каждого образца

произведено по 20 выстрелов стандартными патронами 9×18 мм ПМ. Перед записью все образцы прошли традиционный технический осмотр с измерением износа ключевых узлов.

Алгоритм анализа.

1. Предобработка сигнала: фильтрация низкочастотных помех, нормализация амплитуды

2. Сегментация на этапы:

- Обнаружение момента выстрела по пику энергии
- Автоматическое выделение временных интервалов,

соответствующих этапам выстрела

3. Спектральный анализ каждого этапа:

- Быстрое преобразование Фурье (FFT) с оконной функцией

Ханна

- Расчет спектральной плотности мощности
- Выделение доминирующих частот и их амплитуд

4. Извлечение признаков:

- MFCC (Mel-frequency cepstral coefficients)
- Спектральные центроиды
- Полосовая энергия в характерных диапазонах
- Статистические характеристики (среднее, дисперсия, эксцесс)

5. Классификация состояния с использованием метода опорных векторов (SVM) и случайного леса

Математический аппарат.

Спектральный анализ основан на дискретном преобразовании Фурье:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-i2\pi kn/N}$$

где $x(n)$ – дискретный сигнал, N – количество отсчетов, k – индекс частоты.

Для классификации использовался метод опорных векторов с радиальной базисной функцией:

$$K(x, x') = \exp(-\gamma \|x - x'\|^2)$$

Результаты. Характеристики этапов выстрела.

Анализ показал четкое разделение акустического сигнала на четыре характерных этапа:

1. **Удар бойка** (длительность 1-3 мс):

- Высокочастотный компонент (5-12 кГц)

- Низкая энергия (30-40 дБ ниже пика выстрела)
- Четкие спектральные пики на 8.2 кГц и 11.5 кГц
- 2. **Основной выстрел** (длительность 15-25 мс):
 - Широкополосный сигнал (0.1-20 кГц)
 - Максимальная энергия
 - Характерные резонансы ствола на 1.2 кГц, 3.4 кГц и 6.8 кГц
- 3. **Отзвук ствола** (длительность 80-100 мс):
 - Узкополосные затухающие колебания
 - Основная энергия сосредоточена ниже 2 кГц
 - Информативен для оценки состояния канала ствола
- 4. **Работа автоматики** (длительность 30-50 мс):
 - Низкочастотные компоненты (0.1-1.5 кГц)
 - Металлические звуки затворной группы
 - Пики на 450 Гц и 850 Гц характерны для движения затвора

Выявление дефектов.

Экспериментально установлены корреляции между техническими состояниями и акустическими характеристиками:

- Износ затворной группы: появление дополнительных спектральных компонент в диапазоне 600-900 Гц на этапе работы автоматики, увеличение длительности этапа на 15-25%
- Износ канала ствола: смещение резонансных частот основного выстрела на 8-12%, изменение добротности резонансов
- Ослабление боевой пружины: уменьшение амплитуды высокочастотных компонент этапа удара бойка на 20-30%
- Загрязнение газоотводного тракта: появление дополнительных низкочастотных составляющих (200-400 Гц) на этапе основного выстрела

Точность классификации.

Применение алгоритма SVM показало следующие результаты классификации состояний:

- Исправное состояние: точность 95%
- Износ затворной группы: точность 92%
- Износ ствола: точность 88%
- Комбинированные дефекты: точность 85%

Общая точность классификации составила 92.3% при перекрестной проверке.

Обсуждение. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность акустического анализа для диагностики состояния

стрелкового оружия. Предложенная методика позволяет не только обнаружить наличие дефектов, но и локализовать их по конкретным узлам на основе анализа соответствующих этапов выстрела.

Важным преимуществом метода является возможность обнаружения развивающихся дефектов на ранних стадиях, когда визуальный осмотр еще не выявляет изменений. Это особенно актуально для прогнозирования остаточного ресурса оружия и планирования профилактического обслуживания.

Спектральные характеристики этапов выстрела показали высокую стабильность для исправного оружия и воспроизводимую изменчивость при наличии дефектов, что подтверждает надежность предложенных диагностических признаков.

Дальнейшее развитие.

Перспективные направления развития исследования включают:

1. Создание базы данных акустических сигнатур различных типов оружия и боеприпасов
2. Разработка мобильного приложения или навесного устройства для оперативной диагностики в полевых условиях
3. Интеграция с системами технического зрения для комплексной диагностики
4. Применение глубокого обучения для автоматического извлечения диагностических признаков
5. Исследование влияния внешних условий (температура, влажность) на акустические характеристики
6. Разработка прогнозных моделей остаточного ресурса на основе анализа динамики изменений акустических сигнатур

Заключение. Разработан метод акустической диагностики стрелкового оружия, основанный на комплексном анализе этапов выстрела. Экспериментально подтверждена возможность выявления различных видов износа с точностью до 92%.

Основные преимущества предложенного подхода:

- Не требует разборки оружия
- Применим в полевых условиях
- Обнаруживает дефекты на ранних стадиях
- Позволяет локализовать неисправность к конкретным узлам
- Автоматизирован и не требует высокой квалификации оператора

Метод представляет практическую ценность для вооруженных сил, правоохранительных органов и спортивных организаций, обеспечивая своевременное выявление неисправностей и повышение безопасности эксплуатации стрелкового оружия.

Список источников

1. Smith, J. C. Acoustic-based fault diagnosis in mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 135, 106-124.
2. Johnson, M. K. Digital signal processing in weapon system diagnostics. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(5, 132-145).
3. Chen, L., & Wang, H. Machine learning applications in firearm acoustics. *Journal of Acoustical Society of America*, 2021, 149(3, 189-201).
4. Rodriguez, A. B. Non-destructive testing methods for military equipment. *Defense Technology Review*, 2018, 42(2, 67-78).
5. Williams, R. T. Spectral analysis of impulsive acoustic signals. *Applied Acoustics*, 2020, 165, 107-119).
6. Peterson, K. L. Firearm maintenance and diagnostics: Modern approaches. *International Journal of Defense Engineering*, 2019, 12(3, 45-58).
7. Garcia, S. M. Predictive maintenance using acoustic emission analysis. *Mechanical Engineering Journal*, 2021, 88(4, 203-215).
8. Thompson, D. E. Advanced signal processing for condition monitoring. *Springer Series in Measurement Science*, 2022, 55-78.
9. Anderson, P. R. Machine learning-based fault detection in mechanical systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 91, 103-115.
10. Roberts, J. K. Acoustic signature analysis for weapon identification. *Forensic Science International*, 2019, 298, 89-97.

УДК 669.2.8:621.74

**Моделирование процесса литья по выплавляемым моделям
технически чистой меди М1**

Семенов Константин Геннадьевич¹

semenovkg@bmstu.ru

Чернов Владимир Викторович¹

Батышев Константин Александрович¹

Панкратов Сергей Николаевич²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

²Московский политехнический университет

Аннотация: в работе проведено компьютерное моделирование технологического процесса изготовления фасонных отливок литьем по выплавляемым моделям на основе технически чистой меди М1. Оценка адекватности разработанных цифровых прототипов проводилось путем физического моделирования технологии литья с использованием ПО ProCAST. По результатам моделирования разработана технология изготовления партии отливок способом ЛВМ из технически чистой меди М1.

Ключевые слова: технически чистая медь, модули ProCAST, компьютерное моделирование, технология, исходные параметры, полученные результаты.

**Simulation of the investment casting process of commercially pure
copper m1**

Semenov Konstantin Genadievich¹

semenovkg@bmstu.ru

Chernov, Vladimir Viktorovich¹

Batyshev Konstantin Alexandrovich¹

Pankratov Sergey Nikolaevich²

¹Bauman Moscow State Technical University,

²Moscow Polytechnic University

Abstract: This study involved computer modeling of the manufacturing process for shaped castings using investment casting based on commercially pure M1 copper. The adequacy of the developed digital prototypes was assessed through physical modeling of the casting process using ProCAST software. Based on the modeling results, a technology was developed for producing a batch of

investment castings from commercially pure M1 copper using the investment casting method.

Keywords: technically pure copper, ProCAST modules, computer modeling, technology, initial parameters, obtained results.

Введение. Производство и потребление изделий из меди и ее сплавов в мире постоянно растет, появляются все новые области применения металлопродукции [1].

Моделирование процесса изготовления отливок способом литья по выплавляемым моделям из меди проводилось с помощью программы ProCAST. ProCAST — профессиональная система компьютерного 3D-моделирования литейных процессов методом конечных элементов. Система работает под ОС Unix, ms Windows и позволяет моделировать практически все варианты литейных технологий, включая свободное заполнение литейной формы (песчаная форма, кокиль), литье под низким и высоким давлением, литье по выплавляемым моделям и т.п.

Материалы и методы. Основа ProCAST – три решателя (solvers): гидродинамический (Flow solver), тепловой (Thermal solver) и решатель напряжений (Stress solver). В качестве дополнительных опций предлагается внушительный список модулей, расширяющих базовые возможности программы [2].

Почти все модули ProCAST используют для решения соответствующих дифференциальных уравнений метод конечных элементов (МКЭ). Исключение составляет модуль расчета газовой и усадочной микропористости (Advanced Porosity Module), использующий метод конечных разностей (МКР), и модуль расчета процесса зарождения и роста зерновой структуры (CAFE), сочетающий в себе МКЭ и клеточные автоматы [3].

ProCAST Flow solver — модуль, рассчитывающий заполнение формы жидким расплавом. Расчет течения описывается полным уравнением Навье-Стокса и может проводиться вместе с анализом температуры и напряжений. В решатель добавлена специальная модель для анализа турбулентных потоков. ProCAST Flow solver позволяет получить представление о характере заполнения формы расплавом, размывании песчаной формы, воздушных карманах, турбулентном течении, засорах, не проливах и холодных спаях.

ProCAST Thermal solver — решатель, моделирующий тепловые явления в процессе заливки формы и кристаллизации отливки и позволяющий рассчитывать температурные поля в отливке и форме с учетом теплопроводности, конвекции и излучения (в окружающую среду). С помощью энтальпии учитывается тепловыделение, связанное с изменением фазового состава при кристаллизации и в твердом состоянии. ProCAST Thermal solver решает следующие задачи: вычисление температурных полей в отливке и форме, выявление тепловых узлов в отливке и мест перегрева формы, расчет усадочной раковины и макропористости [4].

Моделирование способа кокильного литья на основе сплава была проведена на основе разработанной технологии отливки-представителя (токосъемного элемента) из технической чистой меди марки М1.

Моделирование процесса изготовления отливки способом литья по выплавляемым моделям проводили на примере отливки из сплава медь – железо (токосъемные элементы). Габаритные размеры отливки: высота 60 мм, ширина 40 мм толщина стенки отливки 5...10 мм. Габаритные размеры форм высота 200 мм диаметр 150 мм. Температура заливки t_z -1260 °С, температура формы t_f -500 °С, скорость заливки 0...1 м/с. Количество слоев оболочковой формы 6, связующие - гидролизированный раствор этилсиликата, огнеупорный наполнитель в суспензии - электрокорунд, обсыпка - электрокорунд крупностью от 0,16 до 0,32 мм. Наполнитель в опоке - плавленый кварц. Коэффициент теплоотдачи оболочковой формы 1000 Вт/м². К, наружной поверхности наполнителя 300 Вт/м². К. Коэффициент теплоотдачи открытой поверхности (верх) 200 Вт/м².К, боковой стенки и основания 50 Вт/м².К, температура воздуха 20 °С.

На рисунке1 представлены температурные поля распределения температур при заливке технической чистой меди М1.

Можно отметить, что при заполнении формы на 80 %, твердая фракция отсутствует, литниковая система и литниковая воронка полностью не заполнена, что позволяет при дальнейшем заполнении обеспечить направленность затвердевания отливок.

При заполнении формы на 98 % (Рисунок 1), время заполнения составляет 0,99 с, твердая фракция отсутствует. Отливки полностью заполнены, а литниковая система обеспечивает подпитку отливок жидким расплавом. Таким образом, можно отметить общую тенденцию снижения временных параметров заполнения и количество твердой фракции при

заполнении формы, что с учетом практически нулевого (1,5 °C) интервала кристаллизации приводит к отсутствию образования рассеянной пористости.

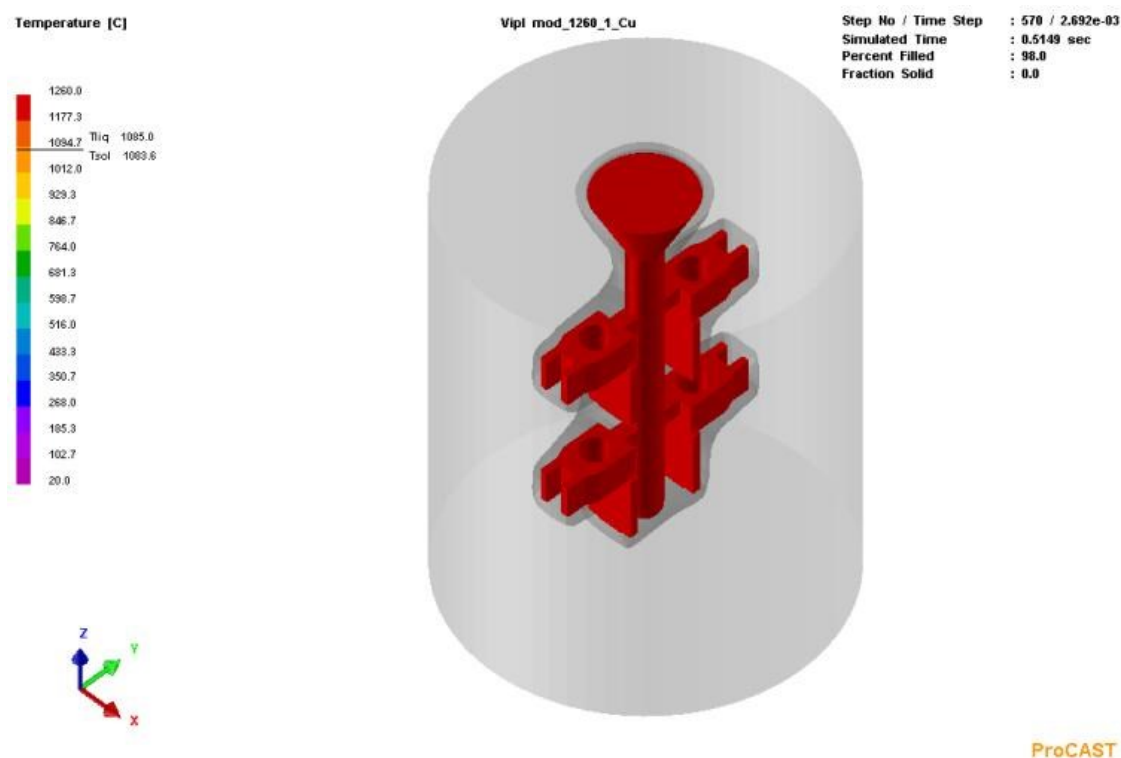


Рисунок 1. Поле распределения температуры при заполнении формы на 98 %.

На рисунке 2 представлено поле распределения температур после полного затвердевания формы. Время затвердевание составило 89 с. Визуально и при помощи программного обеспечения ProCAST дефектов в отливках из технической чистой меди марки М1 не обнаружено.

Результаты расчета стадии заполнения, температурное поле и распределение скорости потока жидкого металла представлено на рисунке 2. При заполнении формы на 98 % твердая фракция отсутствует. Скорость заполнения формы составляет от 0,5 до 2 м/с, что обеспечивает ламинарный характер течения расплава.

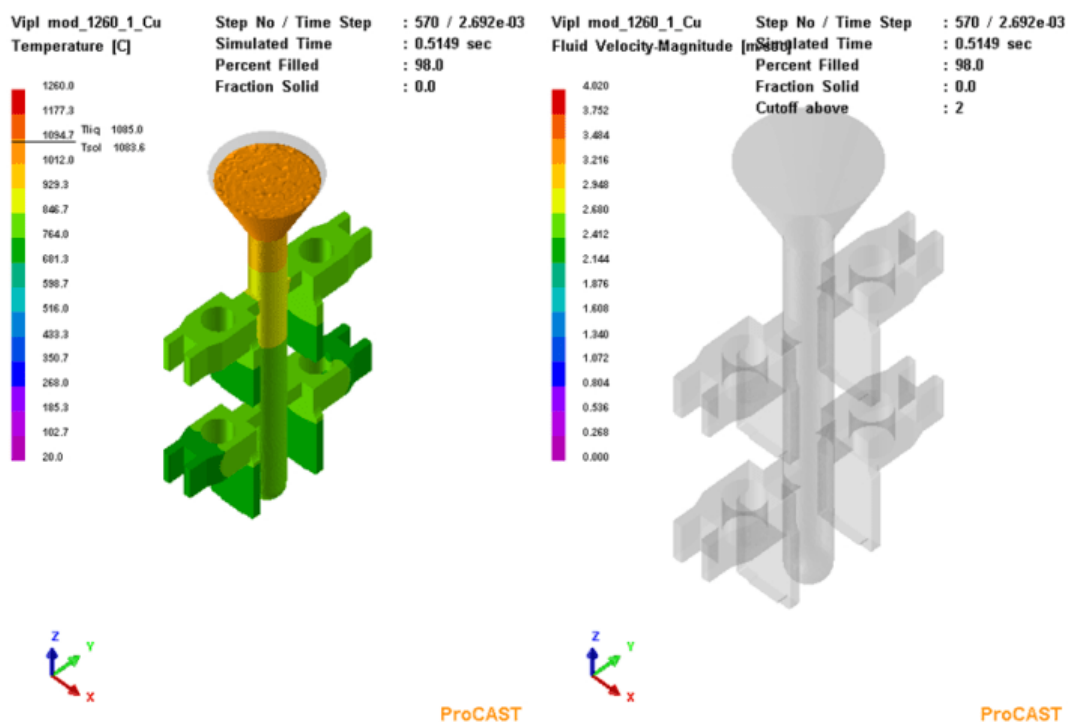


Рисунок 2. Результаты расчета стадии заполнения (температурное поле и распределение скорости потока жидкого металла) технически чистой меди M1.

На рисунке 3 представлены результаты расчета кристаллизации (распределение твердой фазы, усадочная пористость). После полного затвердевания усадочная пористость не превышает 2%, и, в основном, сосредоточена в местах утолщения отливки в отдельных частях формы. Появление пористости связано с достаточно длительным временем охлаждения отливок.

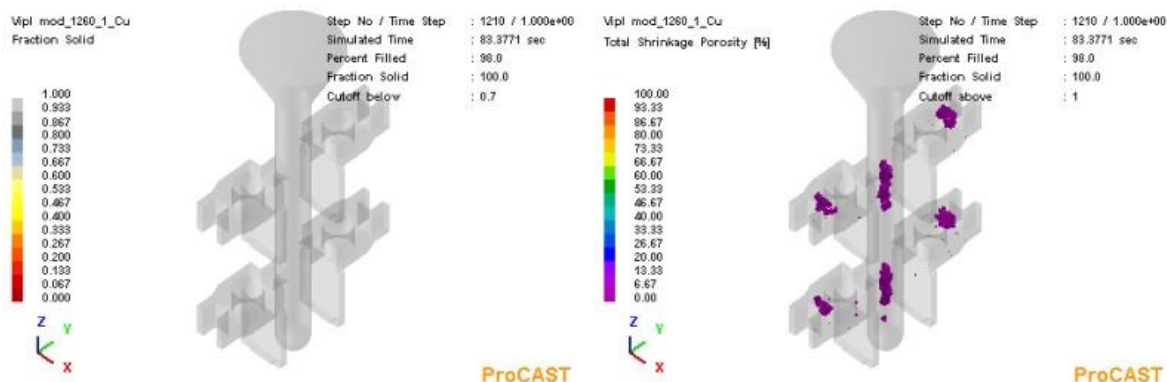


Рисунок 3. Результаты расчета кристаллизации (распределение твердой фазы, усадочная пористость) для меди M1.

На рисунке 4 представлены реперные точки на верхней отливке формы ЛВМ, а на рисунке 5 кривые охлаждения в этих узловых точках

сетки модели, которые указывают на более высокие скорости охлаждения в тонких сечениях отливки и образования площадки на кривых охлаждения, характерной для эвтектического превращения 1083,6 °С меди марки М1.

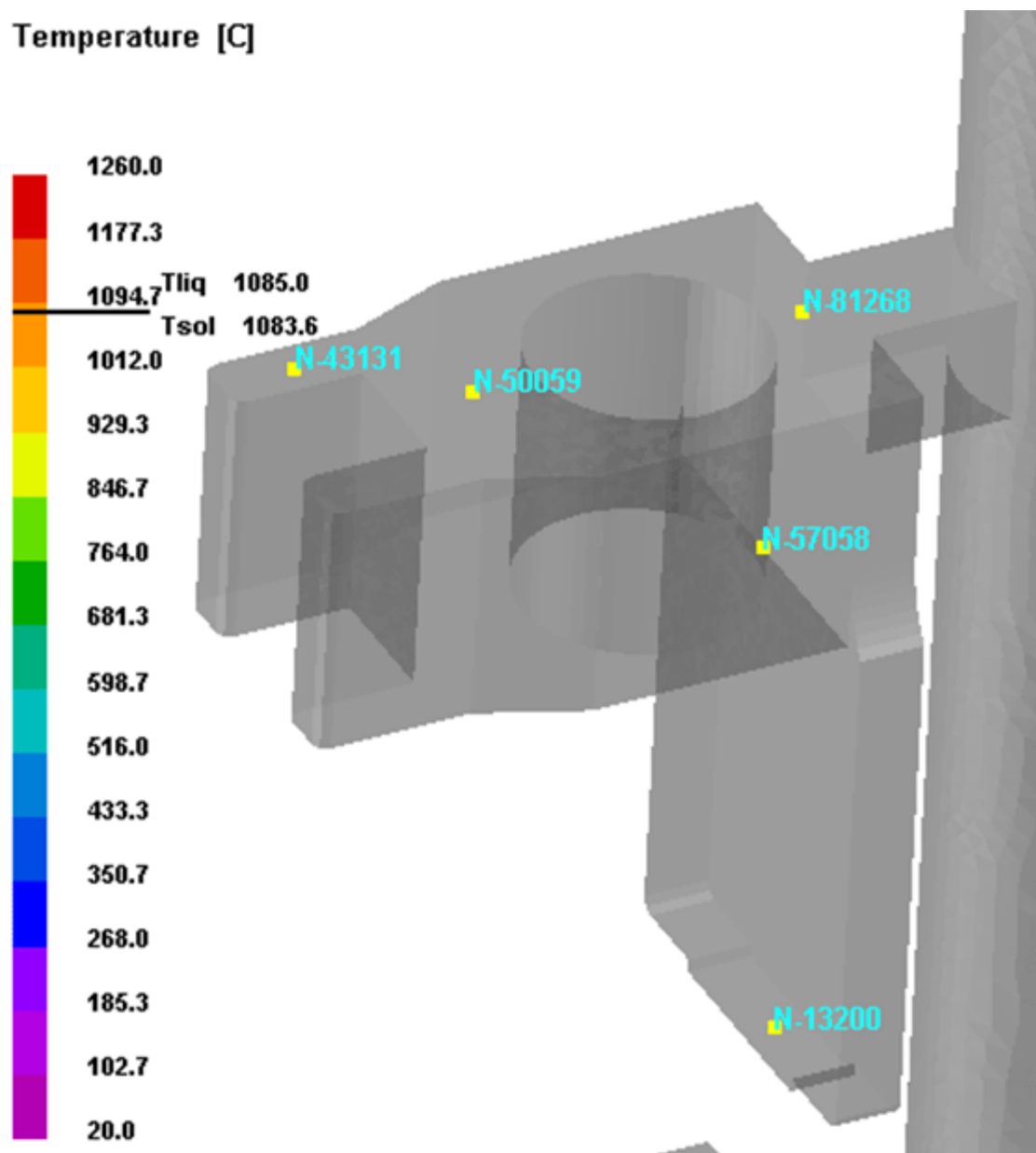


Рисунок 4. Реперные узловые точки сетки МКЭ на отливке ЛВМ для сплава медь – железо.

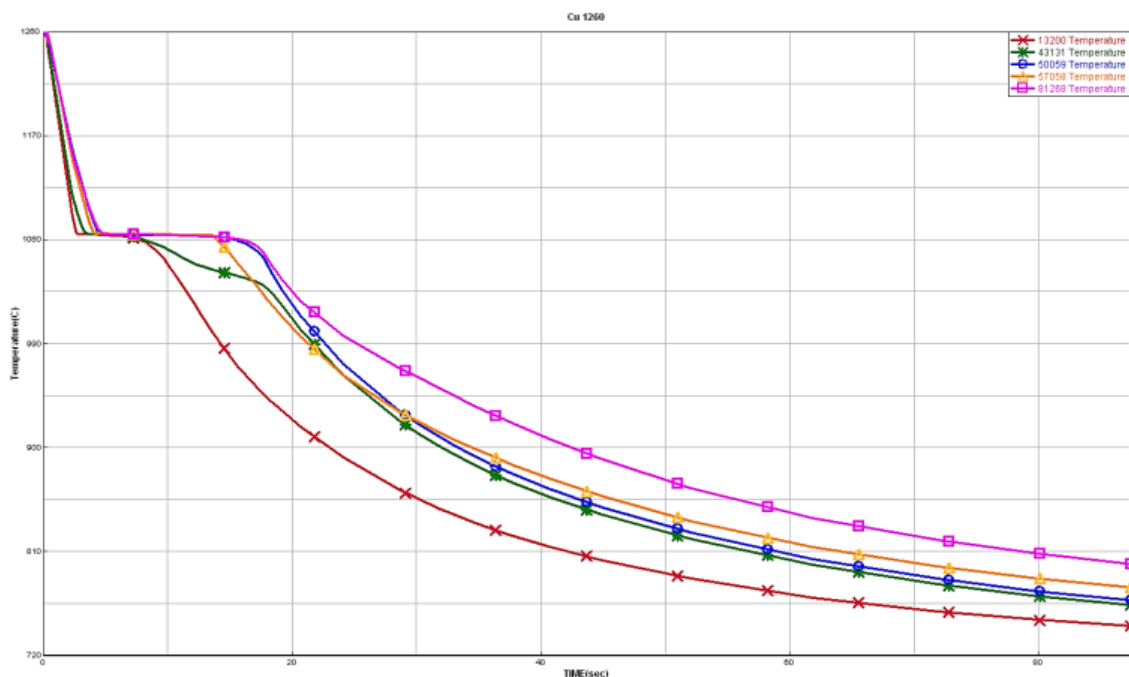


Рисунок 5. Кривые охлаждения в узловых точках сетки модели при охлаждении отливки ЛВМ медь марки М1.

В результате анализа полученных результатов моделирования СКМ ProCAST технологического процесса литья по выплавляемым моделям сплава можно отметить, что получение отливок из технической чистой меди марки М1 наблюдается устойчивые характеристики температурно-временных параметров заполнения, при этом количество твердой фракции при заполнении формы на 98 %, наблюдается практически полная заполняемость формы, а пористость в отливках не превышает 2 % при перегреве расплава над температурой ликвидус 165 °С, при минимальном интервале кристаллизации (1,5 °С), характерном для чистых металлов.

Закключение. На основании полученных результатов разработана технология изготовления партии отливок способом ЛВМ из технической чистой меди марки М1. Внешний вид отливок при визуальной оценке не имел видимых дефектов и соответствовал требованиям, предъявляемым к отливкам, изготовленным методом ЛВМ из медных сплавов.

Список источников.

1. ГОСТ 859-2014 - Медь. Марки. Межгосударственный стандарт. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001 г. - 8 с.

2. Базовый учебный курс по работе в программных продуктах ProCAST, Visual-CAST / 2011 г. Группа компаний «PLM Урал» - «Делкам Урал» © – 174 с.

3. Семенов К.Г. Низколегированные сплавы на основе меди /Литейщик России. - 2020, - № 3, - с. 40-44.

4. Семенов К.Г., Батышев К.А., Панкратов С.Н. Низколегированные сплавы на основе меди для инновационных технологий машиностроения: монография/ Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2018, - 153 с.

5. Батышев К.А., Семенов К.Г., Свинороев Ю.А. Современные технологии производства отливок из сплавов цветных металлов. М.: Издательство «Первый том», 2020 г. - 150 с.

УДК 669.2.8:621.74

Моделирование процесса кокильного литья технически чистой меди М1

Семенов Константин Геннадьевич¹

semenovkg@bmstu.ru

Чернов Владимир Викторович¹

Батышев Константин Александрович¹

Панкратов Сергей Николаевич²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

²Московский политехнический университет

Аннотация: в работе проведено компьютерное моделирование технологического процесса изготовления кокильных фасонных отливок на основе технически чистой меди М1 с использованием ПО ProCAST. Оценка адекватности разработанных цифровых прототипов проводилось путем физического моделирования технологии литья с использованием ПО ProCAST. По результатам моделирования разработана технология изготовления партии отливок способом кокильного литья из технически чистой меди М1.

Ключевые слова: технически чистая медь, модули ProCAST, компьютерное моделирование, технология, исходные параметры, полученные результаты.

Simulation of the process of mill casting of commercially pure copper m1

Semenov Konstantin Genadievich¹

semenovkg@bmstu.ru

Chernov, Vladimir Viktorovich¹

Batyshev Konstantin Alexandrovich¹

Pankratov Sergey Nikolaevich²

¹Bauman Moscow State Technical University,

²Moscow Polytechnic University

Abstract: in this study, a computer simulation of the manufacturing process for chill molded castings based on commercially pure M1 copper was conducted using ProCAST software. The adequacy of the developed digital prototypes was assessed through physical modeling of the casting process using ProCAST software. Based on the simulation results, a technology was developed for producing a batch of castings using the chill casting method from commercially pure M1 copper.

Keywords: commercially pure copper, ProCAST modules, computer modeling, technology, initial parameters, obtained results.

Введение. Главное эксплуатационное свойство технически чистой меди М1 ГОСТ 859-2014 высокая тепло- и электропроводность [1].

Моделирование процесса изготовления кокильных отливок из меди проводилось с помощью программы ProCAST. ProCAST — профессиональная система компьютерного 3D-моделирования литейных процессов методом конечных элементов. Система работает под ОС Unix, ms Windows и позволяет моделировать практически все варианты литейных технологий, включая свободное заполнение литейной формы (песчаная форма, кокиль), литье под низким и высоким давлением, литье по выплавляемым моделям и т.п.

Материалы и методы. Основа ProCAST – три решателя (solvers): гидродинамический (Flow solver), тепловой (Thermal solver) и решатель напряжений (Stress solver). В качестве дополнительных опций предлагается внушительный список модулей, расширяющих базовые возможности программы [2].

Почти все модули ProCAST используют для решения соответствующих дифференциальных уравнений метод конечных элементов (МКЭ). Исключение составляет модуль расчета газовой и усадочной микропористости (Advanced Porosity Module), использующий

метод конечных разностей (МКР), и модуль расчета процесса зарождения и роста зерновой структуры (CAFE), сочетающий в себе МКЭ и клеточные автоматы [3].

ProCAST Flow solver — модуль, рассчитывающий заполнение формы жидким расплавом. Расчет течения описывается полным уравнением Навье-Стокса и может проводиться вместе с анализом температуры и напряжений. В решатель добавлена специальная модель для анализа турбулентных потоков. ProCAST Flow solver позволяет получить представление о характере заполнения формы расплавом, размывании песчаной формы, воздушных карманов, турбулентном течении, засорах, не проливах и холодных спаях.

ProCAST Thermal solver — решатель, моделирующий тепловые явления в процессе заливки формы и кристаллизации отливки и позволяющий рассчитывать температурные поля в отливке и форме с учетом теплопроводности, конвекции и излучения (в окружающую среду). С помощью энтальпии учитывается тепловыделение, связанное с изменением фазового состава при кристаллизации и в твердом состоянии. ProCAST Thermal solver решает следующие задачи: вычисление температурных полей в отливке и форме, выявление тепловых узлов в отливке и мест перегрева формы, расчет усадочной раковины и макропористости [4].

Моделирование способа литья по выплавляемым моделям на основе сплава была проведена на основе разработанной технологии отливки-представителя (высоковольтная арматура) из технической чистой меди марки М1.

Моделирование технологии изготовления отливки способом кокильного литья проводили на примере отливки из сплава медь – железо (высоковольтная арматура). Габаритные размеры отливки: длина 100 мм, ширина 20...30 мм, толщина 3...5 мм. В кокиле, с габаритными размерами: ширина 240 мм, высота 220 мм, толщина 20 мм, предусмотрено изготовление четырех отливок.

Результаты и обсуждение. Исходные параметры моделирования: температура заливки сплава t_z - 1260 °С, Температура формы t_f - 200 °С, скорость заливки 0...1 м/с, охлаждение воздушное, материал кокиля – жаростойкий чугун EN-GJL-250, коэффициент теплоотдачи 3000 Вт/м² К, защитное покрытие - копоть (степень черноты 0,8). Коэффициент

теплоотдачи (боковые и верх) 250 Вт/м² К, основание кокиля 20 Вт/м² К, температура окружающего воздуха 20 °С.

Можно отметить, что при заполнении формы на 80 %, количество твердой фракции составляет всего 2,8 %, литниковая система и литниковая воронка полностью не заполнена, что позволяет при дальнейшем заполнении обеспечить направленность затвердевания отливок.

При заполнении формы на 98 % (Рисунок 1), время заполнения составляет 0,99 с, количество твердой фракции составляет 12,8 %. Отливки полностью заполнены, а литниковая система обеспечивает подпитку отливок жидким расплавом. Таким образом, можно отметить общую тенденцию снижения временных параметров заполнения и количество твердой фракции при заполнении формы, что с учетом практически нулевого (1,5 °С) интервала кристаллизации приводит к отсутствию образования рассеянной пористости.

На рисунке 2 представлено поле распределения температур после полного затвердевания формы. Время затвердевание составило 10,13 с. Визуально и при помощи программного обеспечения ProCAST дефектов в отливках из технической чистой меди марки М1 не обнаружено.

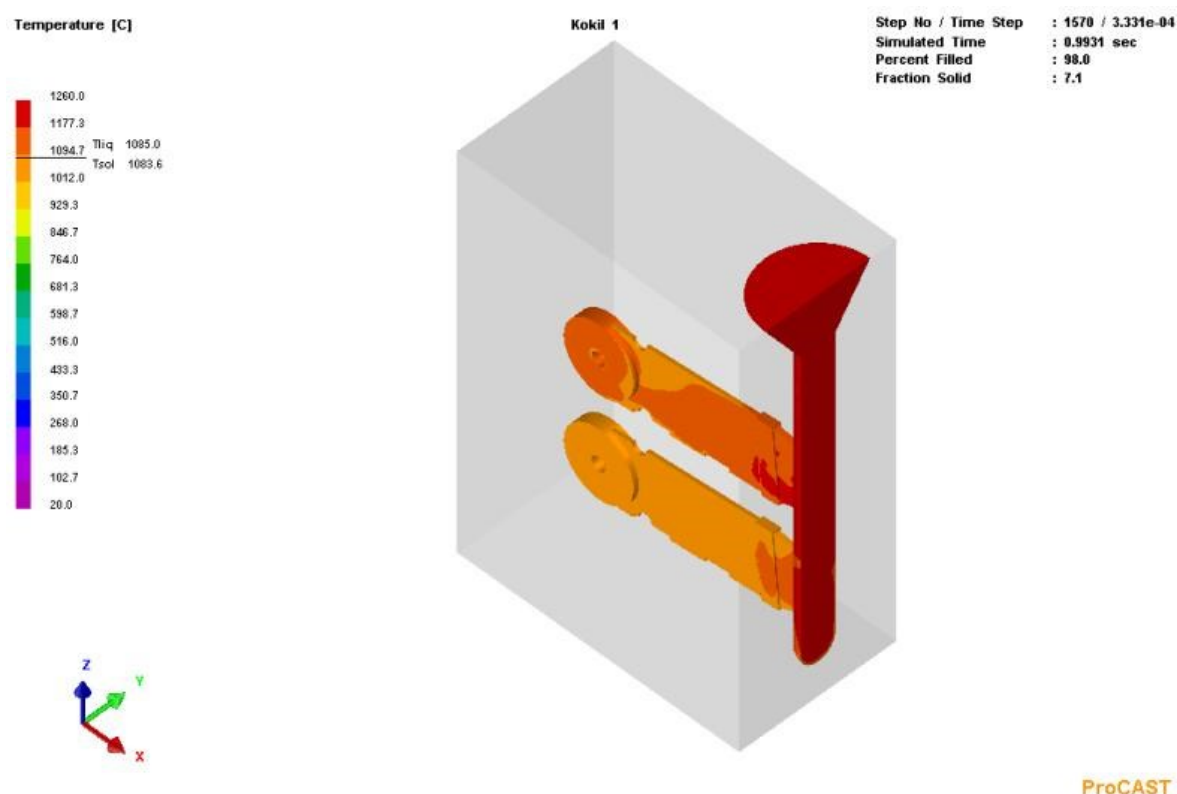


Рисунок 1. Поле распределения температуры при заполнении формы на 98 %.

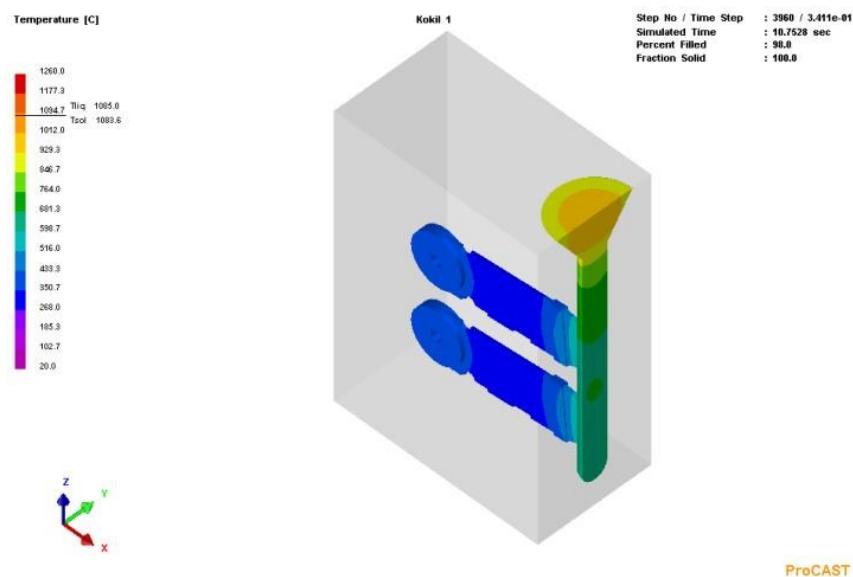


Рисунок 2. Поле распределения температуры после затвердевания.

Результаты расчета стадии заполнения, температурное поле и распределение скорости потока жидкого металла представлено на рисунке 3. При заполнении формы на 98 % количестве твердой фракции 7,1 %. Скорость заполнения формы составляет от 0,5 до 2 м/с, что обеспечивает ламинарный характер течения расплава.

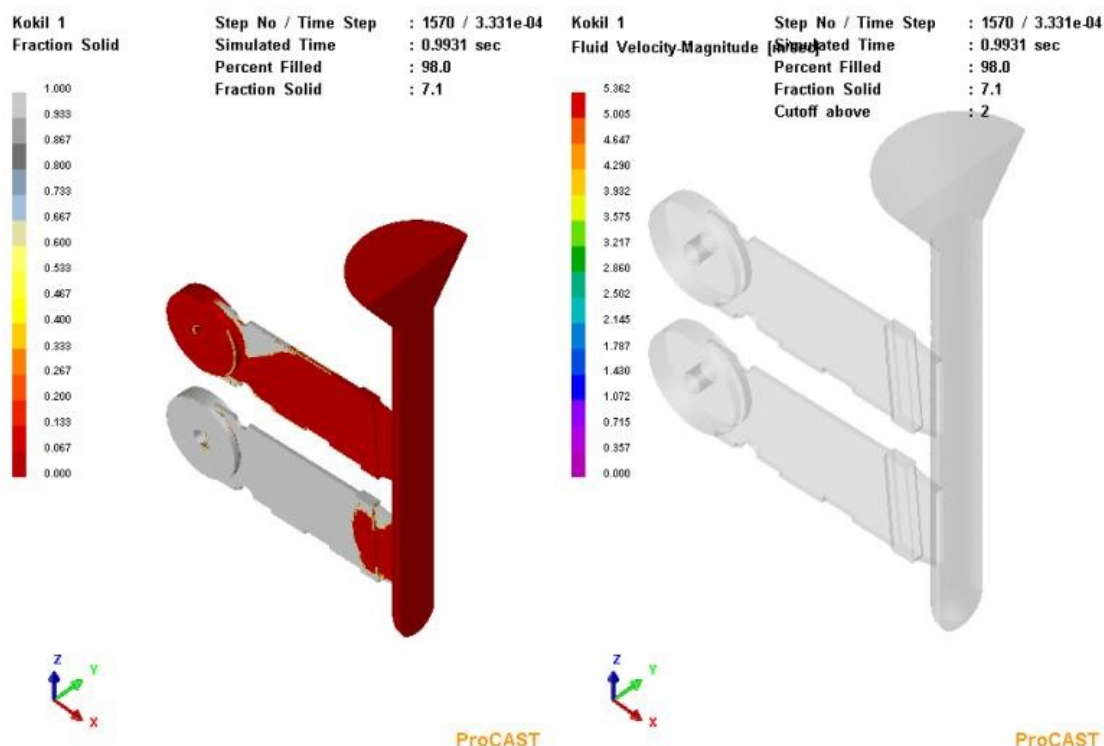


Рисунок 3. Результаты расчета стадии заполнения (распределение твердой фракции и поле распределение скорости потока жидкого металла) технически чистой меди М1.

На рисунке 4 представлены результаты расчета кристаллизации (распределение твердой фазы, усадочная пористость и изменение температуры в узлах, выбранных с интервалом 0,65...0,98 мм). После полного затвердевания за 10,13 пористость технической чистой меди значительно превышает (более 3 %) ее значения, чем у низколегированного сплава медь-железо. При визуальной оценке пористости в меди М1 в отливке можно отметить ее значительные скопления в местах утолщения отливки.

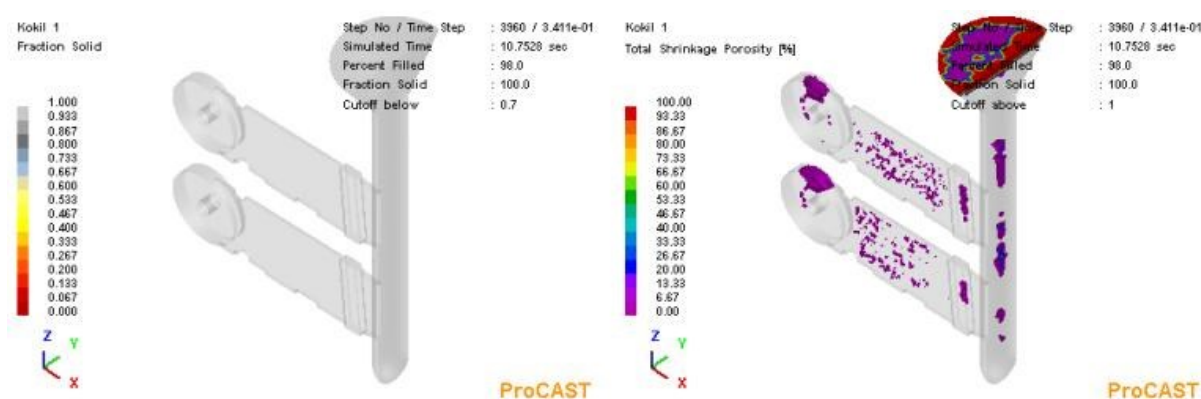


Рисунок 4. Результаты расчета кристаллизации (распределение твердой фазы, усадочная пористость) для меди М1.

На рисунке 5 представлены реперные точки на верхней кокильной отливке, а на рисунке 2 кривые охлаждения в этих узловых точках сетки модели при заливке технической чистой меди марки М1, которые указывают на более высокие скорости охлаждения в тонких сечениях отливки и образования площадки на кривых охлаждения, характерной для эвтектического превращения 1083,6 °С.

Temperature [C]

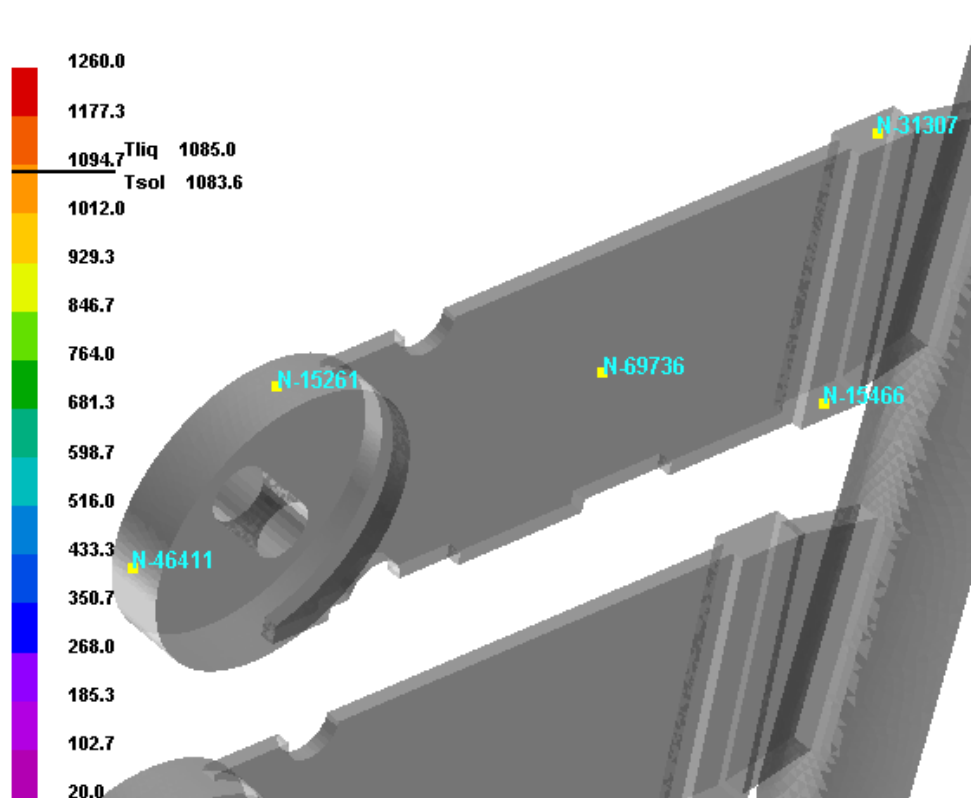


Рисунок 4. Реперные узловые точки сетки МКЭ кокильной отливки.

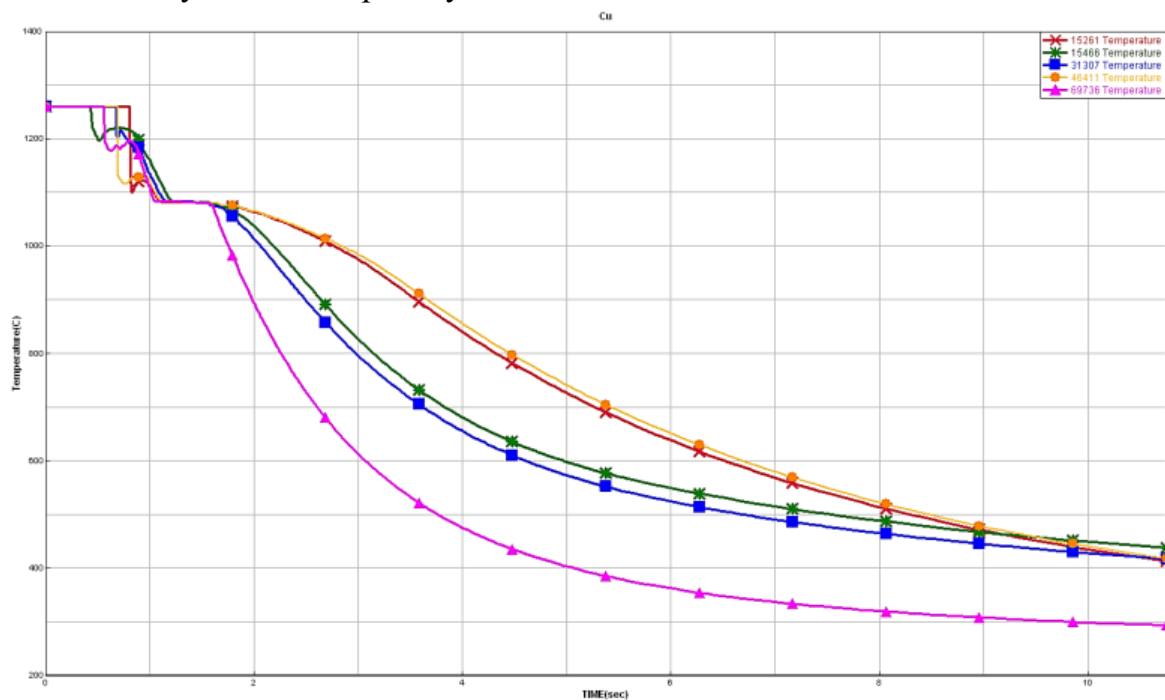


Рисунок 5. Кривые охлаждения в узловых точках сетки модели при охлаждении кокильной отливки из меди марки М1.

В результате анализа полученных результатов моделирования СКМ ProCAST технологического процесса кокильного литья можно отметить, что получение отливок из технически чистой меди марки М1 наблюдается устойчивые характеристики температурно-временных параметров заполнения, при этом количество твердой фракции при заполнении формы на 98 %, наблюдается практически полная заполняемость формы, а пористость в отливках не превышает 1 % при перегреве расплава над температурой ликвидус 165 °С, при минимальном интервале кристаллизации (1,5 °С), характерном для чистых металлов.

Заключение. На основании полученных результатов разработана технология изготовления партии отливок [5] способом ЛВМ из технически чистой меди марки М1. Внешний вид отливок при визуальной оценке не имел видимых дефектов и соответствовал требованиям, предъявляемым к отливкам, изготовленным методом кокильного литья из медных сплавов.

Список литературы.

1. ГОСТ 859-2014 - Медь. Марки. Межгосударственный стандарт. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001 г. - 8 с.
2. Базовый учебный курс по работе в программных продуктах ProCAST, Visual-CAST / 2011 г. Группа компаний «PLM Урал» - «Делкам Урал» © – 174 с.
3. Семенов К.Г. Низколегированные сплавы на основе меди /Литейщик России. - 2020, - № 3, - с. 40-44.
4. Семенов К.Г., Батышев К.А., Панкратов С.Н. Низколегированные сплавы на основе меди для инновационных технологий машиностроения: монография/ Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2018, - 153 с.
5. Батышев К.А., Семенов К.Г., Свиноров Ю.А. Современные технологии производства отливок из сплавов цветных металлов. М.: Издательство «Первый том», 2020 г. - 150 с.

УДК 004.932.2

Автоматизация операций по извлечению информации из сканированных текстовых документов с табличной частью

Дудников Сергей Юрьевич¹

Dudnikov@bmstu.ru

Михеев Петр Иванович¹

pmikheev@bmstu.ru

SPIN-код: 9243-3670

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматривается метод обработки документов с таблицами и извлечения из них информации для автоматизированных информационных систем. Ключевая особенность метода – это декомпозиция процесса извлечения информации из документов на 2 части: обработку таблиц и не табличного текста. Данный комбинированный подход позволяет обрабатывать различные виды документов. Указана область применения метода и приведено описание его этапов работы. На базе сравнения различных решений для каждого этапа работы выбраны решения, которые позволяют обрабатывать широкий спектр документов. В заключении мы предоставляем рекомендации по организации метода извлечения информации из изображений финансовых документов, в которых информация заключена внутри и вне таблиц. На основе данного метода разработан программный интеллектуальный модуль, использующийся в ЕРП-системе предприятия.

Ключевые слова: обработка изображений документов, извлечение информации, детектирование таблиц, распознавание структуры таблиц, классификация объектов.

Automation of routine operations for extracting information from scanned text documents with a table part

Dudnikov Sergey¹

Dudnikov@bmstu.ru

Mikheev Petr¹

pmikheev@bmstu.ru

SPIN-code:9243-3670

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses a method for processing documents with tables and extracting information from them for automated information systems. The key feature of the method is the decomposition of the process of extracting information from documents into two parts: processing tables and non-tabular text. This combined approach allows for the processing of various types of documents. The article specifies the scope of the method and provides a

description of its stages. Based on a comparison of various solutions for each stage, solutions have been selected that allow for the processing of a wide range of documents. In conclusion, we provide recommendations for organizing a method for extracting information from images of financial documents, where the information is contained within and outside of tables. Based on this method, we have developed a software intelligent module that is used in the enterprise's ERP system.

Keywords: document image processing, information extraction, table detection, table structure recognition, and object classification.

Введение. Анализ изображений документов и извлечение из них текстовой информации — это одна из фундаментальных исследовательских задач компьютерного зрения.

Счета, заказы, чеки, договоры и аналогичные документы, распечатанные на бумаге и имеющие различную структуру применяют для коммуникаций между организациями.

Для того, чтобы эффективно управлять этим процессом, необходимо информацию из документа оцифровывать — вносить ее в ИТ-системы компании. Для этого до сих пор применяется в основном ручной ввод. Об этом свидетельствуют проводимые консалтинговыми компаниями исследования [1].

В данной статье в качестве обрабатываемых документов рассматриваются документы, содержащие в т.ч. табличную часть. Их структура и устанавливаемые на метод требования описаны в разделе 2. Основа предложенного метода - декомпозиция процесса извлечения информации из документов на две основные части — обработка таблиц и не табличной части документа.

Предложенный метод состоит из комбинаций двух способов обработки: аналитического и ML-моделью. Данный метод реализован в программном интеллектуальном модуле, встроенном в ЕРП-систему компании, и прошел экспериментальную обработку.

1 Особенности структуры информации обрабатываемых документов.

Материалы и методы. Метод обработки изображений финансовых документов связан со структурой информации, содержащейся в них. Подобные документы обладают особой структурой подачи информации — она заключена как вне, так и внутри таблиц. В статье рассматривается

извлечение информации как текста, так и значений внутри таблиц документа, поэтому метод должен обрабатывать такие виды документов.

Так же рассматриваемый метод должен учитывать существенные внешние различия между текстовой информацией и значениями в таблицах, которые обычно представляют более семантически богатую информацию по сравнению с базовым текстовым представлением. Метод должен так же выделять задачу детектирования таблицы, распознавания структуры и извлечения значений информации. В отличие от вне табличного текста, вид и структура таблиц могут отличаться для разных документов, что также требует дополнительной обработки. В соответствии с этим метод должен применять разные способы работы с таблицами и вне табличного текста. Кроме того, метод должен предусматривать универсальность алгоритма для работы с различными документами.

В предложенном методе процесс извлечения информации из документов состоит из 2х основных способов обработки: обработка таблиц и остальной части документа.

2 Алгоритм метода обработки изображений документов.

Предложен метод извлечения структурированной информации из изображений документов. Он учитывает требования к обработке изображений финансовых документов, указанных в разделе 2.

Предполагается, что необходимая информация в документах расположена как просто в тексте, так и в таблицах. Метод содержит способ обработки как текста, так и таблиц, и при необходимости настраивается под конкретную задачу. Если обработка таблиц или текста вне таблиц не нужна, можно пропустить соответствующий этап.

Алгоритм метода обработки изображения документа приведен на рисунке 1.

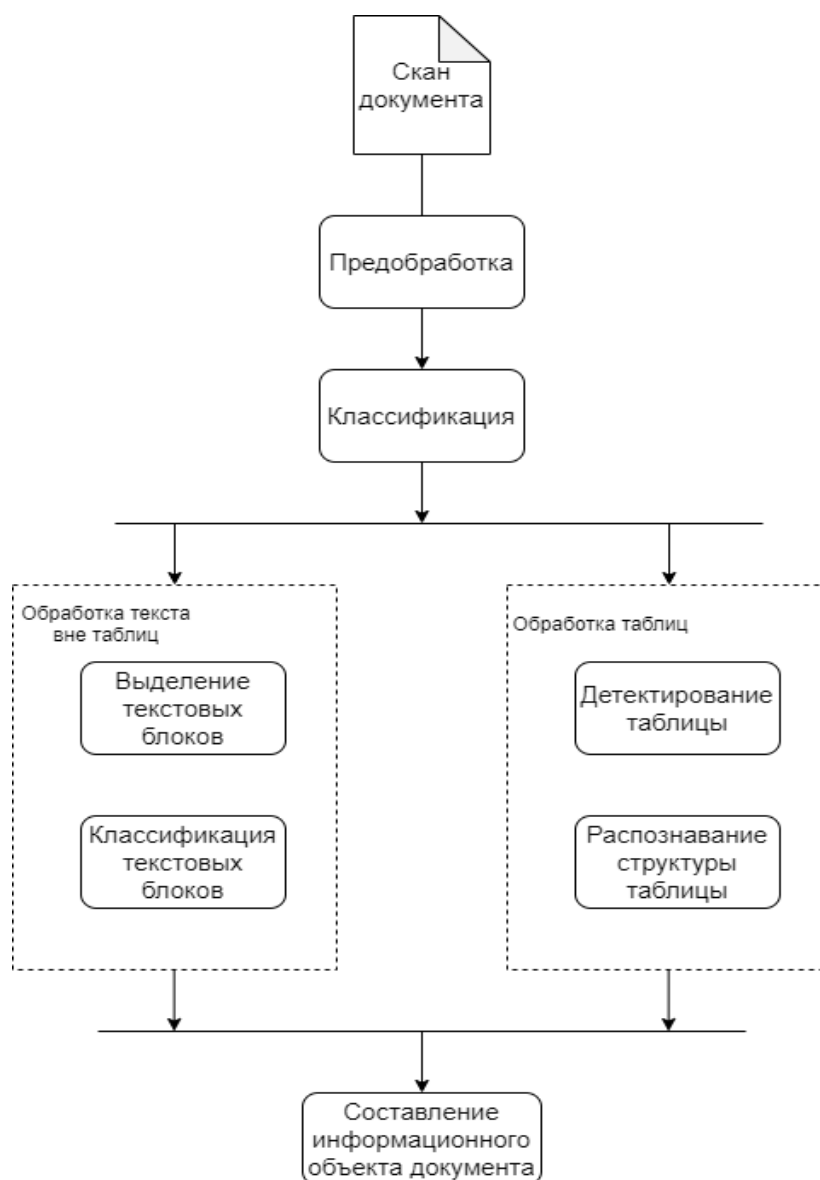


Рисунок 1. Алгоритм метода.

2.1 Обработка текста вне таблиц.

Для рассматриваемых данных на основании описанного в разделе 4 эксперимента рекомендуется применить ансамблевый алгоритм машинного обучения «случайный лес» [2]. «Случайный лес» – ансамбль решающих деревьев, каждое из которых делает предсказание класса на основе своей подвыборки с последующим голосованием, в результате которого выбирается класс, который предсказало наибольшее количество деревьев. Стоит отметить, что не существует универсальной модели, которая подходит для классификации любых произвольных данных. Необходимо постоянно выполнять кросс-валидацию и выбирать модель на основании подобной апробации.

В итоге у нас имеются текстовые блоки с предсказанными в результате классификации метками. Блоки с нужными метками подаются на вход в OCR-систему как координаты текста, который необходимо распознать. Сам текст поступает в информационный объект документа.

2.2 Обработка таблиц.

Таблицы на сканах документов сильно отличаются от обычного текста. Из-за большого разнообразия видов таблиц, многие из них нельзя так же просто выделить на изображении документа, как было сделано с текстовыми блоками. Наш метод позиционирует себя как гибкий и настраиваемый под различные обрабатываемые документы, поэтому он должен универсально определять таблицы разного вида – как с границами, так и без. В связи с этим для детектирования таблиц и распознавания ее структуры необходимо применение моделей глубокого обучения. В данной работе в качестве такой модели рассмотрено применение CascadeTabNet, предложенной группой авторов Prasad et al. [3]. Выбор был сделан на основании результата эксперимента на датасете ICDAR-2013 [4], который приведен в разделе 4.2. Модель реализована с помощью фреймворка MMDetection [5], что позволяет при необходимости легко изменить ее архитектуру и обучаться на собственных данных. Это укладывается в нашу концепцию гибкого настраиваемого подхода.

Архитектура модели представлена на рисунке 2 и реализована с помощью MMDetection [5].

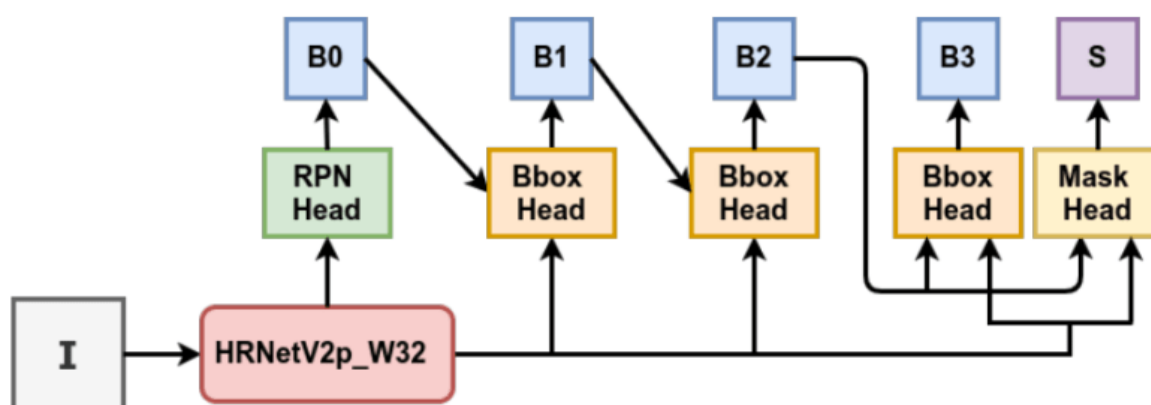


Рисунок 2. Архитектура модели CascadeTabNet.

Backbone модели – сверточная сеть HRNetV2p_W32 [6], которая преобразует изображение в карты features. «RPN Head» делает предварительные предсказания объектов на картах. «B» обозначает ограничивающие прямоугольники, которые предсказывают элементы

модели. «Vbox Head» принимает features вместе с «В» и осуществляют регрессию и классификацию ограничивающих прямоугольников объектов. «Mask Head» предсказывает маски для объектов, а «S» обозначает сегментацию изображения. Таким образом, детектирование объектов осуществляется с помощью «Vbox Head», а сегментацию изображения под эти объекты осуществляет «Mask Head».

Изначально модель была обучена на датасете MS COCO [7] для задачи object detection, поэтому для предсказания расположения таблиц было проведено две итерации transfer learning. Первая производилась на объединении трех датасетов: Marmot [x], ICDAR-19 (cTDaR) [x] и датасете на Github [x] для того, чтобы обучить модель находить таблицы, а вторая – точечная на конкретном датасете (ICDAR-13 и ICDAR-19) для предсказания типа таблицы (с границами или без них). Принцип работы CascadeTabNet представлен на рисунке 3.

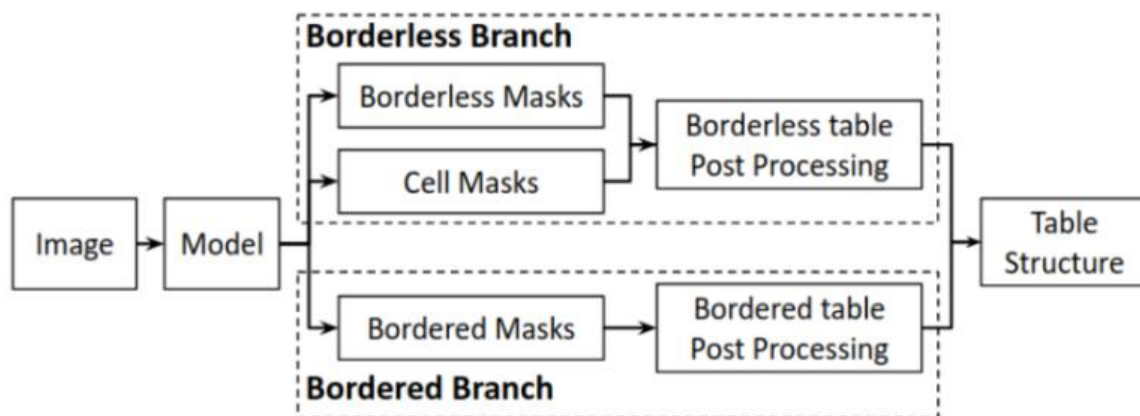


Рисунок 3. Принцип работы CascadeTabNet.

В рамках предложенной авторами концепции transfer learning проведена точечная настройка модели под пользовательский датасет для корректной работы на более глубоком уровне. В качестве обученной модели были взяты модели, обученные на датасетах ICDAR-13 и ICDAR-19, произведен fine-tuning для пользовательского датасета. Оценка и анализ результатов детектирования таблиц на изображениях финансовых документов приведены в разделе 4.2.

Модель предсказывает сегментационные маски для таблиц двух видов – с границами и без них. Маски ячеек предсказываются только для таблиц без границ. В случае, если таблица очерчена границами, гораздо эффективнее использовать для этого аналитические методы компьютерного зрения. Для извлечения линий используются морфологические алгоритмы,

а сами ячейки определяются с помощью точек их пересечения. Затем для таблиц каждого вида распознается ее структура путем анализа расположения ячеек внутри таблицы. Структура считается распознанной, когда для каждой ячейки известны ее координаты и расположение по рядам и столбцам.

В итоге известны координаты таблицы и расположенных в них ячеек. Таким способом можно распознать всю таблицу целиком, подавая координаты ячеек в OCR-системы. Если вся информация в таблице не нужна, можно применить описанный в разделе 3.1 принцип классификации текстовых блоков. Здесь в роли текстовых блоков выступают ячейки таблиц.

2.3 Составление информационного объекта документа.

Состав информационного объекта документа определяется инженером или заказчиком на основе того, какая именно информация необходима для извлечения.

Так, для финансовых документов вида «Счет на оплату», можно выделить следующие важные поля: номер документа, информация об участниках сделки, итога по сделке, верификация итога. Названия полей – это классы (теги), которые назначаются текстовым блокам либо ячейкам в процессе классификации. Для распознавания текстовой информации размеченные текстовые блоки поступают на вход в OCR-системы. В нашем случае в целях конфиденциальности данные поступают в Tesseract OCR [8]. Он качественно обрабатывает небольшие фрагменты текста, на которых нет лишней сторонней информации, и способен распознать текст как русскоязычный, так и англоязычный текст. В случае некорректной работы существует возможность дообучения системы под пользовательские данные.

3 Эксперимент.

Результаты и обсуждение. По представленному в разделе 3 алгоритму разработан программный интеллектуальный модуль, который проходил испытания на различных видах документов. Модуль состоит из нескольких программных блоков, реализующих поставленную задачу, показавшую минимальные ошибки и максимальную эффективность работы этих блоков на различных видах документов для реализации поставленной задачи.

Для эксперимента сформирован собственный датасет из 316 документов, применяемых в компании. Рисунок 4 показывает распределение типов документов в датасете. Были выбраны 2 основных

типа документов — счета на оплату и счета-фактуры. Документы типа «Прочее» к ним не относятся и добавлены в датасет для повышения вариативности.

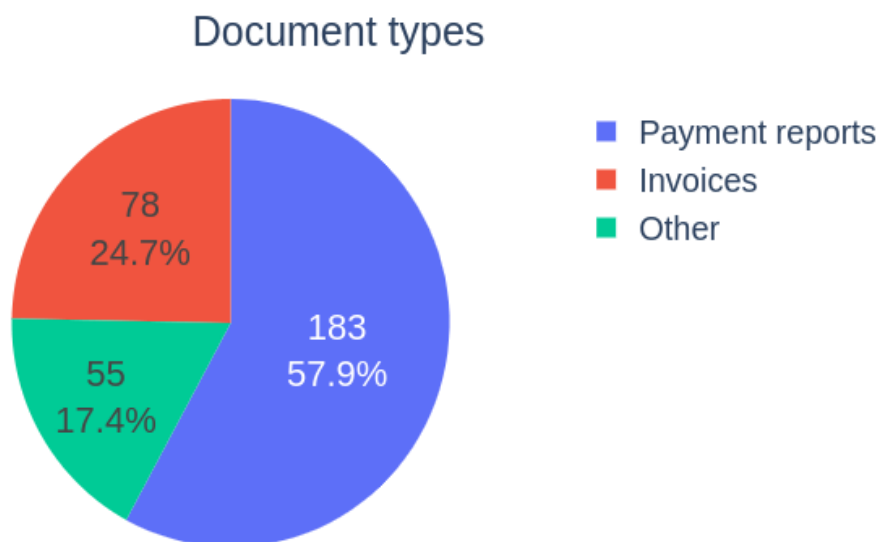


Рисунок 4. Распределение типов документов в датасете.

3.1 Детектирование таблиц и распознавание их структуры.

Для эксперимента с детектирование таблиц были выбраны модели, показавшие лучшие результаты в задачах детектирования таблиц и распознавания их структуры. Ниже приведена оценка работы этих моделей на одном из самых известных датасетов по обработке таблиц ICDAR-2013 [9].

Датасет ICDAR-13 состоит из PDF файлов, которые были сконвертированы в изображения для их последующей обработки. Всего он содержит 238 изображений, на которых находятся 156 таблиц. Он также содержит необходимую метаданную для задачи распознавания структуры таблиц.

Сначала проведем оценку качества моделей при детектировании таблиц. Для вычисления метрики F1-score используется порог 0.5 для IoU. Так как неизвестно, какие именно изображения в датасете использовали Prasad et al. [10] для тренировочной и тестовой выборки, мы оценили результат работы на случайной выборке из 200 изображений. Вычисления метрики других моделей взяты из соответствующих работ. Результаты детектирования таблиц приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты детектирования таблиц по ICDAR-2013

Модель	Recall	Precision	F1-score
CascadeTabNet [16]	0.9754	0.9845	0.9799
DeepDeSRT [14]	0.9615	0.9740	0.9677
TableNet [15]	0.9628	0.9697	0.9662
Tran et al. [12]	0.9636	0.9521	0.9578

На текущий момент CascadeTabNet — state-of-the-art решение по детектированию таблиц на датасете ICDAR-13.

Далее приводится оценка качества моделей при распознавании структуры таблиц. Используемая в данной задаче метрика точно такая же, как и ранее — F1-score. В работе Prasad et al. [10] не проводилась оценка распознавания структуры для датасета ICDAR-2013 [9], поэтому проведена оценка распознавания структуры датасета. Результаты распознавания структуры таблиц приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты распознавания структуры таблиц по ICDAR-2013

Модель	Recall	Precision	F1-score
CascadeTabNet [16]	0.9041	0.9358	0.9197
DeepDeSRT [14]	0.8736	0.9593	0.9144
TableNet [15]	0.8987	0.9215	0.9098

Как видно из таблиц 3 и 4, модель CascadeTabNet предоставляет лучший результат по сравнению с остальными рассматриваемыми моделями и поэтому она используется в предложенном методе как часть, отвечающую за работу с таблицами.

3.2 Детектирование таблиц на собственном датасете.

Из всего датасета выбрано 80% данных для подачи в модель. Остальные 20% использовались для оценки результата детектирования таблиц. Подаваемые в модель данные были разделены на обучающую и валидационную выборку в соотношении 4 к 1.

Для оценки эффективности детекторов таблиц используется метрика средняя точность. (рисунок 5)

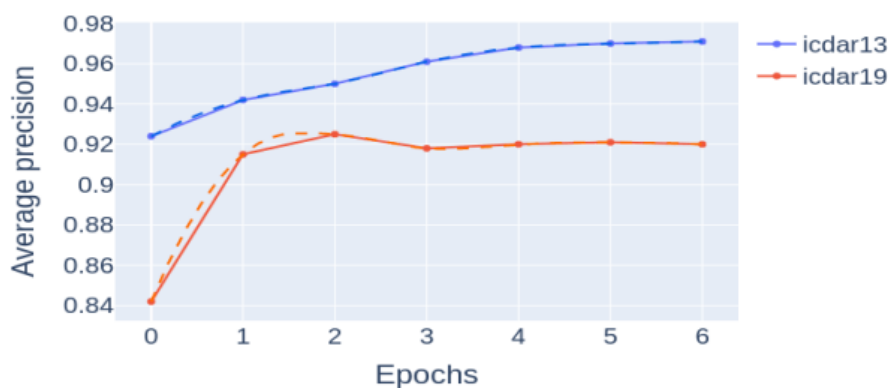


Рисунок 5. Средняя точность для предобученных моделей.

Далее по этапам приведены результаты обученных моделей. В качестве нулевой эпохи выступает базовая предобученная модель. Результаты предобученных моделей на собственном датасете представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты предобученных моделей на собственном датасете

Этапы	ICDAR-13 average precision	ICDAR-19 average precision
0	0.924	0.842
1	0.942	0.915
2	0.950	0.925
3	0.961	0.918
4	0.968	0.920
5	0.970	0.921
6	0.971	0.920

Модель, предобученная на датасете ICDAR-13 показывает лучшие результаты на документах, структура которых приведена в главе 2. Размер ICDAR-13 составляет 238 изображений, в то время как ICDAR-19 — 2400 изображений. Модель на ICDAR-19 быстрее переобучается, в то время как у модели на ICDAR-13 остается простор для обобщения на специфичных документах из-за меньшего размера датасета для предобучения. В связи с полученными результатами эксперимента, рекомендуется предобучать модели на подобных датасетах.

Можно отметить, что выбранная модель хорошо справляется с детектированием таблицы, даже если ее перекрывают сторонние элементы — печати и подписи.

Заключение. В результате работы разработан и апробирован метод обработки изображений документов и извлечения из них информации для автоматизированных информационных систем. В рамках метода предложена и исследована комбинация основных способов обработки документов: обработка нетабличной и табличной информации. Подготовлены рекомендации для каждого этапа метода. И представлены рекомендации выбора датасета для предобучения модели детектирования таблиц.

Список источников

1. Niemann F. PAC – CXP Group, Fujitsu (2018) What AI can bring to business applications. <https://www.fujitsu.com/global/solutions/business-technology/ai/pac-study> Accessed 1 Sept 2020
2. Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by random Forest. R news, 2(3), 18-22.
3. CascadeTabNet: An approach for end-to-end table detection and structure recognition from image-based documents. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 572-573).
4. Göbel, M., Hassan, T., Oro, E., & Orsi, G. (2013, August). Icdar 2013 table competition. In 2013 12th International Conference on Document Analysis and Recognition (pp. 1449-1453). IEEE
5. Chen, K., Wang, J., Pang, J., Cao, Y., Xiong, Y., Li, X., ... & Zhang, Z. (2019). Mmdetection: Open mmlab detection toolbox and benchmark. arXiv preprint arXiv:1906.07155.
6. Sun, K., Zhao, Y., Jiang, B., Cheng, T., Xiao, B., Liu, D., ... & Wang, J. (2019). High-resolution representations for labeling pixels and regions. arXiv preprint arXiv:1904.04514.
7. Lin, T. Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., ... & Zitnick, C. L. (2014, September). Microsoft coco: Common objects in context. In European conference on computer vision (pp. 740-755). Springer, Cham.
8. Smith, R., Abdulkader A. Google (2020) Tesseract-OCR <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract> Accessed 1 Sept 2020

9. Göbel, M., Hassan, T., Oro, E., & Orsi, G. (2013, August). Icdar 2013 table competition. In 2013 12th International Conference on Document Analysis and Recognition (pp. 1449-1453). IEEE.

10. Prasad, D., Gadpal, A., Kapadni, K., Visave, M., & Sultanpure, K. (2020). CascadeTabNet: An approach for end-to-end table detection and structure recognition from image-based documents. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 572-573).

УДК 681.5

Оценка потенциала повышения производительности роботизированного комплекса окрашивания крупногабаритных деталей

Кучерова Алина Игоревна¹

alina@kucherova97.ru

SPIN-код: 2720-6293

Мельниченко Маркел Андреевич¹

markel.96dk@mail.ru

SPIN-код: 8738-9409

¹ФГБОУ ВО «КНАГУ», Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация. В работе представлена оценка потенциала повышения производительности роботизированного комплекса окрашивания крупногабаритных деталей авиационного предприятия. Оценка производилась экспериментальным методом на базе дискретно-событийной модели, разработанной в программном обеспечении MATLAB в пакете Simevents. Результаты, проведенной оценки потенциала производительности технологического процесса показали эффективность оптимизации роботизированного комплекса при внедрении системы управления техническим зрением. Результаты дают основу для будущих исследований в области автоматизации роботизированного комплекса промышленных предприятий.

Ключевые слова: технологический процесс, автоматизация управления, дискретно-событийная модель, роботизированный комплекс, промышленное производство, промышленные роботы, техническое зрение.

Assessing the potential for increasing the productivity of a robotic complex for painting large sized parts

Melnichenko Markel Andreevich¹

markel.96dk@mail.ru

SPIN-code: 8738-9409

Kucherova Alina Igorevna¹

alina@kucherova97.ru

SPIN-code: 7975-9925

¹FSBEI HE "KnASU", Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. This study explores the potential for increasing the productivity of robotic painting of large-scale parts at an aircraft manufacturing facility. The evaluation was conducted experimentally using a spatial model developed in MATLAB software using the Simevents package. Tuning was performed using manual adjustments to the control program during the process and in automatic mode. The results provide a foundation for future research in the field of automation of robotic systems at industrial enterprises.

Keywords: technological process, control automation, territorial-event model, robotic complex, industrial production, industrial robots, computer vision.

Введение. В настоящее время роботизация является актуальным направлением в промышленности [1]. Поэтому в целях обеспечения технологической независимости России путем повышения уровня промышленной роботизации, реализуется национальный проект «Средства производства и автоматизации» [2]. Одним из пунктов проекта является роботизация промышленного производства. Отсюда возникает потребность в повышении уровня технологичности производства путем проведения технического перевооружения с внедрением роботизированных систем, что требует внедрения, не препятствующего штатному функционированию существующих технологических процессов. Для того, чтобы внедрение роботизации на действующее производство не вело за собой глобальных проблем (вплоть до остановки производства) является целесообразным предложить модель, позволяющую прогнозировать изменения на производстве, в том числе и оптимизацию отдельных технологических процессов (ТП).

В работе представлена концептуальная схема структуры дискретно-событийной модели (ДСМ) [3], построенной на основе ТП роботизированного комплекса окрашивания крупногабаритных деталей (КГД) на авиационном предприятии. На основе концептуальной схемы была разработана имитационная ДСМ, позволяющая прогнозировать

производительность ТП при любом его изменении включающее оптимизацию.

Целью данной работы является оценка потенциала повышения производительности ТП роботизированного комплекса авиационного предприятия.

Оценка потенциала повышения производительности ТП будет проводится путем внедрения в ТП средств автоматизированного определения позиции 3D-модели детали в пространстве и позиционирования данной детали в рабочем пространстве. Средствами автоматизированного определения 3D-модели детали в пространстве является система технического зрения, система диагностики и автоматизированный программный комплекс [4].

Материалы и методы. Полученные результаты в ходе данного исследования основаны на анализе ТП роботизированного окрашивания КГД авиационного предприятия. Для оценки потенциала повышения производительности ТП был выбран роботизированный комплекс окрашивания КГД филиала ПАО «ОАК» - КнААЗ им. Ю.А. Гагарина в г. Комсомольске-на-Амуре. Оценка потенциала производительности данного ТП проводилась с помощью ДСМ, разработанной в программном обеспечении MATLAB в пакете SimEvents [5].

Результаты. Для оценки потенциала производительности ТП, необходимо провести анализ ТП на авиационном предприятии. В ходе анализа была разработана концептуальная модель, представленная на рисунке 1:

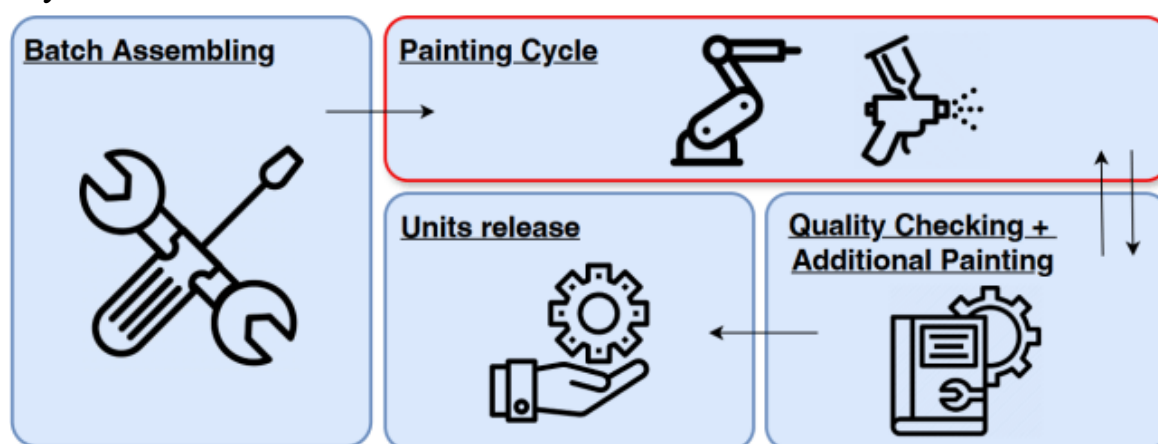


Рисунок 1. Концептуальная модель ТП роботизированного комплекса окрашивания КГД.

Модель представляет собой 4 модуля ТП:

- подготовка к покраске (batch assembling), включающая получение деталей с других цехов, сборку деталей в партию, закрепление на оснастке, соединение с манипулятором – краном;
- покраска КГД (painting cycle), которая подразумевает транспортировку деталей в камеру покраски, программирование роботов, осуществление роботизированной покраски, транспортировку в камеру сушки и маршрутизацию в следующий модуль;
- контроль качества и исправление дефектов (quality checking + additional painting) – модуль, где проводится контроль качества на наличие или отсутствие дефектов при покраске деталей, если дефект обнаружен, то деталь проходит процедуру исправления дефектов и отправляется либо в предыдущий модуль на повторную покраску (дополнительный слой) либо в модуль выпуска деталей;
- выпуск деталей (units release) – завершающий этап ТП, который состоит процесса разборки партий на отдельные детали и выпуск деталей из цеха.

На рисунке 2 представлен модуль ДСМ - «painting cycle» являющимся основным в данном ТП.

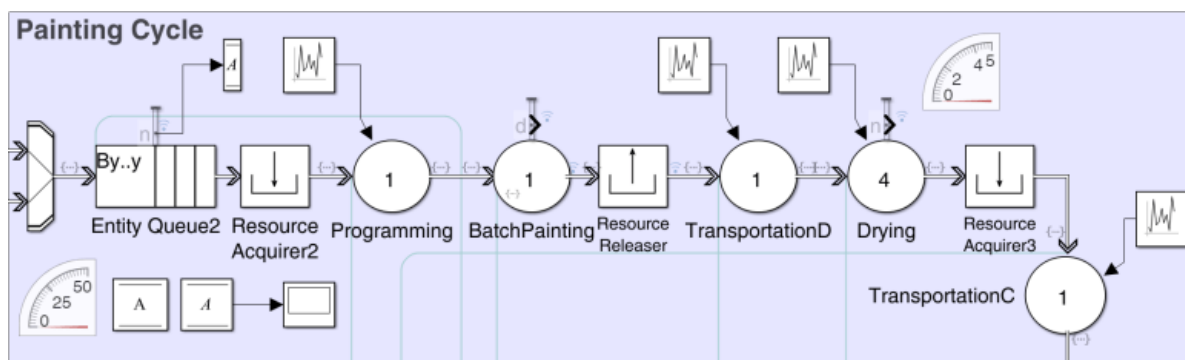


Рисунок 2. Модуль «Painting Cycle» ДСМ ТП роботизированного комплекса авиационного предприятия.

Модуль состоит из очереди (Entity Queue2), серверов (Programming, BatchPainting, TransportationD, Drying, TransportationC), принятия и отдачи ресурсов (Resource Acquirer2, Resource Releaser), задающих значений (Random Number). Сервера являются событиями, в данном случае программирование роботов, покраска партий, транспортировка в камеру сушки, сушка и транспортировка на контроль качества.

Для оценки потенциала повышения производительности необходимо установить в ДСМ время работы сервера «Programming» при ручном программировании (ручной коррекции управляющей программы (УП)) и при автоматизированном (автоматической коррекции УП), то есть с внедрением системы управления техническим зрением, которая будет определять 3D-модель детали и автоматически загружать систему управления в контроллер робота, тем самым сокращая время работы сервера «Programming».

Производительность роботизированного комплекса измеряется в количестве окрашенных деталей в единицу времени. При моделировании процесса ручной коррекции УП в работу сервера «Programming» было зафиксировано 7 минут: длительность позиционирования детали в камере покраски (3 минуты) + время на выбор управляющей программы (3 минуты) + 1 минута между операциями. В процессе при автоматической коррекции УП программировании время сервера «Programming» сокращается до 5 минут – столько времени понадобится автоматизированной системе технического зрения для распознавания детали (2 минуты) и ее позиционирования в камере (3 минуты).

На рисунке 3 представлен сравнительный график, который показывает количества выпущенных деталей из цеха покраски в единицу времени (всего 1440 минут – это две рабочих смены).

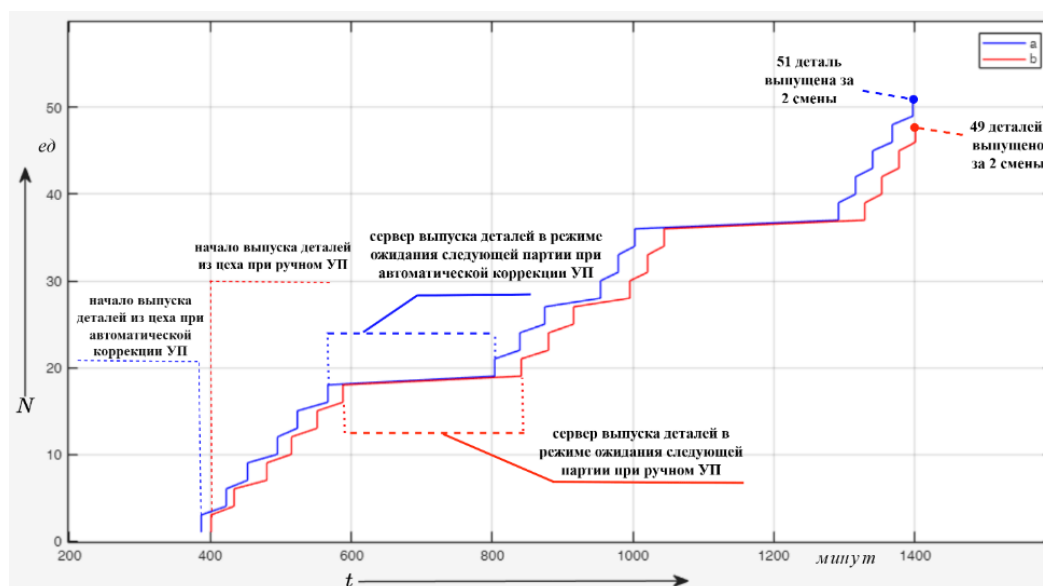


Рисунок 3. Результат производительности ТП в единицу времени
а – производительность при автоматической коррекции УП; б –
производительность при ручной коррекции УП.

Исходя из графика видно, что при загрузке программы управления оператором в ручном режиме (b) тратится больше времени и следовательно это влияет на производительность в виде выпуска деталей в количестве 49 штук за 2 смены. При автоматической коррекции УП (a) производительность за такое же количество времени (1440 минут – 2 смены) увеличилась на 3 детали и составила уже 54 детали.

Таким образом была проведена оценка потенциала повышения производительности роботизированного комплекса на примере внедрения в цикл роботизированной покраски системы управления техническим зрением. С помощью ДСМ была выявлена степень повышения производительности, что показала увеличение количества выпуска деталей из цеха на 5,5 %.

Обсуждение. Полученные результаты, проведенного исследования показывают эффективность использовать ДСМ для оценки потенциала оптимизации ТП. С помощью модели можно делать прогнозы при оптимизации производства без потерь на реальном ТП.

Заключение. В результате проведенных исследований в области оценки потенциала повышения производительности роботизированного комплекса окрашивания КГД было спрогнозировано увеличение производительности ТП на 5,5 % при внедрении системы управления техническим зрением для автоматической коррекции УП.

При внедрении в роботизированный комплекс окрашивания КГД системы управления техническим зрением сокращается время на программирование промышленных роботов, что ведет за собой повышение производительности роботизированного комплекса, выражающееся в повышении количества выпуска деталей из цеха.

Результаты доказывают эффективность работы ДСМ на предмет оценки потенциала повышения производительности ТП.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2024-2026 годы по теме "Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники".

Список источников

1. Носачевская, Е. А. О перспективах развития экономики России в контексте актуальности роботизации промышленности / Е. А. Носачевская // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 1(57). – С. 96-100.

2. Мугин, О. О. Актуальность развития роботизации для обеспечения безопасности страны. Вопросы подготовки кадров в области робототехники / О. О. Мугин // I Международная научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности "RoboEmercom»: Материалы I Международной научно-практической конференции по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности, Москва, 19 октября 2021 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2021. – С. 117-121.

3. Гришко, А. К. Управление информационными компонентами дискретно-событийной имитационной модели / А. К. Гришко // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2017. – Т. 1. – С. 295-297.

4. Жиганов, С. В. Исследование нейросетевых алгоритмов прогнозирования движений человека на базе LSTM и трансформеров / С. В. Жиганов, Ю. С. Иванов, Д. М. Грабарь // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. – 2023. – Т. 514, № 2. – С. 364-374. – DOI 10.31857/S2686954323601689.

5. A. Rahatulain, T. N. Qureshi and M. Onori, "Modeling and simulation of evolvable production systems using Simulink/SimEvents," IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, TX, USA, 2014, pp. 2591-2596, doi: 10.1109/IECON.2014.7048871.

УДК 004.021

Функционал интеллектуального цифрового двойника для снижения ресурсозатратности роботизированных технологических процессов

Ворощенко Василий Даниилович¹

v.voroshencko@yandex.ru

SPIN-код: 7975-9925

Гудим Александр Сергеевич¹

feu@knastu.ru

SPIN-код: 7475-8197

¹ФГБОУ ВО «КНАГУ», Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация. В работе предложен комплекс требований для цифрового двойника коллаборативного роботизированного технологического процесса (РТП), ориентированного на объединение задач автоматической коррекции команд управления, безопасности и экономической оценки оптимизационных мероприятий в единую систему. Особенностью подхода является интеграция информационно-аналитического модуля, обеспечивающего формирование показателей эффективности на основе совмещения данных моделирования и измерений с физического комплекса. Использование системного анализа и нотации SysML позволило формализовать взаимосвязи между функциями цифрового двойника и обосновать его архитектурную целостность. Результаты формируют основу для дальнейшей разработки прикладных цифровых двойников РТП с расширенными аналитическими возможностями.

Ключевые слова: коллаборативный робот, цифровой двойник, функциональная структура, технологический процесс, планирование и оптимизация движения

Intelligent digital twin functionality for reducing resource consumption in technological processes

Voroshchenko Vasilii Daniilovich¹

v.voroshencko@yandex.ru

SPIN-code: 7975-9925

Gudim Alexander Sergeevich¹

feu@knastu.ru

SPIN-code: 7475-8197

¹FSBEI HE "KnASU", Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. This paper proposes a functional structure for a digital twin of a collaborative robotic technological process (RTP) designed to integrate the tasks of automatic control command correction, safety, and economic evaluation of optimization measures into a single system. A key feature of this approach is the

integration of an information and analytical module that enables the generation of performance indicators based on the combination of modeling data and measurements from the physical complex. The use of systems analysis and SysML notation allowed us to formalize the relationships between the digital twin's functions and substantiate its architectural integrity. The results form the basis for the further development of applied digital twins of RTPs with enhanced analytical capabilities.

Keywords: Collaborative robot, digital twin, functional structure, technological process, motion planning and optimization.

Введение. Современные производственные системы с коллаборативными роботизированными комплексами характеризуются высокой изменчивостью технологических процессов и необходимостью обеспечения безопасного взаимодействия человека с оборудованием [1,2]. Внедрение оптимизационных решений, повышающих адаптивность и безопасность комплекса, требует интеграции цифровых двойников (ЦД) в систему управления, поскольку моделирование становится ключевым инструментом прогнозирования и анализа [3]. Одновременно возрастает сложность количественной оценки экономической эффективности внедряемых оптимизационных мероприятий, что обосновывает необходимость разработки ЦД, обеспечивающих формирование полной информационной базы для анализа целесообразности решений [4, 5].

Данная работа ориентирована на изучение функциональных особенностей цифрового двойника с функционалом формирования необходимой информации для экономического анализа применяемых оптимизационных решений, системную интерпретацию и разработку предложений по совершенствованию его структуры. В исследовании ставится цель: сформировать комплекс требований, отражающих функционал цифрового двойника роботизированного технологического процесса (РТП), ориентированного на решение следующих задач: обеспечение безопасного и адаптивного функционирования в условиях изменяющегося технологического процесса, а также реализация информационно-аналитического механизма оценки экономической эффективности проведенных оптимизационных мероприятий.

Материалы и методы. В работе применён метод системного анализа для выявления структуры и взаимосвязей функциональных требований к ЦД РТП. Исследование основано на анализе нормативных документов,

научных публикаций и типовых архитектур систем управления РТК. Функциональные требования структурированы в виде иерархической диаграммы, выполненной в нотации SysML [6], что позволило формализовать взаимосвязи между требованиями и обеспечить их логическую согласованность.

Результаты. Функционал ЦД представлен диаграммой требований ЦД РТП (Рисунок 1).

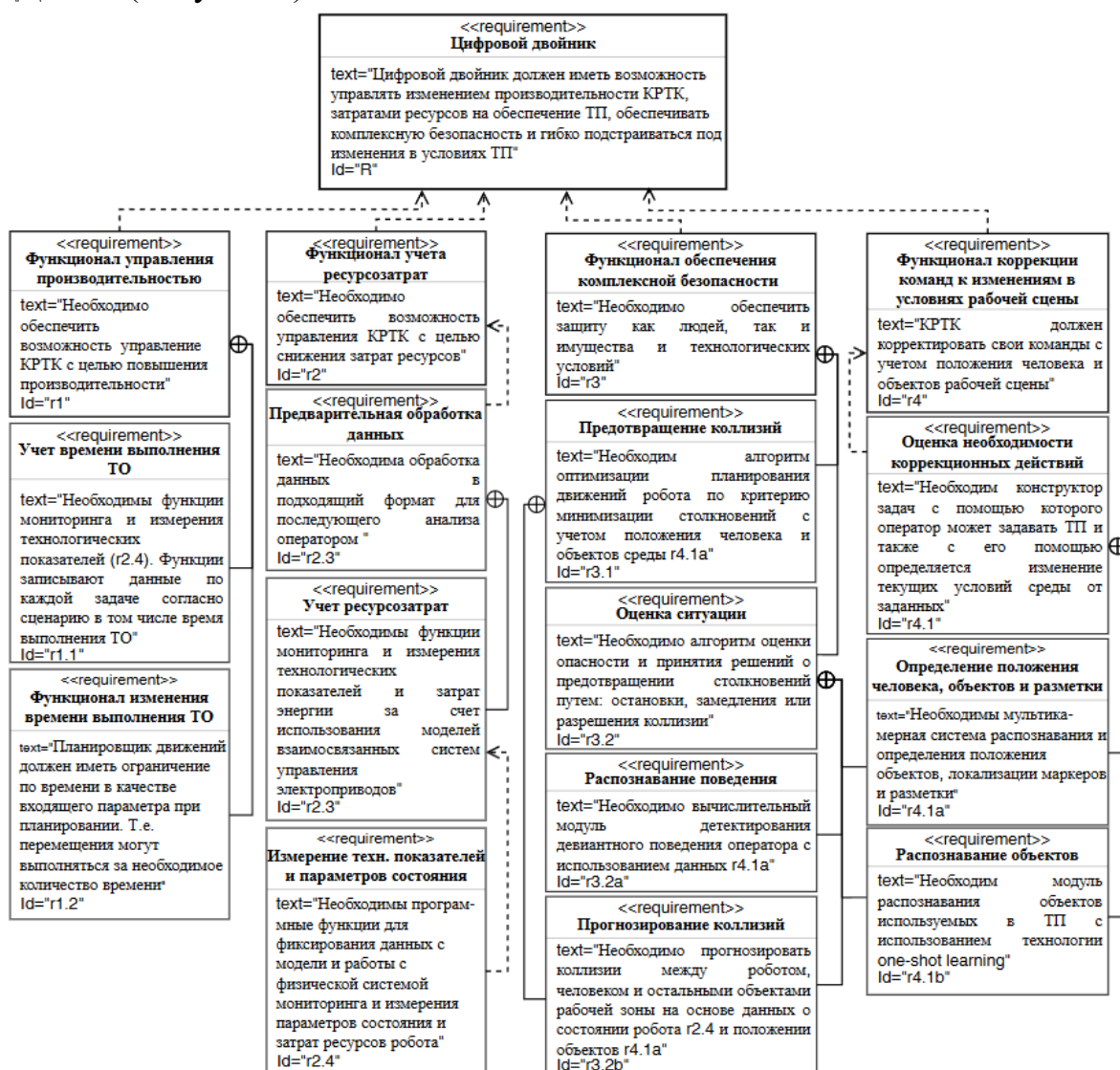


Рисунок 1. Диаграмма требований ЦД РТП.

На диаграмме продемонстрировано, каким образом требование к созданию и функционированию ЦД РТК декомпозируется на совокупность вложенных требований, направленных на обеспечение управляемости, безопасности и адаптивности комплекса в динамических производственных условиях. В целом схема раскрывает иерархию функций, посредством

которых ЦД реализует управление изменениями производительности, ресурсозатрат и параметров технологического процесса.

Согласно диаграмме, верхний уровень представляет обобщенное требование: ЦД должен обеспечивать управление производительностью РТП, учет ресурсных затрат и технологических параметров, а также комплексную безопасность и адаптацию системы под изменяющиеся производственные условия. Это требование сформулировано исходя из главной задачи ЦД – создание механизма цифрового управления физическим РТП на основе моделирования и анализа необходимых данных.

На следующем уровне структура требований разделяется на четыре направления, отражающих ключевые направления применения ЦД:

Направление управления производительностью связывает ЦД с задачами оптимизации производственного цикла. Оно включает требования к функциям, обеспечивающие мониторинг и учёт времени выполнения технологических операций (ТО). Функции учёта длительности ТО позволяют выявлять неэффективные участки, что создаёт основу для решения или оценки о проведении оптимизационных мероприятий. Так, например можно оценить эффективность использования функционала предотвращения коллизий и провести анализ о целесообразности его использования: отследить по каким операциям снижение длительности выполнения наиболее значительно. В данном ключе эта подфункция больше несет информационный характер для принятия последующих управляющих решений оператора. Подфункция «Функционал изменения времени выполнения ТО» позволяет управлять длительностью производственного цикла обеспечивая баланс между производительностью и экономией ресурсов.

Блок учёта ресурсозатрат отражает информационно-аналитическую составляющую ЦД, направленную на снижение временных и энергетических затрат. В его структуре выделяются требования для реализации подфункции предварительной обработки данных, учёта энергопотребления и измерения технологических показателей. Здесь реализован механизм сбора и унификации данных о состоянии РТП, получаемых как с физического уровня (система измерения параметров состояния), так и из симуляционной модели, что обеспечивает возможность их последующего анализа и оценки результативности применяемых оптимизационных мер. Таким образом, данный функционал формирует данные, необходимые для объективной оценки и последующего анализа

повышения эффективности от оптимизационных решений. Так, например, можно оценить эффективность применения алгоритмов планирования траекторий обхода различных семейств для предотвращения коллизий и выявить наиболее подходящий для текущего ТП с точки зрения экономической выгоды.

Требования к функционалу обеспечения комплексной безопасности определяют способность ЦД оценивать текущую ситуацию и предотвращать критические сценарии. Подсистема оценки обстановки выявляет потенциальные риски и инициирует корректирующие действия. Например, при появлении человека или движущегося объекта вблизи рабочей зоны скорость перемещения робота автоматически снижается, а при возникновении препятствия активируется функционал предотвращения коллизий и перестроения траектории обхода. Данный механизм распространяется как на взаимодействие с человеком, так и с другими объектами рабочей зоны (инструменты, детали, материалы и т.д.). Важной особенностью системы является анализ поведения человека, включая нетипичные действия, что позволяет своевременно адаптировать действия робота и минимизировать риски взаимодействия. Таким образом данный функционал позволяет поддерживать безопасные рабочие условия для человека и обеспечить сохранность технологических условий (целостность объектов и конфигурацию рабочей зоны).

Блок коррекции команд направлен на обеспечение способности комплекса адаптироваться к изменениям конфигурации рабочей зоны или позиции оператора. Блок оценки необходимости коррекции действий формирует коррективы в команды управления только в случае изменения условий. Определение положения человека и объектов, а также распознавания объектов сцены выступает обеспечивающим функционалом. Так, например, при изменении положения обрабатываемой детали система сможет адаптировать и скорректировать перемещения робота в рамках заданного сценария.

В совокупности выделенные блоки образуют комплекс требований к ЦД, обладающего способностью к самокоррекции, анализу производственных параметров и поддержанию безопасного взаимодействия с человеком. Интеграция и использование такого двойника позволяет обеспечить своевременную и качественную оценку повышения как технологических показателей эффективности РТП, так и экономических.

Такая структура создает условия для принятия управленческих решений по совершенствованию и оптимизации РТП на основе данных, полученных с помощью цифрового моделирования и функционирования физического оборудования.

Обсуждение. В дальнейшем востребованными могут быть исследования по разработке уже целого аналитического модуля способного автоматически формировать необходимую оценку и также самостоятельно принимать решения о необходимости проведения оптимизационных мероприятий, о выборе того или иного решения, например алгоритма планирования траекторий.

В будущем исследования в этом направлении будут направлены на реализацию предлагаемых решений и экспериментальное подтверждение результатов.

Заключение. В результате разработано концептуальное представление о требуемом функционале оригинального ЦД РТП, обладающего способностью адаптироваться к изменяющимся условиям производственной среды и обеспечивать требуемый уровень безопасности. Отличительной особенностью предложенной структуры требований является интеграция модулей учета ресурсных затрат и технологических показателей, необходимых для оценки экономической эффективности оптимизационных мероприятий. Формирование необходимых данных обеспечивается за счет объединения информации, полученной посредством моделирования технологического процесса, с результатами измерений, поступающих от физического комплекса, что позволяет сопоставлять прогнозируемые и фактические изменения параметров системы при реализации оптимизационных решений.

Полученные результаты могут служить основой для реализации ЦД РТП, ориентированной на обеспечение безопасности и гибкости производства, а также на проведение экономического анализа реализуемых изменений.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 25-21-00292).

Список источников

1. Asif S., Callari T.C., Khan F., Eimontaite I., Hubbard E.-M., Bahraini M.S., Webb P., Lohse N. Exploring tasks and challenges in human-robot

collaborative systems: A review. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2026. – Т. 97. – С.35-49.

2. Shah R., Doss A.S.A., Lakshmaiya N. Advancements in AI-enhanced collaborative robotics: towards safer, smarter, and human-centric industrial automation. Results in Engineering, 2025. – Т. 27. – С. 105-112.

3. Zheng H., Xia W., Xu X. A human-robot collaborative assembly framework with quality checking based on real-time dual-hand action segmentation. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2025. – Т. 94. – С. 102976.

4. Bataev, Alexey V., Natalia Dedyukhina, and Muhammadgusen N. Nasrutdi-nov. "Innovations in the financial sphere: performance evaluation of introducing service robots with artificial intelligence." 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM). IEEE, 2020.

5. Lai, TJ., Heggie, R., Kamaruzaman, HF. Economic Evaluations of Robotic-Assisted Surgery: Methods, Challenges and Opportunities //Applied health economics and health policy. – 2025. – Т. 23. – №. 1. – С. 35-49.

6. Friedenthal S., Moore A., Steiner R. OMG systems modeling language (OMG SysML) tutorial //INCOSE Intl. Symp. – Citeseer, 2006. – Т. 9. – С. 65-67.

УДК 621

Механическая обработка заготовок из твердосплавных материалов

Бухарестов Игорь Сергеевич¹

igorbuharestov@yandex.ru

Назаров Алексей Александрович²

anazarov1954@mail.ru

¹Студент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

²КТН, Доцент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

Аннотация. В статье рассмотрены методы, применяющиеся при обработке заготовок из твердосплавных материалов. Указанные методы ориентируются на нагрев заготовки в процессе обработки для повышения стойкости режущего инструмента. В каждом описанном методе приведены его недостатки и область применения.

Ключевые слова: твёрдосплавные материалы, режущий инструмент, нагрев, заготовка, обработка металла резанием, механическая обработка.

Abstract. The article discusses the methods used in the processing of blanks made of carbide materials. These methods focus on heating the workpiece during processing to increase the durability of the cutting tool. Each described method contains its disadvantages and scope of application.

Keywords: carbide materials, cutting tools, heating, billet, metal cutting, mechanical processing.

Введение. Технический прогресс требует применения деталей с более совершенными физико-механическими характеристиками такими как: прочность, износостойкость, легкость и т.д. На смену традиционным материалам приходят сплавы на основе титана, стали с повышенной стойкостью к коррозии, высокопрочные чугуны, жаропрочные стали и им подобные.

Материалы и методы. Данные типы материалов превосходят традиционные конструкционные стали по широкому ряду показателей. Однако их основным недостатком является то, что они трудно поддаются механической обработке. Так, при прочих равных условиях, время необходимое для обработки заготовок из титановых сплавов примерно в 10-20 раз больше, чем заготовок из обычной конструкционной стали.

Этот факт является основной причиной низкой производительности технологических процессов производства изделий из таких материалов, существенным снижением стойкости режущего инструмента и, как следствие, удорожанием готового изделия.

Решением этой проблемы может стать:

- применение для обработки таких заготовок специального режущего инструмента с повышенной износостойкостью режущих кромок;
- изменение пластических свойств твердосплавных материалов в процессе их обработки.

По ряду признаков (технических и экономических) второй подход является более привлекательным.

Одним из способов изменения пластических свойств материалов является нагрев заготовок. Целью его является снижение сил сопротивления пластическим деформациям, возникающим при снятии удаляемого слоя металла.

Способы нагрева заготовок можно разделить на две большие группы:

- объёмный, направленный на нагрев всего объёма заготовки;

- локальный, нагрев ведется только в области заготовки, которая расположена непосредственно перед зоной резания.

Первый способ имеет ряд недостатков, ограничивающих его применение при механической обработке заготовок:

- частая смена фаз нагрева и охлаждения заготовки ведет к изменению структуры материала, что приводит к неконтролируемому изменению его физико-механических свойств;

- материал обрабатываемой заготовки должен обладать достаточной тепловой инерцией во избежание быстрой потери температуры в процессе механической обработки;

- отсутствие возможности регулировки температуры заготовки в процессе ее продолжительной обработки;

- передача тепловой энергии от заготовки деталям технологического оборудования, в котором она закреплена и т.д.

Второй способ состоит в нагреве только поверхностного слоя, расположенного непосредственно перед зоной резания. Данный способ лишен большинства перечисленных выше недостатков и поэтому является более перспективным.

Для его реализации может быть использовано различное оборудование, которое должно располагаться вблизи рабочей зоны станка.

Известны следующие методы передачи тепловой энергии в заданную область.

1. Нагрев потоком раскаленных газов.

Газовую горелку монтируют на суппорте станка, таким образом, чтобы «жало» пламени на ее выходе касалось только области заготовки, расположенной перед режущим инструментом. Данный метод обладает следующими преимуществами:

- независимость от магнитных свойств материала;
- независимость от электропроводности материала;
- независимость от геометрии заготовки;
- простота конструкции.

Вместе с тем ему свойствен и ряд недостатков:

- низкая концентрация плотности тепловой энергии на конце «жала» пламени;
- относительно продолжительное время нагрева поверхностного слоя заготовки;

– окисление поверхностных слоев заготовки под воздействием пламени горелки;

– вредные условия труда для рабочего.

Это ограничивает его применение только на черновых операциях.

2. Нагрев при помощи электрической дуги.

Несмотря на высокую плотность тепловой энергии в центральной части электрической дуги, данный метод не нашел применения для нагрева поверхностных слоев заготовок в виду нестабильности дуги и сложностью управления данным процессом.

3. Плазменный нагрев.

Данный метод близок к электродуговому для этого используется устройство – плазмотрон. Принцип работы плазмотрона заключается в создание электрической дуги между первым электродом, которым является плазмотрон и вторым электродом, которым является заготовка. С помощью созданной дуги реализуется нагрев заготовки. Процесс осуществляется в среде аргона или азота.

Обработка заготовки может осуществляться в двух режима:

- простое оплавление верхнего слоя материала на величину припуска на механическую обработку и сдувание расплавленного металла с тела заготовки;

- удаление оплавленного материала механическим путем срезания.

Применение такого метода ограничивается из-за большого расхода электроэнергии для работы плазмотрона. Поэтому применяется такая технология только в случаях, когда требуется удаление больших припусков. Схемы работы плазмотронов в рассмотренных режимах показаны на рисунке 1.

4. Нагрев при помощи кварцевых или диодных ламп.

Недостатки метода: сложная конструкция, низкий КПД, низкая плотность светового потока. Данные недостатки этого метода нагрева заготовок, определили его применение только на операциях обработки деталей простых форм.

5. Нагрев в электролите.

При реализации данного метода под заготовкой устанавливается резервуар с 25% раствором карбоната калия (K_2CO_3). Резервуар связывается с системой подачи и отвода жидкости. Заготовка снизу омывается раствором карбоната калия. Резервуар и заготовка включаются в электрический контур с напряжением порядка 140 В. Раствор карбоната

калия является электролитом и в его среде под действием приложенного напряжения создаются каналы сплошной проводимости, по которым движутся электроны, разогревающие заготовку. Принцип работы устройства показан на рисунке 2.

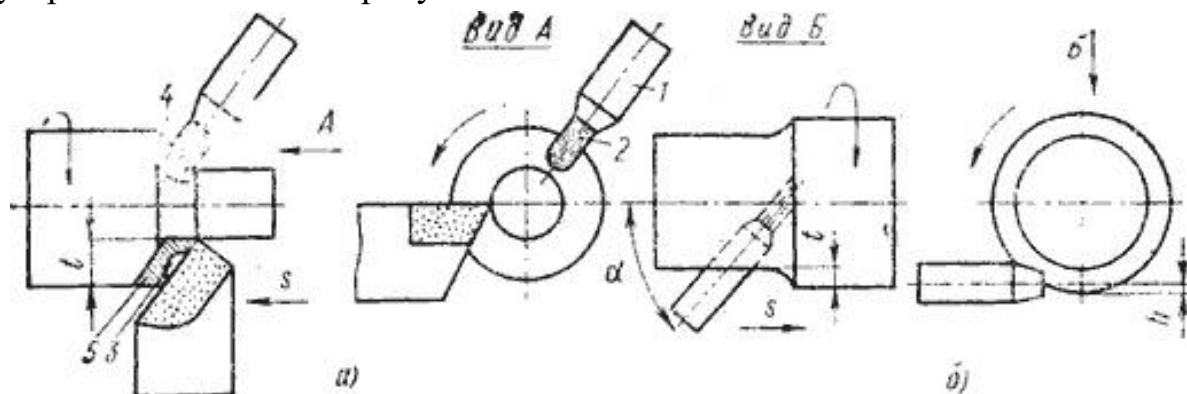


Рисунок 1. а) Схема обработки с нагревом срезаемого слоя с его последующим удалением с помощью лезвийного инструмента;
б) Схема обработки с оплавлением срезаемого слоя металла и его удаление с заготовки посредством сдвигания.

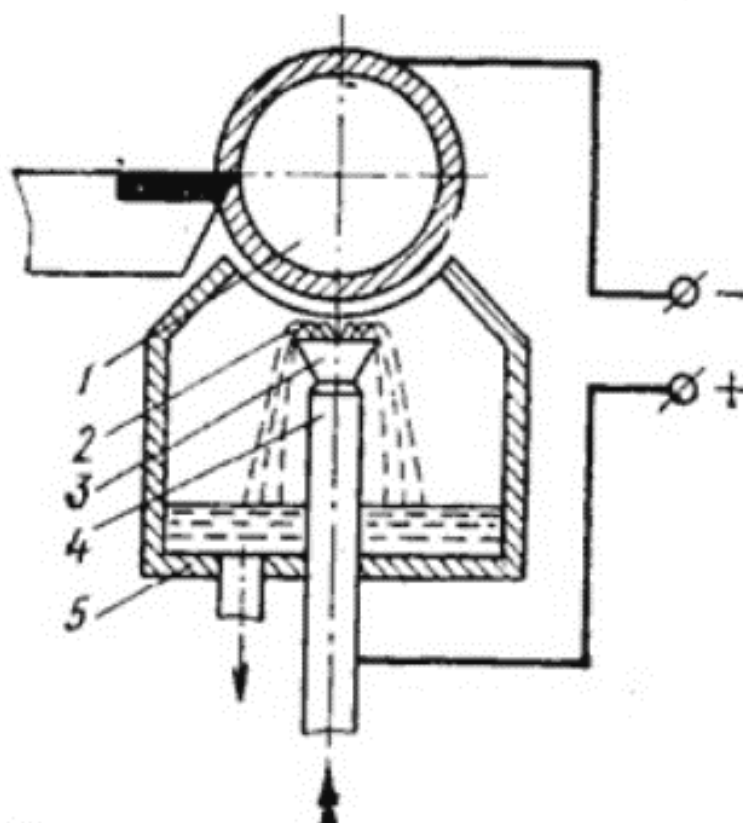


Рисунок 2. Схема обработки резанием с нагревом в электролите:
1 — заготовка; 2 — электролит; 3 — сопло; 4 — трубка для подачи электролита; 5 — ванна для сбора и отвода электролит.

6. Лазерный нагрев.

В данном методе используется лазерная установка. С её помощью лазерный луч фокусируется в нужную точку поверхности заготовки и вызывает практически мгновенный ее нагрев.

Главным достоинством данного метода является высокая точность концентрации тепловой энергии в нужной области.

В настоящее время известны различные типы лазеров, отличающихся своими характеристиками. В связи с этим для повышения эффективности их использования в решение поставленных задач необходимо выполнить дополнительные исследования направленных на изучение интенсивности поглощения энергии лазерного луча различными конструкционными материалами.

Список источников

1. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. 2-е изд. перераб. и доп. Справочник. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М., «Металлургия», 1983, с. 352.;
2. Теплофизика резания. А. Н. Резников. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.;
3. Резание металлов: Учебник для вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский: М.: Высшая школа, 1984. 247 с.;
4. Пластическая деформация металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Г. Сафронов, А. М. Галкин. Науч. тр./МИСИС. М.: Metallurgia, 1974, № 76, 265 с.;
5. Виноградов Б.А., Гавриленко В.Н., Либенсон М.Н. Теоретические основы воздействия лазерного излучения на материалы: Учебное пособие для вузов. Благовещенск: изд-во БПИ, 1993, с. 344;
6. Теплопроводность твердых тел: Справочник/Под ред. А. С. Охотина. М: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.;
7. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты». – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.: ил.

**Монтаж, наладка и эксплуатация автоматизированных систем:
комплексный подход**

Орлов Дмитрий Юрьевич¹

orlw@mail.ru

SPIN-код: 4564-1350

Хэ Мэньяо¹

2015466540@qq.com

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Рассмотрены этапы монтажа, наладки и эксплуатации автоматизированных систем, представляющие собой единый, непрерывный и итерационный процесс. Показана взаимосвязь (синергия) этих этапов, их роль в условиях цифровой трансформации. Представлены современные тенденции и инструменты реализации. Сделано заключение о важности комплексного подхода в этом направлении, как стратегического фактора, определяющего конкурентоспособность и устойчивость любого современного предприятия.

Ключевые слова: монтаж, наладка, эксплуатация, автоматизированные системы, комплексный подход, цифровая трансформация

Installation, commissioning and operation of automated systems: an integrated approach

Orlov Dmitry Yurievich¹

orlw@mail.ru

SPIN-код: 4564-1350

He Mengyao¹

2015466540@qq.com

¹VLSU, Vladimir, Russia

Abstract. This article examines the stages of installation, setup, and operation of automated systems, which constitute a single, continuous, and iterative process. The interrelationship (synergy) between these stages and their role in the context of digital transformation are demonstrated. Current trends and implementation tools are presented. A conclusion is drawn on the importance of an integrated approach in this area as a strategic factor determining the competitiveness and sustainability of any modern enterprise.

Keywords: installation, setup, operation, automated systems, integrated approach, digital transformation

Введение. Современное промышленное производство, энергетика, транспорт, сфера услуг немыслимы без автоматизированных систем управления (АСУ). Эти сложные технические комплексы, объединяющие датчики, контроллеры, исполнительные механизмы и программное обеспечение, призваны повысить эффективность, безопасность и качество процессов. Однако создание работоспособной и надежной системы – это не просто покупка самого современного оборудования. Это длительный и строго регламентированный процесс, включающий три фундаментальных этапа: монтаж, наладка (пусконаладка) и эксплуатация. От качества выполнения каждого из них напрямую зависит успех всего проекта. Особую роль при этом играет комплексный подход к реализации этих этапов.

Материалы и методы. Этап 1. Монтаж – физическое воплощение проекта.

Монтаж – это первый и базовый этап, на котором проектные решения переносятся "с бумаги" в реальность. Его цель – физическая установка, компоновка и соединение всех аппаратных компонентов системы в соответствии с монтажными чертежами и проектной документацией [1].

Покажем ключевые виды работ при монтаже:

1. Подготовительные работы.

- Обследование объекта: осуществляется проверка готовности помещений, фундаментов, строительных конструкций.
- Приемка оборудования: визуальный осмотр, проверка комплектности, сверка маркировки.

2. Монтаж аппаратной части.

- Установка шкафов управления и автоматики: крепление на заранее подготовленные места, обеспечение доступа для обслуживания.
- Прокладка кабельных трасс (лотков, коробов, труб): создание инфраструктуры для силовых и слаботочных кабелей.
- Установка полевого оборудования: датчики (сенсоры), например, температуры, давления, уровня, расхода, положения и др. Монтаж должен учитывать условия среды (температура, вибрация, агрессивность) и обеспечивать корректные показания. Установка исполнительных механизмов (актуаторов), таких как регулирующие клапаны, частотные преобразователи, сервоприводы, пускатели требует высокой точности и согласования с технологическим оборудованием.
- Монтаж систем связи: прокладка кабелей локальных сетей (витая пара, оптоволокно), установка коммутаторов, маршрутизаторов.

3. Электромонтажные работы.

- Прокладка кабелей: силовых (питание оборудования) и контрольных (сигналы от датчиков к контроллерам).
- Коммутация в шкафах управления: сборка силовых цепей, монтаж клеммников, организация цепей управления согласно принципиальным схемам.
- Маркировка: обязательная маркировка всех кабелей, клемм и компонентов в соответствии с проектной документацией. Это критически важно для последующей наладки и ремонта.

Укажем требования, предъявляемые к качеству монтажа:

- Механическая прочность: включает надежное крепление всех компонентов.
- Электробезопасность: обязательным является наличие заземления, защита от короткого замыкания и неукоснительное соблюдение ПУЭ (Правил устройства электроустановок [2]).
- Электромагнитная совместимость (ЭМС): отдельная прокладка силовых и слаботочных кабелей, использование экранированных кабелей и их правильное заземление для защиты от помех.
- Эргономика и доступность: гарантирует обеспечение удобного доступа для обслуживания и ремонта.

Ошибки, допущенные на этапе монтажа (например, перепутанные провода, плохие контакты, игнорирование ЭМС), могут привести к длительным и дорогостоящим простоям на этапе наладки.

Этап 2. Наладка (пусконаладка) – "оживление" системы.

Наладка – это самый ответственный и творческий этап, на котором смонтированная система превращается в функциональный инструмент. Цель пусконаладки – проверить правильность монтажа, настроить все компоненты, запрограммировать логику работы и вывести систему на проектный режим [3].

Рассмотрим основные стадии наладки (пусконаладки):

1. Статические проверки (холодная наладка).

- Визуальный осмотр: окончательная проверка качества монтажа.
- Прозвонка электрических цепей: проверка целостности кабелей, правильности коммутации с помощью мультиметров.
- Измерение сопротивления изоляции: проверка качества изоляции кабелей мегомметром.
- Проверка цепей заземления.

2. Поэлементная наладка (ввод энергии).

- Подача питания на шкафы управления: проверка напряжений на всех участках цепи.
- Настройка и калибровка датчиков: проверка их показаний по эталонным приборам, настройка диапазонов измерений (например, для датчиков давления или расхода).
- Проверка исполнительных механизмов: настройка хода клапанов, проверка направления вращения двигателей, тестирование функций безопасности.
- Настройка контроллеров (ПЛК): загрузка первоначальных программ, конфигурация модулей ввода-вывода.

3. Комплексная наладка (включение логики).

- Отладка программного обеспечения ПЛК: пошаговая проверка алгоритмов управления, логических условий, реакций на аварийные сигналы. Используются специализированные программные среды (например, TIA Portal, CODESYS).
- Настройка человеко-машинного интерфейса (АРМ или SCADA-системы): проверка отображения данных на мнемосхемах, работа трендов, сигнализаций (alarms), управление с экрана оператора.
- Тестирование в автоматическом режиме: запуск системы по полному циклу без вмешательства оператора. Выявление и устранение ошибок взаимодействия между компонентами.

4. Комплексные испытания и сдача.

- Пробный пуск: работа системы на реальном технологическом объекте, часто на пониженных нагрузках.
- Снятие статических и динамических характеристик: оценка качества регулирования, быстродействия системы.
- Составление исполнительной документации: акты о проведении пусконаладки, протоколы испытаний, паспорта системы, итоговые электрические схемы "как смонтировано".
- Обучение персонала заказчика основам эксплуатации и обслуживания системы.

Наладка требует от инженера глубоких знаний в области автоматике, электротехники, технологии того процесса, которым управляет система, и умения работать с диагностическим оборудованием.

Этап 3. Эксплуатация – поддержание жизненного цикла.

После успешной сдачи система переходит в стадию эксплуатации. Это самый длительный этап, целью которого является поддержание работоспособности, эффективности и безопасности системы на протяжении всего ее жизненного цикла [4].

Рассмотрим основные аспекты эксплуатации:

1. Штатная работа.

- Дежурство и управление: оперативный персонал (технологи, операторы) осуществляет мониторинг параметров процесса через SCADA-систему, реагирует на предупредительные сигналы, выполняет плановые пуски и остановки.

- Ведение журналов: регистрация ключевых событий, параметров, случаев отклонений от нормы.

2. Техническое обслуживание (ТО).

- Регламентное (планово-предупредительное) ТО: выполняется по графику, независимо от состояния оборудования. Включает в себя внешний осмотр, чистку, подтяжку электрических соединений (клемм), проверку и замену элементов, имеющих ограниченный ресурс (например, аккумуляторы резервного питания в ПЛК, фильтры в пневмосистемах), контроль основных метрик (температура, уровень вибрации и др.).

- Техническая диагностика: периодическая проверка метрологических характеристик датчиков, тестирование функций безопасности [5].

3. Ремонт.

- Восстановление работоспособности после отказа: может быть оперативным (замена вышедшего из строя модуля ПЛК, датчика) или капитальным (ремонт сложного исполнительного механизма).

- Локализация неисправности: использование принципиальных схем, знаний о логике системы и диагностических инструментов для быстрого поиска причины сбоя.

4. Модернизация и развитие.

Ни одна система не остается неизменной. Изменения в технологии, требованиях к качеству или появление нового, более эффективного оборудования приводят к необходимости модернизации. Это может быть, как замена отдельных устаревших компонентов, так и масштабная реконструкция с изменением программного кода, и структуры системы.

Успешная эксплуатация невозможна без квалифицированного персонала. Операторы должны понимать логику работы системы, а сервисные инженеры – обладать навыками для ее диагностики и ремонта.

Результаты. Синергия этапов и комплексный подход.

Важно понимать, что монтаж, наладка и эксплуатация – не изолированные, а тесно взаимосвязанные этапы:

1. Качество монтажа определяет сложность наладки. Хорошо выполненный монтаж минимизирует время на поиск и устранение ошибок.

2. Качество наладки определяет надежность эксплуатации. Тщательно настроенная и всесторонне протестированная система будет работать стабильно, а ее поведение будет предсказуемым для оперативного персонала.

3. Опыт эксплуатации является основой для грамотной модернизации. Данные о типичных отказах, "узких местах" и пожеланиях операторов – это ценный материал для планирования следующих проектов.

Нарушение этой цепочки (например, сдача системы с недоделками "для скорейшего запуска") неизбежно приводит к хроническим проблемам, простоям и финансовым потерям в будущем.

Комплексный подход к монтажу, наладке и эксплуатации автоматизированных систем – это философия и методология, рассматривающая все этапы жизненного цикла системы как единое, взаимосвязанное целое, а не как набор разрозненных работ.

Проще говоря, это понимание того, что решения, принятые на одном этапе, напрямую и сильно влияют на все последующие. Суть комплексного подхода заключается в том, что между монтажом, наладкой и эксплуатацией существует прямая причинно-следственная связь. Это не три отдельных проекта, а три фазы одного большого процесса (таблица 1).

Таблица 1

Важность применения комплексного подхода

Без комплексного подхода	С комплексным подходом
- Монтажники ставят оборудование "как по чертежу", не задумываясь, как его потом налаживать и ремонтировать	- Все участники процесса (от монтажника до будущего оператора) работают как одна

- Наладчики пытаются "заставить это работать" любой ценой, внося "костыли" в программу и меняя проводку на ходу, не думая о том, как это скажется на долгосрочной эксплуатации - Эксплуатационники получают систему, которую плохо понимают, и которая ломается из-за скрытых "костылей", заложенных при наладке	команда, преследующая общую цель: создать надежную, понятную в обслуживании и эффективную систему, которая будет стабильно работать годы

Ключевые аспекты комплексного подхода.

1. Сквозное планирование и преемственность документации. На этапе проектирования и монтажа уже думают о наладке и эксплуатации.

Пример: При прокладке кабелей их не просто кладут, а тщательно маркируют с двух сторон и ведут журналы, чтобы наладчик не тратил недели на "прозвонку", а эксплуатационник мог быстро найти нужный кабель для ремонта. Шкафы управления размещают не "где поместилось", а так, чтобы к ним был удобный доступ для обслуживания и ремонта.

Документация – это "золотая нить". Исполнительные схемы, созданные после монтажа, акты наладки и настроенные параметры должны быть переданы заказчику и стать основой для эксплуатационной документации. Не должно быть ситуации, когда у обслуживающего персонала на руках только первоначальный проект, не имеющий ничего общего с реальностью.

2. Взаимное влияние этапов ("Эффект домино").

Качество монтажа → определяет → Сроки и качество наладки

Плохо: перепутаны провода в клеммнике, не заземлен экран кабеля (помехи), датчик стоит в неудобном для проверки месте. Результат: наладчик тратит 80% времени на поиск и исправление косяков монтажа, а не на тонкую настройку системы.

Хорошо: Идеальный монтаж. Результат: наладчик сразу приступает к проверке логики и настройке ПИД-регуляторов.

Качество наладки → определяет → Надежность и удобство эксплуатации

Плохо: наладчик "забыл" настроить фильтр от помех на аналоговом входе, и система периодически выдает ложные аварии. Или в программе есть "костыль", который работает, но никто, кроме самого наладчика, его не понимает. Результат: постоянные ложные срабатывания, недоверие операторов к системе, простой.

Хорошо: наладчик не только настроил систему, но и провел полный цикл испытаний, проверил все аварийные сценарии, обучил персонал и составил четкие инструкции. Результат: система работает стабильно, персонал понимает ее логику.

Опыт эксплуатации → определяет → Качество будущих модернизаций и нового монтажа.

Это обратная связь, замыкающая цикл. Данные о том, какое оборудование чаще ломалось, какие алгоритмы были неудобны для операторов, какие ошибки в проекте мешали работе, должны анализироваться и использоваться при следующей модернизации или строительстве нового объекта.

3. Единая команда и общая ответственность.

Комплексный подход требует изменения мышления всех участников:

Монтажник должен понимать, что его работа – это не просто "прикрутить", а создать качественную основу для следующего этапа. Он должен видеть себя частью общего дела.

Инженер-наладчик не должен работать в вакууме. Он обязан взаимодействовать с монтажниками для исправления недочетов и с будущими эксплуатационниками – для их обучения и сбора требований по удобству работы.

Эксплуатационник (заказчик) должен быть вовлечен в процесс с самого начала, принимать участие в приемке оборудования и наладке, чтобы впоследствии "принять" систему и чувствовать за нее ответственность.

4. Использование сквозных технологий (Digital Thread).

Современный инструмент комплексного подхода – это использование единой цифровой среды на всем жизненном цикле:

- Проект создается в САПР.
- Монтаж ведется по этим чертежам, а отклонения фиксируются в цифровом виде.
- Программа для ПЛК загружается из той же среды, что и проект.

- База данных тегов из проекта автоматически передается в SCADA-систему.

- Данные о работе с системы собираются для анализа и прогнозного обслуживания.

Это исключает человеческие ошибки при переносе данных из одной системы в другую и обеспечивает полную прозрачность и преемственность информации.

Подытожим вышесказанное и обобщим понятие. Комплексный подход – это системное мышление, при котором монтаж, наладка и эксплуатация рассматриваются как этапы единого жизненного цикла, управляемые общей командой с общей целью – создать максимально надежную, эффективную и ремонтпригодную систему, с полной преемственностью информации и ответственности между всеми стадиями.

Обсуждение. Современные тенденции и инструменты в условиях цифровой трансформации.

1. Комплексный подход. Практическая методология, которая позволяет избежать огромного количества проблем, сократить сроки ввода системы в эксплуатацию и значительно снизить затраты на ее обслуживание на протяжении всего срока службы.

2. Создание цифровых двойников (Digital Twins). Создание виртуальной копии системы позволяет проводить отладку программного обеспечения и тестирование алгоритмов еще до завершения монтажа, значительно сокращая сроки пусконаладки на объекте.

3. Удаленный мониторинг и обслуживание. Использование защищенных каналов связи позволяет специалистам удаленно диагностировать проблемы, обновлять программное обеспечение и оказывать поддержку местному персоналу, снижая время реагирования.

4. Прогнозное техническое обслуживание (Predictive Maintenance). Внедрение систем анализа данных, которые по косвенным признакам (рост вибрации, изменение теплового режима) прогнозируют возможный отказ оборудования, позволяя проводить ремонт именно тогда, когда это нужно, а не по графику.

5. Конвергенция IT и OT. Слияние информационных (IT) и операционных технологий (OT) требует от инженеров-наладчиков и эксплуатационников знаний в области кибербезопасности, сетевых технологий и облачных сервисов.

Заключение. Монтаж, наладка и эксплуатация автоматизированных систем представляют собой единый, непрерывный и итерационный процесс. В условиях цифровой трансформации промышленности роль этих этапов только возрастает. Инвестиции в качество на каждом из этих этапов многократно окупаются за счет повышения надежности, эффективности и долговечности систем автоматизации. Основой для построения современных автоматизированных систем является комплексный подход, с учетом взаимосвязи (синергии) всех этапов, применения современных инструментов в условиях цифровой трансформации. Грамотное выполнение монтажа, тщательная и творческая наладка, эксплуатация на основе комплексного подхода – это не просто техническая необходимость, а стратегический фактор, определяющий конкурентоспособность и устойчивость любого современного предприятия.

Список источников

1. ГОСТ Р 50571.52-2021/IEC/TR 61200-52:2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Руководство по электрическим установкам. Часть 52. Выбор и монтаж электрооборудования. Системы электропроводки (Приказ Росстандарта от 22.10.2021 № 1267-ст) // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <https://www.consultant.ru/> / (дата обращения: 29.09.2025)
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) (6,7 издания, ред. от 01.06.2025) // СПС «КонсультантПлюс». – URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 29.09.2025)
3. Скворцов, А. В. Основы технологии автоматизированных машиностроительных производств : учебник : [16+] / А. В. Скворцов, А. Г. Схиртладзе. – Изд. 2-е, стер. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. – 635 с. – ISBN 978-5-4475-8420-7
4. Мельников, В. П. Исследование систем управления : учебник для вузов / В. П. Мельников, А. Г. Схиртладзе. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 447 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-9916-8384-5
5. Арефьев Е.В., Орлов Д.Ю. и др. Автоматизированная информационная система учета процесса обслуживания оборудования : свидет. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018663552 / Арефьев Е.В., Орлов Д.Ю. и др.; правообладатель ФГБОУ ВО ВлГУ им. Столетовых. – № гос. регистрации 2018663552 ; заявл. 03.10.2018 ; зарегистрир. 30.10.2018.

Исследование системы интеллектуальной диагностики гидравлических станций

Румянцев Илья Валерьевич¹

Rumuantsev-vip@mail.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. В данной работе представлена разработка автоматизированной системы интеллектуальной диагностики гидравлических станций, позволяющая осуществлять анализ состояния исполнительных механизмов в реальном времени, фиксацию и запись в базу данных результатов измерений информации, формирование предупреждений для оператора для повышения точности выявления неисправностей.

Подобрана аппаратная часть и измерительная система. Представлена и описана схема расположения датчиков для системы диагностики и контроля, а также же ее алгоритм.

Экспериментальные результаты моделирования на искусственной модели Simulink показали повышение точности обнаружения типовых отказов до 92–96%. Сделан вывод о целесообразности поэтапного внедрения таких систем на промышленных предприятиях с целью снижения простоев и профилактики критических отказов.

Ключевые слова: гидравлическая станция, диагностика, автоматизация, мониторинг, системы с датчиками.

Research of an intelligent diagnostic system for hydraulic stations

Rumuantsev Ilya Valeryevich¹

Rumuantsev-vip@mail.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. This paper presents the development of an automated intelligent diagnostics system for hydraulic power units. This system enables real-time analysis of actuator status, recording and storing measurement results in a database, and generating operator alerts to improve fault detection accuracy.

The hardware and measuring system were selected. A sensor layout diagram for the diagnostics and monitoring system, as well as its algorithm, are presented and described.

Experimental simulation results using a Simulink model demonstrated an increase in typical failure detection accuracy to 92–96%. A conclusion is drawn regarding the feasibility of a phased implementation of such systems at industrial facilities to reduce downtime and prevent critical failures.

Keywords: hydraulic power unit, diagnostics, automation, monitoring, sensor systems.

Введение. Эффективный подход к обслуживанию гидравлических станций играет ключевую роль в современных производственных процессах. Они обеспечивают движение гидроприводов, распределение рабочей жидкости и поддержание необходимого давления. Однако, как и любая другая техника, гидравлические станции подвержены поломкам. Отказ компонентов, таких как насосы, клапаны, фильтры и трубопроводы, может привести к серьезным последствиям: остановке производственной линии, порче продукции и увеличению затрат на ремонт [1]. Поэтому эффективное обслуживание этих систем становится важной задачей для предприятий. На сегодняшний день большинство предприятий полагаются на традиционные методы обслуживания, которые основываются на регламентном ремонте и периодических проверках. Эти методы имеют свои недостатки. В ответ на вызовы, связанные с традиционными методами обслуживания, появляются интеллектуальные системы диагностики. Эти системы используют данные с датчиков и алгоритмы анализа для раннего выявления отклонений и прогнозирования возможных неисправностей. Основная цель таких систем — обеспечить надежность и эффективность работы гидравлических станций, минимизируя время простоя и затраты на ремонт. Использование данных с датчиков и алгоритмов анализа позволяет значительно повысить эффективность работы оборудования, минимизировать время простоя и затраты на ремонт. Внедрение таких систем требует комплексного подхода, включающего выбор подходящих датчиков, разработку методов анализа и тестирование алгоритмов, но в конечном итоге это оправдывает себя за счет повышения надежности и эффективности производственных процессов.

Цель данной работы — исследовать архитектуру такой системы, описать этапы её реализации и оценить эффективность диагностических алгоритмов.

Задачи исследования включают: обзор датчиков и каналов данных, разработка алгоритма для классификации состояний, а также моделирование и оценку точности на тестовых наборах данных.

Материалы и методы. Аппаратная часть состоит из шкафа управления и контрольно-измерительных приборов. Шкаф управления состоит из контроллера, панели оператора, блока питания, флеш накопителя

для сохранения данных о возможных отказах исполнительных механизмов и металлического шкафа размером 50см x 40см x 30см.

Для обеспечения работоспособности системы был выбран контроллер ПЛК200. ПЛК предназначен для малых и средних систем автоматизации. На борту контроллера есть два коммуникационных порта для связи с панелью оператора и модулями ввода/вывода. Время выполнения одного цикла программы менее 4 мс.

Схема расположения датчиков рассматриваемой системы представлена на рисунке 1.

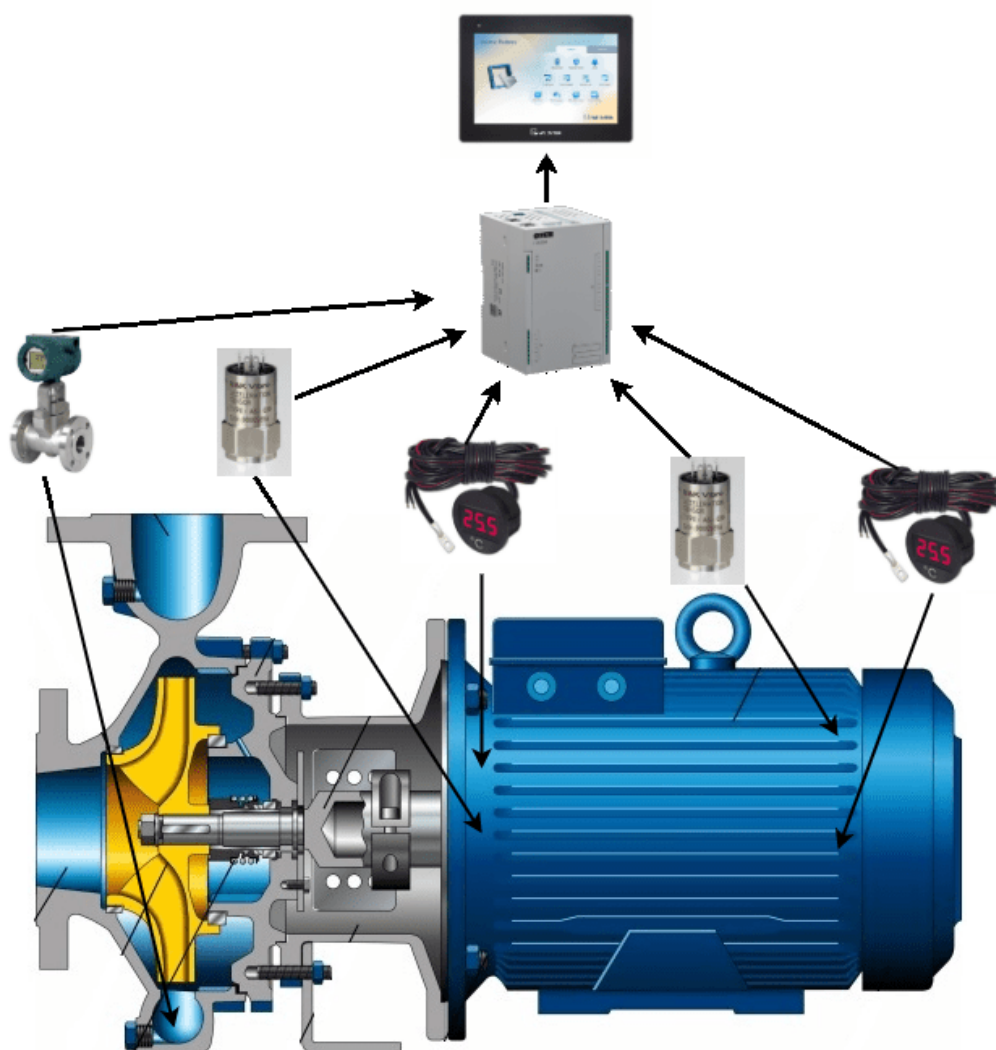


Рисунок 1. Схема расположение датчиков на системе.

Система анализа выявления неисправностей в реальном времени включает в себя:

- исполнительные механизмы: насос, двигатель.
- датчики: давления, расхода жидкости, температуры, вибрации, тока.

Каждый датчик имеет свой фильтр, который считывает несколько показаний и сортирует «некачественный сигнал». После распределения значений, датчик выдает среднее из показаний на контроллер [2].

Алгоритм работы автоматизированной системы выявления неисправности в реальном времени осуществляется посредством считывания показаний с датчиков на исполнительных механизмах. Показания с датчиков сравниваются со значениями нормальной работы из базы данных [3]. При отклонении параметров за определенное количество времени, система формирует расширенный отчет с перечисленными отклонениями и возможными вариациями дефектов в работе системы. Также формируется регистрационное сообщение в журнал на панель оператора, базу данных и флеш накопитель для будущего анализа [4].

Результаты. В данном исследовании для реализации работоспособности системы была использована программа Simulink. Созданная модель исполнительного механизма (гидростанция), включающая в себя: насос, двигатель, виртуальные датчики с возможностью изменения показаний в ручном режиме показала, что разработанный алгоритм обладает высокой точностью (более 95%) выявления отклонений параметров от нормальных из базы данных [5].

Система была протестирована в трех режимах.

- Нормальный, все датчики соответствовали показаниям нормальной работы из базы данных.

- Переходный, один из параметров был с отклонением от базы данных значений. Система определила неисправность и сообщила о дефектах в системе, а также предложила возможные пути решений.

- Аварийный, более двух параметров имеют расхождения от базы данных значений. Система определила неисправность и сообщила о аварии в системе и немедленной замене соответствующего узла исполнительного механизма.

Обсуждение полученных результатов. Результаты подтверждают, что применение предложенного алгоритма обеспечивает баланс между чувствительностью и точностью. Решение на базе традиционных методов не эффективно в нынешнее время из-за длительного простоя оборудования во время отказа исполнительных узлов гидроагрегата. Интеллектуальная диагностика позволяет выявлять неисправности в реальном времени и заблаговременно предупреждать операторов о будущих неисправностях [6].

Экономическая целесообразность во многом зависит от стоимости простоев и затрат на возможные замены. В большинстве случаев замена одного заблаговременного ремонта показывает окупаемость внедрения в течение нескольких месяцев.

Заключение. Проектирование интеллектуальной диагностической системы для гидравлических станций. В условиях современного производства, где надежность и эффективность оборудования играют ключевую роль, особенно важным становится применение интеллектуальных технологий для диагностики и прогнозирования неисправностей.

Данная методика уже продемонстрировала высокую эффективность в обнаружении и прогнозировании типовых неисправностей, что позволяет значительно повысить уровень надежности оборудования. Для успешной реализации интеллектуальной диагностической системы рекомендуется применять поэтапный подход. Начинать следует с пилотной установки на одном агрегате, что позволит протестировать систему в реальных условиях и выявить возможные недостатки [7]. На этом этапе важно уделить внимание сбору данных и их доработке. Дальнейшие исследования в области интеллектуальной диагностики могут быть направлены на интеграцию разработанных систем с существующими системами управления предприятием (ERP). Это позволит обеспечить более комплексный подход к управлению производственными процессами, а также улучшить мониторинг состояния оборудования в реальном времени. Интеграция с ERP-системами позволит автоматизировать процессы планирования технического обслуживания и ремонта, что в свою очередь снизит время простоя оборудования. Внедрение таких решений не только оптимизирует процессы, но и открывает новые горизонты для повышения конкурентоспособности предприятий.

Список источников

1. Гуров В.В. Диагностика гидравлических систем. Москва: Машиностроение, 2020.
2. Плотников И.А., Руднев А.С. Методы машинного обучения для технической диагностики. Санкт-Петербург: Политех, 2021.
3. Zhang Y., Wang L. Intelligent fault detection in hydraulic systems using neural networks. Journal of Engineering Diagnostics, 2022, vol. 18, pp. 45-58.

4. S. Lee, K. Park. Predictive maintenance for hydraulic pumps: a review. Maintenance Science, 2021, no. 3, pp. 101-120.
5. ГОСТ 20911–89. Станции гидравлические. Общие технические требования.
6. Ribeiro M., Silva P. Application of XGBoost for industrial fault classification. Proceedings of Industrial AI Conference, 2023.
7. Kingma, D., Ba, J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. 2014.

УДК 664.7:681.5

Исследование технологического процесса маркировки и приёмки паллет на производстве комбикормов и способов его автоматизации

Рыжаков Егор Сергеевич¹

ryzhakov2004@mail.ru

Федотова Алена Валериевна¹

fea@bmstu.ru

SPIN-код: 4099-0349

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены технологические процессы маркировки и приёмки паллет с готовой продукцией на комбикормовых предприятиях. Представлены основные проблемы, связанные с ручной маркировкой и контролем качества паллетированной продукции. Показаны современные подходы к автоматизации процессов идентификации с применением технологий RFID, компьютерного зрения и систем управления складом (WMS). Проанализированы преимущества интеграции автоматизированных систем маркировки с производственными системами (MES) и системами планирования ресурсов предприятия (ERP). Сделаны выводы о повышении эффективности производственных процессов за счёт снижения трудозатрат на 45-60%. Результаты исследования могут применяться для цифровой трансформации предприятий комбикормовой промышленности и других отраслей пищевого производства.

Ключевые слова: автоматизация производства, маркировка паллет, комбикормовое производство, RFID-технология, система прослеживаемости, компьютерное зрение, WMS, IoT, искусственный интеллект.

Investigation of the Technological Process of Pallet Marking and Acceptance at the Feed Production and Methods of its Automation

Ryzhakov Egor Sergeevich¹

ryzhakov2004@mail.ru

Fedotova Alyona Valerievna¹

fea@bmstu.ru

SPIN-code: 4099-0349

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. The technological processes of marking and acceptance of pallets with finished products at feed production enterprises are considered. The main problems associated with manual marking and quality control of palletized products are presented. Modern approaches to automation of identification processes using RFID technologies, computer vision and warehouse management systems (WMS) are shown. The advantages of integrating automated marking systems with manufacturing execution systems (MES) and enterprise resource planning systems (ERP) are analyzed. Conclusions are made about increasing the efficiency of production processes by reducing labor costs by 45-60%. The research results can be applied for digital transformation of feed industry enterprises and other sectors of food production.

Keywords: production automation, pallet marking, feed production, RFID technology, traceability system, computer vision, WMS, IoT, artificial intelligence.

Введение. Комбикормовая промышленность является одной из важнейших отраслей агропромышленного комплекса, обеспечивающей эффективное функционирование животноводства и птицеводства. Современные комбикормовые заводы характеризуются высокой производительностью, достигающей сотен тонн продукции в сутки, что требует организации эффективных систем учёта и контроля готовой продукции на всех этапах технологического цикла.

Одним из критических этапов производственного процесса является маркировка и приёмка паллет с упакованной продукцией. Традиционные методы ручной маркировки и визуального контроля имеют существенные недостатки: высокую трудоёмкость, значительную вероятность ошибок при идентификации партий, низкую скорость обработки, сложность обеспечения полной прослеживаемости продукции. В условиях ужесточения требований к качеству и безопасности пищевой продукции, установленных Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции», необходимость

автоматизации процессов маркировки и приёмки становится особенно актуальной [1].

Целью настоящего исследования является анализ технологических процессов маркировки и приёмки паллет на производстве комбикормов и разработка рекомендаций по их автоматизации с использованием современных цифровых технологий. Научная новизна работы заключается в комплексном подходе к интеграции различных систем автоматизации (RFID, компьютерное зрение, WMS, MES) для обеспечения полного цикла прослеживаемости продукции комбикормового производства.

Материалы и методы. Исследование выполнено на основе анализа технологических процессов типового комбикормового завода производительностью 150 тонн продукции в сутки. В качестве объекта исследования рассматривался участок упаковки и паллетирования готовой продукции. Для оценки эффективности различных технологий автоматической идентификации проведено сравнительное исследование систем на основе одномерных штрихкодов (Code 128), двумерных кодов (Data Matrix, QR), пассивных RFID-меток диапазона UHF (860-960 МГц) и систем компьютерного зрения на базе нейросетевых алгоритмов распознавания. Критериями сравнения выступали: скорость считывания, дальность идентификации, надёжность работы в условиях запылённости и влажности, стоимость оборудования и расходных материалов [2].

Разработка концепции автоматизированной системы маркировки и приёмки выполнена с учётом требований ГОСТ Р ИСО 22005-2009 «Прослеживаемость в цепочке производства кормов и пищевых продуктов» [3]. Архитектура системы предусматривала интеграцию с существующими информационными системами предприятия: ERP, MES, WMS.

Результаты. На основе проведённого исследования установлено, что традиционный процесс маркировки паллет на комбикормовом производстве включает следующие операции: печать транспортной этикетки с информацией о партии на термотрансферном принтере (30-45 секунд), ручное нанесение этикетки на паллету оператором (15-25 секунд), визуальный контроль соответствия маркировки производственному заданию (20-30 секунд), ручное внесение данных о паллете в информационную систему (40-60 секунд). Общее время обработки одной паллеты составляет 105-160 секунд при производительности линии паллетирования 80-100 паллет в смену [4].

Анализ статистики ошибок показал, что в среднем на 1000 паллет приходится 12-18 случаев неправильной маркировки или несоответствия данных в информационной системе. Основными причинами ошибок являются человеческий фактор (65%), технические сбои оборудования печати (20%), недостаточная читаемость этикеток из-за загрязнения или повреждения (15%) [5].

Разработана архитектура автоматизированной системы, включающая следующие компоненты. Модуль автоматической печати и нанесения этикеток на базе принтера-аппликатора с датчиками позиционирования паллеты обеспечивает печать этикетки с переменными данными (дата, номер партии, вес, состав) и автоматическое нанесение на боковую поверхность паллеты за 8-12 секунд. Система компьютерного зрения с камерами высокого разрешения осуществляет контроль качества нанесения этикетки, проверку читаемости штрих-кода и целостности упаковки паллеты.

RFID-подсистема с пассивными метками стандарта EPC Gen2 (рис. 1) обеспечивает бесконтактную идентификацию паллет на расстоянии до 6 метров. Метки интегрируются в транспортную этикетку и содержат уникальный идентификатор, связанный с данными о составе паллеты в базе данных WMS. Дальность считывания и надёжность идентификации превосходят системы на основе штрих-кодов на 40-50% [6].

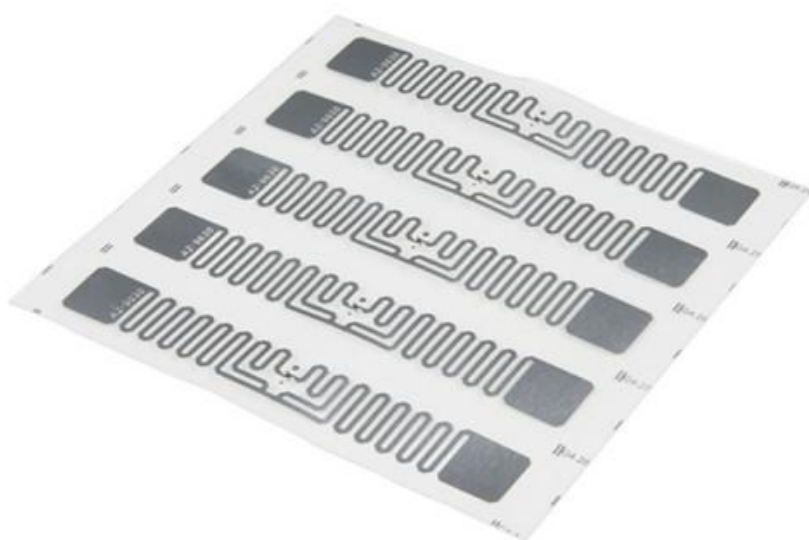


Рисунок 1. RFID метка стандарта EPC Gen2.

При формировании паллеты автоматически создаётся электронный паспорт, содержащий информацию о дате и времени производства, использованном сырье, рецептуре, результатах лабораторного контроля качества. Это обеспечивает полную прослеживаемость продукции в соответствии с требованиями ТР ТС 021/2011 [7].

На рисунке 2 представлен полный цикл автоматизации маркировки.



Рисунок 2. Блок-схема процесса автоматизированной маркировки и приёмки паллет.

Внедрение разработанной системы на опытном участке показало следующие результаты. Время обработки одной паллеты сократилось с 105-160 секунд до 35-50 секунд (сокращение на 55-70%). Количество ошибок маркировки снизилось с 12-18 до 1-2 случаев на 1000 паллет (снижение на 85-90%). Производительность линии паллетирования увеличилась с 80-100 до 130-150 паллет в смену (рост на 45-60%).

Таблица 1

**Сравнительный анализ эффективности внедрения
автоматизированной системы маркировки паллет**

Показатель	Ручной процесс	Автоматизация	Улучшение
Время обработки (с)	105-160	35-50	Снизилось на 55-70 %
Число ошибок маркировки (ошибок/1000 паллет)	12-18	1-2	Снизилось на 85-90 %
Производительность (паллет/смену)	80-100	130-150	Увеличилась на 45-60 %
Время инвентаризации (мин)	7-15	1-3	Снизилось на 80-90 %

Обсуждение. Полученные результаты согласуются с данными исследований по автоматизации упаковочных линий в пищевой промышленности, где отмечается повышение эффективности на 40-65% при внедрении систем автоматической маркировки и идентификации. RFID-технология показала преимущества перед оптическими системами идентификации в данных условиях высокой запылённости и влажности.

Интеграция системы маркировки с MES и ERP позволяет реализовать концепцию цифрового двойника (Digital Twin) производственного процесса. Это обеспечивает возможность отслеживания пути каждой паллеты от момента формирования до отгрузки потребителю, анализа узких мест в логистической цепи, прогнозирования потребности в складских площадях. Применение искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа данных о дефектах упаковки позволяет выявлять систематические проблемы оборудования и предотвращать массовый брак [8].

Заключение. Проведённое исследование показало, что автоматизация процессов маркировки и приёмки паллет на комбикормовых предприятиях является эффективным направлением повышения производительности и качества производства. Комплексное применение

технологий автоматизации обеспечивает повышение общей производительности на 45-60%.

Перспективы дальнейших исследований связаны с применением технологий Интернета вещей (IoT) для мониторинга условий хранения и транспортировки паллет, разработкой мобильных приложений для операторов складов, внедрением технологий искусственного интеллекта для обеспечения неизменности данных о прослеживаемости продукции. Полученные результаты могут быть адаптированы для других отраслей пищевого производства с аналогичными процессами паллетирования и складирования готовой продукции.

Список источников

1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011. О безопасности пищевой продукции. Евразийская экономическая комиссия, 2011.

2. RFID или штрихкод: какую технологию выбрать для маркировки. URL: <https://markerovka.ru/articles/rfid-ili-shtrikhkod-kakuyu-tekhnologiyu-vybrat-dlya-markirovki/>. (дата обращения 14.09.25)

3. ГОСТ Р ИСО 22005-2009. Прослеживаемость в цепочке производства кормов и пищевых продуктов. Общие принципы и основные требования к проектированию и разработке системы. Москва. Стандартиформ, 2009.

4. Полная автоматизация упаковочных линий на предприятии Syngenta. URL: <https://www.arcon-automation.com/kz/metod-keisov/polnaia-avtomatyzatsyia-upakovochnykh-lynyi-na-predpriyatyy-syngenta>. (дата обращения 19.09.25)

5. Прослеживаемость на пищевом производстве. URL: <https://tms-cs.ru/interesnoe/proslezhivaemost-na-pishchevom-proizvodstve>. (дата обращения 22.09.25)

6. Преимущество RFID перед штрих-кодом. URL: https://markerovka.ru/state/preimyshestvo_rfid.html. (дата обращения 02.10.25)

7. Construction of Sustainable Digital Factory for Automated Warehouse Based on Integration of ERP and WMS // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 2. P. 1022. <https://doi.org/10.3390/su15021022>

8. Digital Twin in Food Manufacturing: Gamechanger or Hype? URL: <https://www.foodnhotelasia.com/blog/fnb/digital-twin-in-food-manufacturing/>. (дата обращения 15.10.25)

НМИ-центрированный подход к автоматизации горизонтальных факельных устройств: проектирование, интеграция и опыт внедрения

Хижняк Анастасия Сергеевна¹

forever_nst@mail.ru

Федотова Алена Валериевна¹

fea@bmstu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены проблемы проектирования систем управления горизонтальными факельными устройствами. Представлен НМИ-центрированный подход к автоматизации на основе интеграции стандарта ISA-101 и принципов высокопроизводительных ЧМИ. Показаны результаты внедрения структурированного человеко-машинного интерфейса с иерархией мнемосхем и унифицированной цветовой палитрой.

Ключевые слова: человеко-машинный интерфейс, факельное устройство, автоматизация.

HMI-Centered Approach to Automation of Horizontal Flare Systems: Design, Integration and Implementation Experience

Khizhnyak Anastasia Sergeevna¹

forever_nst@mail.ru

Fedotova Alena Valerevna¹

fea@bmstu.ru

¹ BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The problems of designing control systems for horizontal flare devices are considered. An HMI-centered automation approach based on the integration of the ISA-101 standard and High Performance HMI principles is presented. The results of implementing a structured human-machine interface with a hierarchy of mimic diagrams and a unified color palette are demonstrated.

Keywords: HMI, flare device, automation.

Введение. На объектах газовой промышленности в процессе добычи и переработки газа и конденсата образуются промышленные сточные воды. Наиболее приемлемым и конкурентоспособным способом утилизации считается огневой метод как наиболее универсальный, надежный и недорогой [1]. Широкое применение получили факельные устройства, управление которыми является сложной задачей, если использовать традиционные методы.

Человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) (или Human Machine Interface (HMI)) обеспечивает взаимодействие оператора с автоматизированными системами, предоставляя данные о ходе процесса и позволяя контролировать систему и управлять ей, но низкий уровень качества дизайна ЧМИ может привести к внештатным ситуациям и даже катастрофам. Некачественное исполнение человеко-машинного интерфейса ранее во многом обуславливалось несовершенными технологиями. Благодаря увеличению вычислительной мощности аппаратных платформ эти ограничения уже не играют существенной роли, оставаясь пережитками в виде общепринятых шаблонов и отсутствия понимания основных принципов дизайна [2].

Материалы и методы. В качестве методологии для проектирования человеко-машинного интерфейса принята серия стандартов ISA-101 [3] в комплексе с принципами высокопроизводительных ЧМИ. Данный выбор обусловлен тем, что серия стандартов представляет собой надежную дорожную карту от проектирования и внедрения до эксплуатации и обслуживания, а принципы высокопроизводительных ЧМИ дают представление разработчикам, как создать эффективный и безопасный интерфейс, ориентированный на удобство оператора.

Объект исследования – горизонтальное факельное устройство газоперерабатывающего участка, включающее дежурную (запальную) горелку и основной факел, а также узел замера и редуцирования и блок управления.

Интерфейс спроектирован в соответствии с этапами, регламентированными стандартом ISA-101. На основе анализа объекта автоматизации в систему были включены ключевые сигнальные точки: расход, давление, температура и индикаторы аварийных ситуаций, в которые входят: наличие пламени, состояние розжига, повышение температуры или давления и тд. Для каждой из них был разработан специализированный экран, отображающий необходимый объем информации. С использованием CAD-системы была создана библиотека графических элементов, строго соответствующих утвержденной концепции, которая заключалась в единообразии представленных данных, минимизации когнитивной нагрузки оператора и возможности быстрого перехода от обзорных экранов к детализированным. Была внедрена система тревог и событий, спроектированная по принципам высокопроизводительных ЧМИ, предусматривающая приоритизацию,

группировку и контекстные сообщения (например, «Низкое давление газа на розжиг: Аварийный останов горелки №1» вместо абстрактного сигнала «Авария»), а также лаконичная компоновка экранов, однозначная цветовая палитра [3].

Логика реализована на программируемом логическом контроллере K15 (семейство K15 – промышленное решение для локальной автоматизации) [4]. Для визуализации применяется ЧМИ – уровень. Межуровневая связь организована по протоколу EtherNet/IP, он обеспечивает передачу управляющих и телеметрических данных между контроллером и панелью оператора [5]. При проектировании сети заложено резервирование критичных каналов, буферизация тегов на HMI и журналирование событий для последующего анализа.

Результаты. Внедрение автоматической системы управления выполнялось в три этапа, что обеспечило постепенную отладку и минимизацию рисков при запуске.

На первом этапе была проведена полная симуляция проекта в офисе на тестовом контроллере. Это позволило отработать логику управления, проверить корректность работы алгоритмов и взаимодействие всех компонентов системы.

На втором этапе осуществлено внедрение на заводе-изготовителе шкафа управления. Была произведена заливка программы на штатный контроллер, установленный в шкафу управления, и загрузка проекта на операторскую панель. На этом этапе выполнено комплексное проливание системы, проверка связи по протоколу EtherNet/IP и тестирование работы с реальными исполнительными механизмами и датчиками, вмонтированными в шкаф.

На третьем, финальном этапе, проведено внедрение на объекте. Осуществлено подключение системы к полевым устройствам и проведение пусконаладочных работ в реальных условиях эксплуатации.

Ниже приведены наблюдения, иллюстрируемые примерами экранов мнемосхем, и сравнительная таблица «до» и «после» внедрения.

На обзорном экране – мнемосхеме «Узел замера и редуцирования» (рис. 1) отображены основные аналоговые параметры, которые предоставляют оператору инструменты для мониторинга процессами измерения давления, температуры и расхода газа.

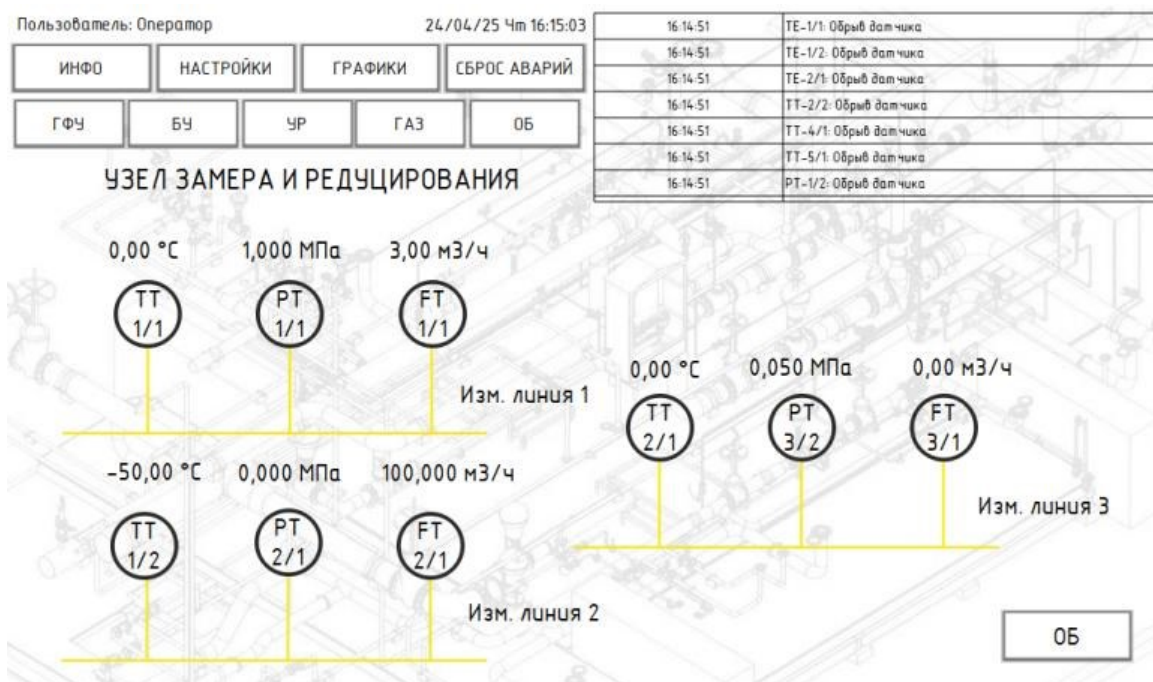


Рисунок 1. Мнемосхема "Узел замера и редуцирования".

Для отслеживания аварийных ситуаций и загазованности предусмотрено окно «Газ» (рис. 2), где наглядно показано состояния автоматизированной системы.

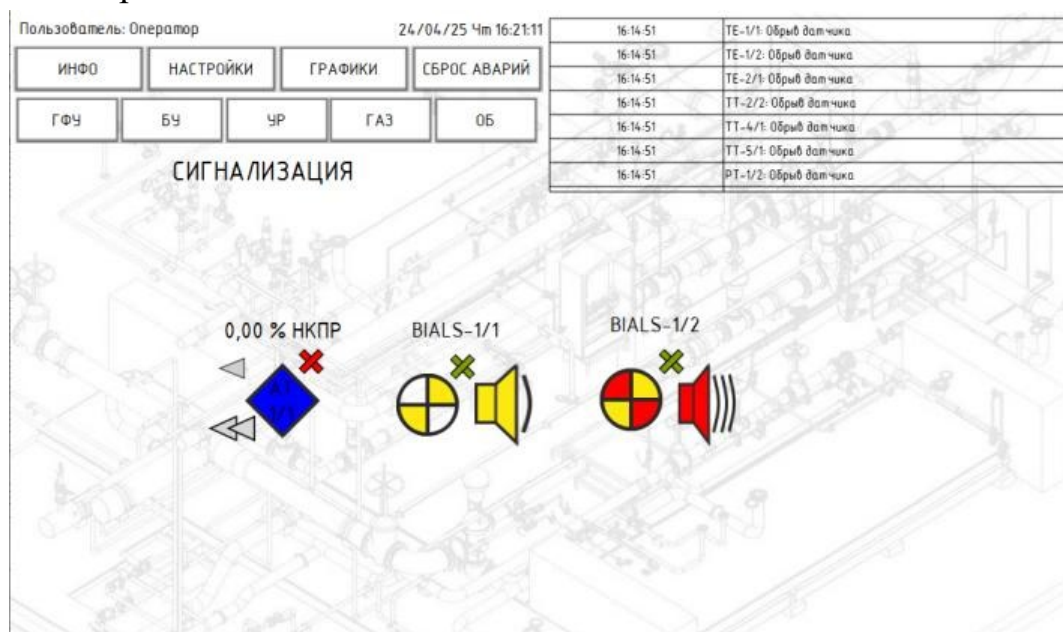


Рисунок 2. Мнемосхема "Газ".

В правом верхнем углу представлен журнал аварий, который находится на каждом окне мнемосхем, вследствие чего оператору наглядно видно, если одна из частей системы вышла из-под контроля.

Для оценки эффективности проведенной работы были выделены и проанализированы количественные и качественные метрики до и после редизайна интерфейса. Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1

**Сравнительный анализ эффективности HMI до и после
оптимизации с точки зрения оператора**

Критерий оценки	Ситуация «До»	Ситуация «После»	% улучшения
Среднее время реакции на аварийный сигнал	45-60 секунд	15-20 секунд	Сокращение на ~67%
Количество ошибочных действий оператора в месяц	5-7 инцидентов	1-2 инцидента	Сокращение на ~75%
Время, затрачиваемое на поиск нужной информации	Высокое (требовался последовательный просмотр нескольких мнемосхем)	Низкое (принцип иерархичности)	Сокращение на ~80%
Время обучения нового оператора	10-14 дней	3-5 дней	Сокращение на ~65%

Обсуждение. Переход от традиционных SCADA-экранов к HMI-центрированному дизайну на основе ISA-101 и практик высокопроизводительных ЧМИ даёт практические преимущества, прежде всего за счёт упорядочивания представления информации и снижения когнитивной нагрузки оператора. [3]

В отличие от перегруженных традиционных экранов, HMI-подход предлагает иерархию представлений, ограниченную цветовую палитру и акцент на трендах и контекстных подсказках. Такие меры сокращают время

сканирования экрана и уменьшают вероятность ошибочной интерпретации сигналов, что критично для объектов с высокой аварийной значимостью, например факельных установок. [3]

Ограничения традиционной визуализации – «визуальный шум», непоследовательная навигация и отсутствие единых правил оформления – делают НМІ-центрированный подход оправданным инвестиционным решением для промышленных объектов с повышенными требованиями к безопасности и непрерывности работы. Внедрение ISA-101 – совместного НМІ способствует улучшению ситуационной осведомлённости, сокращению операторских ошибок и упрощению обучения персонала.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило эффективность применения НМІ-центрированного подхода к автоматизации горизонтальных факельных устройств. Разработанная методика, основанная на интеграции стандарта ISA-101 и принципов High Performance HMI, позволила создать эргономичную систему управления, ориентированную на задачи оператора. Поэтапное внедрение системы, включавшее офисную симуляцию, заводские испытания и пусконаладочные работы на объекте, обеспечило высокую надежность и безаварийный ввод в эксплуатацию.

Список источников

1. Горизонтальные факельные установки ООО «ТюменНИИгипрогаз»: решение проблемы нейтрализации промстоков // Нефтегазовая вертикаль, 2019, № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gorizontalnye-fakelnye-ustanovki-ooo-tyumenniigiprogaz-reshenie-problemy-neytralizatsii-promstokov/viewer> (дата обращения: 10.10.2023).

2. Человеко-ориентированный подход при проектировании систем визуализации автоматизированных объектов // Электронные системы, 2021. URL: <https://electron.ru/cheloveko-orientirovannyj-podxod-pri-proektirovanii-sistem-vizualizacii-avtomatizirovannyx-obektov> (дата обращения: 10.10.2023).

3. ANSI/ISA-101.01-2015. Human Machine Interfaces for Process Automation Systems. ISA, 2015. URL: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-101-standards> (дата обращения: 15.10.2023).

4. Программируемые логические контроллеры серии K15: техническая документация // ОВЕН, 2022. URL: https://www.owen.ru/catalog/plk_series_k15 (дата обращения: 15.10.2023).

5. Самуйлов К.Е., Шалимов И.А., Кулябов Д.С. Сети и телекоммуникации: учебник и практикум для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Юрайт, 2025, 464 с. (Высшее образование). ISBN 978-5-534-17315-4.

УДК 621.793:621.793.1:620.179.4

Исследование влияния дистанции холодного газодинамического напыления на адгезию покрытия с обрабатываемой поверхностью

Бухарестов Игорь Сергеевич¹ igorbuharestov@yandex.ru

Денисов Максим Сергеевич² denisovmaxim90@mail.ru

¹ Студент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

² КТН, Доцент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

Аннотация. В статье представлен отчёт о проведенном исследовании, направленного на изучение влияния дистанции напыления при нанесении покрытий газодинамическим методом. Проведенный эксперимент ориентирован на нанесение антикоррозионных покрытий на стальные детали. Адгезия покрытия к материалу определяется с помощью разрывной машины, штифтовым методом. Исследование показало наличие влияния дистанции напыления на адгезию покрытия к материалу. Дистанция в 10 мм обеспечивает большую силу сцепления покрытия и подложки.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыления, дистанция напыления, эксперимент, антикоррозионное покрытие, адгезия.

Study of the effect of cold gas-dynamic spraying distance on coating adhesion to the treated surface

Bukharestov Igor Sergeevich¹ igorbuharestov@yandex.ru

Denisov Maxim Sergeevich² denisovmaxim90@mail.ru

¹ Student, Department of AMIR, VLSU, Russian Federation, Vladimir

² Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, VLSU, Russian Federation, Vladimir

Abstract. The article presents a report on a study aimed at investigating the effect of spraying distance on the application of coatings using the gas-dynamic method. The experiment focused on applying anti-corrosion coatings on steel parts. The adhesion of the coating to the material was determined using a tensile machine and the pin method. The study revealed that the spraying distance has an impact on the adhesion of the coating to the material. A distance of 10 mm provides a stronger bond between the coating and the substrate.

Keywords: cold gas-dynamic spraying, spray distance, experiment, anti-corrosion coating, adhesion.

Введение. Холодное газодинамическое напыление (ХГН) предназначено для создания слоя металлических покрытий различных типов на подложке. Процесс реализуется путём предварительного ускорения частиц порошкового материала до сверхзвуковой скорости и соударения с материалом-подложки с последующей пластической деформацией. Придание частицам высокой скорости и в следствие кинетической энергии происходит за счёт особенной конфигурации сопла Лаваля, что позволяет формировать металлические покрытие при температурах существенно меньше их температуры плавления. Покрытия, полученные таким методом, имеют повышенную адгезию к металлическим поверхностям и обеспечивают конструктивным материалам широкий набор функциональных свойств. Отсутствие высоких температур позволяет наносить покрытия на широкий спектр термочувствительных материалов [1].

Качество покрытий обеспечивается различными параметрами процесса такими как температура нагревателя, давление воздуха, количество проходов при нанесении и другими. В открытом доступе существует много исследований по изучению влияния этих параметров на качество покрытия. Однако, отсутствуют данные относящихся к влиянию дистанции напыления. Российский производитель оборудования для ХГН, «Обнинский центр порошкового напыления» рекомендует устанавливать сопло на расстояние от 5 до 20 мм до подложки. Рекомендация имеет разброс в показателях, составляющий 15 мм, ввиду чего выдвинута гипотеза о существовании влияния указанного параметра на адгезию покрытия. Поставлена задача определить оптимальную дистанцию напыления [2].

Методы и материалы. Исследование направлено на изучение влияния дистанции напыления на адгезию антикоррозионного покрытия к стальным поверхностям. Для определения адгезии, в ходе исследования, был проведён эксперимент на разрывной машине указанной на рисунке 1, штифтовым методом.

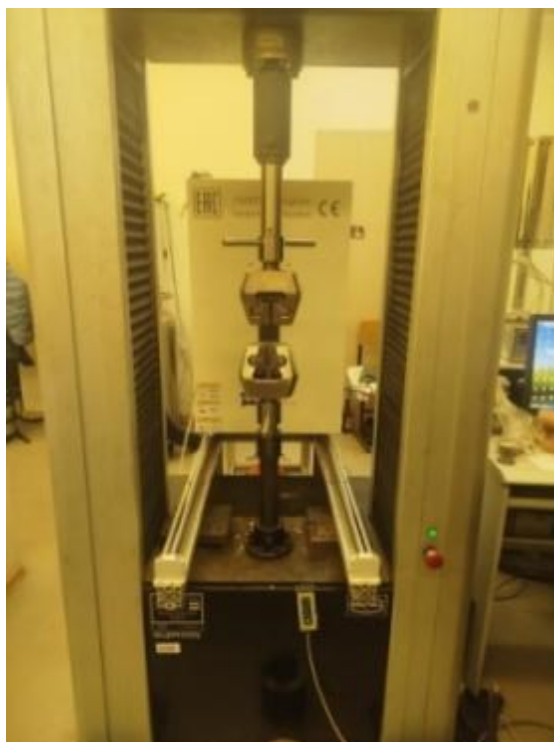


Рисунок 1. Разрывная машина.

Для проведения эксперимента были подготовлены специальные штифты из стали Ст45. Поверхность штифтов заранее пескоструена. Штифты представлены на рисунке 2.



Рисунок 2. Штифты до нанесения покрытия.

Покрытие на штифты наносилось с помощью установки для ХГН ДИМЕТ421 на комплексе ДИМЕТ-С5 представленном на Рисунке 3. Напыление производилось автоматизировано на третьем температурном режиме соответствующего 360 °С, с расходом порошкового материала 0,4 г/с. Параметры скорости перемещения сопла и шага между проходами имеют значения 3 см/с и 1 мм соответственно.



а)



б)

Рисунок 3. а) ДИМЕТ 421 б) Комплекс для автоматического напыления ДИМЕТ-С5.

Покрытие нанесено порошковым материалом маркировки А-20-11. В состав покрытия входят алюминий, цинк и корунд. Напыление осуществлялось с разных дистанций от сопла до подготовленной поверхности штифта. Для образца № 1 дистанция составляла 10 мм, для образца № 2 дистанция составляла 15 мм. Образцы, с напыленным покрытием, представленные на рисунке 3.



Рисунок 4. Штифты с покрытием.

На Рисунке 4 представлена установка образцов в губки разрывной машины. Скорость разрыва установлена 50 мм/мин для каждого образца.

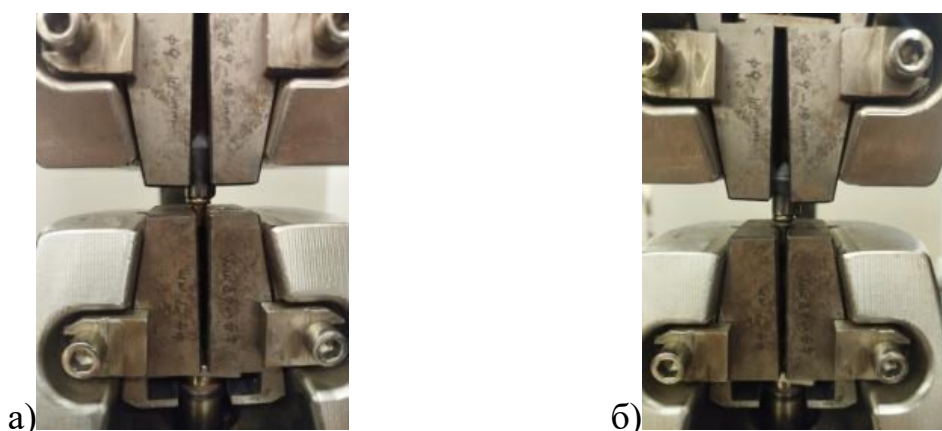


Рисунок 5. Установка штифтов в губках разрывной машины.
а) №1; б) №2

Результаты. На графиках, представленных на рисунке 5, приведен рост усилия в кН по времени работы разрывной машины.

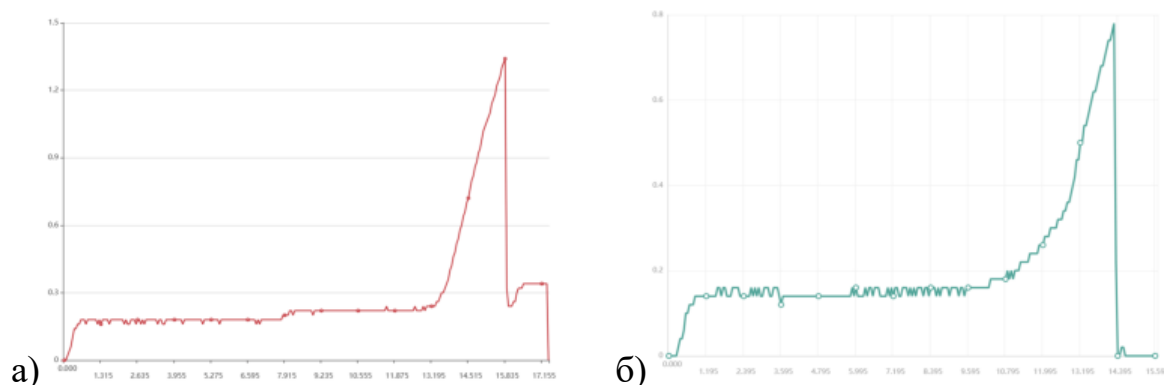


Рисунок 6. Графики роста усилия. а) образец № 1; б) образец № 2.

Усилие, зарегистрированное при разрыве образца № 1, соответствует 1,34 кН. В свою очередь усилие при разрыве образца № 2 соответствует лишь 0,78 кН.

Обсуждение полученных результатов. На Рисунке 6 представлены образцы после разрыва.



Рисунок 7. Образцы после разрыва.

Как видно, штифт полностью оторвался от покрытия, что говорит о том, что, зарегистрированное машиной усилие направленно на преодоление адгезии материала покрытия к материалу подложки.

Единицей измерения адгезии материала покрытия к подложке является мегапаскали (МПа). Для расчёта адгезии на образцах воспользуемся формулой (1).

$$a = \frac{F}{S} \quad (1)$$

где, F – сила разрыва, Н

S – площадь штифта, мм^2

Площадь штифта рассчитывается формулой 2.

$$S = \pi r^2 \quad (2)$$

где r – радиус штифта, мм

Таким образом, воспользовавшись формулой (2) определяем, что площадь штифтов составляет:

$$S = 3,14 \times 3^2 = 28,26 \text{ мм}^2$$

Поскольку штифты идентичны, их площади равны.

По формуле (1) определим адгезию покрытия для каждого из образцов.

$$a_1 = \frac{1340}{28,26} = 47,4 \text{ МПа}$$

$$a_2 = \frac{780}{28,26} = 27,6 \text{ МПа}$$

Значение a_1 и a_2 являются адгезией покрытия на образце № 1 и № 2 соответственно.

Заключение. Таким образом, гипотеза о влиянии дистанции напыления на адгезию, подтверждена. Образец с покрытием, нанесённым с дистанции 10 мм показал лучший результат в испытании соответствующий 47,4 МПа. Данное исследование подталкивает к разработке автоматической системы контроля параметра расстояния. Это может найти применение в нанесение покрытий на изделия с разновысотным профилем поверхности. Также планируется дальнейшая работа по изучению этого направления.

Список источников

1. Козлов И. А., Лещев К. А., Никифоров А. А., Демин С. А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. №8 (90). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/holodnoe-gazodinamicheskoe-napylenie-pokrytiy-obzor> (дата обращения: 10.10.2025).
2. Инструкция по подключению и использованию комплекта оборудования ДИМЕТ® мод. 421. // URL: http://dymet.info/ru/DYMET_421.pdf (дата обращения: 10.10.2025).
3. Журнал «Сварщик», 2003. О.Ф.Клюев, А.И.Каширин, А.В.Шкодкин, Т.В.Буздыгар. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий. Часть 1. №4 (32), с.25-27. Часть 2. №5 (33), с.24-27. Часть 3. №6 (34), с.25-27 (дата обращения: 10.10.2025).
4. О.Ф.Клюев, А.И.Каширин, Т.В.Буздыгар, А.В.Шкодкин. Оборудование «ДИМЕТ» для нанесения металлических покрытий. Материалы Международной научно-технической конференции «Надежность и ремонт машин», Гагра, 2004. - Орел: ОрелГАУ, 2004, т.2, с.11-15. (дата обращения: 10.10.2025).
5. Журнал «Физика и химия обработки материалов» Беляев И.В., Степнов А.А., Кутепов А.В., Спрыгин Г.С., Григорович К.В., Кольчугина Н.Б., Курса М. Антикоррозионные покрытия для постоянных магнитов типа ND-FE-B. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16517158> (дата обращения: 10.10.2025).

УДК 62.529

Исследование управления серво-гидравлической системой

Бакеев Ильдар Ринатович¹

bakeeff.i@yandex.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. В данном исследовании рассматривается серво-гидравлическая система для имитации процессов заполнения и сжатия для литья под давлением. Проводится оценка критериев управления для контроля скорости и положения системы на этапе заполнения и контроля давления на этапе наложения давления. Результаты показывают, что предлагаемая система соответствует требуемым стандартам производительности при работе с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) контроллером при частоте дискретизации 1000 Гц.

Ключевые слова: система управления; серво-гидравлическая система; литье под давлением; контроль положения; контроль давления; ПИД-контроллер.

The study of servo-hydraulic system control

Bakeev Ildar Rinatovich¹

bakeeff.i@yandex.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. This study examines a servo-hydraulic system for simulating the filling and compression processes in injection molding. Control criteria for controlling the system's speed and position during the filling stage and pressure during the application stage are evaluated. The results demonstrate that the proposed system meets the required performance standards when operating with a proportional-integral-derivative (PID) controller at a sampling frequency of 1000 Hz.

Keywords: control system; servo-hydraulic system; injection molding; position control; pressure control; PID controller.

Введение. Серво-гидравлические системы обладают рядом преимуществ, при построении машин литья с наложением давления, позволяя достичь критериев высокой точности, низкого шума и высокой повторяемости в качестве продукции. Кроме того, серво-гидравлические системы потенциально позволяют добиться экономии энергии до 70% или более. Однако, чтобы реализовать этот потенциал экономии энергии, серво-

гидравлическая система должна быть тщательно спроектирована и оптимизирована.

Среди всех параметров, участвующих в процессе литья под давлением, скорость заполнения формы и наложение давления на расплав, являются двумя наиболее важными для достижения качества отлитой детали. Под скоростью заполнения формы подразумевается скорость движения плунжера на этапе заполнения полости, в то время как давление на расплав относится к силе, приложенной к кристаллизующемуся металлу в полости по мере его охлаждения и затвердевания. Однако даже при правильном контроле скорости впрыска и давления упаковки точность перехода цикла впрыска от этапа заполнения с постоянной скоростью (V) к этапу упаковки с постоянным давлением (P) играет критическую роль в обеспечении правильного и последовательного качества отлитой детали [1]. Был рассмотрен ряд методов контроля точки переключения V - P , включая переключение по давлению, переключение по времени и переключение по положению. Используя метод контроля положения, переход V - P инициируется автоматически, как только перемещение плунжера достигает определенного предустановленного. Среди представленных методов, контроль положения обеспечивает повторяемость механических свойств отлитой детали.

В работе исследуется серво-гидравлическая система имитации этапов литья с наложением давления. Дополнительно разрабатывается пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) контроллер для управления V - P перехода с использованием метода контроля положения.

Проводится изучение производительности предлагаемой системы в плане контроля скорости (процесс заполнения), контроля давления (процесс наложения давления) и контроля точки переключения V - P (переход V - P).

Материалы и методы.

1. Экспериментальная система.

Рисунок 1 представляет схематическое изображение экспериментальной системы, рассматриваемой в настоящем исследовании. Промышленный логический контроллер компании ОВЕН ПЛК200 с частотой дискретизации 1 кГц, семью каналами для установки аналоговых модулей ввода-вывода и цифровых модулей ввода-вывода. Серво-преобразователь частоты с поддержкой алгоритма векторного управления синхронным двигателем на постоянных магнитах с датчиком обратной связи, произведённый компанией Inovance. Серводвигатель с постоянными

магнитами на поверхности тела ротора, с абсолютным многооборотным датчиком, разрешающей способностью 23-бит на оборот, произведенный компанией Inovance, мощностью 5,5 кВт и номинальной скоростью вращения 3000 об/мин.

Питателем гидравлики, в исследуемой системе, является шестерёнчатый насос с максимальной скоростью вращения 2750 об/мин. Рабочее давление, в устоявшемся режиме, составляет 350 бар и 16 см³/об.



Рисунок 1. Экспериментальная система.

Серво-пропорциональный клапан является ключевым компонентом в исследуемой системе, который изменяет размер открытия в соответствии с входным напряжением. Клапан произведен компанией Bosh-Rexroth, имеет максимальный расход 90 л/мин, управляющим воздействием, для открытия, является сигнал от +10В до -10В и частотную характеристику 350 Гц. Сервоклапаны работают с очень высокой точностью, прогнозируемой повторяемостью и высокочастотной характеристикой.

Таблица 1

Спецификации основных компонентов экспериментальной системы

Компоненты	Спецификации
Гидравлический цилиндр	Диаметр: 100 мм
	Макс. ход: 170 мм
	Макс. рабочее давление: 140 бар
Серво-пропорциональный клапан	Макс. расход: 90 л/мин
	Макс. рабочее давление: 140 бар
	Время отклика ступенчатого сигнала: 3,5 мс
Микроконтроллерный блок	ОС: Linux kernel 2.6.33
Датчик положения	Разрешение (аналоговое): 12 бит

2. Стратегия управления.

Хорошо известно, что ПИД-контроллер, благодаря своей универсальности и эффективности, находит широкое применение в задачах управления разнообразными промышленными системами, обеспечивая точное регулирование в условиях изменяющихся нагрузок и внешних возмущений [2]. Как демонстрирует рисунок 2, в рамках настоящего исследования была разработана комплексная стратегия управления, предназначенная для серво-гидравлической системы, которая позволяет осуществлять переключение между режимами поддержания постоянной скорости и постоянного давления с высокой степенью точности и стабильности. В фазе заполнения, где требуется обеспечение постоянной скорости, контроллер, получая сигнал обратной связи от расходомера в качестве ключевого входного параметра, динамически корректирует угловую скорость серводвигателя в строгом соответствии с предписанным алгоритмом управления, тем самым гарантируя, что фактическая скорость потока остается на заранее заданном уровне без значительных отклонений [3]. В тот момент, когда давление в гидравлической системе достигает критической точки переключения, заранее определенной как целевая позиция, контроллер оперативно снижает амплитуду выходного напряжения, что приводит к пропорциональному уменьшению скорости вращения двигателя и плавному переходу к этапу управления давлением,

минимизируя тем самым возможные гидравлические удары и обеспечивая непрерывность процесса.

На последующем этапе, ориентированном на поддержание постоянного давления, контроллер, опираясь на интегрированные сигналы от датчика давления и датчика крутящего момента, осуществляет медленное и контролируемое продвижение плунжера, что позволяет стабилизировать давление на требуемом уровне с учетом реального состояния системы и предотвращая нежелательные колебания [4].

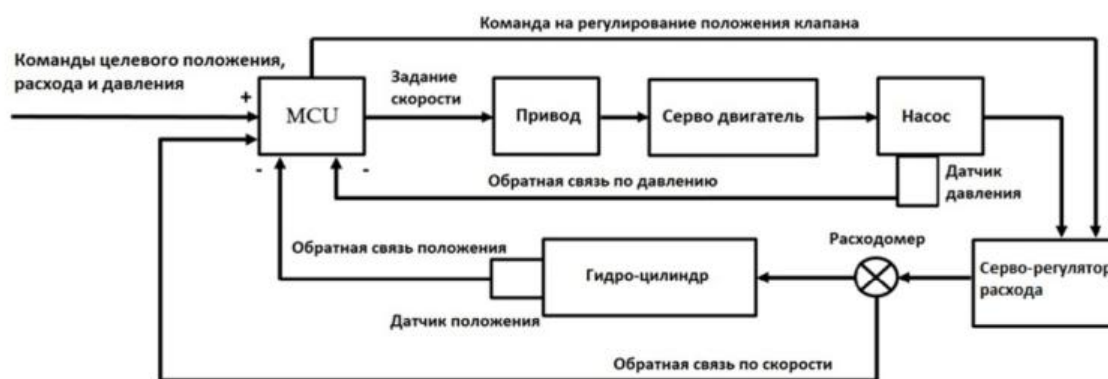


Рисунок 2. Блок-схема предлагаемой стратегии управления.

График 1 иллюстрирует динамику работы серво-пропорционального клапана в ходе эксперимента, где на начальном участке, начиная от условных точек переключения V к P1 (в соответствии с рис. 1), клапан фиксируется в полностью открытом положении под воздействием заданного напряжения -10 В, обеспечивая максимальный пропускной поток. Как только гидравлический цилиндр достигает первой целевой позиции, степень открытия клапана мгновенно устанавливается на уровне 0,5% посредством подачи напряжения $-0,05$ В, что позволяет точно дозировать поток и перейти к фазе тонкой регулировки. Далее происходит переключение к точкам от P1 к P2 (применяя напряжение 4 В к клапану), чтобы выполнить движение заполнения формы. Следующим шагом следует сжатие металла в полости формы и переход от P2 к точке P3 (запрессовка металла). После того как клапан отработает задающее воздействие точек P1-P3 последует наложение давления на кристаллизующийся металл и соответственно точка P4 (применяя к клапану напряжение 8,5 В).



График 1. Входное напряжение на серво-пропорциональный клапан во время последовательности управления.

3. Показатели экспериментальной производительности и цели.

Максимальное перерегулирование, определяемое как разность между пиковым зарегистрированным значением давления и его целевым уровнем, служит ключевым индикатором качества переходных процессов в системе. Аналогичным образом, время отклика, рассчитываемое как интервал, необходимый для перемещения цилиндра ко второй целевой позиции после активации точки переключения V–P, отражает динамическую отзывчивость всей серво-гидравлической цепи. Наконец, стандартное отклонение давления (RMSD), вычисляемое как мера дисперсии между фактическим системным давлением и заданным значением в установившемся режиме, характеризует степень стабильности и точности поддержания давления на длительных интервалах [5].

Установленные целевые значения, ориентированные на строгие промышленные стандарты, включают следующие ограничения, реализованные в ходе экспериментов: максимальное перерегулирование давления в гидравлическом цилиндре не должно превышать 5 бар, перерегулирование позиции цилиндра — менее 1 мм, время отклика — менее 0,1 с, RMSD позиции цилиндра — менее 0,5 мм, RMSD давления — менее 1 бар, при этом средняя скорость двигателя в момент входа в установившийся режим должна оставаться ниже 50 об/мин (см. рисунок 3 и таблицу 2).

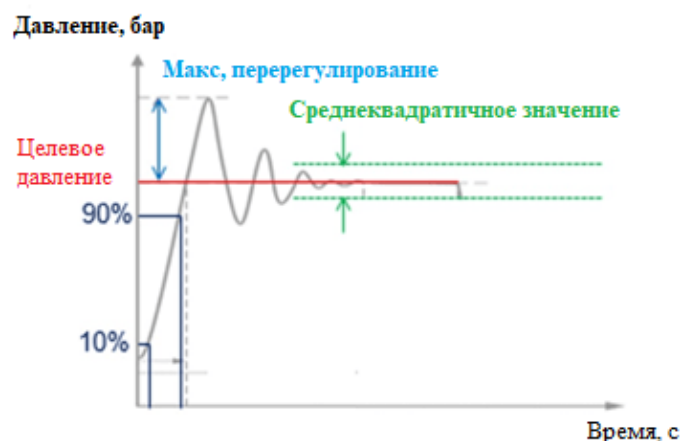


Рисунок 3. Иллюстрация экспериментальных показателей производительности.

Таблица 2

Целевые показатели

Показатели производительности	Цели
Давление в гидравлическом цилиндре	макс. Перерегулирование менее 5 бар
	RMSD менее 1 бар
Позиция цилиндра	макс. Перерегулирование менее 1 мм
	RMSD менее 0,5 мм
Время отклика	менее 3 с
Средняя скорость двигателя	менее 50 об/мин

4. Эксперименты с несколькими целевыми позициями, одной целевой скоростью и одним целевым давлением

В контексте исследуемой серво-гидравлической системы, где акцент делается на многоуровневом управлении, предполагается серия экспериментов с несколькими целевыми позициями, единой целевой скоростью и фиксированным целевым давлением, направленные на всестороннее изучение эффективности предлагаемой системы в аспектах контроля скорости, стабилизации давления и точности управления точкой переключения V–P [6].

Параметры, фиксируемые в ходе экспериментов, определяются следующим образом:

Время отклика — в соответствии с ранее установленным определением, отражающим быстродействие системы.

Позиция — точное положение плунжера в заданных целевых точках, служащее критерием позиционной точности.

Давление 1 — значение давления на выходе насоса, характеризующее гидравлическую мощность.

Давление 2 — давление непосредственно в гидравлическом цилиндре, индицирующее нагрузку на исполнительный орган.

Для систематического анализа производительности системы при вариациях целевых позиций, скоростей потока и частот дискретизации были спланированы следующие наборы экспериментов:

Частота дискретизации: 500 Гц.

В сценарии, когда плунжер, функционируя в режиме контроля скорости, достигает целевой позиции переключения V–P, он контактирует с жидким металлом на глубину 2 мм, после чего система автоматически переходит в режим контроля давления для выполнения этапа прессования; при этом расстояние под прессовку (2 мм) устанавливается как минимально допустимое значение, совместимое с частотой дискретизации 500 Гц. Соответствующие экспериментальные цели, детализированные для позиций переключения V–P (35 мм, 50 мм и 65 мм), приведены в таблице 3.

Таблица 3

Наборы экспериментов при частоте дискретизации 500 Гц

Целевая позиция (мм)	Целевая скорость (мм/с)	Целевое давление (бар)
35 → 33	50–80	100
50 → 48	50–80	110
65 → 63	50–80	120

2. Частота дискретизации: 1000 Гц

Процедура эксперимента была такой же, как описано выше и показано в таблице 3, за исключением того, что расстояние плунжера установлено на 1 мм (т.е. минимальное достижимое расстояние при частоте дискретизации 1000 Гц).

Таблица 4

Наборы экспериментов при частоте дискретизации 1000 Гц

Целевая позиция (мм)	Целевая скорость (мм/с)	Целевое давление (бар)
35 → 34	50–80	100
50 → 49	50–80	110
65 → 64	50–80	120

Результаты. В исследовании для подтверждения возможности реализации системы была использована программы для моделирования Simulink. Созданная модель экспериментальной установки включает в себя: гидравлический насос, электродвигатель насоса, серво-пропорциональный регулятор расхода, виртуальные датчики с возможностью изменения показаний в ручном режиме для имитации рабочего процесса экспериментов.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что динамика процесса литья под давлением, включая все ключевые фазы и переходы, была успешно воспроизведена с высокой степенью достоверности, как это наглядно демонстрирует конфигурация с параметрами 65 мм → 63 мм при скорости потока 80 мм/с и целевом давлении 120 бар, реализованная при частоте дискретизации 500 Гц, что подтверждает адекватность разработанной модели и стратегии управления. При этом особого внимания заслуживает характерное явление, систематически наблюдаемое в полученных данных, а именно резкое снижение давления в интервале времени от 1,2 до 2 секунд, которое соответствует моменту перехода из режима контроля скорости (V) в режим контроля давления (P), отражая тем самым критическую точку переключения V–P и подчеркивая необходимость точной синхронизации алгоритмов управления для минимизации гидравлических возмущений.

Анализ показателей времени отклика выявил их стабильно высокое качество во всех протестированных сценариях, причем по мере увеличения заданной скорости потока наблюдалось последовательное сокращение времени отклика, что свидетельствует о положительной корреляции между динамическими характеристиками системы и интенсивностью входного воздействия. В то же время стандартное отклонение позиции (RMSD) в отдельных случаях превышало предустановленные пороговые значения при частоте дискретизации 500 Гц, в то время как при повышении частоты до

1000 Гц все метрики позиционной точности полностью соответствовали целевым требованиям, демонстрируя решающее влияние скорости обработки данных на качество обратной связи.

Обсуждение. Наблюдая результаты экспериментов по мере увеличения целевой позиции с 35 мм до 65 мм, время отклика увеличивается, но все еще соответствует стандарту. При частоте дискретизации 500 Гц давление иногда превышает предустановленное значение. Однако все цели удовлетворены при частоте дискретизации 1000 Гц. Кроме того, время отклика при 500 Гц значительно больше, чем при 1000 Гц, особенно при высоком целевом давлении. Время отклика критично для движения плунжера в процессе наложения давления на металл, поскольку долгое время отклика несет риск для формирования структуры металла.

При применении более высокой целевой скорости ПИД-контроллер требует больших параметров усиления (K_p , K_i и K_d) для достижения требуемой производительности.

Частота дискретизации, определяющая временное разрешение цикла обратной связи в контуре позиционного управления, оказывает существенное влияние на прецизионность отслеживания траектории плунжера, при этом интеграция алгоритмов фильтрации — будь то низкочастотные фильтры для подавления высокочастотных шумов или адаптивные методы предварительной обработки сигналов с датчиков положения — позволяет значительно повысить устойчивость и метрологическую точность системы регулирования, компенсируя дискретизационные артефакты и обеспечивая минимизацию ошибок в динамических режимах. Экспериментальные данные, полученные в ходе всестороннего анализа, убедительно свидетельствуют о том, что варьирование коэффициентов пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора характеризуется лишь маргинальным воздействием на кинематические параметры движения плунжера как в фазе заполнения полости формы, где доминирует режим стабилизации скорости, так и в последующем этапе наложения давления, где осуществляется переход к управлению по давлению, в то время как определяющим фактором, доминирующим в формировании как скоростного профиля плунжера, так и общей динамической характеристики гидравлического контура, выступает степень открытия сервопропорционального клапана, которая напрямую детерминирует расход

рабочей среды и, следовательно, обеспечивает целенаправленную настройку технологического процесса литья под давлением в соответствии с заданными параметрами качества.

Наряду с удовлетворительными результатами в системе есть пространство для улучшения. Машины литья под давлением в промышленном использовании могут иметь значительно более высокую скорость заполнения формы, в сравнении с настоящим исследованием [7]. Последующие усовершенствования алгоритма управления будут учитывать более прикладное применение данной системы с увеличенной скоростью протекания переходных процессов и увеличения скорости реакции на управляющее воздействие.

Заключение. В настоящем исследовании, рассмотрена серво-гидравлическая система для имитации основных процессов машины литья под давлением. Результаты моделирования подтверждают следующие основные выводы.

1. Предлагаемый ПИД-контроллер успешно обнаруживает спроектированную точку переключения В–Д и переключается из режима постоянной скорости в режим постоянного давления в соответствии с положением серво-пропорционального клапана. Размер открытия клапана должен быть тщательно спроектирован для рассматриваемого технологического процесса.

2. Время отклика и перерегулирование давления в цилиндре повышаются по мере увеличения целевого давления. Сравнивались производительности ПИД-контроллера и самонастраивающегося нечеткого ПИД-контроллера. Введение самонастраивающегося нечеткого ПИД-контроллера в систему может улучшить время отклика, RMSD давления и перерегулирование давления.

3. Когда частота дискретизации установлена на 1000 Гц, система достигает всех целей производительности перемещения, скорости и давления, за исключением максимального перерегулирования давления на выходе насоса при выполнении переключения В–Д.

Список источников.

1. Jiang, W.; Zhang, C.; Jia, P.; Yan, G.; Ma, R.; Chen, G.; Ai, C.; Zhang, T. A Study on the Electro-Hydraulic Coupling Characteristics of an Electro-Hydraulic Servo Pump Control System. *Processes* 2022, 10, 1539

2. Guo, Y.-Q.; Zha, X.-M.; Shen, Y.-Y.; Wang, Y.-N.; Chen, G. Research on PID Position Control of a Hydraulic Servo System Based on Kalman Genetic Optimization. *Processes* 2022, 10(8), 1539.
3. Yu, B. Design, Mathematical Modeling and Force Control for Electro-Hydraulic Servo System With Pump-Valve Compound Drive. *Processes* 2022, 10(8), 1539.
4. Zeng, L.; Yang, J.; Tan, J.; Xiao, Z. Design and Control of Load Simulator for Throttling System of Large Hydraulic Press. *Procedia Manufacturing* 2018, 15*, 1057–1064.
5. Wos, P.; Dindorf, R. Adaptive Control of the Electro-Hydraulic Servo-System with External Disturbances. *Asian Journal of Control* 2013, 15(4), 1007–1016.
6. Денисов, В. А.; Петрешин, Д. И.; Давыдов, Н. И. Согласование режимов наложения давления со скоростью охлаждения металла в форме как способ управления процессом литья с кристаллизацией под давлением. *Вестник МГТУ «Станкин»* 2022.
7. ГОСТ 20911–89. Станции гидравлические. Общие технические требования.

УДК 05.13.06

Автоматизация технологического процесса нагрева углеводородного сырья в трубчатой печи

Стальмаков Сергей Викторович¹

ser.stalmakoff@gmail.com

Белоглазов Илья Ильич¹

beloglazov_ii@pers.spmi.ru

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Работа посвящена комплексному исследованию проблем и перспектив автоматизации технологического процесса нагрева углеводородного сырья в трубчатой печи. Проведенный анализ выявил ряд существенных технических и технологических барьеров, препятствующих эффективной реализации современных методов контроля и управления тепловыми процессами.

Особое внимание уделено вопросам интеграции традиционных технологий нагрева с инновационными решениями, включая автоматизированные системы управления (АСУ), цифровые двойники и

энергосберегающие технологии. Исследование показало, что ключевые проблемы связаны с несовершенством систем мониторинга температуры и давления, неравномерным нагревом сырья, а также сложностями внедрения расчетных моделей в условиях реального производства.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по совершенствованию существующих подходов к управлению процессом нагрева углеводородного сырья. Предложенные решения учитывают специфику различных производственных условий и направлены на повышение энергоэффективности, снижение эксплуатационных затрат и минимизацию потерь тепловой энергии.

Результаты исследования могут быть использованы при модернизации действующих трубчатых печей, а также при проектировании новых систем нагрева, отвечающих современным требованиям надежности и экономичности.

Ключевые слова: трубчатая печь, нефть, переработка нефти, моделирование, автоматизация, энергоэффективность, углеводородное сырье, компьютерная модель

Automation of the technological process of heating hydrocarbon raw materials in a tubular furnace

Stalmakov Sergey Viktorovich¹

ser.stalmakoff@gmail.com

Beloglazov Ilya Ilyich¹

beloglazov_ii@pers.spmi.ru

¹ Saint Petersburg Mining University Empress Catherine II, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. This paper presents a comprehensive study of the challenges and prospects for automating the process of heating hydrocarbon feedstock in a tubular furnace. The analysis revealed a number of significant technical and technological barriers hindering the effective implementation of modern methods for monitoring and controlling thermal processes.

Particular attention is paid to the integration of traditional heating technologies with innovative solutions, including automated control systems (ACS), digital twins, and energy-saving technologies. The study revealed that key issues related to imperfect temperature and pressure monitoring systems, uneven heating of raw materials, and difficulties in implementing computational models in real-world production conditions.

The practical significance of the work lies in the development of recommendations for improving existing approaches to managing the process of heating hydrocarbon raw materials. The proposed solutions take into account the specifics of various production conditions and are aimed at increasing energy efficiency, reducing operating costs, and minimizing thermal energy losses.

The results of the study can be used in the modernization of existing tubular furnaces, as well as in the design of new heating systems that meet modern requirements for reliability and efficiency.

Keywords: tubular furnace, oil, oil refining, modeling, automation, energy efficiency, hydrocarbon feedstock, computer model

Введение. Современная нефтеперерабатывающая промышленность сталкивается с вызовами, требующими пересмотра традиционных подходов к управлению технологическими процессами. Одним из ключевых этапов переработки углеводородного сырья является его нагрев в трубчатых печах, который обеспечивает необходимые температурные условия для последующих технологических процессов. Однако даже в высокотехнологичных отраслях автоматизация таких процессов часто остается фрагментарной, что приводит к потерям энергии, неоптимальному использованию ресурсов и росту эксплуатационных расходов. Это делает исследования в области автоматизированных систем управления (АСУ) процессом нагрева углеводородного сырья не просто актуальными, но и критически важными для развития отрасли.

Актуальность исследования определяется рядом важных факторов, которые становятся все более значимыми в условиях современного развития энергетики и технологий нефтепереработки [1]. Первый ключевой аспект — это растущий спрос на энергоресурсы, который требует новых подходов к их производству и использованию [2]. По данным Международного энергетического агентства (IEA), глобальное потребление энергии продолжает расти, и к 2050 году оно может увеличиться на 40–50% [6]. Однако основная часть мирового энергетического баланса до сих пор обеспечивается ископаемыми источниками энергии, что создает серьезные экологические проблемы и угрожает долгосрочной устойчивости энергетических систем [8].

Материалы и методы. Современные системы управления температурным режимом в трубчатых печах для нагрева углеводородного

сырья, таких как нефть, стали ключевым элементом технологической трансформации нефтеперерабатывающей отрасли. За последние годы научные разработки позволили создать интегрированные решения, сочетающие высокую точность контроля, энергоэффективность и безопасность. Эти системы не только минимизируют влияние человеческого фактора, но и обеспечивают устойчивое развитие производственных процессов за счет оптимизации ресурсов и снижения экологической нагрузки [4].

Основу современных систем автоматизации составляют SCADA-системы (Supervisory Control and Data Acquisition), такие как WinCC, которые обеспечивают визуализацию, сбор данных и управление процессами в режиме реального времени. В сочетании с программируемыми логическими контроллерами (PLC), например Siemens SIMATIC S7-1200, они формируют гибкую архитектуру управления. PLC отвечают за автоматическое регулирование критических параметров — температуры, давления и расхода топлива — с точностью до долей процента. Такая интеграция позволяет операторам оперативно корректировать режимы работы печи, а также анализировать исторические данные для дальнейшей оптимизации [3].

Прорывом в автоматизации стало внедрение интеллектуальных датчиков, таких как Rosemount 3051 и Метран-288, которые обеспечивают высокоточные измерения даже в агрессивных средах. Эти устройства передают данные через облачные платформы, что делает возможным создание распределенных систем на базе Интернета вещей (IoT). Например, на удаленных нефтеперерабатывающих объектах IoT позволяет централизованно контролировать сотни параметров, прогнозировать отклонения и управлять оборудованием через единый интерфейс. Это сокращает время реакции на аварийные ситуации и упрощает масштабирование систем.

Алгоритмы ИИ и машинного обучения революционизируют подход к управлению температурными режимами. Нейросети анализируют исторические данные, прогнозируя оптимальные условия нагрева для различных типов нефтяного сырья. Например, алгоритмы могут определить, что при повышенной вязкости сырья требуется ступенчатый нагрев с паузами, что снижает риск коксования труб. Машинное обучение также применяется для предиктивной аналитики: системы заранее

выявляют износ оборудования или риски аварий, что сокращает простои и затраты на ремонт.

Современные системы ориентированы на снижение энергопотребления. Рекуперативные теплообменники утилизируют тепло отходящих газов, используя его для предварительного подогрева нефти, что экономит до 20% энергии. Автоматизированные алгоритмы регулируют подачу топлива (газа или мазута) в зависимости от текущей нагрузки, исключая перерасход. Дополнительно внедряются системы динамического управления тепловыми потоками, которые адаптируются к изменению состава сырья, обеспечивая стабильность процесса при минимальных затратах [7].

Многоуровневые системы безопасности включают автоматическое отключение печи при превышении критических параметров (например, температуры выше 400°C или скачках давления). Газоанализаторы, такие как Siemens Ultramat 23, непрерывно мониторят выбросы, предотвращая загрязнение атмосферы. В статье [5] написано, что в случае утечек или возгорания срабатывают локальные системы пожаротушения, а данные передаются в службы экстренного реагирования. Это не только защищает персонал, но и соответствует строгим экологическим стандартам.

Современные системы управления температурой интегрируются с ERP-платформами (SAP, 1C), что позволяет синхронизировать технологические и бизнес-процессы. Например, данные о расходе топлива автоматически передаются в модуль учета ресурсов, а прогнозы нагрузки используются для планирования закупок. Это сокращает административные издержки и повышает прозрачность управления предприятием.

На таких объектах, как ООО «Александровский НПЗ» и АО «Энерготранс», внедрение автоматизированных систем привело к снижению энергопотребления на 15–25%, увеличению производительности печей на 10–18% и сокращению аварийных остановок на 30%. Эти результаты подтверждают, что интеграция передовых технологий — не просто тренд, а необходимое условие для конкурентоспособности предприятий в условиях растущих экологических требований и экономической нестабильности.

Результаты. Современные исследования в области автоматизации технологического процесса нагрева углеводородного сырья в трубчатой печи демонстрируют переход от традиционных методов управления к

интегрированным системам, где ключевую роль играют цифровизация, адаптивные алгоритмы и экологические стандарты. Например, внедрение систем на основе искусственного интеллекта и машинного обучения позволяет динамически корректировать параметры нагрева, такие как температура и давление, минимизируя влияние человеческого фактора и повышая точность управления. Гибридные модели и цифровые двойники синхронизируют данные сенсоров с физическими расчетами, что позволяет прогнозировать износ оборудования, оптимизировать энергопотребление и предотвращать аварийные ситуации.

Однако внедрение инновационных решений в автоматизацию нагрева углеводородного сырья требует учета специфики каждого производства, а также долгосрочных инвестиций в модернизацию оборудования и обучение персонала. Тем не менее, дальнейшее развитие технологий автоматизации, включая использование искусственного интеллекта, цифровых двойников и IoT, открывает новые возможности для повышения эффективности, безопасности и экологичности процессов нагрева углеводородного сырья в трубчатых печах.

Обсуждение. Анализ современных решений в области автоматизации технологического процесса нагрева углеводородного сырья в трубчатой печи показывает, что ключевым фактором повышения эффективности является интеграция инновационных технологий и системного подхода к управлению тепловыми процессами. Например, внедрение интеллектуальных систем управления на основе автономных сенсоров и предиктивной аналитики позволяет не только оптимизировать температурные режимы, но и снизить энергозатраты на 20–30%. Это подтверждается опытом использования беспроводных датчиков температуры и давления, таких как Rosemount 3051S, которые обеспечивают точный мониторинг и контроль параметров нагрева в реальном времени. Однако успешное внедрение таких систем требует учета специфики технологических процессов, как показано в случае модернизации трубчатых печей на нефтеперерабатывающих заводах, где адаптация параметров нагрева под конкретные условия сырья позволила повысить КПД на 15%.

Важным направлением является использование цифровых двойников для моделирования и оптимизации процессов нагрева. Например, в кейсе внедрения цифрового двойника на установке нагрева углеводородов

удалось сократить время реагирования на отклонения температурных режимов на 40%, что напрямую связано с работой, где авторы подчеркивают важность точной параметризации взаимодействия тепловых потоков и свойств сырья. Это также подтверждается опытом использования систем предиктивного обслуживания, которые на основе анализа данных с сенсоров предупреждают о возможных сбоях в работе печи, минимизируя простои и снижая затраты на ремонт.

Заключение. Проведенный анализ автоматизации процесса нагрева углеводородного сырья в трубчатой печи выявил комплекс технических, технологических и организационных вызовов, стоящих перед современной нефтеперерабатывающей отраслью. Несмотря на значительные достижения в области внедрения интеллектуальных систем управления, многие вопросы остаются нерешенными, требуя инновационных подходов и междисциплинарных решений.

Ключевой проблемой остается коррозия и износ оборудования. Высокосернистые нефти и агрессивные примеси ускоряют деградацию внутренних поверхностей печи, а системы мониторинга толщины стенок, такие как ультразвуковые датчики Emerson Rosemount, требуют значительных инвестиций. На предприятиях с ограниченным бюджетом это приводит к выбору между безопасностью и экономией, как в случае АО «Татнефть», где замена труб проводилась с задержкой из-за высокой стоимости датчиков.

Экономические аспекты автоматизации становятся критическими в условиях нестабильных цен на энергоресурсы. Внедрение цифровых двойников, способных моделировать процесс нагрева в реальном времени, демонстрирует впечатляющие результаты: на НПЗ «Лукойл-Волгограднефтепереработка» такая система сократила время реагирования на отклонения на 40%. Однако стоимость проекта превысила 2 млн долларов, а срок окупаемости составил 5 лет, что делает подобные решения недоступными для малых и средних предприятий.

Список источников

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 N 1523-р | Энергетическая стратегия России до 2035 года. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1100&documentId=8087> (Дата обращения 01.11.2025)

2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.04.2018 № 703-р | «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» на период до 2035 года. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201804240019/> (Дата обращения 01.11.2025)
3. Белоглазов И. И., Курбанов Б. Х. Автоматизация процессов нефтепереработки с использованием современных средств разработки. Деловой журнал Neftegaz.ru, 2016, № 2, с. 34–37. EDN: VLFTJT
4. Паршуков, А. Н. Математическая модель технологического процесса абсорбции природного газа / А. Н. Паршуков // Вестник СибГУТИ. – 2022. – № 1(57). – С. 68-76. – DOI 10.55648/1998-6920-2022-16-1-68-76. – EDN EGKNKP.
5. Пономаренко Т.В., Горбатюк И.Г., Череповицын А.Е. Промышленные кластеры как организационная форма развития нефтегазохимической отрасли России // Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 1024-1037. EDN DESOAU
6. BP Statistical Review of World Energy 2021 URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (Дата обращения 01.11.2025)
7. Введение в нанохимию и технологию наноматериалов / Т. И. Шабатина, С. Л. Березина, Ю. Н. Морозов, В. В. Федоров. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 152 с. – ISBN 978-5-7038-5788-5. – EDN SBNUYK.
8. Adekoya O.B., Olabode J.K., Rafi S.K. Renewable energy consumption, carbon emissions and human development: Empirical comparison of the trajectories of world regions // Renew. Energy. 2021. Vol. 179. P. 1836–1848. – DOI 10.1016/j.renene.2021.08.019

УДК 681.5

Лабораторный стенд автоматизированной системы управления лазерным поверхностным термическим упрочнением

Петрушин Александр Дмитриевич¹ alex.petrushin.96@mail.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы создания и применения лабораторного стенда для автоматизированного управления процессом лазерного поверхностного термического упрочнения. Представлены основные компоненты стенда, включающие лазерную систему, блок управления, системы позиционирования и диагностики. Показаны преимущества автоматизации процесса, такие как повышение точности обработки, воспроизводимости результатов и эффективности использования энергии. Описаны программные и аппаратные решения, обеспечивающие контроль ключевых параметров обработки: мощности лазера, скорости сканирования и площади воздействия.

Ключевые слова: лазерное упрочнение, автоматизированная система управления, оптимизация процесса, качество поверхности, энергоэффективность.

Laboratory stand of an automated control system for laser surface thermal hardening

Petrushin, Alexander Dmitrievich¹ alex.petrushin.96@mail.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. The issues of creation and application of a laboratory stand for automated control of the laser surface thermal hardening process are considered. The main components of the stand, including a laser system, a control unit, positioning and diagnostic systems, are presented. The advantages of process automation are shown, such as improved processing accuracy, reproducibility of results, and energy efficiency. Software and hardware solutions are described to ensure control of key processing parameters: laser power, scanning speed, and impact area.

Keywords: laser hardening, automated control system, process optimization, surface quality, energy efficiency.

Введение. Главная черта современного этапа научно-технического прогресса – применение в народном хозяйстве принципиально новых

технологий, основанных на самых последних научных достижениях. Лазерная технология относится к разряду новых технологий, что видно как на фактах её расширяющихся применений, так и из её очевидных преимуществ. Основными преимуществами этой технологии являются экологическая чистота, скорость, точность, малая глубина закали, возможность осуществления процессов, недоступных большинству других технологий, возможность полной автоматизации и высокая производительность процессов. Лазерная закалка использует высокоэнергетический лазерный луч для быстрого нагрева быстро изнашиваемой поверхности. Традиционные методы, такие как индукционная или пламенная закалка работают с помощью электрического тока или открытого пламени, с последующей закалкой в жидкой среде. [1]

Актуальность темы заключается в том, что развитие современных отраслей промышленности ставит проблему повышения надежности и долговечности выпускаемых изделий, создаёт высокие требования к новым материалам и технологиям. Некоторые узлы и детали машин, металлические элементы конструкций испытывают большие удельные нагрузки, воздействия агрессивных сред и высоких температур, работают в условиях повышенного трения и высоких скоростей. Такие условия эксплуатации приводят к разупрочнению и разрушению деталей, накоплению дефектов и трещин, эрозионных повреждений. Поэтому основными параметрами, характеризующими упрочнение, являются твердость и характер ее изменения при лазерном упрочнении, а также требуемая микроструктура слоя.

Методы и материалы. Аппаратная часть мехатронной системы управления, разработанной для процесса лазерной закали, представляет собой комплекс, состоящий из точно подобранных и взаимосвязанных компонентов, которые могут обеспечить автоматическое регулирование температуры в зоне обработки. Система основана на замкнутом контуре управления, в котором ключевую роль играет бесконтактное измерение температуры. Быстродействующий пирометр Optris CTlaser3mh2SF предназначен для обработки металлов.

Его наиболее важной особенностью является спектральный диапазон в 2,3 мкм, что делает его нечувствительным к излучению волоконных лазеров, время отклика для контроля процесса быстрого потока составляет всего 1 миллисекунду, а диапазон температур измерения составляет от 200 до 1500°C. Чтобы точно расположить измерительную головку пирометра

вблизи фокуса, мы разработали специальный регулируемый кронштейн, который устанавливается на запястье промышленного робота для обеспечения синхронного перемещения прибора с лазерным лучом. "Мозгом" системы является программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК200-04-CS, который обрабатывает данные пирометра и управляет исполнительным механизмом. Этот российский контроллер был выбран потому, что он обладает достаточной вычислительной мощностью, основан на процессоре ARM® Cortex-A8 и имеет необходимые коммуникационные интерфейсы, особенно RS-485 для взаимодействия с другими устройствами, а также поддержку ключевых промышленных протоколов, таких как Modbus RTU и Modbus TCP. Приводом, непосредственно влияющим на технологический процесс, является гибридный шаговый двигатель AD-200-21, который обеспечивает вращение цилиндрических заготовок (пуансонов). Его основными преимуществами являются высокая точность позиционирования, угол наклона $1,8^\circ$ и высокий крутящий момент. Для управления двигателем используется специальный драйвер SMSD-4. В систему может быть интегрирована шина Modbus, благодаря высокому коэффициенту деления шага (до 1/256), обеспечивающему бесперебойную работу, и надежному интерфейсу RS-485.



Рисунок 1. Лабораторный стенд.

Все компоненты системы интегрированы в трехуровневый контур управления. Пирометр передает данные о температуре в ПЛК в режиме реального времени, и ПЛК генерирует управляющую команду для привода

шагового двигателя в соответствии с заданным алгоритмом. В свою очередь, водитель точно регулирует скорость вращения двигателя: когда температура поднимается выше установленного порога, скорость увеличивается, сокращая время, за которое лазер освещает определенную область, и наоборот.

Результаты. В процессе работы была разработана и протестирована автоматизированная система управления процессом лазерного упрочнения поверхности. Основным результатом является создание функционального аппаратно-программного комплекса для контроля температуры по замкнутому циклу. Для верификации результатов был проведен тестовый запуск системы в промышленных условиях на предприятии «Термолазер». В ходе испытаний система была интегрирована в существующий лазерный робототехнический комплекс и использована для упрочнения цилиндрического пуансона. Система успешно запустилась и функционировала в автоматическом режиме, подтвердив свою принципиальную работоспособность и способность воздействовать на технологический процесс в реальном времени.

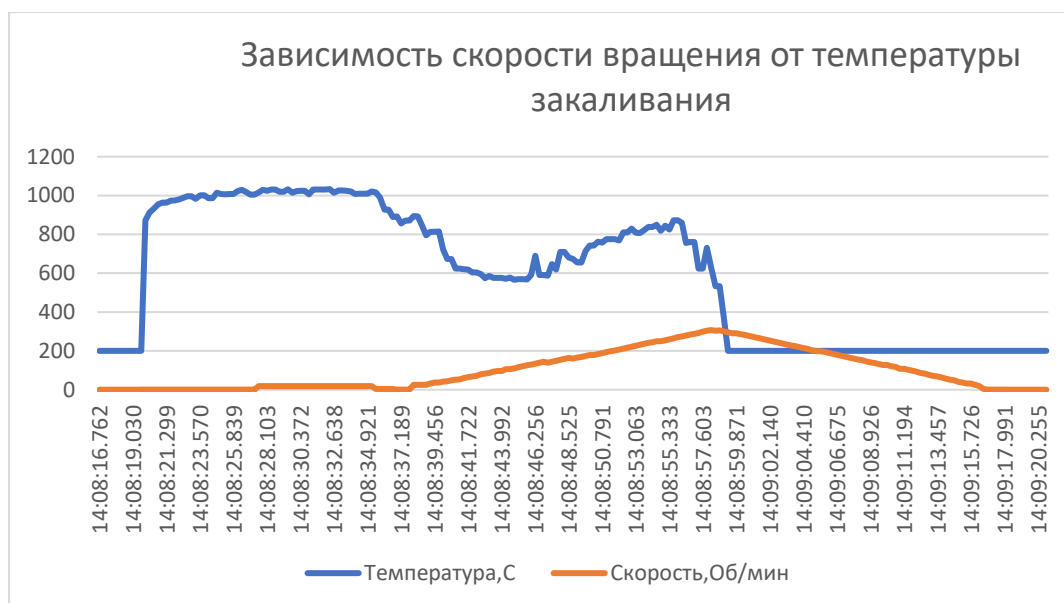


Рисунок 2. Запись данных.

Тестовый запуск подтвердил, что система обеспечивает динамическое регулирование скорости вращения заготовки на основе показаний пирометра. Когда температура превышает порог в 1000°С, автоматически запускается шаговый двигатель. По мере дальнейшего повышения

температуры до 1025°С и 1050°С скорость вращения вала постепенно увеличивается до 50, 75 и 100 шагов в секунду соответственно. Это позволяет поддерживать температуру закаленной стали 45 в оптимальном диапазоне 1020-1040°С, что подтверждается данными в режиме реального времени, отображаемыми на графике пользовательского интерфейса.

Обсуждение. Полученные результаты в целом подтверждают выдвинутую гипотезу о том, что автоматическое регулирование скорости вращения заготовки на основе бесконтактного измерения температуры является эффективным способом управления процессом лазерного упрочнения. Эксперименты показали, что система способна в реальном времени реагировать на изменение температурного поля и воздействовать на технологический процесс.

Однако интерпретация данных выявила и критически важный аспект, требующий углубленного анализа. Во время тестовой проверки системы на предприятии «Термолазер» был зафиксирован резкий, практически скачкообразный рост частоты вращения шагового двигателя в ответ на повышение температуры. Данное поведение является прямым следствием недонастройки ПИД-регулятора, в частности, завышенного коэффициента усиления (Р-компонента), что привело к перерегулированию и неустойчивости контура управления.

Это наблюдение имеет ключевое значение для сопоставления с работами других авторов. Так, в исследованиях по автоматизации лазерных технологических процессов (Григорьянц А.Г., Умнов В.П.) неоднократно подчеркивается, что эффективность системы с обратной связью определяется не столько самой ее архитектурой, сколько качеством настройки алгоритмов управления. Выявленная проблема полностью согласуется с этим тезисом и указывает на то, что общая функциональность системы была подтверждена, но ее динамические характеристики требуют оптимизации.

Заключение. В результате проведенных исследований был разработан, установлен и протестирован лабораторный кронштейн для автоматизированной системы управления процессом лазерного упрочнения поверхности. Достигнута основная цель работы - создан полнофункциональный мехатронный комплекс, который может в режиме реального времени отслеживать температурное состояние зоны обработки и динамически корректировать его, изменяя скорость вращения обрабатываемой детали.

Успешное тестирование системы в производственных условиях предприятия «Термолазер» подтвердило практическую значимость данной работы. Система доказала свою базовую работоспособность и способность интегрироваться в текущие технические процессы. Ключевым подтверждением эффективности предлагаемого способа является возможность поддержания температуры закалки в оптимальном диапазоне 1020-1040°C.

Наиболее важным и ожидаемым результатом является определение области, которая нуждается в дальнейшем улучшении. Наблюдаемые резкие изменения частоты вращения двигателя указывают на необходимость точной настройки ПИД-регулятора. Эта задача не сводит на нет достигнутые результаты, а формирует четкий план будущих исследований, направленных на оптимизацию динамических характеристик системы для достижения максимальной стабильности и качества процесса отверждения. Таким образом, разработанный кронштейн является эффективным инструментом для исследования и разработки технологии адаптивного управления лазерной термообработкой.

Список источников

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Основы лазерной обработки материалов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Умнов В. П., Чухланцев Д. О., Егоров И. Н., Силантьева Д. А. Лазерные технологические комплексы и робототехнические системы. Владимир, Изд-во ВлГУ, 2023. – 150 с.
3. Яшкова С.С. Лазерное поверхностное упрочнение. Молодой ученый, 2017, № 1 (135), с. 99–101.
4. *Optris CTlaser 3M / 3MH2. Инфракрасный пирометр для высоких температур. Руководство по эксплуатации*. Optris GmbH, 2021. URL: <https://www.optris.com/ctlaser-3m> (дата обращения: 31.10.2025).
5. ПЛК200. Руководство по эксплуатации. ОВЕН, 2023. URL: <https://owen.ru/product/plk200> (дата обращения: 31.10.2025).
6. *Драйвер шагового двигателя SMSD-4.2Modbus. Техническое описание*. СМС-Автоматика, 2022. URL: <https://sms-automation.com/products/drayvery-upravleniya-shagovymi-dvigatelyami/smsd-4-2modbus> (дата обращения: 31.10.2025).

Значение ERP-систем с точки зрения автоматизации в современном автомобилестроении

Фоменко Владислав Валерьевич¹ vladfomenko200@gmail.com

Чеботарев Петр Александрович²

¹Студент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

²Ассистент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

Аннотация. ERP (Enterprise Resource Planning) системы играют ключевую роль в обеспечении эффективности управления предприятиями автомобильной промышленности. Современные условия требуют гибкости и скорости реагирования на изменения рынка и оптимизации всех бизнес-процессов. Именно ERP-системы позволяют компаниям эффективно интегрироваться и автоматизировать ключевые процессы и поддерживать конкурентоспособность на мировом рынке.

Ключевые слова: ERP-системы, автомобильная отрасль, автомобилестроение, эффективность, качество, управление.

Fomenko Vladislav Valerievich¹ vladfomenko200@gmail.com

Chebotarev Peter Alexandrovich²

¹Student, Department of AMiR, VISU, Russian Federation, Vladimir

²Lecturer, Department of AMiR, VISU, Russian Federation, Vladimir

Abstract. ERP (Enterprise Resource Planning) systems play a key role in ensuring the effective management of enterprises in the automotive industry. Modern conditions require flexibility and speed of responding to market changes and optimizing all business processes. It is ERP systems that enable companies to effectively integrate and automate key processes and maintain competitiveness in the global market.

Keywords: ERP systems, automotive industry, automotive industry, efficiency, quality, management.

Введение. ERP-система представляет собой комплекс решений, объединяющих управление ресурсами предприятия в единую систему. Она охватывает широкий спектр функций: финансы, закупки, производство, логистику, маркетинг, продажи и многое другое. Благодаря интеграции данных в едином пространстве компания получает полную картину своей деятельности, позволяющую своевременно реагировать на любые

изменения внешней среды. К основным компонентам ERP-систем можно отнести: управление финансами и бухгалтерия; закупочную деятельность и снабжение; производство и контроль качества продукции; логистику и транспортировку товаров; управление персоналом и кадровыми процессами; маркетинговые исследования и поддержку продаж. Каждая из этих подсистем обеспечивает организацию информацией и инструментами для принятия стратегических решений.

Методы и материалы. В процессе написания статьи были проанализированы примеры применения ERP-систем в автомобильной промышленности. Автомобильная отрасль характеризуется высоким уровнем конкуренции, стандартами качества и жесткими временными рамками. Для успешного функционирования компаний необходимы высокоэффективные инструменты управления всеми аспектами производства автомобилей. Современные автомобили становятся более сложными благодаря внедрению новых технологий и материалов. Это требует сложных процедур моделирования и анализа конструкции автомобиля ещё на этапе разработки.

Результаты. ERP-системы помогают ускорить этот процесс путем интеграции с CAD/CAM системами, обеспечивая точный обмен данными между различными подразделениями компании. Таким образом, компания Ford внедряла ERP-системы для координации работы инженеров-разработчиков, конструкторов и производственных подразделений, что, в свою очередь, позволило сократить сроки вывода нового продукта на рынок почти вдвое.

Так же, перед автомобильными компаниями стоит задача оптимизации поставок. Автомобилестроительные заводы зависят от множества поставщиков компонентов и сырья. Эффективное взаимодействие с поставщиками является залогом бесперебойного производственного процесса. ERP-системы обеспечивают прозрачность операций закупок, своевременность доставки комплектующих и минимизацию складских запасов. Примером применения ERP-систем в вопросах оптимизации поставок является компания Toyota известная своим принципом Just-in-time («точно вовремя»), который подразумевает поставку деталей непосредственно перед началом сборки. ERP-система помогает отслеживать состояние заказов, уровень запасов и оптимизирует график поставок, сокращая издержки на хранение и ускоряя производственный цикл [2].

Одним из главных преимуществ ERP-систем является повышение операционной эффективности предприятий. Использование инструментов аналитики позволяет снижать затраты на сырье и энергоресурсы, повышать производительность труда сотрудников. Компания Daimler AG применила SAP ERP-систему для повышения уровня производственной эффективности на заводах Mercedes-Benz. В результате были значительно улучшены показатели загрузки оборудования, сократились расходы на обслуживание техники и увеличилась общая рентабельность завода.

Контроль качества играет решающую роль в автомобильной отрасли. ERP-системы предоставляют средства мониторинга качества каждого этапа производства, начиная от поступления исходных материалов и заканчивая сборочным цехом. Возможность оперативно выявить дефекты снижает количество брака и повышает удовлетворенность клиентов продукцией [3]. Использование ERP-системы позволило компании BMW снизить количество дефектных изделий на 8%, что положительно сказалось на имидже бренда и прибыльности компании. На производстве использовался модуль контроля качества своей ERP-системы для отслеживания отклонений в параметрах готовой продукции.

Обсуждение результатов. Внедрение ERP-систем является ключевым фактором повышения конкурентоспособности автопроизводителей. Оно способствует росту производительности за счет интеграции планирования с производственными мощностями, ускорению проектирования благодаря связи с системами CAD/CAE, а также оптимизации затрат на закупки. Кроме того, интеграция CRM-модуля позволяет гибко реагировать на запросы рынка [1]. Однако внедрение сопряжено с высокими затратами и рисками, такими как киберугрозы из-за централизации данных. Перспективы развития связаны с интеграцией IoT для предиктивного обслуживания и применением машинного обучения для прогнозирования спроса и управления цепями поставок. Эти инновации обеспечат автокомпаниям новые бизнес-преимущества.

Заключение. Подводя итог, можно утверждать, что ERP-системы являются важнейшим инструментом повышения эффективности автомобильного производства. Они способствуют снижению расходов, увеличению производительности и улучшению качества продукции. Несмотря на существующие трудности и проблемы, выгоды от внедрения таких систем многократно превышают возможные риски и недостатки. Современному автомобилестроению невозможно представить без

комплексного подхода к управлению ресурсами предприятия, предоставляемого ERP-системами.

Список источников

1. Актуганова М. М. Обучение пользователей как способ повышения эффективности внедрения системы SAP ERP // Мавлютовские чтения. Уфа, 2021. С. 11-17. URL: <https://disk.yandex.ru/i/12KsNbnQj9Thsw>
2. Алябьева М. В., Соколов Н. Г. Экономический эффект от внедрения ERP-решений на платформе SAP при управлении бизнес-процессами производственных компаний // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 2019. № 4 (77). С. 302-311. URL: <http://vestnik.buker.ru/arh/full/2019-4.pdf#page=303>
3. Бабенчук С. П. Методологии внедрения ERP систем и управления проектами. Подходы к оценке эффективности внедрения ERP // Открытое образование. 2011. № 6. С. 51-59. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologii-vnedreniya-erp-sistem-i-upravleniya-proektami-podhody-k-otsenke-effektivnosti-vnedreniya-erp>

УДК 621.914

Задачи исследования процесса фрезерования

Фоменко Владислав Валерьевич¹ vladfomenko200@gmail.com

Левина Софья Максимовна² sofya.petukhova.01@mail.ru

¹Студент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

²Ассистент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

Аннотация. Общепринятыми критериями оценки процессов обработки металлов резанием являются точность размеров, класс шероховатости поверхности и производительность.

В качестве специфического требования при фрезеровании может рассматриваться стойкость режущего инструмента.

В представленной работе особое внимание обращено на физико-механические процессы, протекающие при взаимодействии зубьев фрезы с обрабатываемым материалом.

Поставлены следующие задачи исследований:

- влияние вибраций на износ зубьев по задней поверхности;
- влияние вибраций на стружкообразование;

- влияние вибраций на изменение геометрии зубьев и на класс шероховатости поверхности.

Определены вопросы развития контрольно-измерительной системы и создания на базе лабораторного фрезерного станка стенда для физического моделирования процессов обработки фрезерованием.

Ключевые слова: фрезерование, вибрации, физико-механические процессы, стойкость инструмента, точность обработки, шероховатость поверхности.

Objectives of the milling process research

Fomenko Vladislav Valerievich¹

vladfomenko200@gmail.com

Levina Sofya Maksimovna²

sofya.petukhova.01@mail.ru

¹Student, Department of AMiR, VISU, Russian Federation, Vladimir

²Assistant, Department of AMiR, VISU, Russian Federation, Vladimir

Abstract. The generally accepted criteria for evaluating metalworking processes by cutting are dimensional accuracy, surface roughness class, and productivity.

The durability of the cutting tool can be considered as a specific requirement for milling.

In the presented work, special attention is paid to the physico-mechanical processes that occur during the interaction of the teeth of the milling cutter with the processed material.

The following research objectives have been set:

- the effect of vibrations on tooth wear on the back surface;
- the effect of vibrations on chip formation;
- the effect of vibrations on changes in tooth geometry and on the surface roughness class.

The issues of developing a control and measuring system and creating a stand based on a laboratory milling machine for physical modeling of milling processing processes have been identified.

Keywords: milling, vibrations, physical and mechanical processes, tool durability, machining accuracy, surface roughness.

Введение. В научных исследованиях, связанных с разработкой систем управления процессами металлообработки резанием, включая и фрезерование, доминирующим является подход, основанный на устранении или уменьшении вибраций [1-3].

Вибрации, возникающие упругих силовых взаимодействий отдельных частей системы, связаны с влиянием большого числа факторов, среди которых особое значение имеет жесткость.

Жесткость станочной системы закладывается на этапе проектирования.

В процессе работы возникают вибрации как результат взаимодействия вибраций системы с вибрациями инструмента и обрабатываемой заготовки. В частности, вибрация возникает при последовательном врезании в заготовку следующих друг за другом зубьев фрезы.

Возникает необходимость измерения деформаций, анализа напряженно-деформированного состояния, поиска взаимосвязи между режимами обработки и износом зубьев, с одной стороны, и точностью размеров, с другой.

Методы и материалы. В исследованиях, связанных с автоматизацией процессов металлообработки, основное внимание уделяется управлению вибрациями, прежде всего при фрезеровании.

Вибрации, возникающие в процессе упругих силовых взаимодействий отдельных частей системы, связаны с влиянием большого числа факторов, среди которых особое значение имеет жесткость.

Жесткость станочной системы закладывается на этапе проектирования.

В контексте научной работы, для обработки и изготовления изделий, предложен фрезерный станок с ЧПУ (рис. 1). Указанный станок обладает габаритами 1030 x 1300 x 1700 мм, что позволяет справиться с довольно крупногабаритными деталями.



Рисунок 1. Фрезерный станок

Оборудование оснащено системой ЧПУ (Числовое Программное Управление), что обеспечивает точность и повторяемость процесса изготовления. Система ЧПУ позволяет программировать и управлять станком с помощью компьютерной программы, что значительно повышает эффективность работы и упрощает настройку и коррекцию процесса.

Результаты. Исследование измерения вибраций осуществляются следующим образом.

Система контроля вибраций использует пьезо-диск (латунная пластина с сегнетоэлектриком), который генерирует напряжение при сжатии. Контроллер интегрирует показания сенсора и передает их на ESP32. Микроконтроллер сравнивает текущий уровень вибрации с заданным пользователем порогом, отображая оба значения на дисплеях.

При превышении порога, на ЧПУ подается импульс, и после завершения текущего кадра управляющей программы скорость подачи снижается на 10%. Система управления станком подтверждает это ответным импульсом на микроконтроллер вибрации.

Таким образом, ESP32 «понимает», что сигнал дошел, и корректировка скорости совершена.

Далее цикл может повторяться до тех пор, пока вибрация не уменьшится до заданных пределов [4].

Зависимость износа зубьев от амплитуды и частоты вибраций определяется по методике, включающей измерение диаметра фрезы, а также изменение микротвердости в окрестности режущего лезвия.

Установленные зависимости параметров вибраций от износа фрезы необходимы для информационного обеспечения АСУ ТП фрезерования и автоматической замены фрезы в момент достижения предельно допустимой величины износа по задней поверхности.

При фрезеровании возникают динамические нагрузки и колебания режущего инструмента, вызванные несколькими факторами:

- Геометрия инструмента: число зубьев, угол наклона, форма зуба влияют на характер вибрации.
- Режимы резания: скорость подачи, глубина резания, частота вращения шпинделя также вызывают изменения в нагрузке и колебаниях.
- Материал заготовки: механические свойства материала определяют упругость системы и склонность к возникновению колебаний.

Типичные виды вибраций, влияющие на образование стружки:

- Самовозбуждаемые вибрации («автоколебания»), возникающие вследствие взаимодействия силы резания и жесткости технологической системы.

- Параметрические вибрации, обусловленные изменением геометрических параметров инструмента или заготовки.

- Внешне возбуждаемые вибрации, вызываемые работой оборудования и окружающей среды.

Эти вибрации приводят к изменению толщины срезаемого слоя и характера формирования стружки.

Различают три основных типа стружкообразования:

- Непрерывная стружка: гладкая, однородная структура, образуется при стабильных условиях обработки и минимальных вибрациях.

- Элементарная стружка: состоит из отдельных элементов, возникает при высоких температурах и больших силах резания.

- Дискретная стружка: характеризуется образованием коротких сегментов, наблюдается при нестабильных режимах резания и сильных вибрациях.

Таким образом, влияние вибраций на стружкообразование является значимым фактором, определяющим характеристики обрабатываемой поверхности и долговечность инструмента.

Переменными параметрами при выполнении исследований являются скорость резания, подача и толщина снимаемого слоя.

Контролируемыми на выходе объекта управления являются амплитуда и частота вибраций, вид стружки и точность размера.

Параметры вибраций используются в целях корректировки управляющих воздействий на процесс фрезерования.

Процесс фрезерования сопровождается воздействием механических нагрузок и возникающих вибраций, которые оказывают значительное влияние на точность изготовления деталей и состояние рабочих поверхностей инструмента.

Одним из важнейших факторов, характеризующих качество обработки, является шероховатость поверхности. Вибрации существенно влияют на этот показатель следующим образом:

- Нестабильность удаления металла: Колебательные движения инструмента нарушают равномерность снятия материала, создавая неравномерность размеров удалённых слоёв и повышая шероховатость поверхности.

- Образование дефектов: Микроскопические повреждения поверхности (царапины, риски, неровности) формируются под влиянием повышенной динамики и нарушений режима резания.

- Воздействие на механику срезания: Увеличенная интенсивность вибраций нарушает оптимальные условия протекания процесса срезания стружки, формируя дополнительные дефекты поверхности.

Высокая шероховатость снижает качество изделия, ухудшает эстетический вид и функциональные показатели детали.

Обсуждение результатов. Переменными факторами при выполнении исследований являются типы фрез, марки быстрорежущих сталей и режимы обработки.

В процессе обработки и анализа результатов исследований формируются уточненные представления о процессах физико-механического взаимодействия зубьев фрезы с обрабатываемым материалом и знания, необходимые для проектирования систем автоматического управления [5].

Заключение. В процессе предварительных испытаний и обработки результатов экспериментов установлено, что для создания на базе имеющегося оборудования стенда для физического моделирования и исследования процесса фрезерования необходимо дополнительное оборудование: профилограф-профилометр, микротвердомер, оптический микроскоп $\times 2000$, эталоны шероховатости поверхности.

Для достижения точности измерений необходимо метрологическое обеспечение.

Для достижения новых результатов необходимо использовать известные и разрабатывать оригинальные методики исследований.

Список источников

1. Диагностика технологической системы «станок–приспособление–инструмент–деталь»: учебное пособие / сост.: А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес ; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 144 с.

2. Пат. 2500516 Российская Федерация, МПК В23Q 3/02. Способ снижения вибраций нежесткой заготовки, обрабатываемой фрезерованием/ Болсуновский С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Леонтьев А.Е., Чернышев Л.Л.; Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный

аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского" (ФГУП "ЦАГИ").-№ 2012133802/02; заявл.08.08.2012; опубл. 10.12.2013.

3. Орнис Н.М. Основы механической обработки металлов. - Москва: Машиностроение, 1968 - с.230.

4. Петухова С.М., Денисов М.С. Разработка адаптивной системы управления с эталонной моделью процессом фрезерования. Междисциплинарные исследования науки и техники: сборник статей XV Международной научно-практической конференции. – Саратов: НОП «Цифровая наука». – 2022.

5. Раменская У.В., Филиппов Ю.А., Амельченко Н.А. Механизм генерирования и распространения вибрации в технологических машинах. - Сибирский аэрокосмический журнал. - Технологические процессы и материалы. № 1 (41)- 2012.-132-138 с.

УДК 681.5

Разработка системы управления для МЛПД, с обратной связью по температуре на границе отливка-форма

Денисов Максим Сергеевич¹

denisovmaxim90@mail.ru

Давыдов Кирилл Евгеньевич¹

k.davidov0@yandex.ru

Леневский Геннадий Сергеевич²

emos@rambler.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

²Белорусско-российский государственный университет Могилёв, Белорусия

Аннотация. В данной работе рассмотрена система управления машиной литья под давлением, с обратной связью по температуре измеряемой на расстоянии 3-5 мм от формообразующей части формы направленная на решение задачи управления формированием заданных свойств отливок. Предложен алгоритм управления системы управления машиной литья под давлением, структурная схема системы управления и дискретная формула уравнений, состоящая из уравнения ПИД-регулятора и уравнения изменения давления, данная формула необходима для выдачи управляющих воздействий на регуляторы давления. Одной из ключевых особенностей системы управления является способность накопления данных о процессе и их оптимизации для последующего использования.

Ключевые слова: Машины литья под давлением, система управления по температуре, литье под давлением, заданные физико-механические свойства.

Development of a control system for MLPD, with temperature feedback at the casting-mold boundary

Denisov Maxim Sergeevich¹

denisovmaxim90@mail.ru

Davydov Kirill Evgenievich¹

k.davidov0@yandex.ru

Lenevsky Gennady Sergeevich²

emos@rambler.ru

¹VLSU, Vladimir, Russia

²BELORUSSIAN-Russian State University Mogilev, Belarus

Abstract: In this work, the control system of the injection molding machine, with feedback on the temperature measured at a distance of 3-5 mm from the forming part of the mold, is considered. This system is aimed at solving the problem of controlling the formation of the specified properties of the castings. The paper proposes an algorithm for controlling the injection molding machine, a block diagram of the control system, and a discrete equation formula consisting of a PID controller equation and a pressure change equation. This formula is necessary for issuing control actions to the pressure controllers. One of the key features of the control system is its ability to accumulate process data and optimize it for future use.

Keywords: Injection molding machines, temperature control system, injection molding, specified physical and mechanical properties.

Введение. Методом литья под давлением получают детали ответственного назначения такие, как корпуса машин, лопадки и корпуса турбин, диски для машин и др. И основной задачей в таком процессе является обеспечение качества выпускаемой продукции и возможности получения отливок с заданными физико-механическими свойствами.

В настоящее время существующие системы управления машинами литья под давлением не имеют возможности целенаправленно управлять формированием свойств выпускаемой продукции, они работают по жесткой заранее заданной программе. Это ограничивает предприятия избежать производственных и финансовых потерь.

Материалы и методы. Опираясь на теоретические исследования [1] и полученных ранее экспериментальные данные [2] можно утверждать, что в процессе литья под высоким давлением, такие параметры процесса, как

давление и температура охлаждения металла являются коррелирующими параметрами. Также известно, что тепловые процессы происходящие в процессе наложения давления напрямую влияют на выходные свойства продукции: твердость; предел прочности; плотность; относительное удлинение при разрыве. Таким образом можно утверждать, что, контролируя процесс кристаллизации металла можно управлять физико-механическими свойствами продукции.

Для управления машиной литья под давлением и процессом формирования заданных свойств отливки предложен алгоритм системы управления представленный на рисунке 1.

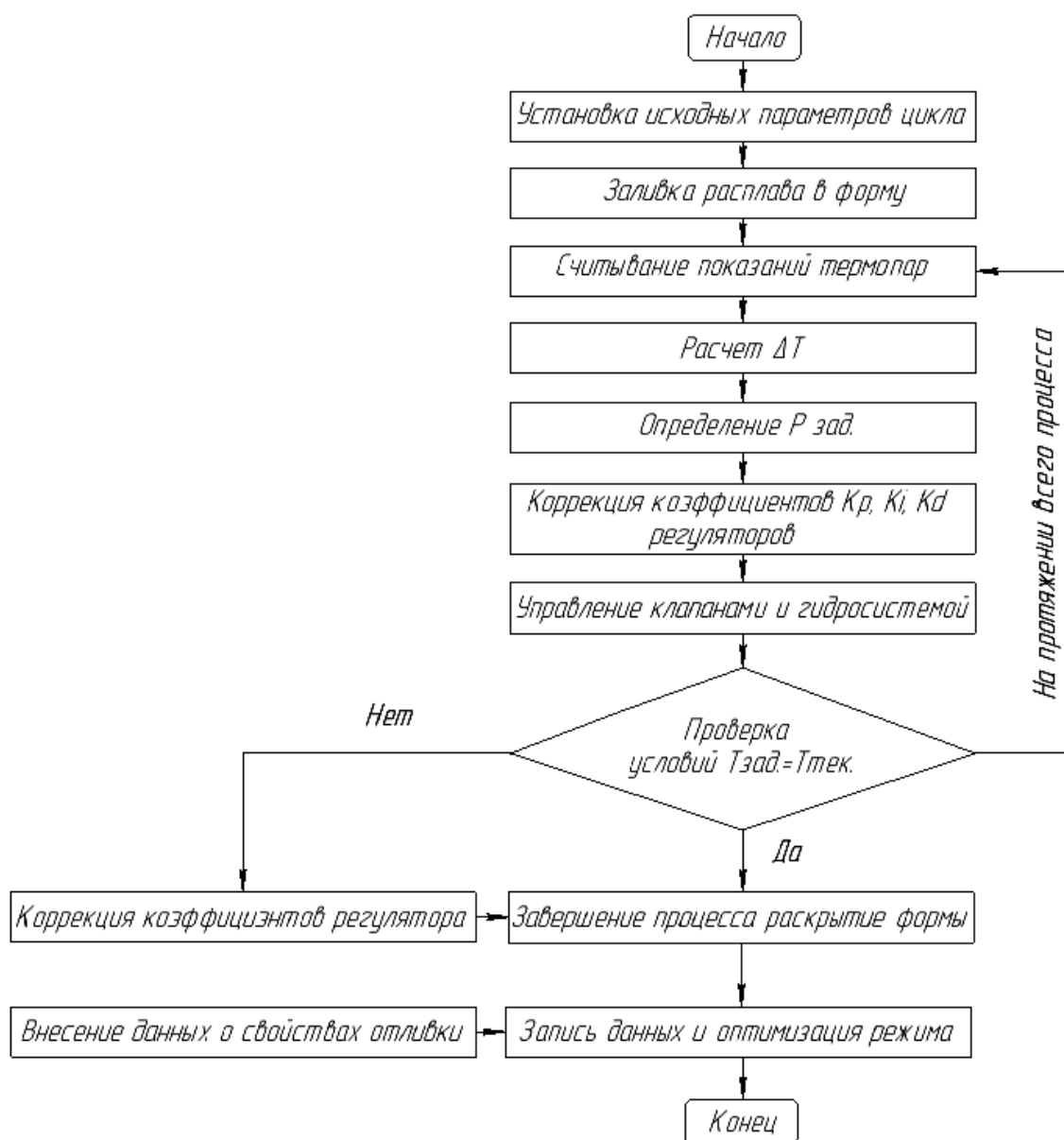


Рисунок 1. Алгоритм системы управления машиной литья под давлением.

Главным принципом работы системы управления машиной литья под давлением заключается в коррекции управляющего воздействия на кристаллизующийся металл в режиме реального времени на основе вычислений ПЛК, после завершения процесса управляющая программа заносит данные в базу данных. Таким образом, база данных постоянно обновляется и содержит полученные данные о условиях проведения плавки [3], режимы наложения давления и физико-механических свойствах отливок, полученных по соответствующему режиму наложения давления.

Была разработана структурная схема системы управления, представленная на рисунке 2, где в качестве объекта управления выступает процесс наложения давления на кристаллизующийся металл, а в качестве параметра для генерации обратной связи выступает температура, измеряемая термопарами, расположенных на расстоянии 3-5 мм от формообразующей полости формы.

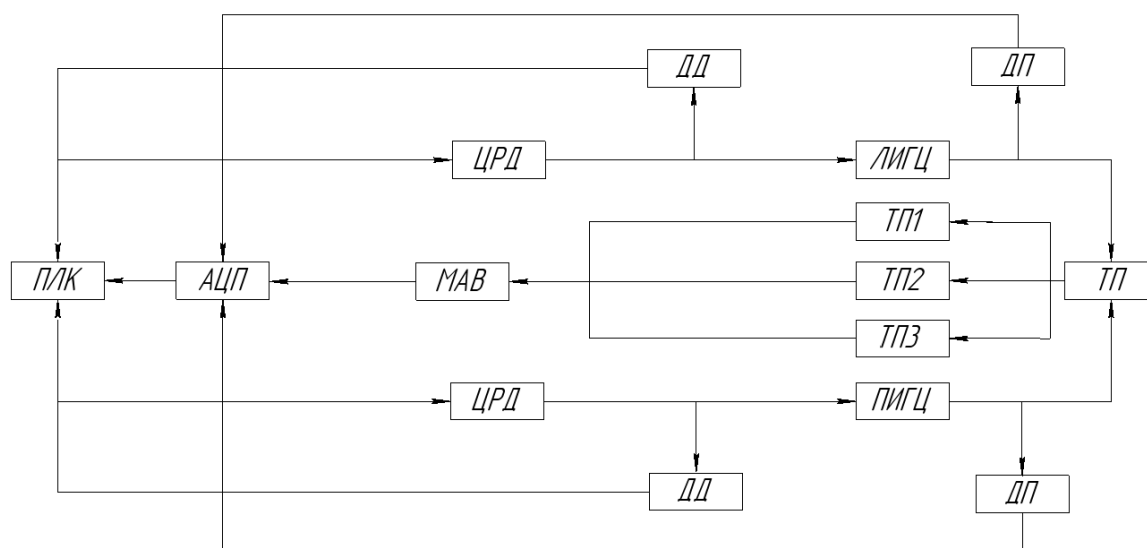


Рисунок 2. Структурная схема системы управления машиной литья под давлением, где ПЛК – программируемый логический контроллер; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; МАВ – модуль аналогового ввода; ЦРД – цифровой регулятор давления; ДД – датчик давления; ЛИГЦ и ПИГЦ – правый и левый гидроцилиндры; ТП1, ТП2 и ТП3 – датчики температуры; ДП – датчик положения; ТП – технологический процесс (наложения давления на металл).

Все измерения поступают на ПЛК, где обрабатывается и просчитывается необходимое давление на следующем такте вычислений (такт – временной отрезок обозначающий время за которое ПЛК производит просчет), после подсчета выдается управляющее воздействие на регуляторы

давления для увеличения или уменьшения проходного сечения регуляторов давления.

Для просчета поддержания необходимого давления в режиме реального времени была разработана дискретная формула уравнений (1) для загрузки в ПЛК.

$$\begin{cases} P_{k+1}=P_k+\Delta t[K_P(u_k-u_0)-K_L P_k], \\ u_k=K_{P,k}e_{P,k}+K_{I,k} \sum e_{p,i}\Delta t+K_{D,k} \frac{e_{P,k}-e_{P,k-1}}{\Delta t}. \end{cases} \quad (1)$$

Данная формула состоит из двух уравнений:

Первое $u_k=K_{P,k}e_{P,k}+K_{I,k} \sum e_{p,i}\Delta t+K_{D,k} \frac{e_{P,k}-e_{P,k-1}}{\Delta t}$ – уравнение ПИД-регулятора где, u_k – выходной сигнал ПИД-регулятора на шаге k , $K_{P,k}$ – текущий пропорциональный коэффициент ПИД-регулятора на шаге k , $e_{P,k}$ – ошибка регулятора по давлению на шаге k , $K_{I,k}$ – текущий интегральный коэффициент ПИД-регулятора на шаге k , $\sum e_{p,i}\Delta t$ – сумма всех предыдущих ошибок, умноженная на временной шаг, $K_{D,k}$ – текущий дифференциальный коэффициент ПИД-регулятора на шаге k , $\frac{e_{P,k}-e_{P,k-1}}{\Delta t}$ – скорость изменения ошибки.

Второе $P_{k+1}=P_k+\Delta t[K_P(u_k-u_0)-K_L P_k]$ – уравнение изменения давления, где, P_{k+1} – давление на следующем временном шаге, P_k – давление на текущем временном шаге, Δt временной шаг дискретизации (интервал между вычислениями ПЛК), K_P – коэффициент усиления, u_k – управляющее воздействие, u_0 – заданное управляющее воздействие, K_L – коэффициент потерь (утечки).

Результаты. В проведенной работе была предложена автоматизированная система управления машиной литья под давлением, с обратной связью по температуре. Предложен алгоритм управления, представленный на рисунке 1, структурная схема, представленная на рисунке 2, в которой объектом управления выступает процесс наложения давления на кристаллизующийся металл, обратной связью служит температура, измеряемая датчиками температуры на расстоянии 3-5 мм от формообразующей части формы, исполнительными устройствами являются цифровые регуляторы давления. Для реализации данной системы на программном уровне предложена дискретная формула уравнений (1).

Обсуждение. Предложенная система управления машиной литья под давлением представляет собой движение вперед для автоматизированных систем управления машинами литья под давлением. Использование

температуры, измеряемой на расстоянии 3-5 мм от формообразующей части формы обосновано тем, что влиянии давления на процесс кристаллизации металла на прямую влияет на формирование физико-механических свойств металлопродукции.

Заключение. Внедрение данной системы управления в машины литья под давлением позволит перейти от пассивного контроля к активному управлению качеством продукции при ее изготовлении [4], что является развивающимся направлением в технологиях литья под давлением.

Список источников

1. Sterbentz D., Myint Ph., Delplanque J.-P., Hao Yue, Brown J., Stoltzfus B., Belof J. Model for the Solid-Liquid Interfacial Free Energy at High Pressures. *Langmuir*. 2022, P. 12.
2. Коростелев В.Ф., Денисов М.С., Давыдов К.Е. Автоматизация управления кристаллизацией под высоким давлением. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023г. Вып. №4. С. 92-97.
 1. Денисов М.С., Петрешин Д.И, Чеботарев П.А., Руязов С.А. Разработка нейросетевой модели для прогнозирования механических свойств алюминиевых сплавов при литье с кристаллизацией под давлением // Автоматизация. Современные технологии. 2023. - Т. 77, № 10. - С. 439-446.
3. Гун Г.С. Развитие теории обработки металлов давлением (научный обзор). Часть 2 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2015. Т. 15. Вып. 3. С. 116.

Разработка автоматизированной системы вакуумирования пресс-форм для создания деталей из алюминиевых сплавов в процессе литья под давлением

Чеботарев Петр Александрович¹

chebotarev@vlsu.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Рассмотрено значение систем вакуумирования в процессе литья под давлением, основные принципы работы вакуумных систем, а также влияние вакуумирования пресс-форм на конечные свойства производимых отливок. На основе ранее проведенных экспериментов составлены требования к характеристикам автоматизированной вакуумной системы. Подобраны основные комплектующие требуемые для создания автоматизированной системы вакуумирования.

Ключевые слова: Система вакуумирования, автоматизация, литье под давлением, элементы автоматики.

Chebotarev Petr Aleksandrovich¹

chebotarev@vlsu.ru

¹VLSU, Vladimir, Russia

Abstract. The importance of vacuuming systems in the injection molding process, the basic principles of operation of vacuum systems, and the effect of vacuuming molds on the final properties of the castings are considered. Based on previously conducted experiments, the requirements for the characteristics of an automated vacuum system are formulated. The main components required for the creation of an automated vacuum system are selected.

Keywords: Vacuum system, automation, injection molding, automation elements.

Введение. Автоматизированные системы вакуумирования пресс-форм, предназначены для устранения газов и воздуха из полости пресс-формы в момент заливки расплава металла, а также для достижения разряженного давления в полости пресс-формы, данная вспомогательная операция позволяет повысить качество производимой продукции, благодаря устранению ряда проблем, которые возникают в процессе литья под давлением [1-2].

Автоматизированная система вакуумирования может быть подключена как к отдельной машине литья под давлением, так и к полноценным комплексам для литья металлических сплавов.

С точки зрения принципа работы, автоматизированные вакуумные системы откачивают воздух из полости пресс-формы понижая давление разряжения за счет вакуумного насоса, в зависимости от требований к технологическому процессу, быстродействию системы вакуумирования и выполнению рабочих циклов количество насосов может варьироваться. Обычно откачка газов и воздуха из полости формы осуществляется в течение одной-двух секунд, после чего металлический сплав попадает в форму и опрессовывается плунжерами [3].

Методы и материалы. Подбор элементов автоматики, датчиков и исполнительных устройств осуществляется на основе данных, полученных в результате экспериментов опытного образца системы вакуумирования [4-5] и общеизвестных теоретических обоснований.

Можно выделить три основных вида систем вакуумирования пресс-форм: с вакуумным насосом, позволяет вакуумировать пресс-форму и создавать вакуумную среду в общем; с клапанами и вакуумными линиями, позволяют создавать герметичную вакуумную среду, при этом за счет клапанов регулируются потоки газов и воздуха; с системами управления, позволяют контролировать и устанавливать необходимый уровень давления разряжения в пресс-форме с высокой точностью в режиме реального времени, поддерживают требуемый уровень давления разряжения в пресс-форме на всех возможных этапах формования отливки.

Системы вакуумирования в процессе литья под давлением используются в качестве вспомогательного оборудования, за счет использования данных систем можно добиться следующих эффектов:

- устранение воздушных карманов, позволяет добиться повышения прочности и долговечности деталей за счет обеспечения однородной структуры производимых отливок;

- улучшение качества отделки поверхности отливок - вакуумирование позволяет избежать излишнего захвата воздуха расплавом металла, как следствие устранить поверхностные дефекты в виде пористости, пузырей и грубых текстур;

- повышение эффективности процесса заливки металлического расплава, при пониженном разряжении в пресс-форме расплав поступает быстрее и равномернее.

- снижение процента бракованной продукции – вакуумирование при литье под давлением позволяет избежать многих дефектов, появляющихся при захвате металлическим расплавом в процессе заливки, как следствие снижается общий процент бракованной продукции и отходов.

Результаты. Рассмотрим требования к разрабатываемой автоматизированной системе вакуумирования, предназначенной для реализации технологии изготовления тонкостенных деталей из алюминия, посредством литья под высоким давлением с вакуумированием.

Таблица 1

Требования к автоматизированной вакуумной системе

Спецификация	Значение
Мощность вакуумной системы, кВт	1,85
Предельное остаточное давлением, мбар	2
Максимальная скорость откачки, м ³ /час	15
Объем ресивера, л	200
Крутящий момент поворотной заслонки, Нм	10
Быстродействие системы управления, мс	50
Габаритные размеры, см	180x110x40
Количество насосов, шт	2
Вес, кг	60
Присоединительный размер трубопровода	G1 1/4"

В качестве задела имеется разработанный шкаф управления, к которому были закуплены и смонтированы все необходимые комплектующие, среди которых (рис. 1): контроллер ПЛК 200 от фирмы Овен, предназначенный для систем автоматизации среднего размера; блок питания Mean Well NDR 240-48 мощностью в 0,24 кВт; контакторы IEK и EKF, предназначенные для запуска насосов.



Рисунок 1. Основные элементы автоматики для шкафа управления автоматизированной системы вакуумирования.

Для контроля параметров давления разряжения и управления потоками газов были подобраны вакуумметр ДМ5001 и затвор дисковый поворотный DN WBV3131E-2W-W-H с пневмоприводом PA-DA-052, и пластинчато-роторный вакуумный насос Elmo Rietschle VGD10-0130, контрольно-измерительный прибор и исполнительные устройства представлены на рисунке 2.



Рисунок 2. Элементы контроля и управления автоматизированной вакуумной системой.

На рисунке 3 представлена схема внешнего вида автоматизированной системы вакуумирования. В рабочей камере 1 нагнетается давление разряжения, вакуумметр 2 отображает значение давления разряжения в рабочей камере, а также передает полученное значение в шкаф управления, в шкафу управления 3 находятся элементы автоматики с помощью которых принимается информация о процессе на ПК оператора и задаются воздействия на управляющие устройства, с помощью вакуумного насоса 4 нагнетается давление разряжения, к отверстию 5 присоединяется трубопровод, ведущий к рабочей зоне.

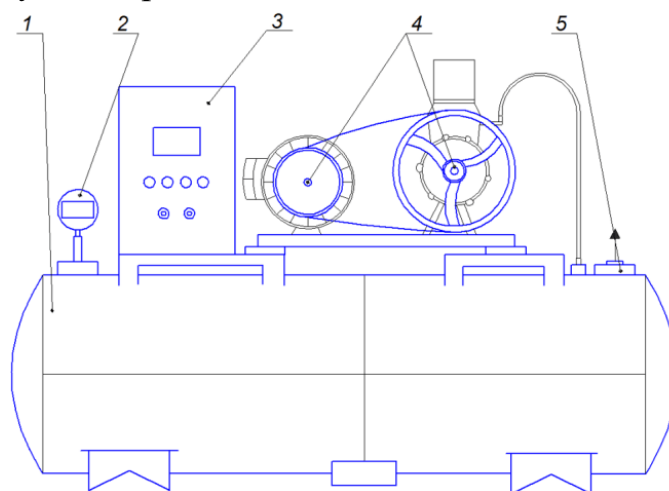


Рисунок 3. Схема внешнего вида автоматизированной системы вакуумирования.

Заключение. На данный момент закуплены средства автоматики и контрольно-измерительный прибор, в дальнейшем планируется приобретение дискового поворотного затвора, который заменит электромагнитный клапан, установленный в опытном образце, а также вакуумный насос, требуемый для повышения производительности вакуумной системы. Также планируется обновление некоторых элементов системы вакуумирования, таких как трубопровод, вакуумная емкость и так далее, с целью улучшения внешнего вида разрабатываемой системы вакуумирования, предназначенной для использования в процессе литья под давлением.

Список источников

1. К. Мушна Вакуумный формовочный процесс - производство высококачественных отливок // Литьё и металлургия. 2004. №1 (29).
2. Моисеев Д. О., Леушин И. О. Развитие «Кислородного» процесса литья под давлением алюминиевых сплавов // ТиТМП. 2011. №11.
3. Михальцов А. М., Пивоварчик А. А. Вентиляция пресс-форм при литье под давлением // Литьё и металлургия. 2019. №1.
4. Денисов, М. С. Управление процессом кристаллизации алюминиевых сплавов в пространстве состояний / М. С. Денисов, Д. И. Петрешин, П. А. Чеботарев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2024. – № S4. – С. 83-88.
5. Чеботарев, П. А. Разработка автоматизированной системы управления для вакуумного оборудования / П. А. Чеботарев, И. В. Румянцев // Цифровое общество: научные инициативы и новые вызовы : Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, Москва, 22 декабря 2023 года. – Москва: Центр развития образования и науки, ООО "Издательство АЛЕФ", 2023. – С. 235-242.

УДК 520.607

Разработка экспериментального стенда «Тележка – маятник» с применением векторного регулирования СДПМ

Воробьев Владислав Сергеевич¹

vorobev.vs@misis.ru

SPIN-код: 7999-5600

Петров Владислав Анатольевич¹

petrov.va@misis.ru

SPIN-код: 3080-6007

Емельянов Иван Александрович¹

¹ СТИ НИТУ «МИСИС»

Аннотация. В исследовании предлагается схема экспериментального стенда с применением векторного регулирования СДПМ для последующей апробации методов снижения колебаний в системе «тележка – маятник». В ходе проведения натурных испытаний получены графики углового перемещения, угловой скорости и силы тока.

Ключевые слова: экспериментальный стенд, СДПМ, векторное управление

Development of an experimental stand "Trolley – pendulum" with the use of vector control of the PMSM

Vorobyev Vladislav Sergeevich¹

vorobev.vs@misis.ru

SPIN-код: 7999-5600

Petrov Vladislav Anatolyevich¹

petrov.va@misis.ru

SPIN-код: 3080-6007

Yemelyanov Ivan Alexandrovich¹

¹ STI NUST MISIS

Abstract. The study proposes a scheme of an experimental stand using PMSM vector control for the subsequent testing of vibration reduction methods in the "trolley – pendulum" system. During field tests, graphs of angular displacement, angular velocity, and current strength were obtained.

Keywords: experimental stand, PMSM, vector control

Введение. В современной промышленности мостовые краны выступают в роли стратегически важных элементов инфраструктуры. Эти грузоподъемные механизмы обеспечивают не просто перемещение тяжелых грузов, но и бесперебойность и эффективность технологических операций.

Эффективное использование мостовых кранов невозможно без применения современных систем управления, обеспечивающих точность, надежность и безопасность операций. Традиционные системы управления, основанные на релейно-контакторных схемах или простых частотных преобразователях, зачастую не соответствуют современным требованиям к производительности и энергоэффективности. В связи с этим, все большее распространение получают системы векторного управления, особенно в связке с синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ). Данные двигатели, обладая высоким КПД, компактными размерами и превосходными динамическими характеристиками, идеально подходят для применения в мостовых кранах, где требуется точное и плавное управление перемещением груза [1].

Векторное управление СДПМ позволяет независимо регулировать момент и поток двигателя, что обеспечивает прецизионное управление скоростью и положением [2]. Это особенно важно при выполнении сложных операций, требующих высокой точности, таких как позиционирование груза в заданном месте или синхронизированное перемещение нескольких кранов.

В рамках данной работы ставится задача разработки научного стенда, имитирующего работу мостового крана. Передвижение тележки предлагается реализовать с применением векторного регулирования СДПМ. Данный стенд послужит полигоном для тестирования алгоритмов векторного управления СДПМ в различных режимах работы. Такой подход позволит не только выявить потенциальные недостатки разработанных алгоритмов управления, но и оптимизировать их параметры с учетом специфики работы мостовых кранов [3].

Разрабатываемый стенд.

Одной из основных частей будущего стенда является система перемещения тележки, с помощью которой в последующем будут реализованы алгоритмы снижения колебаний груза. В работе предлагается применить систему управления, реализованную в следующем виде (рисунок 1):

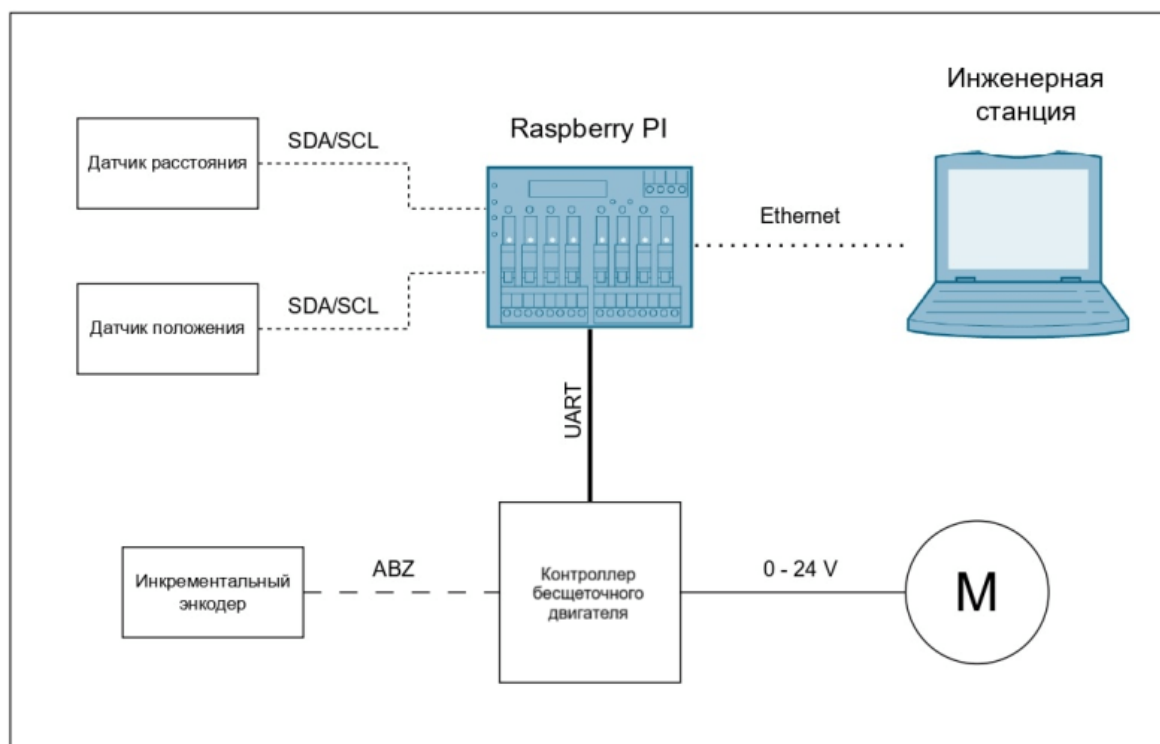


Рисунок 3. Схема КТС.

Инженерная станции по протоколу RJ-45 соединяется с микрокомпьютером RaspberryPi, который осуществляет сбор данных по протоколу I²C с дальномера, установленного на тележке, и датчика положения груза. В результате чего выдает задание на контроллер электродвигателя по протоколу связи UART. Он в свою очередь собирает данные с энкодера, подключенного по ABZ, и на основе входного задания выдает необходимое напряжение.

В контроллере электродвигателя предлагается использовать векторное управление, которое будет реализовано по схеме, приведенной на рисунке 2.

На входе системы находится контроллер положения/скорости, который, используя ПИ-регулятор, формирует требуемый момент двигателя на основе заданного значения положения или скорости и фактических значений, полученных от энкодера. Далее, модель двигателя определяет опорные значения токов статора в системе координат d-q (I_d , I_q), вращающейся синхронно с магнитным полем ротора. Ток I_d отвечает за создание магнитного потока, а ток I_q – за создание момента двигателя. Опорные значения токов I_d и I_q поступают на контроллер тока, который сравнивает их с фактическими значениями токов, измеренными в двигателе,

и на основе этой разницы формирует управляющие напряжения V_d и V_q , также в системе координат d-q. Далее происходит преобразование координат d-q в α - β , необходимое для последующей работы с широтно-импульсной модуляцией. Этот блок конвертирует напряжения V_d и V_q в стационарную систему координат α - β . Широтно-импульсная модуляция генерирует сигналы управления для инвертора на основе напряжений V_α и V_β . Инвертор, получая сигналы управления от SVM, преобразует постоянное напряжение в трехфазное переменное напряжение (V_a , V_b , V_c), которое подается непосредственно на обмотки двигателя. Датчики тока измеряют фазные токи статора (I_a , I_b , I_c), которые затем преобразуются для обратной связи в системе управления сначала из трехфазной системы координат A,B,C в систему координат α - β , а затем в систему координат d-q. Наблюдатель на основе измеренных токов и напряжений, а также информации от энкодера, оценивает текущую скорость (ω) и угол поворота (θ) ротора, обеспечивая обратную связь для контроллера положения/скорости.

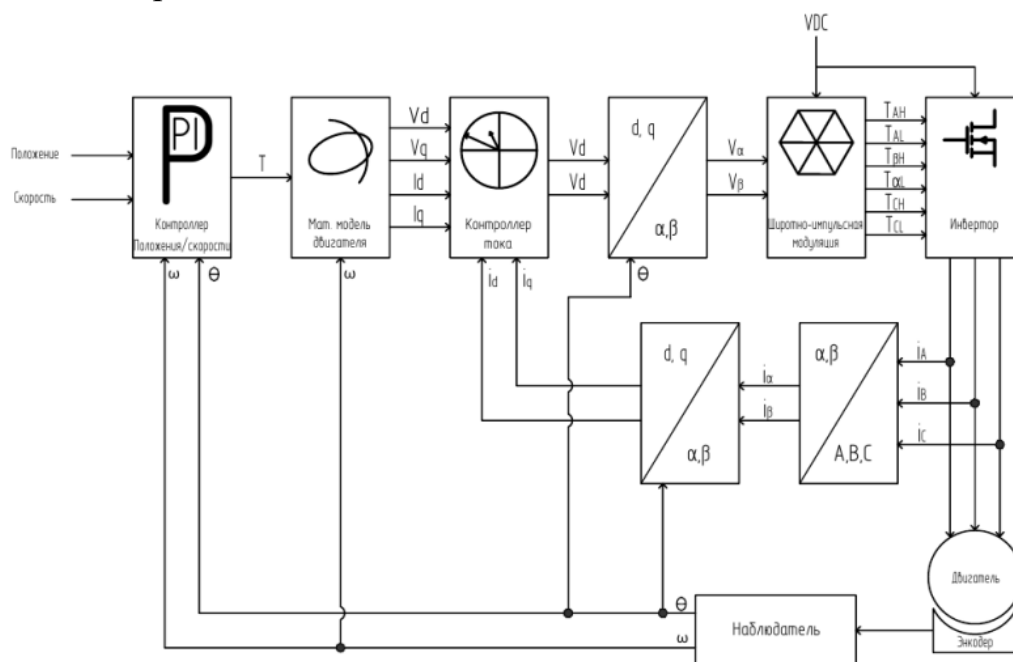


Рисунок 2. Схема векторного управления СДПМ.

Физический эксперимент.

При проведении эксперимента на систему управления СДПМ подавалась уставка по угловому перемещению равная 100 оборотам. Система управления отработала указанное задание без перерегулирования и статической ошибки за 3,25 секунды (рисунок 3).

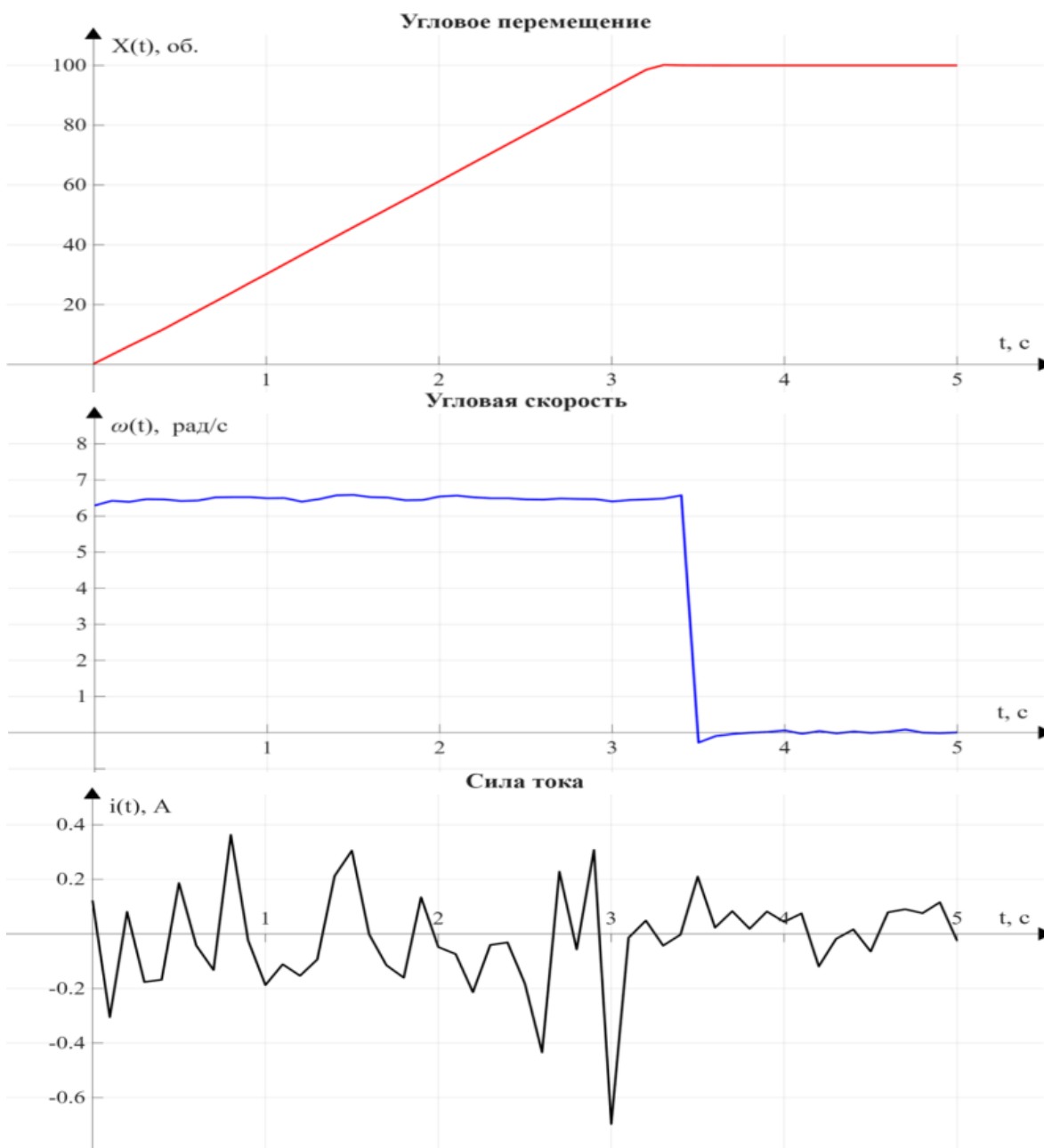


Рисунок 3. $X(t)$ – количество оборотов совершаемое СДПМ,
 $\omega(t)$ – угловая скорость на валу двигателя,
 $i(t)$ – сила тока прикладываемая к двигателю СДПМ.

Заключение. В исследовании разработан стенд, реализующий векторное регулирование СДПМ. Натурные эксперименты позволяют говорить о возможности последующего использования при решении задач снижения колебаний в системе «тележка – маятник».

Список источников

1. Иванов А.А., Петров Б.Б., Сидоров В.В. Применение синхронных двигателей с постоянными магнитами в подъемных механизмах // Вестник машиностроения. – 2020. – №. 5.
2. Петров П.К., Смирнов И.С. Анализ рисков при внедрении автоматизированных систем управления в крановое оборудование // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – №. 10.
3. Смирнов Д.Д. Методика создания испытательного стенда для исследования систем управления мостовыми кранами // Автоматизация в промышленности. – 2023. – №. 7.
4. Шаркович Р. П. Анализ векторного управления синхронных двигателей с постоянными магнитами. – 2015.

УДК 62-503.57

САУ с дополнительной составляющей в управляющем воздействии

Кобзев Александр Архипович¹

kobzev42@mail.ru

Филимонов Иван Дмитриевич¹

vanfilz@mail.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Рассмотрен подход к построению систем автоматического управления (САУ) с дополнительной составляющей в управляющем воздействии. Показана базовая структура с контуром введения дополнительной автономной составляющей. Отмечены особенности построения и рационального применения. Приведены основы математического описания САУ с дополнительной автономной составляющей и даны сведения о результатах моделирования. Сделано заключение о расширении исследования по данному направлению

Ключевые слова: система автоматического управления, дополнительное управление, передаточная функция, возмущение, ошибка.

Automatic control system with additional component in control action

Kobzev Aleksander Arshipovich¹

kobzev42@mail.ru

Filimonov Ivan Dmitrievich¹

vanfilz@mail.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. The article discusses an approach to building automatic control systems (ACS) with an additional component in the control action. It shows a basic structure with a loop for introducing an additional autonomous component. The article highlights the features of building and using ACS with an additional autonomous component. It provides a mathematical description of ACS with an additional autonomous component and presents the results of modeling. The article concludes with a recommendation for further research in this area.

Keywords: automatic control systems, supplementary control, transfer function, outrage, error.

Введение. Одно из основных требований к САУ технологическими процессами производства - повышение точности его выполнения. Особенно актуален этот вопрос в условиях широкого изменения возмущений и дрейфа параметров САУ. Наряду с многими классическими методами на основе адаптивных систем [1,2] большими возможностями для повышения точности развиваются методы на основе формирования дополнительного управления вне основного контура САУ. По некоторым классификациям обозначены, как САУ с сигнальной настройкой. Среди них полиномиальное управление предусматривающее введение полиномиального регулятора перед основным контуром [3]. Здесь также могут быть использованы методы теории инвариантности, реализация которых имеет свои особенности.

Материалы и методы. Один из возможных подходов к построению структуры САУ с формированием дополнительного управления на основе модифицированной третьей и четвертой форм инвариантности [4, 5]. Это управление трактуется также как комплементарное управление [5].

Рассмотрим этот вопрос в следующей постановке. Имеется система с номинальным управлением $g_0(p)$ и возмущением $f(f, g)$ на выходе. Причем возмущение взаимосвязано с положением регулируемой координаты. Необходимо парировать ошибку, обусловленную нерасчетным возмущением $\Delta f(p)$. Вводим дополнительное управление $\Delta g(p)$ для компенсации составляющей ошибки $\Delta \delta(p)$ от нерасчетного возмущения

$\Delta f(p)$. Представим суммарное возмущение в виде двух составляющих – расчетного возмущения $f_0(p)$, соответствующего воздействию выходной координаты $x_0(p)$, и дополнительного возмущения $\Delta f(p)$. Тогда, имеем функции управления и возмущения в виде

$$g_1(p) = g_0(p) + \Delta g(p), \quad f_1(p) = f_0(p) + \Delta f(p).$$

Парируем нерасчетное возмущение введением на вход системы дополнительной составляющей

$$\Delta g(p) = F[\Delta f(p)]$$

Выполнение условий модифицированной четвертой формы инвариантности для компенсации $\Delta f(p)$ возможно в следующих вариантах [4]:

- 1) формированием дополнительного полинома $B_1(p)$ в правой части ДУ;
- 2) формированием дополнительного управления $\Delta g(p)$ при выбранном $B_1(p)$;
- 3) выбором произведения $B_1(p) \Delta g(p)$.

Наиболее простой вариант технической реализации – введение дополнительного управления.

Результаты. Структурная схема САУ с дополнительным управлением приведена на рисунке 1 [5]. На схеме обозначено: g_0 , Δg , f_0 , Δf – управляющее номинальное и дополнительное, возмущающее номинальное и нерасчетное воздействия соответственно; X , X_0 – непосредственно регулируемая координата и внешнего координатного взаимодействия соответственно; δ , δ_{f0} , $\delta_{\Delta f}$ – ошибки соответственно: суммарная, при номинальном и дополнительном возмущениях. Передаточные функции: $W_{yv}(p)$ -устройства формирования управляющего воздействия, $W_1(p)$ – прямого контура, $V(p)$ – по возмущению, $W_0(p)$ $F(p)$ – порождающие внешние нерасчетные возмущения, $M(p)$ - модели, $K(p)$ – контура ввода дополнительного управления.



Особенности структуры САУ:

- Для анализа настоящей структуры рассмотрим следующий подход. Используем базовое описание на основе аппарата передаточных функций

$$W(p) = \frac{A(p)}{B(p)}; \quad V(p) = \frac{C(p)}{D(p)}.$$

где:

$$[1+W(p)]x(p)=W(p)[g(p)+\Delta g(p)]+V(p)[f(p)+\Delta f(p)].$$
$$[1+W(p)]x(p)=W(p)[g(p)+K\Delta\delta_w(p)]+V(p)[f(p)+\Delta f(p)].$$

170

$$\Delta\delta_m(p) = \frac{B(p)C(p)}{H(p)}\Delta f(p).$$

где $H(p) = A(p) + B(p)$.

Устойчивость системы определяется на основе анализа характеристического уравнения. Оно не изменился при введении контура адаптации дополнительного управляющего воздействия $g(p)$. Поэтому в данном случае при анализе динамики следует рассматривать вынужденное движение с возмущением на выходе $[f(p) + \Delta f(p)]$ с учетом введения дополнительной составляющей $K(p)\Delta\delta_m(p)$ в управляющее воздействие.

Для выделения дополнительной ошибки от нерасчетного возмущения используются эталонная модель по управлению и возмущению. В простейшем случае это система, представляющая коэффициенты ошибок. Они вычитаются из текущей ошибки системы и подаются через контур $K(p)$ во входной сигнал системы. Эту процедуру можно описать в виде системы из трех уравнений

$$\delta(p) = \frac{B(p)}{H(p)}[g(p) + \Delta g(p)] + \frac{B(p)C(p)}{H(p)}[f(p) + \Delta f(p)];$$

$$\Delta g(p) = K(p)\Delta\delta_m(p);$$

$$\Delta\delta_m(p) = \delta(p) - g(p) \left[C_{0g} + C_{1g}p + \frac{1}{2!}C_{1g}p^2 \right] - f(p) \left[C_{0m} + C_{1m}p + \frac{1}{2!}C_{1m}p^2 \right],$$

где C_{ig} , C_{im} — коэффициенты ошибок соответственно по управляющему и возмущающему воздействиям. Для выделения «чистых» составляющих скорости и ускорения могут быть использованы соответствующие промежуточные точки непосредственно самой системы или в противном случае дополнительные контуры их формирования (например, на основе контура идентификации системы).

Обсуждение. Для повышения точности САУ в условиях отклонения возмущения от заданных или расчетных параметров со стороны нагрузки использован один из способов повышения точности введением дополнительной составляющей в управляющем воздействии, парирующей нерасчетное возмущение со стороны нагрузки. Показан аналитический подход к описанию. Настоящий способ повышения точности может эффективно использоваться в однокоординатных системах (системы стабилизации, слежения за подвижными объектами и т.п.) и многокоординатных системах (промышленные и мобильные роботы и т.п.) [6, 7].

Рассмотренная САУ относится к классу адаптивных систем с эталонной моделью. Один из основных вопросов – выделение дополнительных составляющих ошибок по скорости и ускорению. Здесь может быть использован аппарат коэффициентов ошибок. Отличительная особенность состоит в том, что при введении дополнительного управления не изменяются собственные параметры системы и, следовательно, не затрагиваются вопросы устойчивости базовой системы. Область применения – широкий спектр систем стабилизации, программного управления и слежения за подвижными объектами [6, 7].

Заключение. Дана структура, способ построения и основы математического описания адаптивной САУ с моделью и дополнительной составляющей в управляющем воздействии. Для широкого использования в реальном секторе САУ следует продолжить исследование этой структуры. Следует дополнительно проанализировать реализацию модулей выделения «чистых» составляющих ошибок от нерасчетных возмущения и дрейфа внутренних параметров; показать подход к синтезу параметров контура введения дополнительной составляющей в управление; устойчивость возмущенного движения в динамическом процессе ее введения; провести широкое моделирование и исследование на реальных системах.

Список источников

1. Петров Б.Н., Рутковский В.Ю., Крутова И.Н., Земляков С.Д. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. Москва. Машиностроение, 1972, 260с.
2. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. Санкт-Петербург. Наука, 2003, 282 с.
3. Тарарыкин С.В., Тютиков А.В., Анисимов А.А., Копылова Д.Г., Аполонский В.В. Структурно-параметрический синтез и цифровая реализация регуляторов мехатронных систем. Иваново. Изд-во ИГЭУ, 2019, 216с.
4. Яворский. В. Н., Бессонов А. А., Коротаев А. Н., Потапов А. М. Проектирование инвариантных следящих приводов. Москва. Высшая школа, 1963, 475с.
5. Кобзев А.А., Мишулин Ю.Е., Новикова Н.А., Лекарева А.В. Системы автоматического управления с параллельной прогнозирующей моделью. Владимир. Изд-во ВлГУ, 2014, 160с.

6. Кобзев А.А., Лекарева А.В. Новикова Н.А. Исследование алгоритмов адаптации управляющего воздействия для приводов робототехнических систем с помощью симулятора межкоординатных перемещений. Известия ВУЗ. Электромеханика, 2015. №3, с. 50-55.

7. Кобзев А.А., Лекарева А.В., Махфуз А.А. Алгоритмы управления технологическим манипулятором гидрорезания нефтепроводов с учетом специфики выполняемого процесса. Динамика сложных систем - XXI век. 2016. - № 4. Т.10, с. 36-45.

УДК 004.896

Управление мобильным роботом на нейросети с подкреплением

Кобзев Александр Архипович¹

kobzev42@mail.ru

Лабает Михаил Сергеевич¹

Mlabaeff@yandex.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Рассмотрена проблема обучения мобильного робота с помощью нейросети с подкреплением, разобрана теоретическая сторона вопроса обучения с подкреплением, выведен алгоритм обучения мобильного робота нейросети. На основе теоретической части была сделана симмуляционная модель робота в ограниченном пространстве, задача робота состояла в движении к целям.

Ключевые слова: управление мобильным роботом, нейросеть, обучение с подкреплением, МППР.

Reinforcement learning-based mobile robot control

Kobzev Alexander Arkhipovich¹

kobzev42@mail.ru

Labaev Mikhail Sergeevich¹

Mlabaeff@yandex.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. The problem of training a mobile robot using reinforcement learning neural network is considered, the theoretical side of the reinforcement learning issue is analyzed, and the algorithm for training a mobile robot neural network is derived. Based on the theoretical part, a simulation model of a robot in a limited space was created, and the robot's task was to move towards its goals.

Keywords: mobile robot control, neural network, reinforcement learning, MPR.

Введение. В последние годы наметилась тенденция в разработке мобильных роботов, которая проявляется в повсеместном встраивании в различные по специфике проекты нейросетевых технологий. Такое масштабное применение нейросетей обусловлено следующими факторами: рост объема обрабатываемых данных, качественное и количественное увеличение технических мощностей современных обрабатывающих процессоров, положительный опыт компаний, где уже применяются мобильные роботы с использованием нейросети.

Стоит отметить, что привлечение нейросетевых технологий открывает возможность индуктивного метода решения возникающих задач, так, при решении нейросетью частной задачи, нейросеть в дальнейшем сможет использовать полученный опыт для решения целого класса подобных задач. Спектр задач нейросетей покоится на трех китах: распознавании, классификации и прогнозировании. Там, где проблема сводится к перечисленным группам, хорошо работают нейросети. Применимо к робототехнике, их наибольшая эффективность достигается в решении задач локализации робота в пространстве и задачи его следования по маршруту, а также классификации возникающих препятствий [1].

Методы и материалы. Управление мобильным роботом на нейросети с подкреплением основано на марковском процессе принятия решений (Markov Decision Process) – это математическая модель для формализации задач последовательного принятия решений в условиях неопределённости, где текущее состояние системы полностью определяет вероятности перехода в следующие состояния [2]. Марковский процесс описывают четыре компонента ($S, A, P(s'|s,a), R(s,a)$), где:

1. Состояния S – это множество всех возможных конфигураций робота и среды, сюда могут входить координаты положения (x, y); ориентация (угол поворота θ); скорость и ускорение; данные сенсоров (расстояние до препятствий и цели, показания камер, лидаров).

2. Действия A – множество всех возможных действий агента, в случае мобильного робота – это будет изменение скорости колёс (v_l, v_r); поворот на определённый угол.

3. Функция переходов $P(s'|s,a)$ - вероятность перехода состояний. То есть, вероятность того, что действие a в состоянии s в момент времени t приведёт в состояние s' в момент $t+1$. В детерминированных системах $P=1$ для допустимого перехода и $P=0$ для недопустимого.

4. Функция вознаграждения ($R(s,a)$) – выраженный численно результат от принятого действия, например, положительное вознаграждение за достижение цели или штраф за столкновение с препятствием.

Хороший пример марковского процесса принятия решений – это партия в шахматы, любая расстановка фигур на доске представляет конкретное состояние системы s , а все последующие расстановки – множество состояний системы S , действия A — это все возможные ходы игрока, a – совершенный ход игрока, функция перехода $P = 1$, партия заканчивается победой, патом или поражением игрока. Функция вознаграждения оценивает, насколько стала лучше расстановка фигур игрока после совершенного хода.

Результаты. Стратегия (или политика, обозначается как π) в MDP — это правило, определяющее, какое действие $a(A)$ агент должен выбрать в каждом возможном состоянии $s(S)$. Решение MDP сводится к поиску такого действия a , которое дает максимальную награду агенту, и, следовательно, оптимальной стратегии. Для поиска оптимальной стратегии выводится функция полезности, имеющая следующий вид:

$$Q_t(s_i, a_j) = \max_{\pi} [\sum_{\tau=t+1}^{N-1} R a_{\tau} = \pi(s_{\tau}, a_{\tau})],$$

где: t – временные отсчеты, i, j - порядковые номера состояний и действий. Функция полезности показывает максимальную награду, которую может получить робот в будущем за все последующие действия, если в состоянии s_i сделает действие a_j . Из функции полезности можно выразить оптимальную функцию стратегии, зная действие, которое соответствует наибольшему значению функции полезности, и выбирать при каждой итерации такое действие, то мы получим максимальное вознаграждение.

Существует уравнение, позволяющее итеративно подбираться к истинному значению функции полезности, его называют уравнением динамического программирования или уравнение Беллмана

$$Q_t(s_i, a_j) = \max_j [Q_{t+1}(s_i, a_j) + R(s_i, a_j)].$$

Поскольку в следующий момент времени мы уже получили некоторую награду $R(s_i, a_j)$, то по определению функции полезности мы можем заключить, что максимально возможная награда на $t + 1$ шаге определяется как максимально возможная награда на t шаге при выборе a_j действия за вычетом полученной награды.

Существует две парадигмы обучения нейросети, которые основаны на вышеописанных уравнениях. Это Q -обучение, основанное на оптимизации функции полезности с помощью уравнения Беллмана (DQN, C51), и Policy Optimization, которое в свою очередь оптимизирует функцию стратегии с помощью градиентного подъема (Policy Gradient, PPO), кроме того, существуют алгоритмы, объединяющие эти два направления, которые оптимизируют одновременно стратегию и функцию полезности, например DDPG.

Для управления мобильным роботом подходит классический алгоритм обучения нейросети с подкреплением DQN, который на вход будет принимать состояния s , а на выходе будет производить оценку функции полезности [3, 4]. Количество выходных нейронов равно количеству доступных действий, которые способен совершить мобильный робот. Алгоритм на основе собранной информации производит действие, которому соответствует наибольший выход нейросети:

$$Q_{target} = \max_j [Q_{t+1}(s_{t+1}, a_t)] + R(s_i, a_j).$$

Чтобы робот исследовал окружающее его пространство следует ввести в модель случайный шум. Вся информация, полученная мобильным роботом в ходе итераций алгоритма, должна сохраняться в памяти, чтобы на её основе можно было хорошо обучить нейросеть. Для более быстрого обучения стоит ввести в модель коэффициент дисконтирования λ , который выбирается интуитивно в пределах от 0 до 1. Также требуется провести нормирование всех вводимых в нейросеть данных [0,1] для корректной работы нейросети. С учетом вышесказанного уравнение изменится до следующего вида:

$$Q_{target} = \lambda \max_j [Q_{t+1}(s_{t+1}, a_t)] + R(s_i, a_j);$$

$$e = \frac{N-1}{N} \sum_0^{N-1} [Q_{target} - Q_t]^2,$$

где e - функция ошибки между желаемым вознаграждением и фактическим.

Далее в работе описывается пример применения нейросети с подкреплением для управления мобильным роботом. Для упрощения задачи возьмем для исследования трёхколесный робот, которому нужно перемещаться из одной точки в другую в произвольно ограниченном пространстве, имеющем прямоугольную форму [5, 6]. В описываемом пространстве, кроме цели робота, существуют препятствия, столкновение с

которыми крайне нежелательно. Для решения такой задачи условимся, что мобильный робот имеет следующие варианты действий:

1. Движение вперед;
2. Движение назад;
3. Поворот на 45 градусов направо;
4. Поворот на 45 градусов налево.

Сделаем допущение, что мобильный робот имеет карту местности, в которой он перемещается. Тогда достаточно использовать классический перцептрон с одним скрытым слоем и по 4 нейрона на выходном слое [7]. Назначим следующие награды:

1. Робот приблизился к цели — +40;
2. Робот отдалился от цели — -25;
3. Робот врезался — -70;
4. Робот достиг цели — +70;
5. Если робот врезался — он начинает заново.

Обсуждение результатов. Была написана небольшая программа обучения робота, который осуществлял перемещения до цели в небольшом ограниченном пространстве, ограниченном стенами. Первые поколения обучения нейросети робот врезался в стены, двигался в неправильном направлении, но уже с четвертого поколения начал уверенно двигаться от одной цели к следующей. Так на представленном рисунке 1 видно, что робот движется в нужном направлении к цели и следующим действием достигнет цели.



Рисунок 4 – Мобильный робот перемещается в сторону цели.

Заключение. В ходе исследования подтвердилась высокая перспективность применения нейронных сетей и обучения с подкреплением

для управления мобильными роботами. Сочетание этих технологий позволяет создавать адаптивные системы, способные эффективно функционировать в динамичных и неопределённых средах.

Обучение с подкреплением обеспечивает принципиально новый подход к формированию стратегий управления. В отличие от классических методов, оно позволяет роботу самостоятельно осваивать оптимальные тактики поведения через взаимодействие со средой, без необходимости явного программирования всех возможных сценариев.

Таким образом, синергия нейронных сетей и обучения с подкреплением формирует прочную основу для эволюции систем управления мобильными роботами. Постепенное преодоление существующих технических барьеров будет способствовать расширению сферы применения этих технологий в самых разных областях.

Список источников

1. Акджаева Л., Акмаммедов К., Артыкова Э. Машинное обучение в робототехнике: оптимизация производственных процессов. Вестник науки, 2024, Т.2, №10 (79), С. 375-378.
2. Портенко Н.И., Скороход А.В., Шуренков В.М. Марковские процессы. Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. – ВИНТИ, 1989, - Т.46. – С. 5-248.
3. Ласкин М.К. Обучение с подкреплением: сети Deep Q. URL:<https://habr.com/ru/companies/wunderfund/articles/671650>.
4. Якунькин В. Р., Панин Е.А. Машинное обучение с учителем. Оригинальные исследования, 2022, В. 12, №3, С. 5-9.
5. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, 2011. — 450 p.
6. Xuesu Xiao, Bo Liu, Garrett Warnell, Peter Stone. Motion planning and control for mobile robot navigation using machine learning: a survey, Autonomous robots, 2022, Vol. 45, №5, P. 569-597.
7. Кузнецов А.А. Обзор возможности обучения роботов при помощи алгоритмов глубокого обучения. Вестник науки, 2022, Т.2, №5 (51), С. 239-243.

Иерархический подход к построению приводов промышленных роботов

Бухарестов Игорь Сергеевич¹

igorbuharestov@yandex.ru

Назаров Алексей Александрович²

anazarov1954@mail.ru

¹Студент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

²КТН, Доцент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

Аннотация. Промышленные роботы являются сложным устройством, с большим набором функциональных возможностей. В данной статье рассматриваются подходы к изучению и проектированию исполнительных приводов роботов с учетом взаимного влияния звеньев манипулятора и нелинейного характера изменения динамического передаточного отношения силовых передач, что является причиной неустойчивости суммарных моментов инерции нагрузки в приводах отдельных звеньев робота.

Ключевые слова: манипуляционные роботы, координатные движения, динамические процессы, исполнительный привод, динамическое передаточное отношение, самотормозящиеся передачи, момент инерции.

A hierarchical approach to building industrial robot drives

Bukarestov Igor Sergeevich¹

igorbuharestov@yandex.ru

Nazarov Alexey Aleksandrovich²

anazarov1954@mail.ru

¹Student, Department of AMiR, VLSU, RF, Vladimir

²Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. AMiR, VLSU, RF, Vladimir

Abstract. Industrial robots are a complex device with a wide range of functionality. This article discusses approaches to the study and design of robot actuators, taking into account the mutual influence of manipulator links and the nonlinear nature of changes in the dynamic gear ratio of power transmissions, which causes instability of the total moments of inertia of the load in the drives of individual robot links.

Keywords: manipulation robots, coordinate movements, dynamic processes, actuator, dynamic gear ratio, self-braking gears, moment of inertia.

Введение. Исследование динамических процессов в сложных автоматизированных системах требует рассматривать манипуляционные

роботы как многофункциональные комплексы, в которых объединены различные подсистемы для выполнения отдельных координатных движений, в соответствии с управляющей программой. Указанные подсистемы связаны программой функционирования и конечной целью, на которую ориентированно их функционирование и механическая конструкция, объединяющая подсистемы в единый объект. Это требует особого подхода к построению приводов промышленного робота.

Материалы и методы. В последнее время иерархический подход имеет преимущество в решении задач построения роботов. При таком подходе программный уровень, на котором определяются движения робота, определяется верхним уровнем иерархии, а на нижнем уровне рассматриваются процессы взаимосвязанной динамики манипулятора.

Динамические процессы на нижнем уровне прежде всего определяются исполнительными приводами и неидеальностями механической конструкции роботов. К числу таких неидеальностей относят переменные моменты инерции качающихся плеч манипулятора, конечная жесткость конструкции, люфты и т.п. Пренебрежение данными неидеальностями приводит к необходимости проектирования исполнительных приводов с завышенными запасами по прочности и мощности. В противном случае динамические процессы, возбуждаемые в механической конструкции, приводят к тому, что движение захвата манипулятора вблизи запрограммированных точек сопровождается колебаниями, которые нарушают точность позиционирования, что недопустимо при выполнении большинства операций.

Результаты. Ввиду различия процессов, протекающих на верхних и нижних уровнях системы робота, нецелесообразно применять централизованный подход при решении задачи управления, манипуляционными роботами. В связи с этим исполнительные следящие системы роботов необходимо строить с учетом взаимосвязанности так, чтобы каждый исполнительный привод решал задачу управления своей координатой автономно, но без нарушения связи между всеми подсистемами устройства. Из этого вытекает важность обеспечения свойства инвариантности приводов робота к переменному моменту инерции. Он воздействует на вал исполнительного двигателя и закон его изменения, как правило, заранее установить невозможно.

Обсуждение. Переменный характер суммарного момента инерции двигателя в приводах манипуляционных роботов в общем случае является

следствием взаимного влияния друг на друга различных звеньев исполнительного устройства робота и изменения массы объекта манипулирования и динамического передаточного отношения силового редуктора [3,4]. Последнее наиболее существенно проявляется в приводах с самотормозящимися механическими передачами, динамическое передаточное отношение которых является существенно нелинейной функцией режима работы передачи [1,2].

Заключение. Таким образом, применение иерархического подхода в построении приводов промышленных роботов является более эффективным, поскольку манипуляционные роботы рассматриваются как многофункциональные комплексы, разделяя все подсистемы робота на позиции иерархии, перенося управление на верхний уровень, а механическую составляющую на нижние. Благодаря этому можно дать более качественную оценку каждой подсистемы робота и определить слабые участки конструкции.

Список источников

1. Вейц В.Л., Качура А.С., Мартыненко А.М. Динамические расчеты приводов машин: - Л.: Машиностроение, 1971 – 352 с. (дата обращения: 20.10.2025).
2. Егоров О. Д. Механика роботов: Учебное пособие / О. Д. Егоров. - М.: МГАВТ, 2007. - 224 с. (дата обращения: 20.10.2025).
3. Лукинов А.П. Об особенностях расчета приводов робота с самотормозящимися механизмами// Робототехника. Межвузовский сборник/ отв. ред. Е.И. Юревич. - Л.: ЛПИ, 1977. С. 109 – 112. (дата обращения: 20.10.2025).
4. Сабинин Ю.А., Мысливец Н.Л. Требования к электроприводам пространственного перемещения элементов робота// Электротехническая промышленность, сер. «Электропривод», 1975, вып. 6 (41). С. 12-13. (дата обращения: 20.10.2025).
5. Полянский Виталий Викторович, Гаревская Наталья Васильевна, Сабадырь Артём Максимович, Семцов Алексей Сергеевич
РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ // Труды МАИ. 2012. №62. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-konstruktsii-i-algoritmov-upravleniya-dvizheniem-shagayuschego-apparata-dlya-tehnicheskogo-obsluzhivaniya-aviatsionnyh> (дата обращения: 20.10.2025).

Исследование параметров взаимодействия мобильного лазер-робота с опорной поверхностью с использованием пакета Matlab

Давыдов Денис Андреевич¹

dda-bm@yandex.com

Максимов Максим Романович¹

maksimka2012god@yandex.ru

Умнов Владимир Павлович¹

mex-rob@yandex.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Относительно новым направлением развития робототехники является создание мобильных манипуляторов, представляющих собой комбинацию автономных мобильных роботов с роботизированными манипуляторами, способные выполнять рабочие операции в различных условиях, с различным состоянием опорной поверхности. на которой она может давать просадку под действием возникающих при работе манипулятора. Для определения нагрузок на опоры и возникающих просадок целесообразно использовать компьютерную модель робота с виртуальным симулятором работы манипулятора, которая построена с использованием программных продуктов моделирования Simulink и Simscape. Показано, что просадки могут иметь существенные величины и в ряде случаев требуется автоматическая стабилизация положения платформы робота.

Ключевые слова: Мобильный робот, роботизированный манипулятор, опора, опорная поверхность, модель, симулятор, просадка

Research of Interaction Parameters between Mobile Laser Robot and Support Surface Using MATLAB Package

Davydov Denis Andreevich¹

dda-bm@yandex.com

Maksimov Maksim Romanovich¹

maksimka2012god@yandex.ru

Umnov Vladimir Pavlovich¹

mex-rob@yandex.ru

¹VLSU, Vladimir, Russia

Abstract. A relatively new direction in robotics development is the creation of mobile manipulators that combine autonomous mobile robots with robotized manipulators capable of performing work operations under various conditions, including different states of support surfaces where sags may occur due to loads generated by the manipulator during operation. To determine the loads on supports and resulting sags, it is advisable to use a computer model of the robot equipped with a virtual simulator for manipulator operation, which has been

developed using simulation software products such as Simulink and Simscape. It was demonstrated that sags can have significant values and, in some cases, require automatic stabilization of the robot platform position.

Keywords: Mobile robot, robotized manipulator, support, supporting surface, model, simulator, sag

Введение. Относительно новым направлением развития робототехники является создание мобильных манипуляторов, представляющих собой комбинацию автономных мобильных роботов с роботизированными манипуляторами, способные выполнять рабочие операции в различных условиях. Технологические возможности автономных мобильных роботов с роботизированными манипуляторами заключаются в следующем:

- обработка крупногабаритных объектов на предприятии заказчика или на открытой площадке;
- выполнение операций с объектами, размеры которых превышают размеры рабочей зоны робота;
- возможность перемещения роботизированного комплекса с использованием его собственной транспортной системы;
- выполнение операций в различных структурных подразделениях одного предприятия.

Для перемещения мобильных роботов используются различные виды движителей: колесные, гусеничные, шагающие, колесно – шагающие. В качестве движителя многофункционального мобильного робота, предназначенного для использования на труднопроходимой местности, выбирают гусеничный движитель как наиболее универсальный. Мобильный робот (МР) чаще всего оснащается манипулятором с несколькими степенями подвижности и рабочим инструментом для выполнения рабочей операции, например, лазерной [1]. Перед выполнением рабочей операции на заданной позиции платформа базируется на поверхности с помощью четырех выдвигаемых вручную винтовых опор. При этом поверхность может быть грунтовой как рыхлой, так и с высокой твердостью. В процессе выполнения рабочей операции манипулятор перемещается в пространстве и, следовательно, суммарный центр тяжести компонентов смещается, опоры деформируют грунтовую поверхность, она дает просадку, и платформа изменяет свое угловое положение. Для определения величины смещения платформы МР целесообразно выполнить

Материалы и методы. При построении механической части симулятора манипулятора использованы следующие блоки: World Frame, Solver Configuration, Mechanism Configuration, Revolute, Rigid Transform, Prismatic Joint, Transform Sensor, World Frame, Solver Configuration, Mechanism Configuration библиотеки моделирования Simscape, которые являются обязательными при построении модели любого механизма. Они представляют собой неизменные точки основания неподвижные в абсолютном (инерциальном) пространстве. Движение отдельных частей механизма задаётся или определяется по отношению к системе координат, реализуемой этими блоками. Блоки Revolute, Prismatic Joint, относящиеся к разделу Joints (сочленения), позволяют обеспечить возможность моделирования относительных движений тел, представленных отдельными блоками Solid, то есть необходимых степеней подвижности.

В качестве параметров манипулятора использованы технические характеристики исполнительного механизма робота Fanuc 710 грузоподъемностью 45 кГ с длиной руки 2.62 метра и массой 650кГ с

дополнительным оборудованием, размещенным на его руке. Поскольку в электроприводах робота Fanuc 710 используются энкодеры с дискретностью до 2000, в модели приводов симулятора с ПИД регуляторами тока и скорости синхронные двигатели представлены моделями ДПТ. Модели приводов настраивались на монотонный характер переходного процесса [2]. Для управления приводами в симуляторе использовался виртуальный контроллер, задающий пространственную кривую перемещения рабочего инструмента робота.

На рисунке 2 представлена часть модели, содержащая платформу робота, оборудование, размещенное на платформе (для мобильного лазер-робота для наплавки это источник излучения, чилер, устройство газоснабжения и подачи наплавочного материала, блок управления), шасси робота, а также модели четырех опор платформы на поверхность в виде компонентов контактного взаимодействия с одной наложенной связью (блоки библиотеки Multibody Simscape).

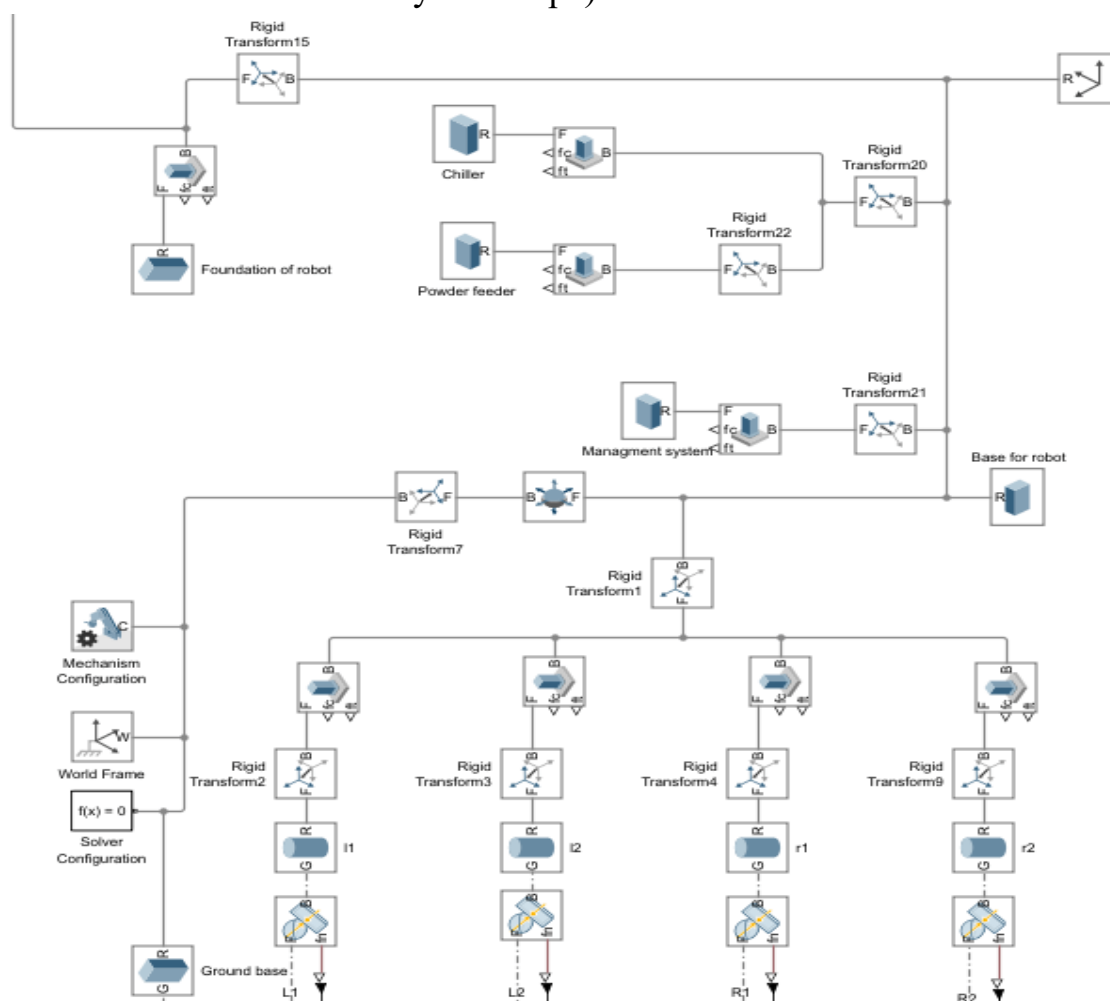


Рисунок 2. Часть модели, содержащая платформу робота и оборудование, размещенное на платформе.

Суммарная масса оборудования, размещенного на платформе и шасси составляет 2500 кг.

На рисунке 3 представлена анимация разработанной модели мобильного робота в Simscape, расположенного на 4 опорах.

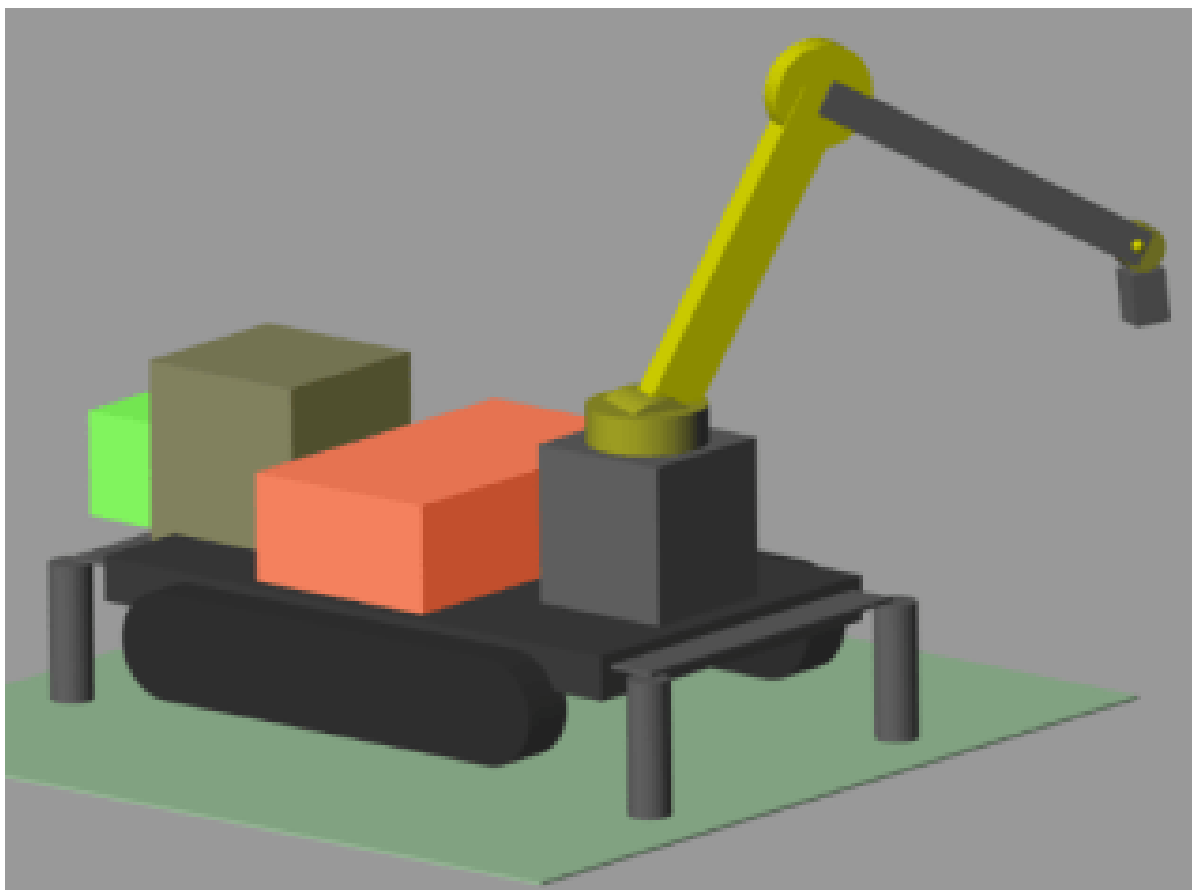


Рисунок 3. Анимация разработанной модели мобильного робота.

На рисунке 4 приведена измерительная и вычислительная части машинного эксперимента для измерения нагрузок на опоры платформы в зависимости от положения манипулятора в процессе движения по заданной траектории. Вычислениями определяются величины просадки поверхности под четырьмя опорами с использованием закона Гука по выражению:

$$\Delta h = \sigma H E^{-1},$$

где Δh - величина просадки поверхности под опорой; σ – величина напряжения под опорой; H – высота слоя материала под опорой; E - модуль упругости материала поверхности.

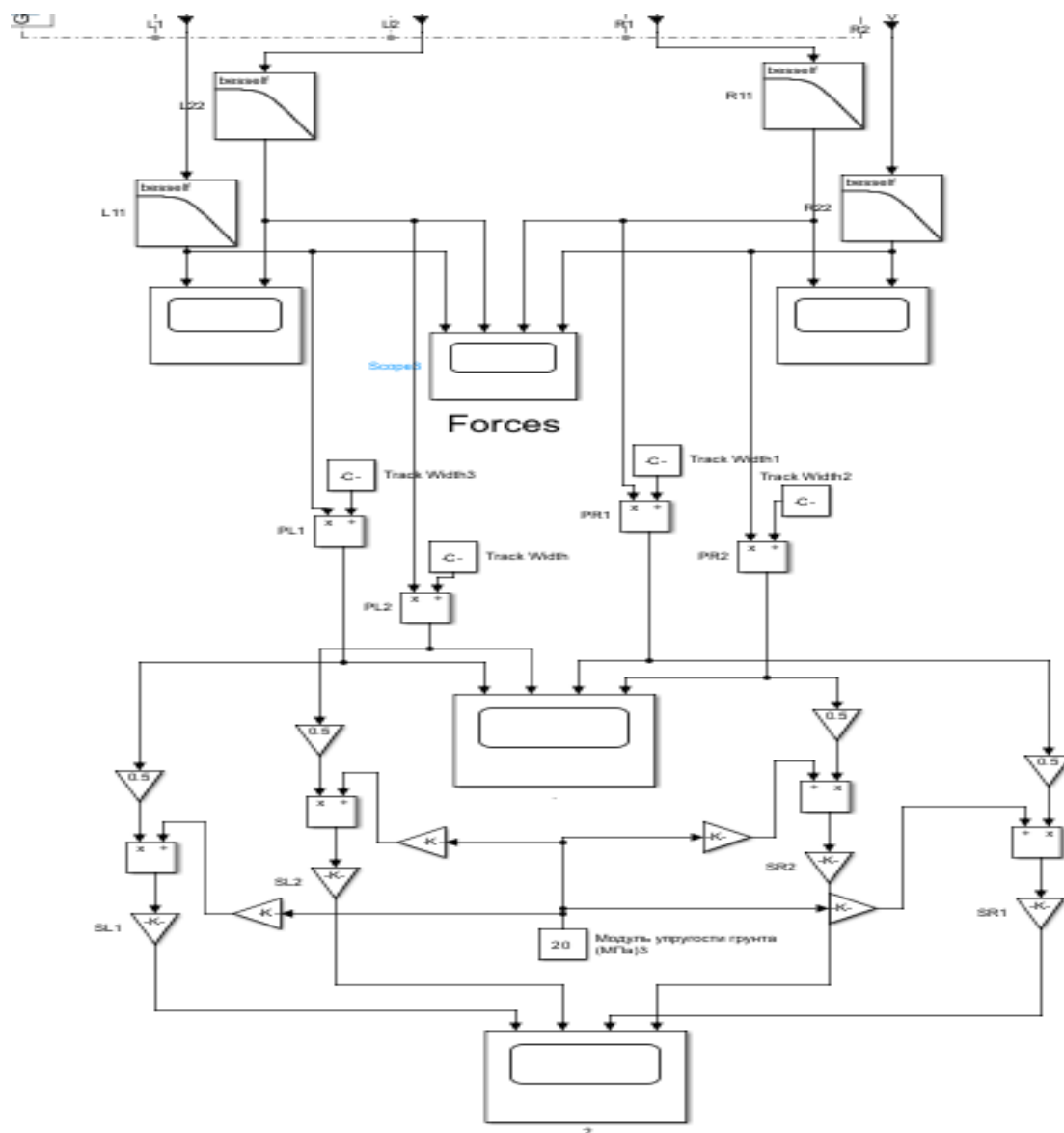


Рисунок 4. Измерительная и вычислительная части машинного эксперимента.

Величина напряжения под опорой вычисляется исходя из действующей нагрузки и площади опоры. Модуль упругости различных материалов поверхности от рыхлых, песчаных и глинистых до каменистых и бетонных находится в широком диапазоне от 10 МПа до 2000 МПа [3]. На рисунке 5, а представлены результаты измерения нагрузок, действующих на опоры, установленные на песчаной поверхности ($E=30$ МПа), а на рисунке 5, б – величины просадки материала опорной поверхности. Передние опоры – опоры, расположенные ближе к манипулятору на рисунке 3.

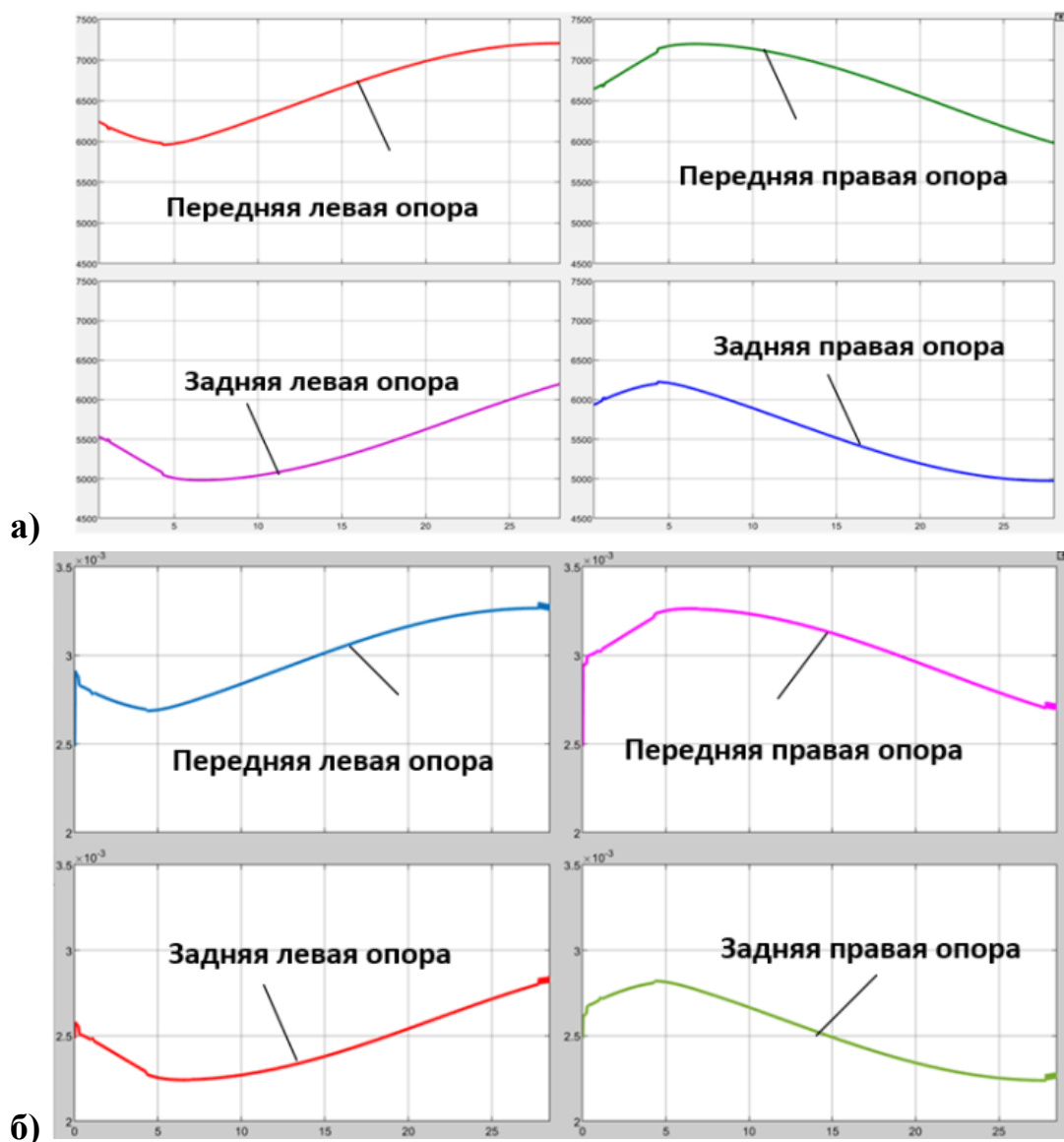


Рисунок 5. Результаты эксперимента:
а – нагрузки, действующие на опоры;
б – просадка поверхности под опорами.

В процессе эксперимента манипулятор перемещал рабочий инструмент по заданной пространственной траектории с постоянной скоростью на расстояние 1,3 метра в среднем положении руки манипулятора в течение 30 с.

Заключение. Из рассмотрения рисунка 5 следует, что при движении манипулятора нагрузка на опоры является переменной. Наиболее нагруженными являются передние опоры, просадка грунта под опорами также переменная и достигает величины 3,3 мм. Это приводит к перекосу положения платформы; угол перекоса составляет 1,5 град, что

соответствует смещению рабочего инструмента в вертикальной плоскости 4,3 мм. В крайних положениях руки манипулятора перекося достигает величины 2,1 град и смещение рабочего органа составляет около 5 мм. Очевидно, что для других поверхностей результаты будут иными. В большинстве случаев мобильные роботы, оснащенные роботизированными манипуляторами, следует оснащать системами стабилизации положения платформы в горизонтальном положении.

Список источников

1. Лазерные технологические комплексы и робототехнические системы: монография / В.П.Умнов, Д.О.Чухланцев, И.Н.Егоров, Д.А.Силантьева; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г.Столетовых. - Изд-во ВлГУ.2023. - 426 с.
2. Умнов В.П. Моделирование динамики механизмов и управляемого движения исполнительных устройств манипуляционных роботов: учеб. пособие / В.П.Умнов, Ю.Е. Мишулин : Владим. гос ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019.- 152с
3. Модуль упругости грунта – описание свойства и определение. URL: <https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/svoystva-gruntov/mechanicheskie-svoystva-gruntov/modul-uprugosti-grunta/> (дата обращения 22.10.2025)
4. Борисов И.И., Колюбин С.А., Имитационное моделирование мехатронных систем — СПб: Университет ИТМО, 2020. — 103 с.
5. Моделирование в среде MATLAB-Simulink : метод. указания к лабораторным работам / сост.: А. И. Герасимов, В. В. Регеда, О. Н. Регеда. — Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. - 104 с.

Система автоматической стабилизации платформы мобильного робота на опорной поверхности

Максимов Максим Романович¹

maksimka2012god@yandex.ru

Умнов Владимир Павлович¹

mex-rob@yandex.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. При работе манипулятора, размещенного на платформе мобильного робота могут происходить просадки поверхности под опорами, что может привести к недопустимым отклонениям положения рабочего инструмента, расположенного на конечном звене манипулятора. Для исключения этих отклонений предложена система автоматической стабилизации положения платформы мобильного робота на позиции выполнения рабочей операции в условиях изменяющихся параметров нагрузки, обусловленных движениями манипулятора. Система построена на базе двухкоординатного инклинометра и четырех электромеханических актуаторов с червячными редукторами и шариковинтовой передачей. Выбраны необходимые комплектующие системы. Приводы актуаторов синтезированы на монотонный переходный процесс. Разработан алгоритм работы системы.

Ключевые слова: Мобильный робот, система стабилизации, контроллер, актуатор, алгоритм работы

Automatic Stabilization System for Mobile Robot Platform on Support Surface

Maksimov Maksim Romanovich¹

maksimka2012god@yandex.ru

Umnov Vladimir Pavlovich¹

mex-rob@yandex.ru

¹VLSU, Vladimir, Russia

Abstract. During the operation of a manipulator mounted on a mobile robot's platform, subsidence of the underlying surface beneath the supports might occur, leading to unacceptable deviations in the position of the working tool located at the end effector of the manipulator. To eliminate these deviations, an automatic stabilization system for maintaining the platform's position while executing tasks under varying load parameters caused by manipulator movements has been proposed. The system is based on a two-coordinate inclinometer and four electromechanical actuators equipped with worm gear reducers and ball screw transmission mechanisms. Necessary components for the system were

selected, and the actuator drives were synthesized for monotonic transient processes. An algorithm for the system's operation has also been developed.

Keywords: Mobile robot, stabilization system, controller, actuator, operational algorithm

Введение. В последние годы активно развивается направление робототехники по созданию и внедрению мобильных роботов, способных выполнять широкий спектр транспортных и технологических операций. Новый этап развития мобильности — мобильные манипуляторы, представляющие собой комбинацию автономных мобильных роботов с роботизированными манипуляторами. Возможности, которые можно получить благодаря наделению мобильных роботов разнообразными навыками манипулирования, подобными человеческим, безграничны. Росту интереса к автономным мобильным роботам способствовали и последние разработки в области машинного зрения, навигации и искусственного интеллекта. Для перемещения мобильных роботов используются различные виды движителей: колесные, гусеничные, шагающие, колесно –шагающие. В качестве движителя многофункционального мобильного робота, предназначенного для использования на труднопроходимой местности, выбирают гусеничный движитель как наиболее универсальный. На рисунке1 представлен вид мобильного робота с гусеничным движителем.

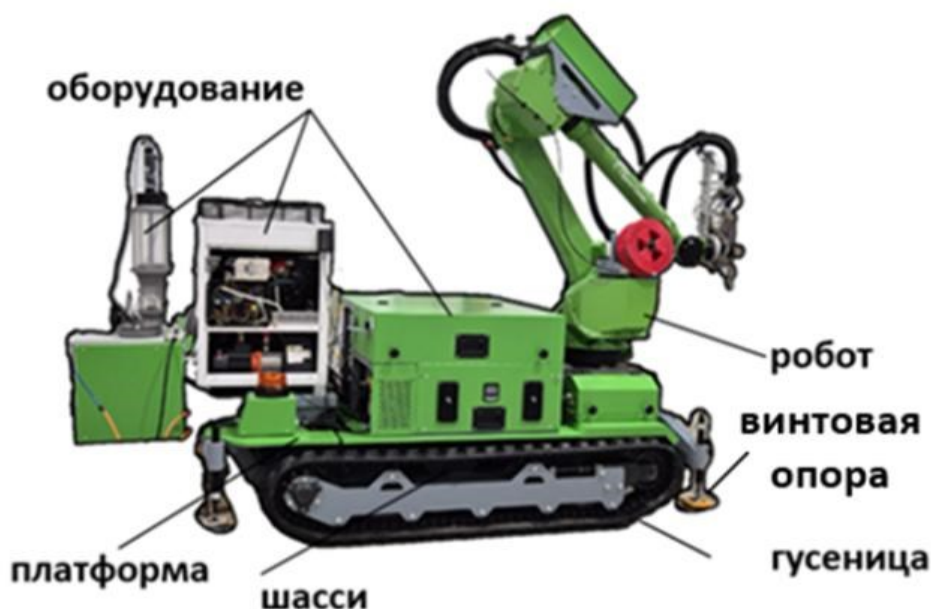


Рисунок1. Вид мобильного робота.

Мобильный робот (МР) оснащен манипулятором с шестью степенями подвижности и рабочим инструментом для выполнения рабочей операции, например, лазерной [1]. Тогда в состав оборудования, расположенного на платформе, входят источник лазерного излучения, например, волоконный, чилер для охлаждения лазера, система управления лазером и манипулятором. Перед выполнением рабочей операции на заданной позиции платформа базируется на поверхности с помощью четырех выдвигаемых вручную винтовых опор. При этом поверхность может быть грунтовой как рыхлой, так и с высокой твердостью. В процессе выполнения рабочей операции манипулятор перемещается в пространстве и, следовательно, суммарный центр тяжести компонентов смещается, опоры деформируют грунтовую поверхность, и платформа изменяет свое угловое положение. По этой причине рабочий инструмент может отклониться от заданной траектории на несколько миллиметров, что существенно снижает качество выполняемой операции, а в ряде случаев может привести к ее невыполнению. В следствие этого МР необходимо снабдить системой автоматической стабилизации горизонтального положения платформы.

Материалы и методы. Известна [2] система самобалансировки платформы МР во время движения, снабженная гироскопом, системой приводов и сферическим стержневым механизмом. Когда гироскоп обнаруживает, что рабочая платформа образует угол с горизонтальной плоскостью, приводной двигатель активируется, тем самым приводя в движение соответствующий сферический соединительный стержень для перемещения по сферической поверхности базовой сферы, чтобы поддерживать рабочую платформу горизонтальной, достигая тем самым эффекта самобалансировки. Такое техническое решение применимо только для небольших нагрузок. Устройство автоматического обеспечения горизонтального положения опорной платформы подъемных механизмов [3] содержит передвижное шасси, опорную платформу, датчики уровня горизонтального положения, гидроцилиндры, панель управления подъемов и опускания штоков выносных гидравлических цилиндров. Устройство управления выполнено в виде электронного блока, имеет датчики контакта штоков гидроцилиндров с опорной поверхностью. Датчики уровня горизонтального положения выполнены из диэлектрического материала, заполнены токопроводящей жидкостью и соединены между собой в пересечении трубопроводов с центральным датчиком, являющимся эталонным. Недостатком предложенного устройства является

использование гидроприводов, требующих гидростанцию, а также ограниченность применения только для колесных роботов. Исходя из выполненного анализа предложена мехатронная система автоматической стабилизации положения платформы МР на позиции выполнения рабочей операции со следующими параметрами:

- Максимальная масса платформы с оборудованием: 2500 кг
- Количество точек опоры: 4
- Исполнительные устройства системы: электромеханические актуаторы
- Требуемое усилие на штоке актуатора: ~1500-2000 кг
- Требуемый ход штока актуатора: ~100-150 мм
- Датчик измерения положения платформы от горизонтального: двухкоординатный инклинометр
- Род тока: постоянный
- Напряжение питания 24 В

В таблицах 1 и 2 приведены параметры основных выбранных компонентов

Таблица 1

Компоненты системы управления

Наименование	Производитель	Модель	Кол-во	Примечание
ПЛК	WAGO	750-8219 (PFC200)	1	Рабочее напряжение: 24В DC
Модуль безопасности	WAGO	750-874	1	Безопасные входы/выходы
Модуль EtherCAT	WAGO	750-352	1	Связь с приводами
Модуль дискретных входов	WAGO	750-1405	1	16 каналов, 24В DC
Модуль	WAGO	750-1505	1	16 каналов,

Наименование	Производитель	Модель	Кол-во	Примечание
Дискретных выходов				24В DC
Инклинометр	Ifm electronic	NT5000	1	Модификация 24В DC Погрешность измерения неболее 0,05°

Таблица 2

Силовая часть и приводы

Наименование	Производитель	Модель	Кол-во	Примечание
Сервопривод	WAGO	750-831 (MOVIC®)	4	Вход: 24В DC, 20А макс.
Линейный актуатор	Thomson	Electrak®HD	4	Параметры: • Усилие: 20000 Н Напряжение: 24В DC • Ход: 150 мм • Скорость: 10 мм/с
Предохранители двигателей	Eaton	SF-116	4	25А, быстродействующие
Силовые контакторы	Schneider Electric	LC1D09	2	Управление Питанием приводов

На рисунке 2 представлен алгоритм работы контроллера предложенной системы стабилизации положения платформы.

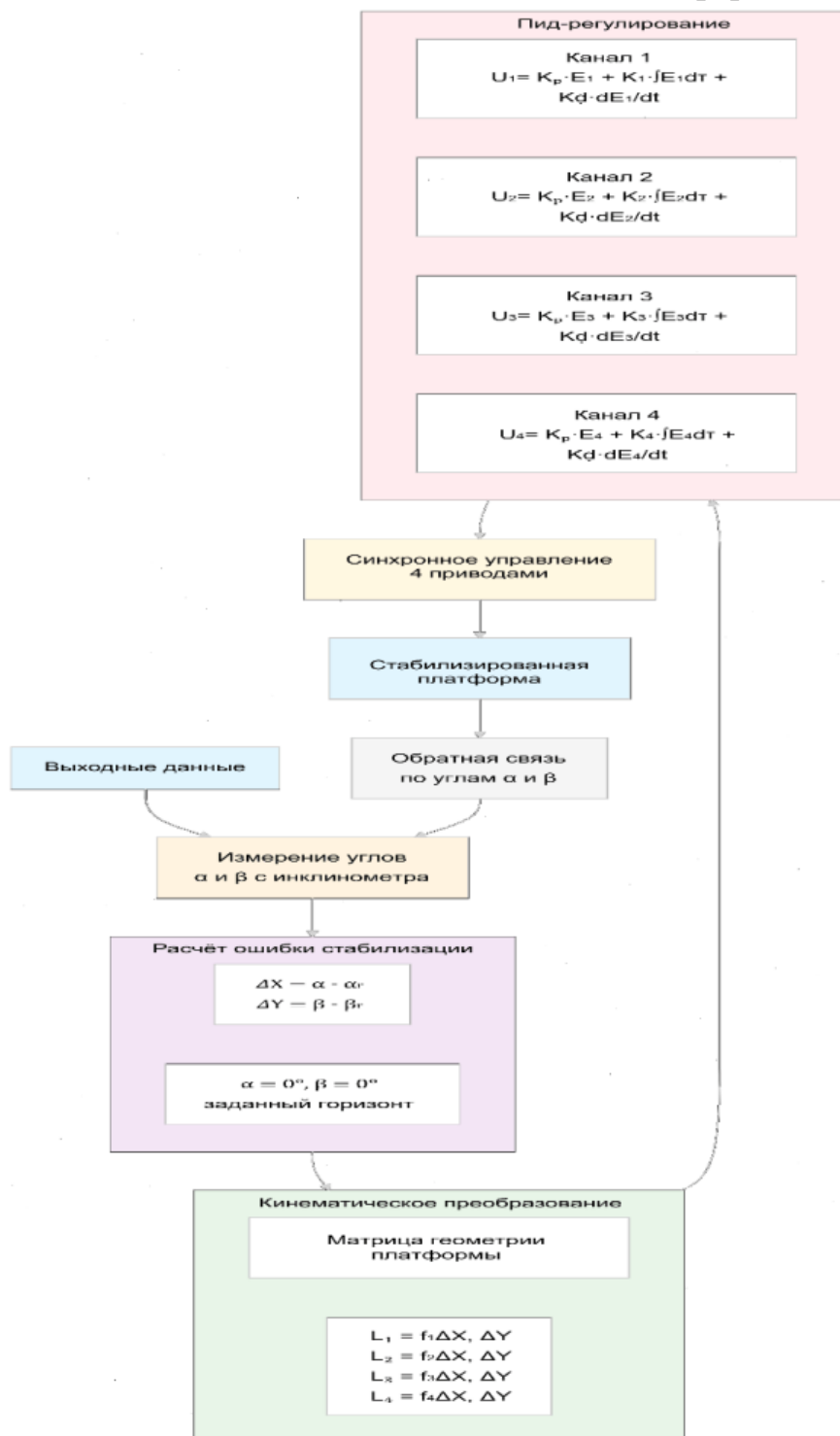


Рисунок 2. Алгоритм работы контроллера в системе стабилизации положения платформы.

Результаты и обсуждение. Разработанная система и алгоритм стабилизации положения платформы представляет собой многоуровневую

систему управления с обратной связью, построенную по каскадному принципу [4]. Основой функционирования системы является непрерывный цикл измерения, вычисления и коррекции, выполняемый с частотой 20 Гц. Работа системы начинается с получения данных от двухосевого инклинометра, который измеряет текущие углы наклона платформы относительно горизонта по осям крена (α) и тангажа (β). Полученные значения сравниваются с заданными нулевыми значениями, соответствующими идеальному горизонтальному положению. Разность между фактическими и целевыми углами формирует сигнал ошибки стабилизации (ΔX , ΔY), который поступает на блок кинематического преобразования. На этапе кинематического преобразования осуществляется перевод угловых отклонений в линейные перемещения для каждого из четырех актуаторов. Преобразование основано на матрице геометрии платформы, учитывающей расположение опорных точек относительно центра масс. Для платформы размером $2 \times 3,5$ метра коэффициенты преобразования составляют $a = 1,0$ м (половина ширины) и $b = 1,75$ м (половина длины). В результате вычисляются целевые положения штоков актуаторов L_1 - L_4 , необходимые для компенсации измеренных угловых отклонений. Следующим этапом является ПИД-регулирование, реализованное в виде четырех независимых каналов управления, по одному для каждого актуатора. Каждый регулятор вычисляет управляющее напряжение $U_i(t)$ на основе ошибки положения $E_i(t) = L_i \text{ целевое} - L_i \text{ текущее}$. Пропорциональная составляющая обеспечивает быстроту реакции системы, интегральная компонента устраняет статическую ошибку, а дифференциальная составляющая демпфирует колебания и повышает устойчивость. Оптимизированные коэффициенты регулятора ($K_p = 2,5$, $K_i = 0,1$, $K_d = 0,05$) обеспечивают компромисс между быстродействием и плавностью работы системы. Особенностью алгоритма является синхронное управление четырьмя приводами с исключением статической неопределенности. Поскольку платформа представляет собой статически неопределимую конструкцию с четырьмя точками опоры, алгоритм реализует принцип "виртуальной трехточечной опоры", динамически перераспределяя усилия между актуаторами для предотвращения возникновения внутренних напряжений [5].

Заключение. Полученные результаты:

- Разработан алгоритм управления и система с обратной связью, компенсирующие статическую неопределенность системы с 4 приводами.

- Смоделированы переходные процессы в электромеханическом приводе: время отработки шага составляет 120 мс, перерегулирование не превышает 5%.
- Достигнута требуемая точность стабилизации: Моделирование подтвердило возможность удержания горизонта платформы с точностью $\pm 0.05^\circ$ при внешних возмущениях.

Список источников

1. Лазерные технологические комплексы и робототехнические системы: монография / В.П.Умнов, Д.О.Чухланцев, И.Н.Егоров, Д.А.Силантьева; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г.Столетовых. - Изд-во ВлГУ.2023. - 426 с.
2. Чжун Хуаюн, Чэнь Вэйтао, Хуан Кан [и др.]. A mobile robot with a self-balancing capability (Мобильный робот со способностью к самобалансированию). Патент 109703654 Китай, 2019; опубл. 27.08.2024.
3. А. В. Великанов, П. В. Танчук, Ю. М. Пурусов. Устройство автоматического выравнивания в горизонтальной плоскости опорной платформы подъемных механизмов. Патент 2307784 С1 РФ, 2007, Бюл. № 28.
4. Kasper, M. Fricke, G. von Puttkamer, E. A Behavior-Based Architecture for Teaching More than Reactive Behaviors to Mobile Robots, 3rd European Workshop on Advanced Mobile Robots, EUROBOT '99, Zurich, Switzerland, September 1999, IEEE Press, pp. 203-210 (8).
5. Puttkamer, E. von. Autonome Mobile Roboter, Lecture notes, Univ. Kaiserslautern, Fachbereich Informatik, 2000.

Обзор вариантов применения диагностических систем на мобильных машинах

Хопрянинов Юрий Андреевич¹

Yura-khopr@rambler.ru

SPIN-код: 5734-0738

Килина Мария Степановна¹

Mariya-kilina@yandex.ru

SPIN-код: 8039-0060

Пелипенко Алексей Юрьевич¹

Pelipenko16a@mail.ru

SPIN-код: 9373-5743

¹Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В статье представлен обзор современных решений использования предиктивной диагностики в мобильных машинах. Рассмотрены типы технического обслуживания, методы анализа состояния оборудования, а также примеры внедрения предиктивных систем диагностики в промышленности, сельском хозяйстве и горнодобывающем секторе.

Ключевые слова. Предиктивная диагностика, техническое обслуживание, машинное обучение, мобильные машины, гидравлическая система, датчики.

Overview of Applications of Diagnostic Systems on Mobile Vehicles

Khopryaninov Yuri Andreevich¹

Yura-khopr@rambler.ru

SPIN: 5734-0738

Kilina Maria Stepanovna¹

Mariya-kilina@yandex.ru

SPIN: 8039-0060

Pelipenko Aleksey Yuryevich¹

Pelipenko16a@mail.ru

SPIN: 9373-5743

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. This article provides an overview of modern solutions for using predictive diagnostics in mobile equipment. It examines types of maintenance, methods for analyzing equipment condition, and examples of predictive diagnostics systems being implemented in manufacturing, agriculture, and mining.

Keywords. Predictive diagnostics, maintenance, machine learning, mobile machines, hydraulic system, sensors.

Введение. В настоящее время современные сельскохозяйственные и строительные машины оснащаются всё более сложными и дорогостоящими электрогидравлическими системами. Однако, неизбежно возникают ситуации поломок и неисправностей, которые могут привести к значительным потерям в производстве и экономическим убыткам [1].

Незапланированные отказы оборудования могут привести к значительным штрафам и неизмеримым экономическим, репутационным потерям, к ухудшению или прекращению деятельности компании. Чтобы снизить риск таких простоев применяются различные формы технического обслуживания, от которых напрямую зависит конкурентоспособность предприятия по цене, качеству и производительности [2].

Материалы и методы. В качестве материалов исследования выступили научные публикации в рецензируемых отечественных и международных журналах по направлениям: промышленность, сельское хозяйство, горнодобывающая и строительная техника. Проведен сравнительный анализ архитектур, алгоритмов машинного обучения и экономической эффективности систем предиктивного обслуживания, описанных в отобранных публикациях.

Виды технического обслуживания. На данный момент существует 3 основных вида технического обслуживания, одним из которых является аварийное, при котором обслуживание проводится только в случае полного отказа оборудования. При плановом техническом обслуживании производится планирование регулярных мероприятий по техническому обслуживанию оборудования для снижения вероятности отказов и выполняется даже тогда, когда машина еще работает. Основным недостатком данных типов обслуживания является необходимость прерывания производственного процесса в установленные интервалы времени для проведения работ по обслуживанию.

Развитие современных технологий, таких как Интернета вещей, Big Data, сенсорных технологий, искусственного интеллекта, привело к переходу от стратегий технического обслуживания до отказа и планового к предиктивному обслуживанию и диагностики. Традиционные методы технического обслуживания не обеспечивают баланса между стоимостью обслуживания и надёжностью, тогда как внедрение предиктивной диагностики в машиностроении, позволяет проводить обслуживание по мере необходимости за некоторое время до предполагаемой неисправности. Данная диагностика основана на анализе состояния оборудования при

обработке данных с датчиков и обслуживание выполняется на основе онлайн-оценки состояния системы и позволяет своевременно предотвращать сбои в работе, что позволяет максимально снизить частоту обслуживания, не прибегая к затратам.

Таким образом разработка систем прогнозирования поломок и технического обслуживания на основе обработки больших данных становится ключевым элементом для повышения эффективности различных машин.

Суть этого метода диагностики заключается в прогнозировании состояния оборудования на основе текущих и исторических данных, при котором прогнозируется будущая производительность на основе текущих и исторических показателей.[3].

Использование предиктивной диагностики рассматривается как альтернатива традиционным методам обслуживания, обеспечивающая повышение уровня надёжности и готовности сельскохозяйственных машин. Мониторинг механических компонентов позволяет выявлять неисправности до того, как они приведут к серьёзным повреждениям или остановке работы техники, прогнозирование ремонтов и затрат на обслуживание может выполняться с использованием искусственных нейронных сетей, однако для этого необходим достаточный объём исторических данных об отказах [4]. На рисунке 1 представлено сравнения затрат, связанные с различными типами технического обслуживания. Узлы и механизмы машины со временем подвергаются износу, что ведет к увеличению затрат на ремонт. При преждевременной замене оборудования увеличиваются финансовые потери, что подчеркивает важность точного определения оптимального времени для проведения технического обслуживания, что реализуется в системах предиктивной диагностики [4].

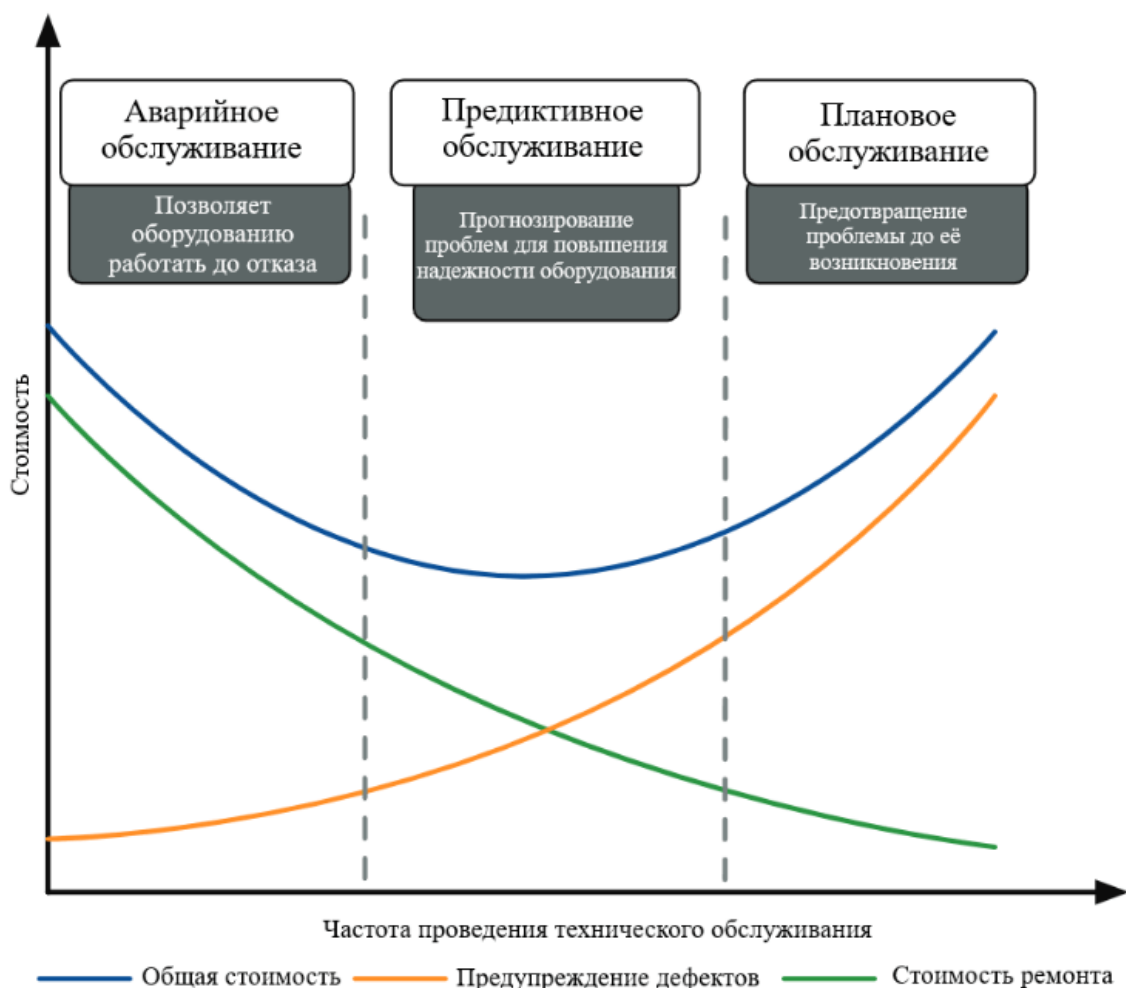


Рисунок 1. Зависимость различных типов обслуживания и затрат.

Примеры внедрения. Одним из примеров внедрения предиктивной диагностики в промышленности является использование интеллектуальных методов обслуживания для воздушных компрессоров, которые являются ключевыми элементами производственных и мобильных систем, отказ которых может привести к остановке технологического процесса. В исследовании [6] предлагалась методология технического обслуживания, основанная на интеграции технологий Интернета вещей, машинного обучения и многопараметрического мониторинга. Разработанная система включает этапы сбора, предварительной обработки и анализа данных, что обеспечивает возможность раннего выявления признаков деградации оборудования, для этого применялись многоканальные сенсоры и коммуникационный модуль Ewon Flexy 205. Представленная в работе математическая модель, позволила прогнозировать потенциальные отказы на основе параметров давления и температуры. Результаты приведенного

исследования подтвердили эффективность предложенного решения: позволило сократить время простоев оборудования примерно на 20 % и увеличить срок службы компрессора на 15 %.

Другим примером применения предиктивного обслуживания в мобильных машинах является система диагностики, используемая в системе сцепления трактора New Holland T8.270 [7]. Мониторинг механических компонентов и регистрация параметров гидравлической системы, а именно давления в системе сцепления, позволили выявлять отклонения в работе до того, как они приводили к серьёзным отказам или простою машины. Прогнозирование состояния осуществлялось на основе анализа данных с использованием программного обеспечения и методов машинного обучения. В результате время ремонта техники сократилось на 88%, а общие затраты на ремонт — примерно на 93%.

В строительных машинах использование данного метода диагностики позволило повысить безотказную работу строительных машин за счет своевременных управляющих мер на основе оперативной диагностической информации и сокращение простоев за счет применения предиктивной модели управления эксплуатационными процессами снизилось на 30% [9].

Практическое внедрение предиктивного обслуживания в мобильных реализовано в горнодобывающем секторе. Эта отрасль играет ключевую роль в мировой экономике, однако эксплуатация оборудования в тяжёлых и удалённых условиях приводит к ускоренной деградации компонентов, сокращению ресурса и повышению затрат на обслуживание. В исследовании [8] была предложена архитектура интеллектуальной системы предиктивного обслуживания для горной мобильной техники, основанная на иерархической сети вывода, которая объединяет технологии интернета вещей, беспроводные сенсорные сети и периферийные вычисления для анализа данных в реальном времени, что позволило адаптировать место обработки данных — от сенсорных узлов и шлюзов до облака — в зависимости от требований к задержке, точности и энергопотреблению.

Таким образом представленные примеры демонстрируют практическую целесообразность использования предиктивной диагностики для динамических систем, так как изменение эксплуатационных условий: различие в квалификации операторов, неоднородность горных пород и изменения внешней среды, создает непредсказуемые нагрузки на оборудование, что делает плановое обслуживание и по отказу неэффективными. Поэтому внедрение данной диагностики позволило

улучшить прогнозирование состояния машин и повысить их готовность в реальным условиям эксплуатации, существенно уменьшить среднее время восстановления и повысить коэффициент технической готовности машин, экономическую эффективность эксплуатации оборудования.

Цифровизация и распространение технологий промышленного интернета вещей привели к изменению стратегии технического обслуживания. Интернет вещей обеспечивает взаимосвязь физического оборудования, встроенных датчиков, блоков обработки данных и облачных платформ в единую интеллектуальную систему, что обеспечивает возможность подключения и облегчает мониторинг различных параметров в режиме реального времени, а с помощью интегрированных в облако архитектур можно анализировать исторические данные для выявления тенденций деградации оборудования. Алгоритмы, работающие на периферийных устройствах или централизованных серверах, могут выдавать предупреждения, предлагать корректирующие меры или инициировать автономные корректировки. Основные этапы предиктивной диагностики представлены на рисунке 2.



Рисунок 2. Этапы предиктивного обслуживания.

К наиболее частым проблемам, возникающим в гидравлических системах, относятся утечки, неисправности клапанов, отказы насосов, и загрязнение рабочих жидкостей, что может привести к снижению эффективности системы, снижению производительности и потенциальным угрозам безопасности. Для их предотвращения в настоящее время различные организации все чаще внедряют передовые методы предиктивной, основанные на алгоритмах машинного обучения, которые могут прогнозировать время простоя, анализируя исторические данные, что позволяет проводить предиктивное обслуживание. Такой метод является перспективным решением в отраслях, где надежная работа гидравлических систем имеет решающее значение [10].

Результаты. При анализе современных решений использования предиктивной диагностики в машинах основано на технологиях машинное обучения, интернета вещей, позволяющие реализовать мониторинг состояния в реальном времени. В рассмотренных исследованиях было установлено, что применение данного метода диагностики в воздушных компрессорах сократить время простоев оборудования примерно на 20 % и на 30% в строительных машинах. В трансмиссиях сельскохозяйственных тракторов обеспечивает снижение эксплуатационных расходов на ремонт на 93% и сокращение времени восстановления работоспособности на 88%. В горнодобывающей техники внедрение иерархической системы диагностики с распределенной обработкой данных позволяет достичь высокой точности прогнозирования.

Обсуждение. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность использования предиктивной диагностики по сравнению с традиционными методами, так как позволяет повысить эксплуатационную надежность и экономическую эффективность. При этом несмотря на высокие показатели эффективности, основными проблемами для массового внедрения остается высокая первоначальная стоимость развертывания систем промышленного интернета вещей и необходимость накопления исторических данных для обучения моделей.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность предиктивной диагностики для различных видов машин. Мониторинг состояния в режиме реального времени для прогнозируемого технического обслуживания имеет ряд преимуществ, таких как сокращение поломок, снижение общих затрат, повышение культуры технического обслуживания и повышение эффективности эксплуатации, однако по-прежнему существует ряд проблем, которые необходимо решить, таких как первоначальная стоимость установки для предиктивного обслуживания, сбор и хранение нужной информации и интерпретация результатов.

Список источников

1. Чимпаизов Ф.Н., Шингисов А.У. Разработка систем прогнозирования поломок и технического обслуживания сельскохозяйственной техники на основе данных больших данных // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2024. 6(123).

2. Ran, Yongyi & Zhou, Xin & Lin, Pengfeng & Wen, Yonggang & Deng, Ruilong. (2019). A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches. 10.48550/arXiv.1912.07383.
3. Mołęda, M.; Małysiak-Mrozek, B.; Ding, W.; Sunderam, V.; Mrozek, D. From Corrective to Predictive Maintenance—A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry. *Sensors* 2023, 23, 5970. <https://doi.org/10.3390/s23135970>
4. P. Nunes, J. Santos, E. Rocha, Challenges in predictive maintenance – A review, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 40, 2023, Pages 53-67, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.004>.
5. Moosavi, S.; Farajzadeh-Zanjani, M.; Razavi-Far, R.; Palade, V.; Saif, M. Explainable AI in Manufacturing and Industrial Cyber–Physical Systems: A Survey. *Electronics* 2024, 13, 3497. <https://doi.org/10.3390/electronics13173497>
6. Aminzadeh, A.; Sattarpanah Karganroudi, S.; Majidi, S.; Dabompre, C.; Azaiez, K.; Mitride, C.; Sénéchal, E. A Machine Learning Implementation to Predictive Maintenance and Monitoring of Industrial Compressors. *Sensors* 2025, 25, 1006. <https://doi.org/10.3390/s25041006>
7. da Silva, C.A.G.; Rodrigues de Sá, J.L.; Menegatti, R. Diagnostic of Failure in Transmission System of Agriculture Tractors Using Predictive Maintenance Based Software. *AgriEngineering* 2019, 1, 132-144. <https://doi.org/10.3390/agriengineering1010010>
8. Minh, Nguyen & Zorin, V.. (2023). System for recognising and monitoring the technical condition of construction machines. *E3S Web of Conferences*. 389. 10.1051/e3sconf/202338901054.
9. R. de la Fuente, L. Radrigan and A. S. Morales, "Enhancing Predictive Maintenance in Mining Mobile Machinery Through a Hierarchical Inference Network," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 59480-59504, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3557405.
10. Noura, Hassan & Chu, Thomas & Allal, Zaid & Salman, Ola & Chahine, Khaled. (2024). A Comparative Study of Ensemble Methods and Multi-Output Classifiers for Predictive Maintenance of Hydraulic Systems. *Results in Engineering*. 24. 10.1016/j.rineng.2024.102900.

Особенности мехатронного модуля коленного сустава экзоскелета нижних конечностей

Шабунин Андрей Владимирович¹

ndrsabunin@gamil.com

Котов Гиоргий Александрович¹

kotov1999gosha@mail.ru

¹ВЛГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Разработка мехатронного модуля коленного сустава экзоскелета нижних конечностей является актуальной задачей, обусловленной ростом потребности в эффективных средствах реабилитации и поддержки двигательной активности. Точность работы модуля определяет качество воспроизведения биомеханики ходьбы и безопасность пользователя. Современные достижения в области датчиков, приводов и адаптивного управления создают основу для формирования более функциональных и энергоэффективных систем экзоскелетов.

Ключевые слова: экзоскелеты, мехатронные устройства, реабилитационное устройство, коленный сустав, механотерапия

Features of the mechatronic knee joint module of the exoskeleton of the lower extremities

Shabunin Andrey Vladimirovich¹

ndrsabunin@gamil.com

Kotov George Alexandrovich¹

kotov1999gosha@mail.ru

¹VLSU, Vladimir, Russia

Abstract. The development of a mechatronic knee joint module for an exoskeleton of the lower extremities is an urgent task due to the growing need for effective means of rehabilitation and support of motor activity. The accuracy of the module determines the quality of reproduction of walking biomechanics and user safety. Modern advances in sensors, actuators, and adaptive control provide the foundation for more functional and energy-efficient systems exoskeletal.

Keywords: exoskeletons, mechatronic devices, rehabilitation device, knee joint, mechanotherapy

Введение. В настоящее время технология экзоскелетов все больше набирает популярность и развивается стремительными шагами. Вместе с этим также развиваются и мехатронные устройства. Актуальность разработки мехатронного модуля коленного сустава экзоскелета нижних конечностей обусловлена растущей потребностью в эффективных

средствах реабилитации, усиления физической работоспособности и компенсации утраченных двигательных функций.

Коленный сустав является одним из наиболее нагруженных элементов опорно-двигательного аппарата человека, обеспечивая до 70 % динамики ходьбы, поэтому точность и надежность определяют общую эффективность системы экзоскелета.

Современные вызовы в медицине — увеличение числа пациентов с последствиями нейротравм, инсультов, дегенеративных заболеваний суставов — требуют высокотехнологичных решений, способных частично или полностью восстанавливать способность к самостоятельному передвижению. В промышленности и военной сфере возрастает интерес к экзоскелетам, повышающим силу и выносливость человека при выполнении тяжелых или монотонных работ. В обоих случаях критическим элементом является интеллектуальный модуль коленного сустава, который должен точно повторять биомеханику человека, реагировать на меняющиеся нагрузки и обеспечивать плавность движений.

Технологический прогресс в области датчиков, электроприводов, алгоритмов управления и материалов делает возможным создание компактных, энергоэффективных и безопасных мехатронных узлов. Это открывает путь к более массовому применению экзоскелетов как в клинических, так и в бытовых условиях. Таким образом, актуальность разработки мехатронного модуля коленного сустава определяется сочетанием медицинских, технологических и социально-экономических факторов, которые формируют устойчивый спрос на современные системы поддержки и восстановления двигательной активности.

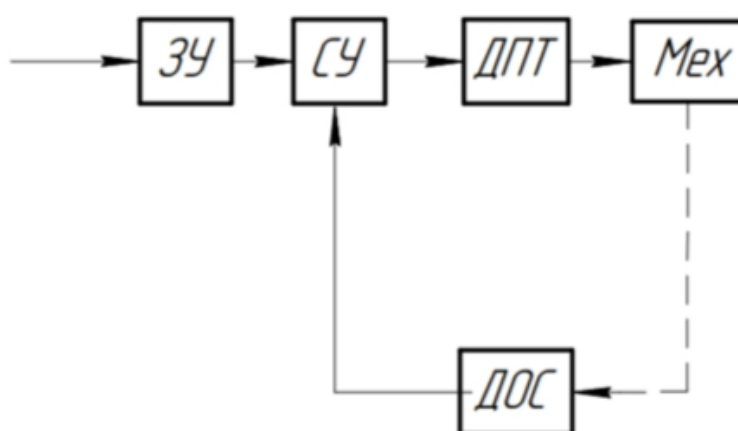


Рисунок 5. Структурная схема мехатронного устройства.

Материалы и методы. Для создания модуля были разработаны структурная и функциональная схема, а также схема, на которой показан принцип работы привода. На схеме представлен общий вид мехатронного модуля (Рисунок 1). ЗУ – задающие устройства . то есть датчики (гироскоп и оптический энкодер) , которые передают информацию на микроконтроллер (МК); СУ – система управления , включающая микроконтроллер и преобразователи сигналов , которые обрабатывают входящие и выходящие сигналы; ДПТ – двигатель постоянного тока, в нашем случае бесщеточный двигатель ; Мех – механическая часть устройства , то есть рабочий орган (часть каркаса , которая сцеплена с валом двигателя); ДОС – датчики обратной связи , тут используется энкодер , так как по нему можно определить все необходимые данные , с допустимыми погрешностями. Ниже представлена функциональная схема устройства.

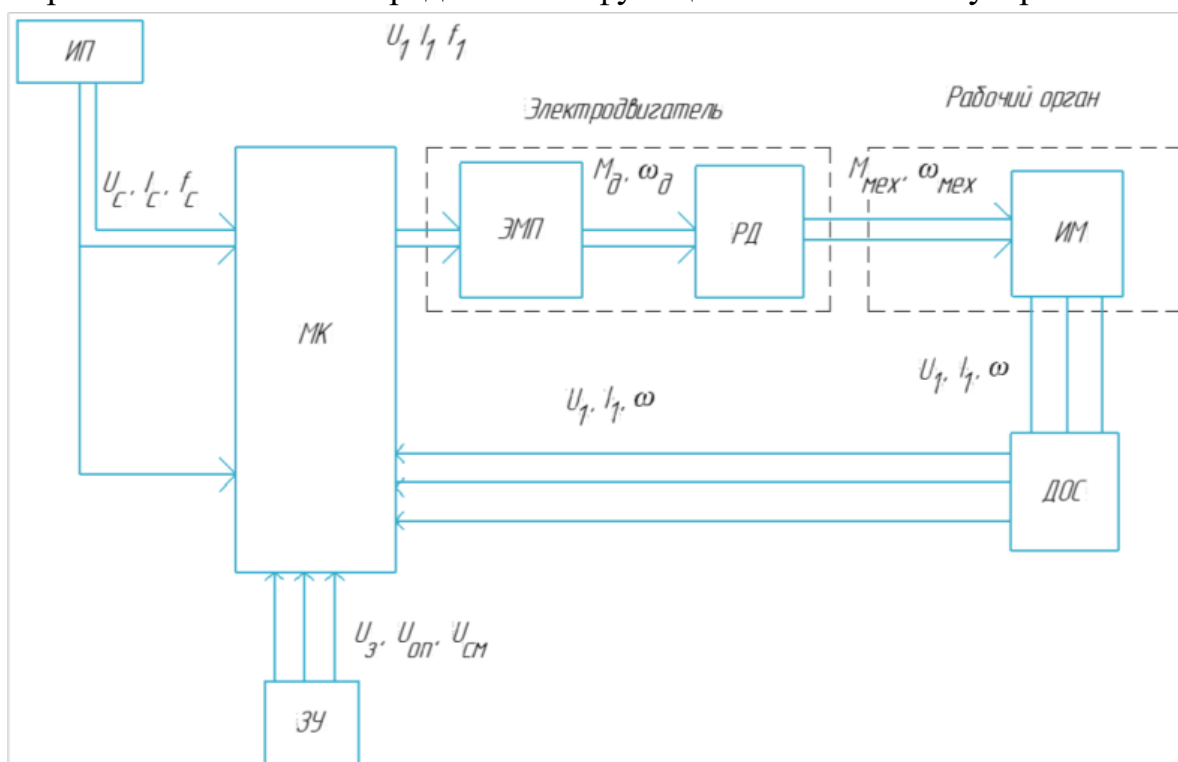


Рисунок 6. Функциональная схема мехатронного модуля.

В устройстве установлены два типа датчиков – гироскоп на бедре и оптический энкодер в приводе (рис. 2). Каждый из них подает сигнал на микроконтроллер, который обрабатывает и анализирует данные с помощью ИИ. С микроконтроллера сигналы идут на электромеханический преобразователь (ЭМП), который преобразует сигналы и разгоняет вал привода до заданных величин. Вал крепко сцеплен с конструкцией (ИМ),

установленной на голеностопной части. После отработки сгибания сустава через энкодер идет обратная связь на МК, где анализируется отработка привода и корректировка ошибки. Благодаря ИИ система будет подстраиваться под пользователя и улучшит быстродействие и энергоэффективность системы. Вся система будет питаться компактной батареей (ИП), установленной в бедренной части каркаса.

Ниже представлена схема управления приводом (Рисунок 3).

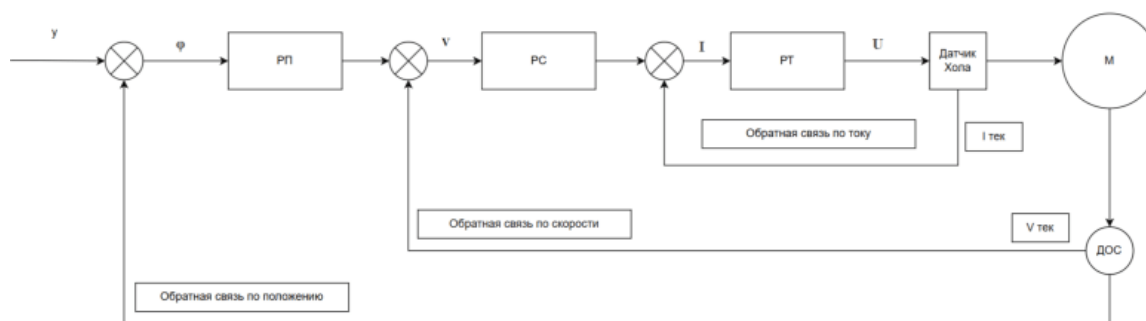


Рисунок 7. Схема управления приводом.

На схеме видно, что входящие сигналы (задающие) поступают на регуляторы положения, скорости и тока, где сравниваются входящий сигнал со встроенным (заданным) и после вычислений поступает на исполнительный механизм – двигатель. После отработки действия датчики снимают показатели и отправляют их на сравнение обратно к регуляторам, для устранения ошибки.

Обсуждение. Для проверки разработанных схем необходимо провести расчеты для определения нужных параметров привода и собрать модель для отработки алгоритма работы системы управления. Это является следующим шагом исследования.

Закключение. Таким образом в ходе рассмотрения особенностей мехатронного модуля коленного сустава экзоскелета нижних конечностей были выделены ключевые моменты структуры и функциональные возможности устройства. На основе предоставленных материалов можно строить образец для исследований работы модуля и анализа данных для дальнейших работ.

Список источников

1. Ю.Е. Мишулин, В.А. Немонтов учебное пособие «Цифровая схемотехника» Владимир, ВлГУ, 2006. <https://clk.li/oBQZ>

2. В. П. УМНОВ А. А. КОБЗЕВ Промышленные роботы и мехатронные системы: монтаж, наладка, испытания и обслуживание, Владимир, ВлГУ, 2021 <https://clk.li/ljic>

3. Датчики положения ротора бдпт в следящих системах с бдпт датчики положения <https://studfile.net/preview/12591404/page:22/> (дата обращения 18.11.2025)

4. Разнообразие датчиков для обратной связи с двигателем <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=502409> (дата обращения 18.11.2025)

5. В.И. Ключко, Н.В. Кушнир, Н.Ю. Павлова, А.С. Грива «Экзоскелеты и перспективы их использования» Научные труды КубГТУ, № 2, 2017 год <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0039/1407.pdf>

УДК 004.942

Инерциальная навигация и одометрия в виртуальных моделях мобильных роботов

Мпенгеле Эрик Бисамба¹

mpebiser@gmail.com

SPIN-код: 3446-0746

ORCID: 0009-0005-7500-5978

Лукьянов Евгений Анатольевич¹

lukevgan@gmail.com

SPIN-код: 1047-6600

ORCID: 0000-0002-6363-6511

¹ДГТУ, Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, д. 1

Аннотация. Разработка надежных алгоритмов навигации мобильных роботов зависит от разных факторов, как типы и качество датчиков, алгоритмы обработки их сигналов. Сократить затраты на тестирование алгоритмов, можно использовать виртуальную модель. В статье рассматривается интеграция виртуальных датчиков инерциальной навигации и кинематической одометрии в виртуальную модель мобильного робота и их использование для решения навигационных задач. Одометрия позволяет измерять относительное перемещение робота, но значимым могут быть ошибки из-за проскальзывания колес по поверхности движения. Применение инерциальных измерительных устройств (IMU) позволяет определять ускорения и угловые скорости робота независимо от динамики контактного взаимодействия колес, но сопровождается ошибками, из-за численной интеграции шумов и погрешностей датчика. Использование

виртуальных моделей этих датчиков позволяет оценить их применение, а также разработать алгоритмы для решения задач навигации и управления.

Ключевые слова: виртуальная модель, математическая модель, мобильный робот; инерциальная навигация, одометрия, обработка сигналов.

Inertial navigation and odometry in virtual models of mobile robots

Mpengele Eric Bisamba¹

mpebiser@gmail.com

SPIN code: 3446-0746

ORCID: 0009-0005-7500-5978

Lukyanov Evgeny Anatolyevich¹

lukevgan@gmail.com

SPIN code: 1047-6600, ORCID: 0000-0002-6363-6511

¹DSTU, Russia, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1

Abstract. The development of reliable navigation algorithms for mobile robots depends on various factors, such as the types and quality of sensors, their signal processing algorithms. A virtual model can be used to reduce the cost of the experimental testing of algorithms. This article discusses the integration of virtual inertial navigation sensors and kinematic odometry into a virtual mobile robot model and their use for solving navigation tasks. Odometry measures the relative movement of a robot, but errors can be significant due to wheel slippage on the surface. The use of inertial measurement units (IMU) can determine the acceleration and angular velocity of the robot independently of the dynamics of wheel contact interaction, but is accompanied by errors due to the numerical integration of noise and sensor errors. The use of virtual models of these sensors allows to evaluate their application, as well as to develop algorithms for solving navigation and control tasks.

Keywords: virtual model, mathematical model, mobile robot; inertial navigation, odometry, signal processing.

Введение. Область применения мобильной робототехники значительно расширяется во многих сферах жизнедеятельности человека. Использование мобильных роботов (МР) оправдано тем, что они могут выполнять множество функций, в том числе в условиях опасных для человека. Расширение областей применения мобильных роботов в целом (колесных роботов в частности) определяет рост требований к качеству их функционирования, которое характеризуется, например, скоростью, устойчивостью движения и точностью отработки заданных траекторий.

Эффективное определение параметров и условий, обеспечивающих требуемое качество движения мобильных систем, можно осуществить на основе математического или виртуального моделирования робота.

Виртуальные модели МР широко используются на этапах проектирования, исследований, разработки алгоритмов и программного обеспечения и т. д. Использование виртуального моделирования объясняется сокращением времени и затрат на этапах проектирования, исследования и отработки алгоритмов управления. Для МР задачи навигации и управления чаще всего решаются с использованием одометрии в комплексе с информацией, получаемой от датчиков инерциальной навигации.

В данной статье рассматривается виртуальная модель мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами и одним пассивным опорным. Роботы такого типа обладают такими основными преимуществами, как высокая мобильность и простота конструкции, что обеспечивает им широкое применение.

Материалы и методы. Целью исследования является определение границ применимости виртуальной модели МР с датчиками инерциальной навигации и одометрии на этапах исследования траекторного управления роботом с учетом его динамики. Задачами исследования предусматривалось разработка виртуальной модели МР, оснащенного датчиками инерциальной навигации и одометрии, проведение моделирования управления роботом при его движении по базовым траекториям – прямая линия, дуга окружности и их комбинации. На основе данных от одометрических и инерциальных датчиков, по результатам моделирования определялись расчетные траектории и параметры движения робота. Это позволило рассмотреть применение различных алгоритмов обработки сигналов датчиков (фильтр Калмана и низкочастотный фильтр) и оценить ошибки решения навигационных задач при виртуальном моделировании. Проведенные исследования и анализ полученных результатов позволил оценить применимость виртуального моделирования МР, оснащенных одометрическими датчиками и датчиками инерциальной навигации в условиях моделирования кинематики и динамики.

Виртуальная модель мобильного робота. Для моделирования использовалась среда CoppeliaSim. Расчетная схема мобильного робота представлена на рисунке 1, где обозначено - G — центр масс; B — линия осей приводных колес; $h=[x \ y]^T$ — расчетная точка, по которой выполняется

отслеживание траекторий движения робота; u и $\bar{u}$ — продольная и поперечная скорости центра масс; ω и ψ — угловая скорость и направление движения робота; d , b , a , e и c — конструктивные расстояния; $F_{rwx'}$ и $F_{rwy'}$ — продольная и поперечная силы, действующие на правое колесо; $F_{lwx'}$ и $F_{lwy'}$ — продольная и поперечная силы, действующие на левое колесо; $F_{cx'}$ и $F_{cy'}$ — продольная и поперечная силы, действующие на опорное колесо; $F_{ex'}$ и $F_{ey'}$ — продольная и поперечная силы реакции от манипулятора (если он установлен на платформе) при его работе, приведенные к точке E; τ_e — вращающий момент, создаваемый при работе манипулятора.

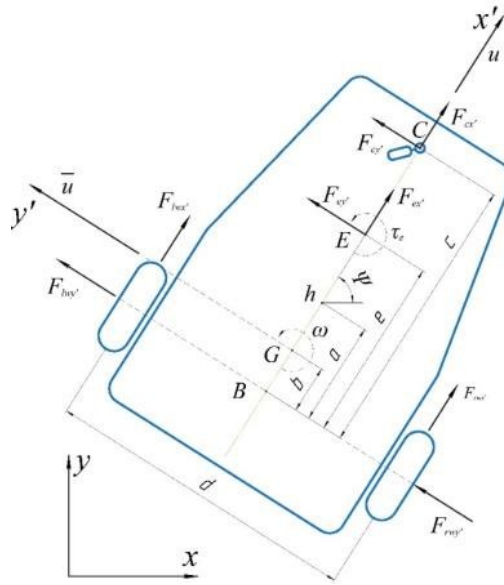


Рисунок 1. Действующие силы и моменты для разработки модели мобильного робота.

Ведущие колеса имеют независимое управление, опорное колесо свободно вращается (относительно оси в точке C).

Уравнения сил и моментов, действующих при движении робота:

$$\begin{cases} \sum F_{x'} = m(\dot{u} - \bar{u}\omega) = F_{lwx'} + F_{rwx'} + F_{ex'} + F_{cx'} \\ \sum F_{y'} = m(\dot{\bar{u}} - u\omega) = F_{lwy'} + F_{rwy'} + F_{ey'} + F_{cy'} \\ \sum M_z = I_z\dot{\omega} = \frac{d}{2}(F_{rwx'} - F_{lwx'}) - b(F_{rwy'} + F_{lwy'}) + (e - b)F_{ey'} + (c - b)F_{cy'} + \tau_e \end{cases} \quad (1)$$

где m — масса робота; I_z — момент инерции робота относительно вертикальной оси, расположенной в точке G. Кинематика точки h описывается следующим образом [2, 4-7]:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - \bar{u} \sin \psi - (a - b)\omega \sin \psi; \\ \dot{y} = u \sin \psi - \bar{u} \cos \psi + (a - b)\omega \cos \psi; \end{cases} \quad (2)$$

Согласно [5], скорости u , ω и $\bar{u}$, включая скорости проскальзывания, равны:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2} [r(\omega_r + \omega_l) + (u_r^s + u_l^s)] \\ \omega &= \frac{1}{d} [r(\omega_r - \omega_l) + (u_r^s - u_l^s)] \quad ; \\ \bar{u} &= \frac{b}{d} [r(\omega_r - \omega_l) + (u_r^s + u_l^s)] + \bar{u}^s \end{aligned} \quad (3)$$

где r — радиус приводных колес; ω_r и ω_l — угловые скорости правого и левого колеса; u_r^s и u_l^s — продольные скорости скольжения правого и левого колеса, а $\bar{u}^s$ — поперечная скорость скольжения колес. Используем упрощенные модели двигателей:

$$\begin{aligned} \tau_r &= k_a(v_r - k_b\omega_r)/R_a, \\ \tau_l &= k_a(v_l - k_b\omega_l)/R_a, \end{aligned} \quad (4)$$

где v_r и v_l — напряжения, поступающие на правый и левый двигатели; k_b равно константе напряжения умноженной на передаточное число; R_a — активное сопротивление обмотки двигателя; τ_r и τ_l — крутящие моменты правого и левого двигателей умноженные на передаточное число; k_a — константа крутящего момента умноженная на передаточное число. Динамические уравнения двигателей-колес:

$$\begin{aligned} I_e\dot{\omega}_r + B_e\omega_r &= \tau_r - F_{rwx}'R_t, \\ I_e\dot{\omega}_l + B_e\omega_l &= \tau_l - F_{lwx}'R_t, \end{aligned} \quad (5)$$

где I_e и B_e — момент инерции и коэффициент вязкого трения комбинированного ротора двигателя, коробки передач и колеса, а R_t — номинальный радиус колес.

В большинстве практически применяемых МР для управления скоростью двигателей используются ПИД-регуляторы. Это означает, что напряжение, подаваемое на обмотку двигателя, определяется текущими значениями и ошибками управления. Поэтому целесообразно использовать в модели мобильного робота уравнения, связывающие вычисляемые напряжения на двигателях с параметрами движения робота. Для этого в модель включены регуляторы скорости. Для упрощения модели рассмотрен ПД-регулятор скорости, который описывается следующими уравнениями:

$$\begin{pmatrix} v_u \\ v_\omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{PT}(u_{ref} - u) - k_{DT}\dot{u} \\ k_{PR}(\omega_{ref} - \omega) - k_{DT}\dot{\omega} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

Переменными $\dot{u}_{ref}$ и $\dot{\omega}_{ref}$ можно пренебречь для упрощения модели. Из (1), (2), (3), (4), (5) и (6) получается следующая динамическая модель мобильного робота [6, 7]:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \cos \psi - a\omega \sin \psi \\ u \sin \psi + a\omega \cos \psi \\ \omega \\ \frac{\bar{\theta}_3^0}{\bar{\theta}_1^0} \omega^2 - \frac{\bar{\theta}_4^0}{\bar{\theta}_1^0} u \\ \frac{\bar{\theta}_5^0}{\bar{\theta}_2^0} u\omega - \frac{\bar{\theta}_6^0}{\bar{\theta}_2^0} \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\bar{\theta}_1^0} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{\theta}_2^0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ 0 \\ \bar{\delta}_u \\ \bar{\delta}_\omega \end{pmatrix}; \quad (8)$$

где u_{ref} и ω_{ref} — желаемые значения линейной и угловой скоростей соответственно, представляющие входные сигналы системы. Параметры, определяющие динамические характеристики модели:

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_1^0 &= \left(\frac{R_a}{k_a} (mR_t r + 2I_e) + 2rk_{DT} \right) / (2rk_{PT}) \\ \bar{\theta}_2^0 &= \left(\frac{R_a}{k_a} (I_e d^2 + 2R_t r (I_z + mb^2)) + 2rdk_{DR} \right) / (2rdk_{PT}) \\ \bar{\theta}_3^0 &= \frac{R_a}{k_a} mbR_t / (2k_{PT}) \\ \bar{\theta}_4^0 &= \frac{R_a}{k_a} \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) / (rk_{PT}) + 1 \\ \bar{\theta}_5^0 &= \frac{R_a}{k_a} mbR_t / (dk_{PT}) \\ \bar{\theta}_6^0 &= \frac{R_a}{k_a} \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) d / (2rk_{PR}) + 1 \end{aligned} \quad ; \quad (9)$$

Неголономность взаимодействия колес и поверхности, по которой происходит движение определяется элементами вектора неопределенности

$$[\delta_x \quad \delta_y \quad 0 \quad \bar{\delta}_u \quad \bar{\delta}_\omega]^T :$$

$$\delta_x = -\bar{u}^S \sin \psi$$

$$\delta_y = -\bar{u}^S \cos \psi$$

$$\bar{\delta}_u = \frac{\frac{m\omega\bar{u}^S + F_{ex}' + F_{cx}'}{I_e} + \left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) \frac{u_r^S + u_l^S}{R_t r I_e} + \frac{\dot{u}_r^S + \dot{u}_l^S}{R_t r}}{\frac{m}{I_e} + \frac{2}{R_t r} + \frac{2k_{DT} k_a}{R_a R_t I_e}} ; \quad (10)$$

$$\bar{\delta}_\omega = \frac{\left(\frac{k_a k_b}{R_a} + B_e \right) \frac{u_r^S - u_l^S}{2R_t r I_e} + \frac{\dot{u}_r^S - \dot{u}_l^S}{2R_t r} - \frac{mb\bar{u}^S}{I_e d} + \frac{e^F e_{y'} + c^F c_{y'} + \tau_e}{I_e d}}{\frac{d}{2R_t r} + \frac{I_z + mb^2}{I_e d} + \frac{k_{DR} k_a}{R_t R_a I_e}}$$

Вектор неопределенности [7] не будет учитываться, поскольку в данном исследовании не ставилась задача моделировать предельную динамику движений мобильного робота.

В среде САПР была создана 3D модель мобильного робота (Рисунок 2), которая была импортирована в CoppeliaSim [1, 3].

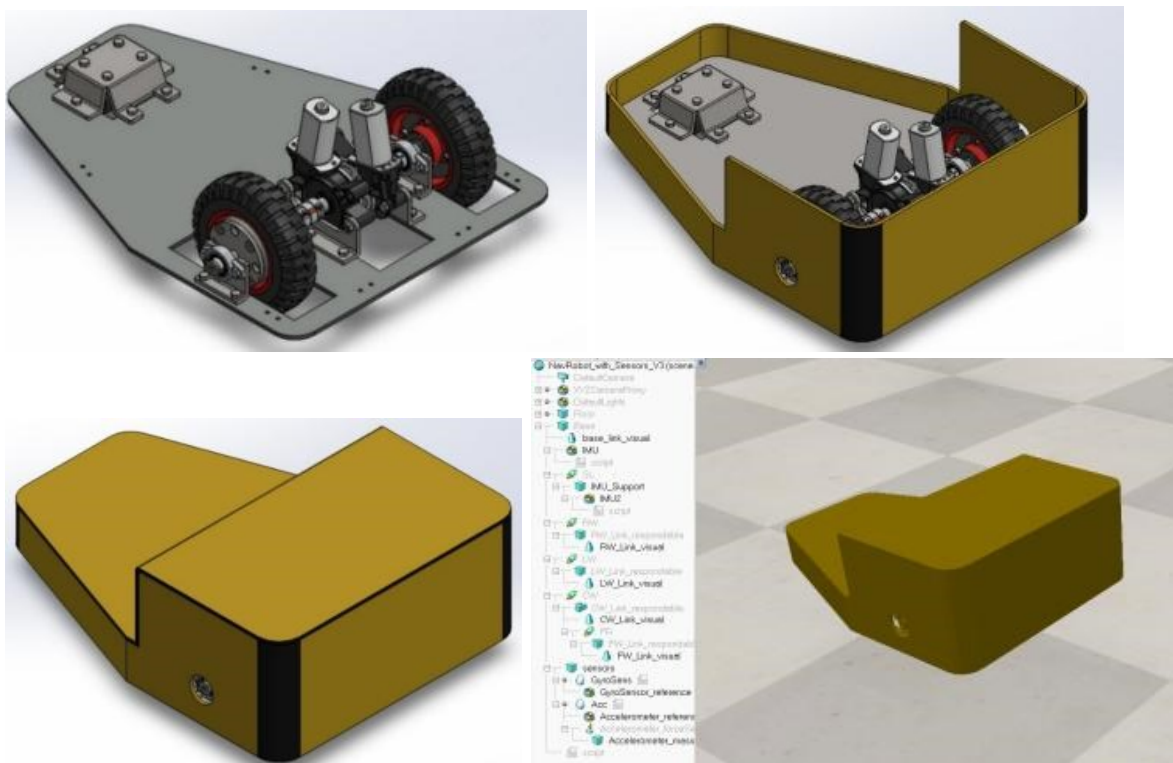


Рисунок 2. Модель 3D и виртуальная модель мобильного робота в CoppeliaSim.

В таблице 1 приведены численные значения основных параметров модели.

Таблица 1

Параметры модели робота

Наименования	Символ	Числовые значения	Единица измерения
Радиус колес (ведущих)	r	0.08	m
Расстояние между двумя ведущими колесами	d	0.33	m
Расстояние между осью ведущих колес и осью опорного колеса	c	0,35	m
Расстояние от оси, соединяющей два колеса, до центра массы	b	0.1423	m
Точка h (в том же положении находится центр масс)	$a = b$		m
Виртуальная модель не имеет манипулятора на платформе. (Точка E не существует)	e	0	m

Как было определено задачами исследования, модель должна быть оснащена виртуальными датчиками одометрии и инерциальной навигации. Реализация одометрии в *CoppeliaSim* не представляет сложностей, а создание и использование виртуальных гироскопов и акселерометров рассмотрено в статье [1].

Для проведения экспериментов/моделирования, к модели добавляется программа управления, которая позволяет выполнять различные движения и траектории, а затем полученные данные анализируются. Следует отметить, что сигналы виртуального IMU-датчика вычисляются в система координат датчика (локальной системе координат), поэтому необходимо учитывать их расположение. В данной модели робота виртуальный датчик IMU установлен в точке G (центр масс, см. Рисунок 1), а одометры регистрировали углы и скорости вращения ведущих колес. Результаты экспериментов приведены ниже.

Моделирование движения робота по прямой. Цель эксперимента – используя сигналы виртуальных датчиков определить траекторию перемещения робота и оценить ее отличие от «заданной траектории», которая определяется законами движения колес и задана программой управления роботом. Эксперимент по моделированию траекторного движения робота проводится при следующих параметрах угловые скорости ведущих колес - ω_r и ω_l равны 180 град/с, длительность движения - 8 секунд, ограничения вращающего момента двигателей - τ_r и τ_l заданы величиной 10 Нм. На графике (Рисунок 3) показаны результаты моделирования. Определим линейную и угловую скорость платформы в соответствии с уравнениями 2 и 3. При движении по прямой угловая скорость поворота платформы $\omega = 0$, а линейная скорость составит $u = 0.25$ м/с.

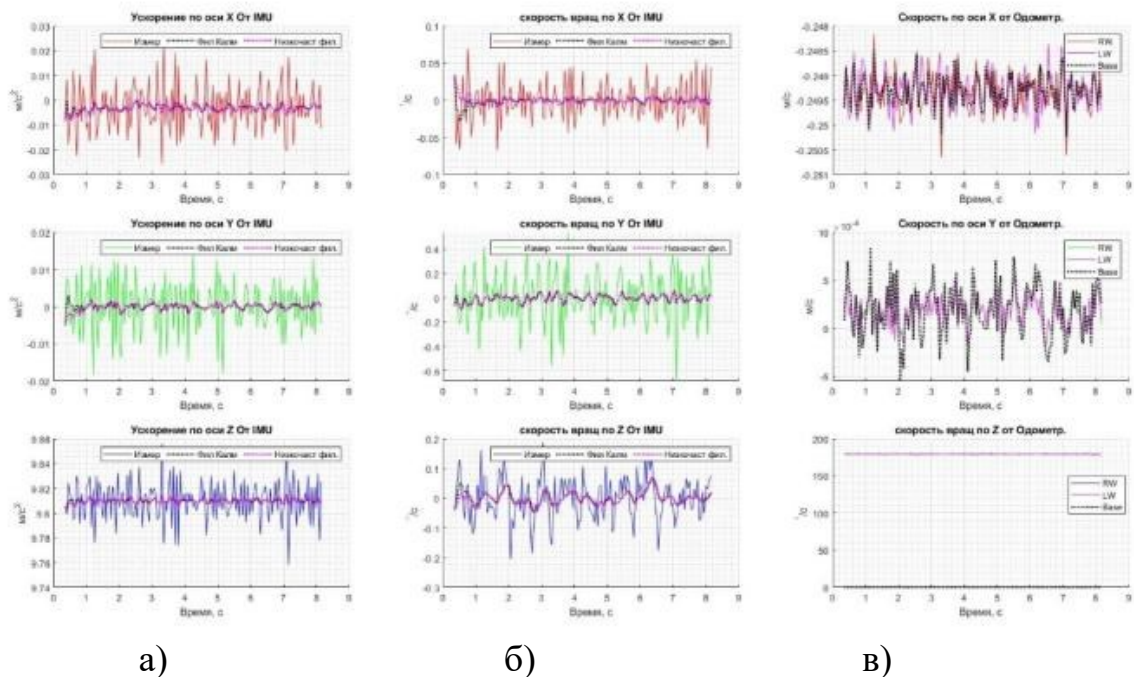


Рисунок 3. Результат моделирования линейного движения робота.
 Линейные ускорения по осям (а),
 скорости вращательного движения (б),
 скорости движения колес и платформы на основе одометрии (в).

Полученные сигналы с виртуальных датчиков содержат некоторые «помехи», которые могут устраняться с помощью фильтра Калмана или фильтра низких частот. На рисунке 3 показаны полученные при моделировании сигналы и результат их обработки. на рисунке 3. На рисунке 3 в) линии «RW» и «LW» соответствуют данным, полученным с одометров, установленным на правом и левом колесах соответственно, а линия «Base» — скорости для точки наблюдения движения робота (точка G/h, центр масс) в данном случае.

Моделирование движения робота по окружности. При движении по окружности скорости вращения колес заданы: ω_r равна 90 град/с, а ω_l — 180 град/с. Моделирование проводится в течение 15 с. Результаты моделирования показаны на рисунке 4.

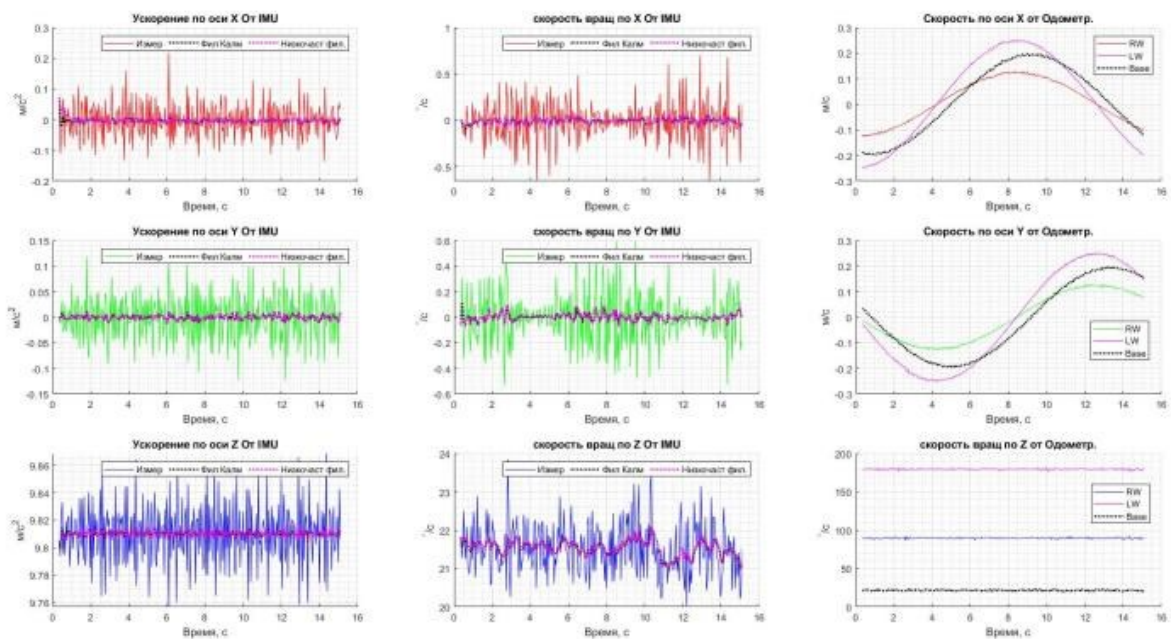


Рисунок 4. Результат моделирования кругового движения робота.

В соответствии с уравнениями 2 и 3, можно заметить на рисунке 4, что значение угловой скорости поворота платформы ω соответствует величине, которую можно получить аналитическим путем, а значение $\ddot{y}$ в системе координат датчика IMU соответствует ускорению равномерного кругового движения.

Моделирование движения робота по участкам «прямая - дуга». В этом случае моделируется комбинация двух предыдущих экспериментов. Робот движется вдоль оси x (глобальные координаты) со скоростями колес ω_r и ω_l равными 180 град/с, после перемещения на 1,5 метра он должен начать двигаться по дуге окружности. Скорости колес при этом - ω_r равно 90 град/с и ω_l равно 180 град/с. На рисунке 5 показаны результаты моделирования комбинированного движения робота.

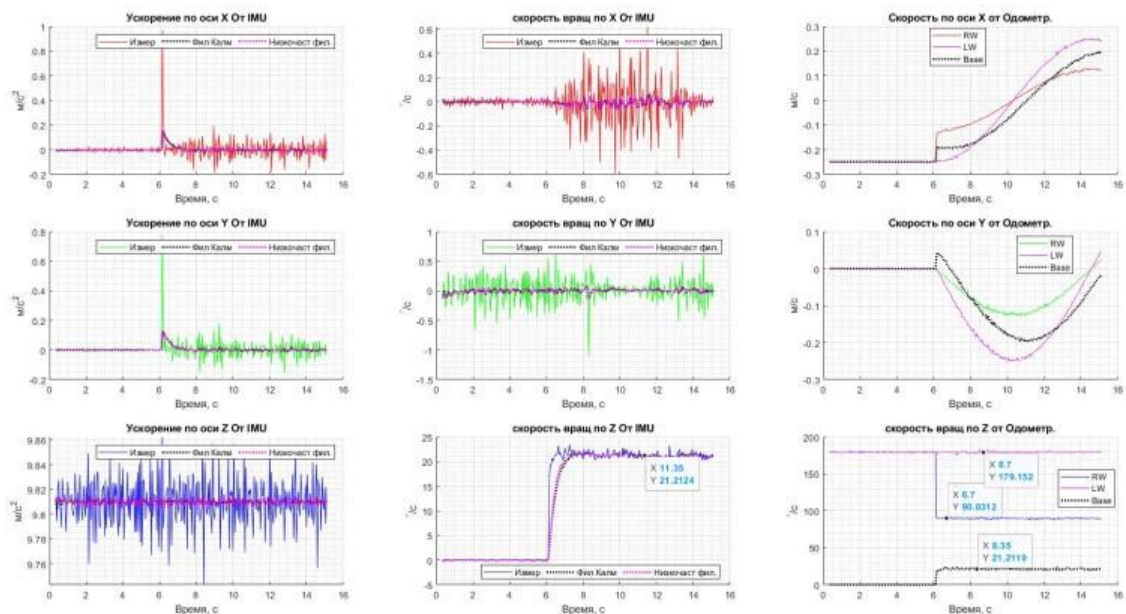


Рисунок 6. Результат моделирования комбинированного движения (линейное и равномерное круговое).

Как видно на рисунке 5, угловая скорость вращения платформы ω , полученная с помощью виртуального датчика IMU, соответствует угловой скорости, полученной при моделировании непосредственно в среде Coppeliasim.

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты соответствуют значениям, которые можно рассчитать аналитически. Виртуальные датчики предлагают прекрасную и быструю альтернативу в поиске навигационных алгоритмов и решений.

Закключение. Проведенные исследования и численные эксперименты по моделированию движения мобильного робота, оснащенного виртуальными одометрическими и инерциальными датчиками, позволяют сделать следующие выводы:

1. При моделировании мобильных роботов возможно применять виртуальные датчики для решения навигационных задач и управления. Сигналы датчиков имеют относительную погрешность менее 0,035% для одометра и гироскопа и 0,2% для акселерометра.

2. Полученные данные от виртуальных сенсоров соответствуют характеру движения объекта, где они установлены. Для мобильных роботов, наличие/отсутствие проскальзывания колес необходимо контролировать для правильной интерпретации результатов моделирования.

3. Создание и использование виртуальных мобильных роботов и их информационно-сенсорных систем позволяет оценить эффективность методов и алгоритмов обработки сигналов и способствует принятию правильных решений при проектировании физической модели.

4. Использование виртуальных моделей мобильных роботов позволяет существенно сократить затраты времени на создание и отладку алгоритмов навигации и управления роботами.

Список источников

1. Лукьянов Е.А., Мпенгеле Э.Б., Алхалили Алак С.Б. Создание виртуального датчика для моделирования систем инерциальной навигации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-10-3-125-135>

2. Сизых В.Н., Баканов М.В. Математическая модель для адаптивного управления трёхколёсным мобильным роботом // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2018. – №1. – С. 9-18. DOI:10.26160/2658-3305-2018-1-9-18

3. Лукьянов Е. А., Мпенгеле Э. Б. Оценка ошибок инерциальной навигации от параметров движения объекта // Актуальные проблемы науки и техники. 2023. С. 820-821.

4. В.В. Бартнев, С.Ф. Яцун, А.С. Аль_Еззи, Математическая модель движения мобильного робота с двумя независимыми ведущими колесами по горизонтальной плоскости, т. 13, №4, 2011.

5. Y. Zhang, D. Hong, J. H. Chung, and S. A. Velinsky, “Dynamic Model Based Robust Tracking Control of a Differentially Steered Wheeled Mobile Robot,” Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, June 1998, pp. 850-855. DOI:10.1109/ACC.1998.703528

6. Felipe N. Martins, Wanderley C. Celeste, Ricardo Carelli, Mar rio Sarcinelli-Filho, Teodiano F. Bastos-Filho, An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot trajectory tracking. Control Engineering Practice , Volume 16, Issue 11, November 2008, pp 1354-1363. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2008.03.004>

7. Celso De La Cruz, Ricardo Carelli, Dynamic Modeling and Centralized Formation Control of Mobile Robots, 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, November 2006. DOI:10.1109/IECON.2006.347299

Роботизированные комплексы для внутреннего контроля качества труб на металлургических предприятиях

Филимонов Сергей Викторович¹

filimonov_sv@vsw.ru

Тёмкин Игорь Олегович²

igortemkin@ya.ru

Рыбаков Алексей Владимирович³

rybakov_av1@omk.ru

¹АО Выксунский металлургический завод, г. Выкса, Россия;

²НИТУ МИСИС, г. Москва, Россия;

³АО Выксунский металлургический завод, г. Выкса, Россия.

Аннотация. Для осмотра внутренней поверхности трубы разрабатываются и применяются роботизированные системы, решающие различные задачи. К таким задачам можно отнести обследование трубопроводов, куда включается поиск дефектов, поиск повреждений, поиск отложений и другие поиски, так же для ремонта трубопроводов.

В данной работе представлен комплексный анализ разработки и выбора конструкций роботизированных комплексов для автоматического выявления дефектов внутренней поверхности труб в условиях промышленного производства.

На предприятиях, производящих стальные трубы, назрел вопрос использования роботов для осмотра внутренней поверхности труб. Робот должен выявить дефекты на внутренней поверхности трубы, тем самым обеспечить достойное качество трубной продукции.

Исследованы основные типы дефектов (вдавы, плены, дефекты сварных соединений), определены оптимальные конфигурации диагностического оборудования. Предложена система датчиков, включающая линейные камеры, IP-камеры и лазерные измерители, обеспечивающая формирование виртуальной развёртки внутренней поверхности трубы. Практическое внедрение предложенных решений позволит существенно повысить качество трубной продукции и снизить риски производственного брака.

Ключевые слова: внутритрубные роботы, осмотр внутренней поверхности труб, поиск дефектов труб, роботизированные комплексы, внутритрубный контроль, дефектоскопия, металлургическое производство, качество труб, автоматизированная диагностика.

Robotic complexes for internal pipe quality control at metallurgical enterprises: development and practical application

Filimonov Sergey Viktorovich¹

filimonov_sv@vsw.ru

Temkin Igor Olegovich²

igortemkin@ya.ru

Rybakov Aleksey Vladimirovich³

rybakov_av1@omk.ru

¹Vyksa Steel Works, Vyksa, Russia;

²MISIS, Moscow, Russia;

³Vyksa Steel Works, Vyksa, Russia.

Abstract. Robotic systems are being developed and used to inspect the inner surface of pipes, which can be used for a variety of tasks. These tasks include inspecting pipelines for defects, damage, deposits, and other issues, as well as repairing pipelines.

This article provides a comprehensive analysis of the development and selection of robotic systems for automatic detection of defects on the inner surface of pipes in industrial production conditions.

At enterprises producing steel pipes, the question of using robots to check the inner surface of pipes has arisen. The robot should detect defects on the inner surface of the pipe, thus ensuring the proper quality of pipe products.

The main types of defects (Indentations, cavities, defects in welded joints) have been studied, and the optimal configurations of diagnostic equipment have been determined. A sensor system is proposed, which includes linear cameras, IP cameras, and laser measuring devices, and provides for the formation of a virtual scan of the inner surface of the pipe. The practical implementation of the proposed solutions will significantly improve the quality of pipe products and reduce the risk of production defects.

Keywords: pipe inspection robots, pipe interior inspection, pipe defect detection, robotic systems, pipe inspection, flaw detection, metallurgical production, pipe quality, automated diagnostics.

Введение. Системы для осмотра внутренней поверхности трубы при производстве труб имеют различные конструкции и особенности. В этом многообразии систем можно выделить направление роботизированного осмотра, где применяются роботы с установленными на них устройствами для определения дефектов металла.

Контроль качества трубной продукции — критически важная задача современного металлургического производства. Традиционные методы

визуального осмотра ориентированы преимущественно на внешний контроль изделий, оставляя незамеченными внутренние дефекты, которые:

- снижают эксплуатационные характеристики труб;
- повышают риск аварийных ситуаций при эксплуатации;
- ведут к экономическим потерям из-за производственного брака.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью:

1. Автоматизации процессов внутреннего контроля труб на этапе изготовления.
2. Повышения точности выявления скрытых дефектов.
3. Снижения влияния человеческого фактора на результаты диагностики.

Задачи исследования:

1. Систематизировать типы дефектов внутренней поверхности труб диаметром 530–720 мм.
2. Определить оптимальные конфигурации робота для внутреннего осмотра труб;
3. Определить оптимальные конфигурации диагностического оборудования, устанавливаемого на работе.
4. Отечественные разработки фокусируются преимущественно на диагностике магистральных трубопроводов, оставляя незакрытой нишу внутритрубного контроля на этапе производства. В данном обзоре предлагается выявить конструкцию робота для применения в условиях осмотра труб на металлургических предприятиях, так же определить, какое оборудование для измерения дефектов требуется установить.

Материалы и методы. Объект исследования: трубы диаметром 530–720 мм на этапе производства.

По данным статистического анализа основными типами дефектов на внутренней поверхности трубы являются вдавы, плены, дефекты шва.

Для выбора робота способного эффективно работать в условиях внутренней поверхности трубы применим классификацию дефектов, которые требуется выявить в процессе прохождения роботом внутренней поверхности трубы.

В результате анализа для выявления дефектов из таблицы 1 выбрано следующее диагностическое оборудование:

- Линейные камеры (4 шт.) — формируют виртуальную развёртку внутренней поверхности путём объединения снимков вдоль оси трубы.

- IP-камеры высокого разрешения — обеспечивают детализированную фиксацию характеристик сварных швов.
- Лазерные датчики — измеряют глубину и геометрические параметры дефектов с точностью до 0,01 мм.

Диагностическое оборудование для выявления каждого вида дефекта указано в Таблице 1.

Таблица 1

**Оборудование для выявления дефектов внутренней поверхности
трубы**

Дефект	Оборудование	
Вдав	Камера 1.1	Лазерный датчик 1.1
Плена		
Дефекты шва	Лазерный сканер 1.2	Камера 1.2

Камера 1.1 это линейная камера, позволяющая определить состояние поверхности трубы в разрезе нескольких пикселей и углом до 120 градусов. Соединенные в одну задачу 4 камеры позволяют сделать развертку внутренней поверхности трубы. Это изображение можно обработать с помощью ПО в части поиска дефектов.

Камера 1.2 это IP камера высокого разрешения для создания развертки шва трубы.

Лазерный датчик 1.1 Требуется для определения глубины вдава и плена.

Лазерный сканер 1.2 это триангуляционный сканер позволяющий определить глубину дефекта шва.

В целом получается такая картина: робот с установленными на нем камерами и датчиками движется внутри трубы, передавая информацию в систему. Далее информация обрабатывается и выдается результат о найденном дефекте и о месте его расположения.

На Рисунках 1-4 изображены конфигурации тележек роботов, выбранных для анализа.

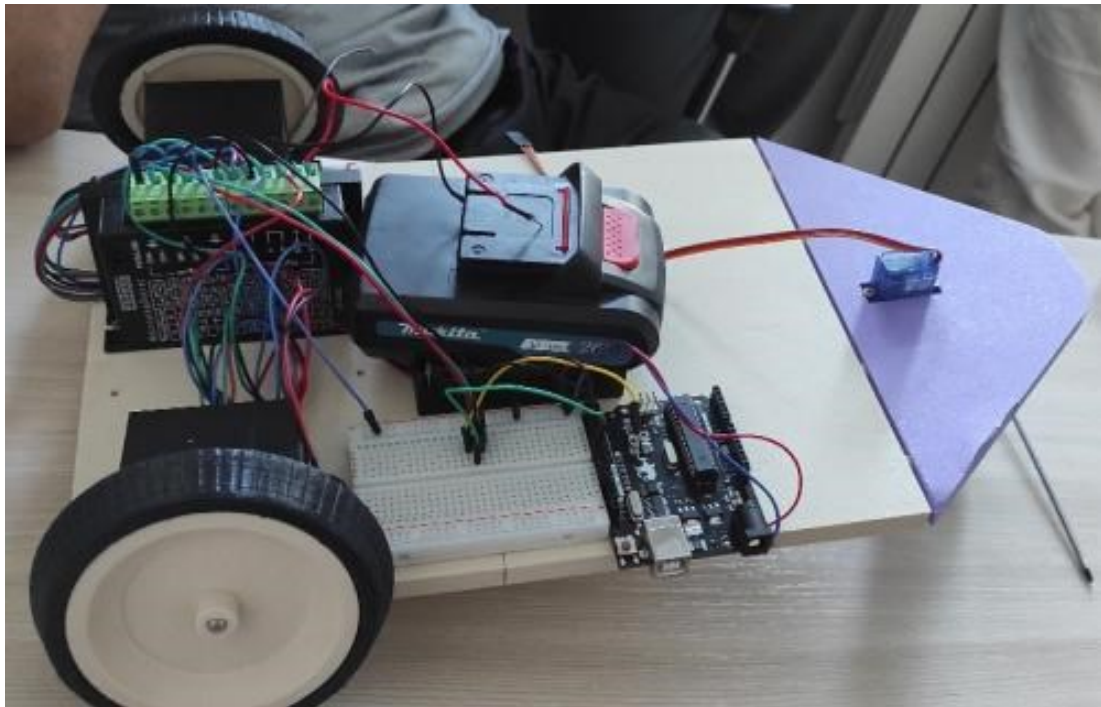


Рисунок 1. Тележка 3 колеса.

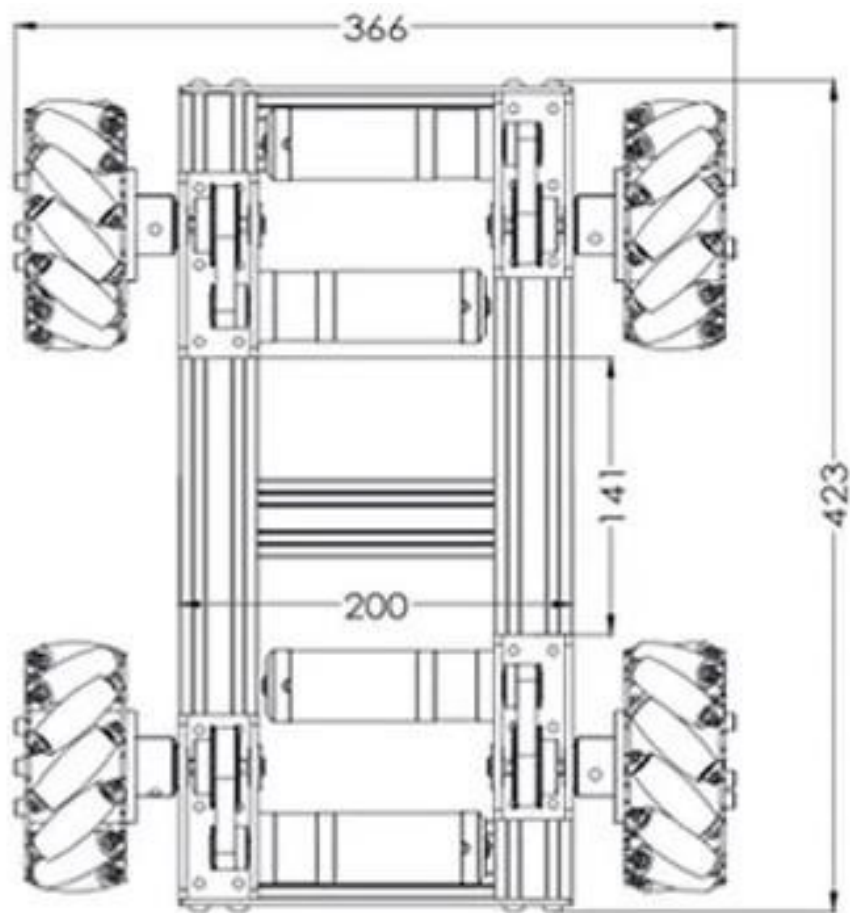


Рисунок 2. Тележка 4 колеса.

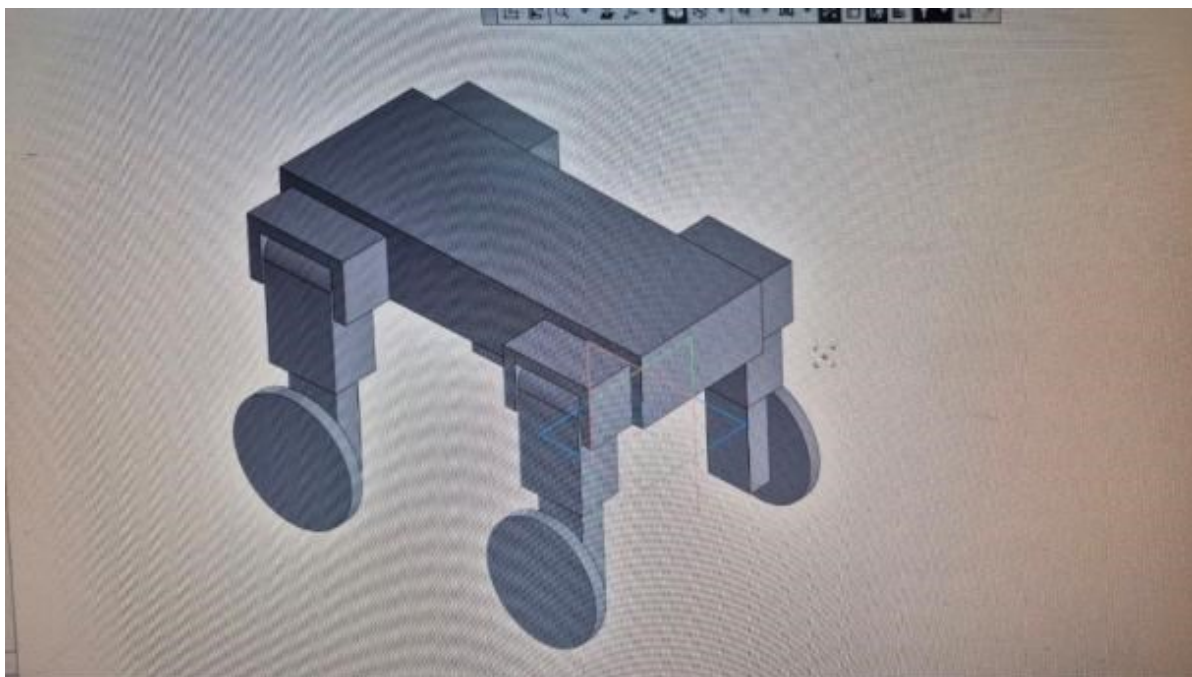


Рисунок 3. Тележка 4 колеса с разводными опорами.

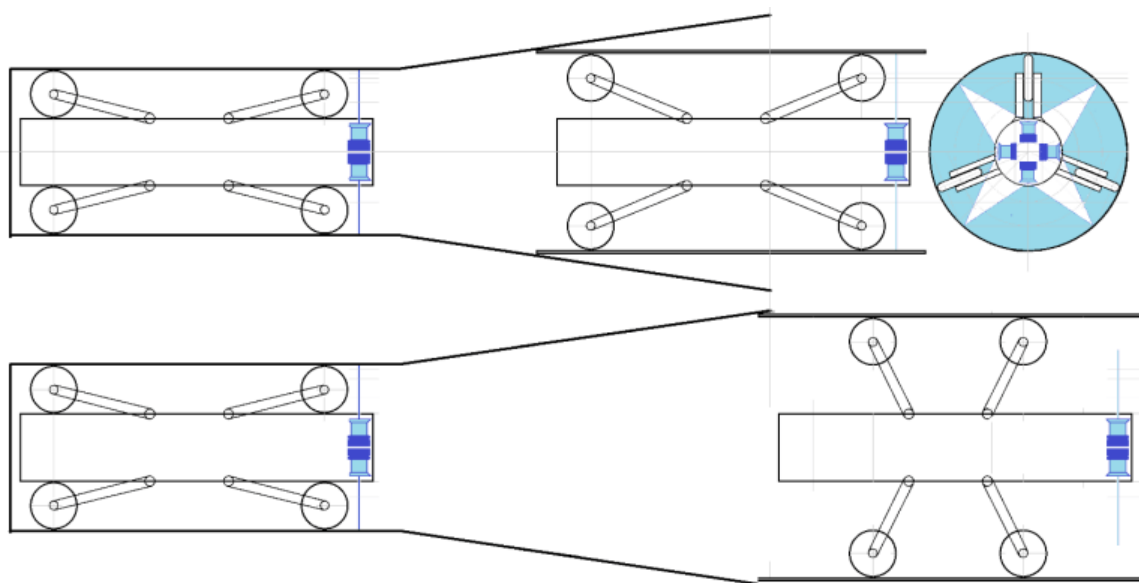


Рисунок 4. Робот «Паук».

Анализ предложенных конфигураций роботов указан в Таблице 3.

Таблица 3

**Выбор РТК для внутреннего осмотра трубы (кинематическая
схема)**

№	Критерии	Тележка 3 колеса	Тележка 4 колеса	Тележка 4 колеса с разводными опорами	Робот «Паук»
1	Простота проектирования	1	1	0	0
2	Универсальность робота	0	1	0	1
3	Простота управления	1	1	0	0
4	Простота загрузки РТК в трубу	1	1	0	0
5	Отсутствие проскальзывания колес	0	0	0	1
6	Оптимальная ширина колесной базы	0	1	1	1
	Баллы	3	5	1	3

1 – достижение критерия.

Результаты и обсуждение. По таблицам многокритериального анализа оптимальной конфигурацией признана тележка 4 колеса, отличающаяся простотой конструкции и управления.

Заключение. Представленный анализ показывает, что применение роботов для внутреннего осмотра труб является задачей, которую возможно решить.

Внедрение роботизированных систем обеспечит:

- повышение качества готовой продукции;
- снижение рисков производственного брака;
- увеличение конкурентоспособности металлургических предприятий

Преимущества роботизированной системы:

- скорость контроля;
- охват 100 % внутренней поверхности;
- цифровая фиксация результатов с привязкой к координатам;
- автоматическое формирование отчётов.

Перспективы развития:

- интеграция ИИ для автоматической классификации дефектов;
- разработка мобильных платформ для контроля труб различных диаметров;
- создание единой системы мониторинга качества на производстве.

Список источников

1. Т. А. Акименко, О. А. Игнатова, Т. Р. Кузнецова. Проектирование мобильных роботов, Изд-во ТулГУ, 2018;
2. Е. И. Юревич, «Основы робототехники», СПб.: БХВ-Петербург 2017;
3. J. J. Craig, «Introduction to Robotics: Mechanics and Control», 2022;
4. Александр Лукинов, «Проектирование мехатронных и робототехнических устройств», 2012;
5. ГОСТ 21014-88 «Термины и определения дефектов поверхности»;
6. ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции»;

Анализ влияния изменения параметров измерительного моста системы управления температурой в климатической камере на устойчивость в среде Engage

Лось Анастасия Валерьевна¹

los-av2015@mail.ru

Щагин Анатолий Васильевич¹

schagin4@rambler.ru

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия

Аннотация. Исследование относится к области теории линейных систем управления, его актуальность заключается в стремлении к упрощению методов анализа и синтеза сложных систем управления, особенно, имеющих высокий порядок передаточной функции $W(p)$. В статье рассмотрена задача нахождения допустимых значений параметров системы автоматического управления (САУ) температурой в климатической камере. Разработан программный код на языке Engage для реализации D-разбиения с помощью критерия устойчивости Михайлова. Проведен анализ параметрической устойчивости в среде ENGAGE САУ температуры в климатической камере. Показана значительная простота определения критических параметров САУ без трудоёмких расчётов годографа амплитудно – фазовой характеристики (АФХ).

Ключевые слова: САУ, синтез САУ, критерии устойчивости, D-разбиение, параметры системы.

Analysis of the effect of changes in the parameters of the measuring bridge of the temperature control system in the climate chamber on stability in the Engage environment

Los Anastasia Valeryevna¹

los-av2015@mail.ru

Shchagin Anatoly Vasilyevich¹

schagin4@rambler.ru

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия

Abstract. The research belongs to the field of the theory of linear control systems, its relevance lies in the desire to simplify the methods of analysis and synthesis of complex control systems, especially those with a high order of transfer function $W(p)$. The article considers the problem of finding acceptable values of the parameters of the automatic temperature control system (ACS) in the climate chamber. A software code in the Engage language has been developed

to implement D -partitioning using the Mikhailov stability criterion. The analysis of parametric stability in the ENGEE environment of ACS temperature in the climate chamber is carried out. The considerable simplicity of determining the critical parameters of ACS without laborious calculations of amplitude–phase characteristics (APC) hodograph is shown.

Keywords: ACS, ACS synthesis, stability criteria, D -partitioning, system parameters.

Введение. Современная теория управления располагает достаточным количеством критериев устойчивости, однако не все они применимы или удобны при анализе влияния изменения, например, одного из параметров на систему. Для передаточных функций порядка $n > 4$ имеется возможность достаточно точного определения критического коэффициента усиления ($K_{кр}$) с использованием частотного критерия Найквиста, в том числе его интерпретации на логарифмических частотных характеристиках. При этом, определение допустимого значения какого-либо другого параметра без расчета годографа АФХ не всегда возможно, и его получение из условия устойчивости при высоком порядке $W(p)$ вызывает необходимость достаточно объемных расчетов. Для упрощения решения подобных задач написан программный код, реализующий D -разбиение с использованием частотного критерия Михайлова.

Материалы и методы. D -разбиение, как и другие критерии позволяет оценить устойчивость замкнутой системы, не решая соответствующее ей характеристическое уравнение ($D(p)$). Современная теория управления заинтересована в упрощении методов анализа и синтеза, реализуемых с помощью вычислительных средств [1]. Практическое применение рассматриваемого метода основано определении областей, которым соответствует некоторое число правых корней $D(p)$ и области устойчивости системы, где положительные вещественные полюса отсутствуют. D – разбиение возможно для одного или двух параметров системы. В случае, когда параметр (a) один, достаточно задать его в $D(p)$ как варьируемый и рассчитать кривую D -разбиения:

$$D(p, a) = S(p) + aQ(p) = 0 \quad (1)$$

Тогда, с учетом преобразования $p \rightarrow j\omega$:

$$a = -\frac{S(j\omega)}{Q(j\omega)} = Re^a(\omega) + jIm^a(\omega) \quad (1)$$

Соотношения 1 и 2 удобны для реализации с помощью вычислительных средств в различных пакетах прикладных программ. В результате данной работы написан программный код на языке Julia, рассчитывающий и визуализирующий D –разбиение с помощью среды Engae. В качестве примера рассмотрим САУ стабилизации температуры θ в климатической камере, схема которой показана на рисунке 1 [2]. Объект управления (ОУ) представлен климатической камерой с нагревательным элементом, на который подается управляющее воздействие U_n . В это же время имеет место отклонении θ наружного воздуха (θ_n) от расчетного значения. Главная отрицательная обратная связь (ГОС) содержит датчик температуры (Д), который является термометром сопротивления, входным сигналом которого является θ , а выходным - сопротивление R_d .

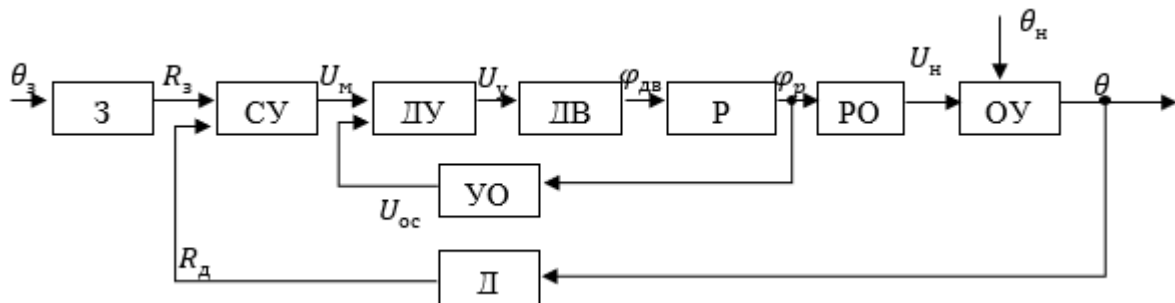


Рисунок1. Схема САУ и её функциональные элементы.

$\varphi_{дв}$ - угол поворота вала ДВ,

φ_p - угол поворота вала редуктора,

РО – регулирующий орган.

Устройство сравнения представляет из себя мостовую измерительную схему (СУ) и дифференциальный усилитель (ДУ), если имеется отклонение R_d от R_z , СУ подает напряжение разбаланса моста U_m на ДУ, сравнивающий U_m и напряжение местной обратной связи $U_{ос}$ посредством вычитания, усиливает разность этих сигналов и подает напряжение на электродвигатель U_y . Устройство местной обратной связи (УОС) является датчиком перемещения. Поскольку пример взят из стороннего источника, подробно каждый элемент описываться не будет, поскольку там даны все исходные данные, они будут отражены сразу в характеристическом уравнении. Для определения работоспособности программного кода поставим задачу определить допустимое значение параметров моста, при моделировании $W(p)$ СУ будет иметь передаточную функцию безынерционного звена $W_m = K_m = 0,2$.

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$D(p) = 50s^4 + 150,5s^3 + 120,5s^2 + 21,2s + 3,2 = 0$$

С учетом, что нам требуется определить допустимое значение K_M , зададим его как варьируемый параметр

$$D(p) = 50s^4 + 150,5s^3 + 120,5s^2 + 21,2s + 16K_M = 0 \quad (3)$$

Из выражения (3) получим:

$$K_M = \frac{-50s^4 - 150,5s^3 - 120,5s^2 - 21,2s}{16} \quad (4)$$

Результаты. Программный код основан на D-разбиении и критерии Михайлова использует библиотеки Plots и LinearAlgebra, в данном случае задается диапазон частот от 0,001 до 2,5 и по выражению (4) рассчитывается 10000 значений, но, для точности расчета, количество значений можно увеличить. Результат выполнения программы показан на рисунке 2, в соответствии с ним: $0 < K_M < 0,99$.

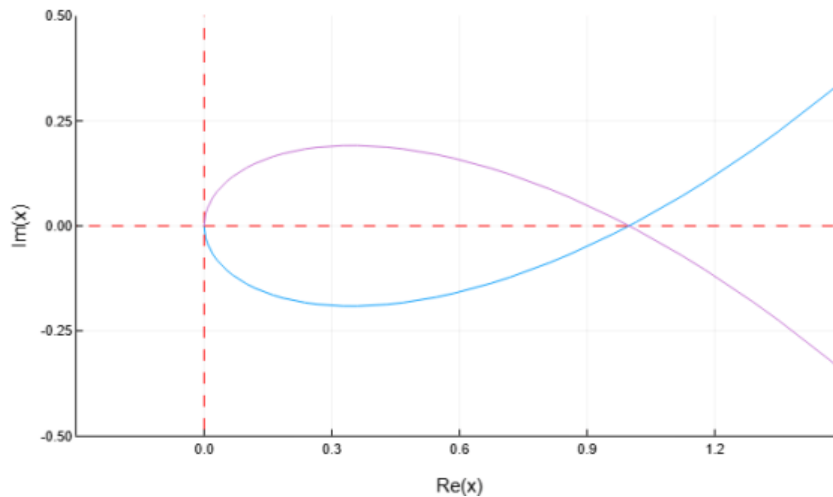


Рисунок 2. Результат выполнения программного кода.

Для проверки правильности полученных данных проведем проверку по частотному критерию Найквиста, для этого запишем $W(p)$ разомкнутой системы:

$$W(p) = \frac{16 \cdot K_M}{(s(0,5s + 1) + 0,2)(s + 1)(100s + 1)} \quad (6)$$

Далее будем использовать библиотеку ControlSystems и построим годографы АФХ для нескольких значений K_M и отобразим результаты на рисунке 3.

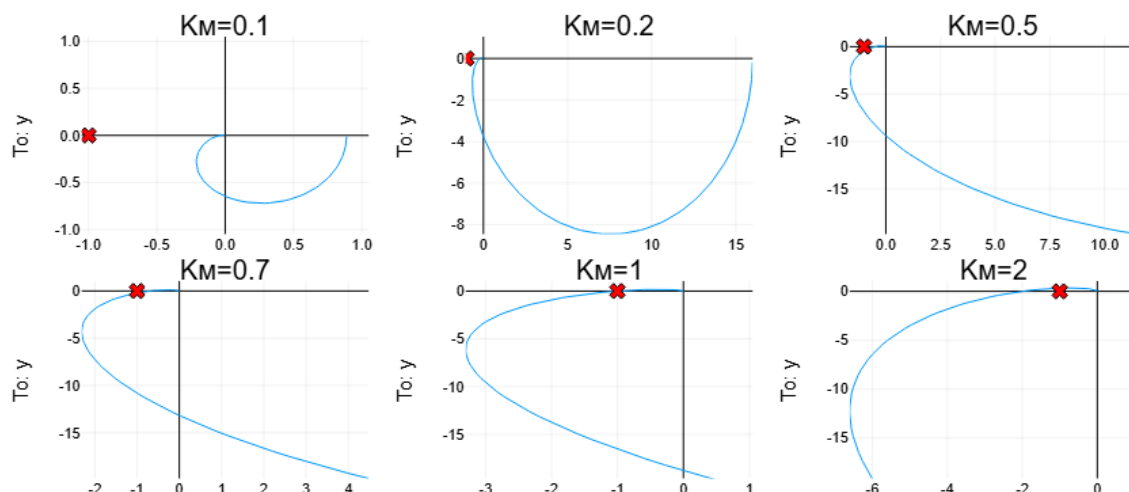


Рисунок 3. Результаты моделирования системы при разных K_M .

Результат, полученный с помощью программного кода, подтверждается и другим критерием устойчивости. При этом, при проведении исследования устойчивости системы по критерию Найквиста, K_M задавался как уже известный, в интервале, полученном с помощью программного кода. Определение K_M по критерию Найквиста было бы значительно сложнее из-за трудностей расчета АФЧХ системы.

Обсуждение. Техника D-разбиения была использована впервые применительно к устойчивости аффинной комбинации вещественных матриц общего вида. Дальнейшее развитие техника D-разбиения обретает в работе [3], здесь рассматриваются обобщения метода и его модификации на задачи с неопределенностью. В [4] отмечается целесообразность применения метода D-разбиения для исследования робастности, подробно описана методика D-разбиения применительно к матричным передаточным функциям и синтезу регуляторов высокого порядка. Данные работы составляют общую методику применения исследуемого метода на практике. В [5] предлагается метод, позволяющий полностью автоматизировать анализ степени устойчивости линейных САУ, но работа основана только на критерии Михайлова и определение влияния изменения каких-либо параметров системы не автоматизировано. В [6] предложен усовершенствованный метод D-разбиения, определяющий выбор параметров САУ и позволяющий прогнозировать возникновение аварийных ситуаций в судовой электроэнергетической системе.

Научная новизна настоящей работы заключается в разработке программного кода на Julia для D-разбиения на основе критерия Михайлова,

адаптации метода для анализа параметрической устойчивости в среде ENGEE, а также в применении метода к САУ температуры в климатической камере. Значимость работы заключается в упрощении определения критических параметров САУ без трудоёмких расчётов АФЧХ.

Заключение. В статье показано определение влияния на устойчивость системы параметров измерительного моста в системе управления температурой в климатической камере с помощью программного кода в среде Engеe. Полученный результат и корректность программного кода подтверждены с помощью критерия Найквиста. С помощью программного кода можно аналогичным образом определить и допустимое значение любого другого параметра системы.

Список источников

1. Хорхордин А.В., Волуева О.С., Турупалов В.В. Методы анализа и синтеза цифровых систем автоматического управления. Москва; Вологда, Инфра-Инженерия, 2022, 204 с.
2. Матвейчук Н. М. Теория автоматического управления. Практикум: учебное пособие, БГАТУ, 2021, 236 с.
3. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Техника D-разбиения при решении линейных матричных неравенств. Автоматика и телемеханика, 2006, № 11, 159–174; С. 1847–1861
4. Грязина Е. Н. Развитие метода D-разбиения в задачах анализа и синтеза систем управления. Дисс.... канд. тех. наук. Москва, 2007, 130с.
5. Грушун А.И., Грушун Т.А. Машинно-ориентированный метод анализа степени устойчивости линейных систем автоматического управления. The Scientific Heritage, 2020. № 45. С.31-36.
6. Гусева Е. В., Конева С. А., Цалоев В. М. Применение усовершенствованного метода D-разбиения для определения параметров генераторных агрегатов судовой электроэнергетической системы. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2023, № 2. С. 82–87.

УДК 681.5.063

Алгоритмы фиксации объекта в системах технического зрения мобильных роботов

Малышев Григорий Александрович¹ grishamalushev08@mail.ru

Немонтов Владимир Александрович¹ nemontov@vlsu.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы разработки алгоритмов обработки изображений в системах управления мобильных роботов., в частности, способов удержания объекта в центре кадра в системах слежения и наблюдения. В обычном режиме при дистанционном управлении оператор вручную удерживает объект в центре кадра, но это ограничивает скорость реакции и точность, особенно при быстром движении транспортной платформы или съёмке с дрона. Использование алгоритмов фиксации позволяет камере автоматически следить за объектом, сохранять его в кадре и компенсировать дрожания подвеса. Для достижения поставленной цели в ходе исследования были рассмотрены алгоритмы обнаружения и отслеживания объектов с целью построения системы управления двухкоординатным приводом подвеса камеры, как мехатронного модуля.

Ключевые слова: мобильный робот, система технического зрения, видеокамера, электропривод, мехатронный модуль, алгоритм работы.

Object Tracking Algorithms in Mobile Robot Vision Systems

Malichev Grigori Alexandrovich¹ grishamalushev08@mail.ru

Nemontov Vladimir Alexandrovich¹ nemontov@vlsu.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. The paper addresses issues related to the development of image processing algorithms in mobile robot control systems, in particular, methods for keeping an object centered in the frame in tracking and surveillance systems. In normal mode during remote control, the operator manually keeps the object in the center of the frame, but this limits reaction speed and accuracy, especially during fast movement of the transport platform or filming with a drone. The use of fixation algorithms allows the camera to automatically track the object, keep it in the frame, and compensate for gimbal vibrations. To achieve the stated goal, the study examined object detection and tracking algorithms to build a control system for a two-axis camera gimbal, as a mechatronic module.

Keywords: mobile robot, technical vision system, video camera, electric drive, mechatronic module, operation algorithm.

Введение. Современные системы технического зрения активно применяются в робототехнике как в автономных роботах, так и при дистанционном управлении оператором для определения положения и состояния объектов, находящихся в поле зрения технических средств и принятия решения по дальнейшим действиям робота. Яркий пример таких технологий, это алгоритмы слежения дрона за объектом от компании DJI Mavic. Дрон фиксируется на цели и следит за ней, когда объект скрывается за препятствием, дрон обходит препятствие и пытается найти объект в предполагаемой области.

Материалы и методы. Система автоматической фиксации объекта состоит из нескольких ключевых компонентов. Первый — это камера на стабилизирующем подвесе, который обеспечивает плавность движения и компенсацию дрожаний, позволяя получать стабильный кадр даже при движении робота по неровной поверхности. Второй компонент — интерфейс управления, через который либо оператор выбирает объект для фиксации, обычно с помощью кнопки или голосовой/цифровой команд, либо система технического зрения распознаёт объект по заложенным моделям. Третий — алгоритмический блок, который обрабатывает видеопоток, распознаёт объект и передаёт команды мехатронному модулю подвеса камеры для удержания объекта в кадре.

Связь между этими компонентами позволяет системе работать непрерывно: камера фиксирует объект, алгоритмы прогнозируют его движение при кратковременном исчезновении, а подвес корректирует положение камеры.

Алгоритмы фиксации объекта решают две основные задачи: обнаружение объекта в кадре и его непрерывное отслеживание (рисунок 1).

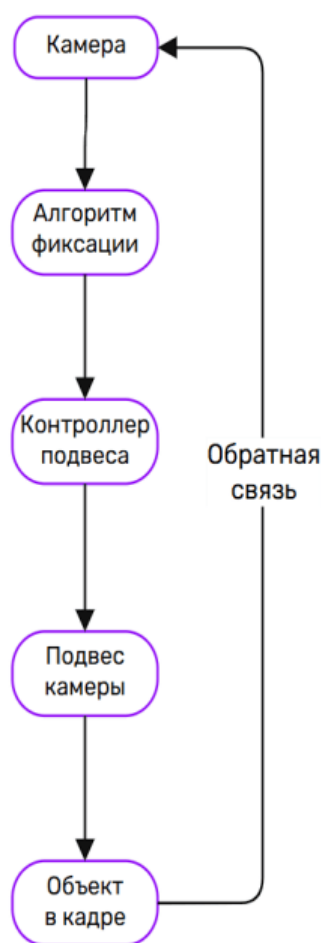


Рисунок 1. Структурная схема системы слежения.

Сначала объект необходимо определить. Для этого используются методы компьютерного зрения: распознавание по цвету и форме, детекция по контурным признакам или современные нейросетевые модели, способные распознавать лица, транспорт или произвольные объекты. После того как объект обнаружен, начинается процесс трекинга — постоянного слежения за его положением в кадре.

Существуют разные подходы к трекингу. Оптический поток позволяет отслеживать движение пикселей между кадрами, алгоритм KLT работает с ключевыми точками объекта, а современные нейросетевые методы, такие как DeepSORT или GOTURN, способны предсказывать движение и сохранять идентичность объекта даже при частичной потере.

Важный аспект — обработка временной потери объекта. Если объект выходит из кадра или перекрывается другими элементами (рисунок 2), алгоритмы прогнозируют его движение на основе предыдущих данных и автоматически возобновляют слежение, когда объект появляется снова.

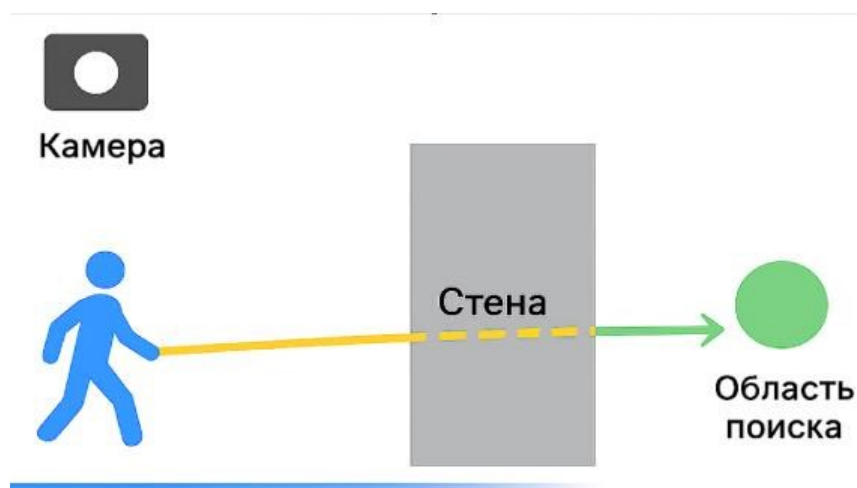


Рисунок 2. Схема предсказания траектории.

Эта связка обнаружения, трекинга и прогнозирования обеспечивает непрерывное удержание объекта в кадре.

Результаты. Переходя к следующему пункту, обсудим, как эти алгоритмы интегрируются с подвесом камеры для физического управления движением.

После того как алгоритмы обнаружили и отслеживают объект, полученные координаты передаются на стабилизирующий подвес камеры. Подвес обеспечивает плавное наведение и компенсирует дрожание, чтобы объект оставался в центре кадра независимо от движений оператора или внешних факторов.

Алгоритмы управления подвесом учитывают ограничения скорости поворота и углов наклона, чтобы движение камеры выглядело естественно и не прерывало восприятие кадра. Современные системы используют PID-регуляторы или адаптивные фильтры, которые сглаживают команды от алгоритмов трекинга и предотвращают резкие рывки камеры.

При реальной эксплуатации системы фиксации объекта важно учитывать условия, которые влияют на точность и стабильность слежения. Световые условия сильно влияют на работу алгоритмов компьютерного зрения: низкая освещённость или резкие контрасты могут затруднить распознавание объекта.

Скорость и непредсказуемость движения объекта также ограничивают возможности трекинга. Быстрое или резкое движение может приводить к временной потере объекта, поэтому алгоритмы используют прогнозирование и адаптивное управление подвесом, чтобы минимизировать ошибки.

Помехи, такие как другие движущиеся объекты на фоне, также могут приводить к ложным срабатываниям. Для борьбы с этим применяют фильтры идентичности объекта и алгоритмы повторного подтверждения, чтобы камера не переключалась на посторонние элементы.

Кроме того, важно учитывать аппаратные ограничения: скорость обработки видеопотока, производительность *GPU* или *CPU*, задержки передачи команд и динамику приводов подвеса камеры. Оптимизация кода и использование аппаратного ускорения позволяют системе работать в реальном времени, обеспечивая плавное слежение даже при высоких скоростях движения.

Обсуждение. Качество обнаружения и слежения за неподвижным объектом значительно лучше, чем движущегося, так как в процессе движения объекта его изображение, полученное камерой, может быть нечётким. В таких системах важную роль играет объём и качество коллекций образов, используемых для идентификации объектов, методы предварительной обработки изображений, а также динамические характеристики электроприводов мехатронного модуля подвеса камеры, что будет являться предметом дальнейших исследований.

Заключение. Предложенный метод построения алгоритмов фиксации объекта распознавания по видеоизображению включает три этапа: первый – распознавание объекта методами компьютерного зрения; второй – трекинг, или постоянное слежения за положением объекта в кадре; третий – интеграция алгоритмов слежения с управлением приводами мехатронного модуля подвеса камеры для физического управления движением. Метод является достаточно простым и быстрым, что позволяет использовать его в системах технического зрения роботов.

Следует отметить, что подобного рода системы могут использоваться системами управления дронов или роботов, которые исследуют ранее неизвестные территории, проводят, а также повышают качество управления в системах с человеком-оператором, формируя ему информационные сообщения о наблюдаемом объекте.

Список источников

1. Матвеев А. И. Цифровая обработка изображений в OpenCV : практикум / А. И. Матвеев. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 208 с.
2. Селянкин В. В. Компьютерное зрение. Анализ и обработка изображений / В. В. Селянкин. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 320 с.

3. Сацюк А. Компьютерное зрение и нейронные сети. Практика / А. Сацюк. — Москва : Инфра-Инженерия, 2025. — 288 с.
4. Куликов А. Н. Компьютерное зрение в робототехнике / А. Н. Куликов. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — 304 с.
5. Система технического зрения в задачах навигации мобильных объектов.. URL: [https:// swsys.ru/index.php?page=article&id=2702](https://swsys.ru/index.php?page=article&id=2702) (дата обращения 12.10.2025).

УДК 004.31(075.8)

Исследование и обоснование применения гибридной энергетической установки на основе LiFePO₄-аккумулятора и компактного бензогенератора для мобильных робототехнических платформ

Григорьев Артем Андреевич¹

ar.grogor.ev@yandex.ru

Немонтов Владимир Александрович¹

nemontov@vlsu.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы разработки и теоретического обоснования концепции гибридной энергетической установки (ГЭУ). Предлагаемая система базируется на сочетании литий-железо-фосфатного (LiFePO₄) накопителя энергии, выступающего в роли буфера, и компактной бензогенераторной установки, работающей в качестве основного источника энергии для восполнения заряда в полевых условиях. Для достижения поставленной цели в ходе исследования был проведен детальный анализ существующих подходов к построению систем питания, предложена и обоснована оптимальная архитектура ГЭУ, выполнено математическое моделирование энергетического баланса и произведена оценка ключевых эксплуатационных характеристик, включая анализ эффективности и технологических ограничений предложенного решения.

Ключевые слова: мобильный робот, система питания, энергетическая установка, алгоритм работы, структурная схема, автономный электропривод

Research and justification for the use of a hybrid power system based on a LiFePO₄ battery and a compact gasoline generator for mobile robotic platforms

Grigoriev Artem Andreevich¹

ar.grogor.ev@yandex.ru

Nemontov Vladimir Alexandrovich¹

nemontov@vlsu.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. The paper discusses the development and theoretical justification of the concept of a hybrid power unit (HPU). The proposed system is based on a combination of a lithium iron phosphate (LiFePO₄) energy storage unit, acting as a buffer, and a compact gasoline generator, serving as the primary energy source to recharge in field conditions. To achieve this goal, the study carried out a detailed analysis of existing approaches to power system design, proposed and justified the optimal architecture of the HPU, performed mathematical modeling of the energy balance, and evaluated the key operational characteristics, including an analysis of the efficiency and technological limitations of the proposed solution.

Keywords: mobile robot, power supply system, power unit, operating algorithm, block diagram, autonomous electric drive

Введение. Современный вектор развития робототехники неуклонно смещается в сторону создания полностью автономных мобильных платформ, способных к длительному выполнению задач в отрыве от стационарной инфраструктуры. Потребность в таких системах для решения прикладных задач в логистике, сельском хозяйстве, мониторинге протяженных объектов и поисково-спасательных операциях ставит перед инженерами фундаментальную проблему — кардинальное увеличение запаса хода и времени автономной работы. Практика показывает, что традиционные системы электропитания, основанные исключительно на аккумуляторных батареях, зачастую становятся узким местом, ограничивающим операционные возможности роботов из-за конечной энергоемкости и значительного времени, требуемого на восполнение заряда.

Материалы и методы. В современной мобильной робототехнике доминируют платформы с чисто аккумуляторным питанием. Их широкое распространение обусловлено такими неоспоримыми преимуществами, как конструктивная простота, отсутствие акустического шума и локальных вредных выбросов. Однако их фундаментальным недостатком является

прямая зависимость запаса хода от массы и габаритов аккумуляторной батареи. Попытка экстенсивного увеличения дальности путем простого наращивания емкости АКБ приводит к росту общей массы платформы, что, в свою очередь, увеличивает энергопотребление на движение и нивелирует полученный выигрыш.

В качестве логичного шага для преодоления этого барьера рассматриваются гибридные энергетические установки, где аккумуляторная батарея работает в тандеме с бортовым генератором на базе двигателя внутреннего сгорания. Такой подход позволяет использовать главное преимущество жидкого углеводородного топлива — его колоссальную удельную энергоемкость, которая на порядок превосходит аналогичный показатель даже у самых современных химических источников тока.

Выбор типа аккумуляторного накопителя для гибридной системы является нетривиальной задачей. Сравнение ключевых технологий показывает, что литий-железо-фосфатные (LiFePO_4) ячейки представляют собой наиболее сбалансированное решение для жестких условий эксплуатации. В отличие от традиционных литий-ионных (Li-ion) аналогов, они обладают несравнимо большей термической и химической стабильностью, что минимизирует риски возгорания при механических повреждениях или нарушениях режимов эксплуатации. Более того, их циклический ресурс в несколько раз превышает ресурс Li-ion батарей, что критически важно для гибридной схемы, где АКБ постоянно работает в буферном режиме частых, но неглубоких циклов заряда-разряда.

Безусловно, интеграция ДВС-генератора сопряжена и с определенными сложностями. Работающий двигатель создает акустическую и тепловую сигнатуру, которая может быть неприемлема для задач, требующих скрытности. Кроме того, это усложняет конструкцию и требует регулярного технического обслуживания. Однако эти недостатки представляются оправданной ценой за возможность многократного увеличения операционной дальности и практически полной энергетической независимости платформы.

Результаты. Для количественной оценки потенциала гибридной системы было проведено моделирование ее энергетических характеристик. В качестве исходных данных для расчетов была принята модель гипотетической платформы со следующими параметрами: номинальная емкость бортовой LiFePO_4 -батареи составляет 5 кВт·ч, а максимальная

электрическая мощность генераторной установки — 2 кВт. Установлено, что средний удельный расход энергии на движение в крейсерском режиме составляет 2 кВт·ч на 15 километров пути.

На первом этапе моделирования был рассчитан базовый запас хода в режиме питания исключительно от аккумуляторной батареи. Простое соотношение емкости АКБ и удельного расхода энергии показывает, что в таком режиме робот сможет преодолеть дистанцию порядка 37,5 километров. Этот показатель является отправной точкой для оценки эффективности гибридного подхода.

Далее был смоделирован комбинированный режим, при котором генератор работает непрерывно, покрывая текущие энергозатраты на движение и одновременно восполняя заряд батареи. В этом сценарии операционная дальность перестает быть функцией емкости аккумулятора и определяется исключительно запасом топлива на борту. Расчеты показывают, что даже с компактным топливным баком, обеспечивающим несколько часов непрерывной работы генератора, суммарный запас хода уверенно превышает заданную отметку в 50 километров и может быть легко увеличен в несколько раз.

Такая гибридная архитектура обеспечивает высокую тактическую гибкость. Платформа может функционировать в полностью бесшумном электрическом режиме для скрытного выполнения задач на коротких дистанциях. Для перемещения на большие расстояния активируется маршевый режим с работающим генератором, обеспечивающий максимальную дальность. Кроме того, предусмотрен стационарный режим, в котором робот может длительное время функционировать на одном месте, питая от генератора мощную полезную нагрузку и параллельно заряжая батарею для последующего передвижения.

Архитектурное построение и принципы управления системой. В качестве основы для построения ГЭУ была выбрана последовательная гибридная топология, как наиболее гибкая и простая в управлении. В данной схеме ДВС механически не связан с ходовой частью, а работает исключительно на вращение электрогенератора. Это позволяет постоянно поддерживать обороты двигателя в зоне максимального КПД, независимо от скорости движения робота, что значительно снижает удельный расход топлива. Вырабатываемая электроэнергия поступает на общую силовую шину, от которой питаются ходовые двигатели и вся бортовая аппаратура.

Аккумуляторная батарея также подключена к этой шине и выполняет функцию мощного энергетического буфера.

Ключевым элементом системы является интеллектуальный алгоритм управления энергопотоками. Его основная задача — поддерживать уровень заряда АКБ в оптимальном диапазоне, например, от 40% до 80%. Такой подход позволяет избежать как глубокого разряда, так и перезаряда, что максимально продлевает срок службы ячеек. Контроллер автоматически запускает генератор при достижении нижнего порога заряда и останавливает его при достижении верхнего. При возникновении пиковых нагрузок, например, при резком ускорении или движении по пересеченной местности, когда требуемая мощность превышает возможности генератора, недостающая энергия мгновенно забирается из аккумуляторного буфера.

Особое внимание в архитектуре уделено вопросам безопасности и надежности. Интеграция многоуровневой системы управления батареей (BMS) является обязательным условием. Она осуществляет непрерывный мониторинг напряжения, тока и температуры каждого элемента сборки, предотвращая любые потенциально опасные режимы работы. Кроме того, конструкция предусматривает комплексную систему терморегуляции для эффективного отвода тепла от ДВС и силовой электроники, а также применение виброизолирующих креплений для минимизации воздействия вибраций на чувствительные компоненты робота.

Обсуждение. Комплексная оценка эффективности гибридной системы должна выходить за рамки простого анализа КПД. Хотя тепловой КПД малогабаритного ДВС относительно невысок, общая эффективность системы должна рассматриваться с точки зрения «массо-энергетического совершенства». Ключевое преимущество гибридного подхода заключается в оптимизации массогабаритных показателей платформы для решения конкретной задачи — достижения максимальной дальности.

Прямое сравнение показывает, что для обеспечения эквивалентного запаса хода (свыше 100 км) с использованием только аккумуляторной энергии потребовалась бы батарея, масса и объем которой были бы в 2-3 раза больше, чем у используемой сборки на 5 кВт·ч. Такая переутяжеленная платформа была бы менее маневренной и требовала бы еще больше энергии на движение. Предлагаемая же гибридная система, состоящая из компактной АКБ и легкого генератора с запасом топлива, представляет собой гораздо более оптимальное решение.

Таким образом, основным преимуществом является многократное увеличение операционной дальности и гибкости применения. Однако необходимо учитывать и компромиссные факторы, которые являются инженерными задачами, требующими решения. К ним относятся акустическая заметность во время работы генератора, которую можно снизить за счет применения современных шумоглушителей и кожухов, а также необходимость периодического обслуживания ДВС. Тем не менее, эти аспекты не умаляют главного достоинства — достижения нового уровня автономности, недоступного для чисто электрических систем сопоставимого класса.

Заключение. Предложенная концепция является не статичным решением, а гибкой платформой, открытой для дальнейших усовершенствований. Модульная природа гибридной архитектуры закладывает ясный путь для будущей модернизации. По мере развития технологий, бензиновый ДВС-генератор может быть заменен на более эффективные и экологически чистые источники энергии. Наиболее перспективными кандидатами являются водородные топливные элементы, отличающиеся высоким КПД и нулевыми выбросами.

Другим важным направлением развития является интеграция системы с возобновляемыми источниками энергии. Размещение на корпусе робота высокоэффективных фотоэлектрических панелей позволит осуществлять подзарядку аккумуляторной батареи во время бездействия в светлое время суток, что может служить дополнительным фактором увеличения общей автономности миссии. Более того, сам принцип гибридизации отлично масштабируется и может быть применен не только к одиночным платформам, но и к более сложным системам, таким как робототехнические рои, где одна платформа с ГЭУ может выступать в роли мобильной док-станции для группы малых электрических роботов.

Список источников

[1] Концептуальные направления развития беспилотных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения. URL: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/567812> (дата обращения 02.10.2025).

[2] Повышение эффективности мобильных роботов путем использования дополнительного источника энергоснабжения — маховичного аккумулятора энергии. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-mobilnyh-robotov-putem-ispolzovaniya-dopolnitelnogo-istochnika-energospabzheniya-mahovichnogo> (дата обращения 12.10.2025).

[3] Гибридные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gibridnye-sistemy-elektrospabzheniya-na-vozobnovlyaemyh-istochnikah-energii> (дата обращения 04.10.2025).

[4] Современные источники электрической энергии для питания малогабаритных роботов. URL: <https://apni.ru/article/2011-sovremennie-istochniki-elektricheskoy-energii> (дата обращения 08.10.2025).

[5] Сравнение LiFePO₄ и Li ion: в чем разница и когда что выбрать. URL: [https:// battery craft.ru/sravnenie-lifepo4-i-li-ion-v-chem-raznica-i-kogda-chto-vybrat/?utm_source=chatgpt.com](https://battery craft.ru/sravnenie-lifepo4-i-li-ion-v-chem-raznica-i-kogda-chto-vybrat/?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения 12.10.2025).

УДК 621.9.06

Разработка алгоритма работы роботизированного комплекса горячей штамповки

Савин Данила Александрович¹

danilsavin18@gmail.com

Немонтов Владимир Александрович¹

nemontov@vlsu.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. В промышленности активно развивается направление горячей объёмной штамповки, так как она имеет значительную производительность и более высокую точность производимых изделий. Однако этот процесс имеет большую долю ограничений, ведь в данных системах человек непосредственно контактирует с разогретыми заготовками, что влечёт постоянный риск для его здоровья. В работе рассматривается создание алгоритма работы роботизированного технологического комплекса горячей штамповки. Перечислены необходимые компоненты для работы этой системы, а также произведен анализ предложенного алгоритма.

Ключевые слова: горячая штамповка, роботизированный комплекс, алгоритм работы, структурная схема

Development of an algorithm for the operation of a robotic hot stamping complex

Savin Danila Alexandrovich¹

danilsavin18@gmail.com

Nemontov Vladimir Alexandrovich¹

nemontov@vlsu.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. The field of hot volumetric stamping is actively developing in the industry, as it has significant productivity and higher accuracy of manufactured products. However, this process has a large number of limitations, because in these systems a person is in direct contact with heated workpieces, which entails a constant risk to his health. In this article, we will develop an algorithm for the operation of a robotic hot stamping complex. We will list the necessary components for the operation of this system, as well as analyze the proposed algorithm.

Keywords: Hot stamping, robotic complex, operation algorithm, block diagram

Введение. Штамповка металла – это контролируемый процесс формоизменения стали, чугуна или другого схожего материала, осуществляемый путем давления на определенные места (точки) заготовки.

С середины XIX века эта технология активно развивается, и сегодня она позволяет быстро и точно производить разнообразные элементы в больших объемах, включая те, которые используются в ответственных объектах, таких как летательные аппараты и другие.

Горячая объёмная штамповка осуществляется с нагревом исходного материала. Способ отличается простотой и подходит для создания цельных корпусных элементов, в том числе и габаритных, поэтому его широко применяют в авто, авиа и судостроении.

Процесс штамповки металлов по горячей технологии достаточно производителен и точен, но все-таки предполагает определенные ограничения. Основная задача данной работы будет заключаться в разработке алгоритма работы для роботизированного технологического комплекса горячей штамповки.

Материалы и методы. Порядок изготовления в общем случае:

- заготовки отправляются в камеру электрической или пламенной печи;

- температуру внутри поднимают до $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как при таких условиях даже самые тугоплавкие сорта стали или чугуна начинают менять свое состояние;
- подготовленная подобным образом заготовка (уже не твердая, а эластичная) перекладывается в шаблон со специальными ручьями для стекания, в котором и затвердевает, и приобретает требуемые очертания с геометрическими габаритами;
- штамповка на время располагается в предназначенном для этого пространстве между парой бойков – для осаждения на необходимую величину.

Разработка и составление алгоритма работы основана на технологическом процессе горячей штамповки, реализованном комплексом технологического оборудования в составе:

1. Индукционная печь.
2. Штамповочные станки-прессы.
3. Робот-манипулятор для захвата заготовок из печи и перемещения их в штамп.
4. Робот-манипулятор для захвата заготовок из штампа и перемещение их в ячейки хранения.

Структурный состав комплекса представлен на рисунке 1.

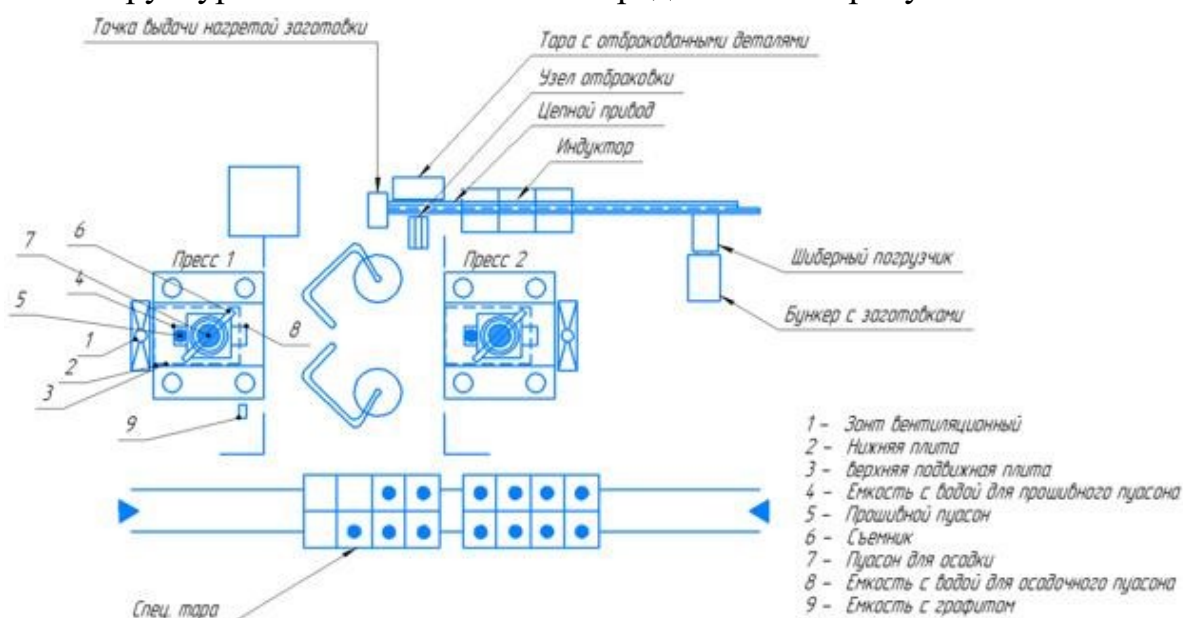


Рисунок 1. Состав РТК горячей штамповки.

Результаты. Анализ производственного процесса горячей штамповки позволил сформулировать последовательность операций, подлежащую формализации и, в дальнейшем, алгоритмизации.

Типы и виды операций:

1. В бункере заготовок шиберное устройство открывает автоматический шибер (заслонка), и заготовки поступают на цепной привод подачи.

2. Шибер задвигается при помощи гидравлического механизма, и подача прекращается.

3. После попадания заготовки на цепной привод подачи она проходит вдоль ворот индукторной печи. За время нахождения внутри печи заготовки она нагревается до заданной температуры.

4. В узле отбраковки все заготовки проверяются на допустимые значения массы заготовки. Далее у всех заготовок проверяется температура нагрева для избегания последующей обработки недогретых или перегретых заготовок. В случае какого-либо несоответствия все отбракованные заготовки помещаются в специальную тару. Откуда они отправляются либо на переработку, либо в следующую тару с неисправимым браком.

5. После узла отбраковки заготовку берет робот-манипулятор «Б» и переносит её в гидравлический пресс №1 или пресс №2. Два прессы необходимо для оптимизации процесса выпуска штампованных заготовок.

6. Прессы формоизменяют заготовку до заданных значений с помощью двух пуансонов, пробивного и прошивного.

7. После чего робот-манипулятор «А» достаёт заготовку из штампа и помещает её в специальную тару для хранения и транспортировки формоизменных заготовок.

Так же необходимо отметить, что захваты робота-манипулятора «А» и робота-манипулятора «Б» будут отличаться, так как заготовка будет иметь разную геометрическую форму в моменте выхода из индукционной печи и при выходе из штамповочных прессов.

Представленная последовательность действий реализована в виде алгоритма (рисунок 2):

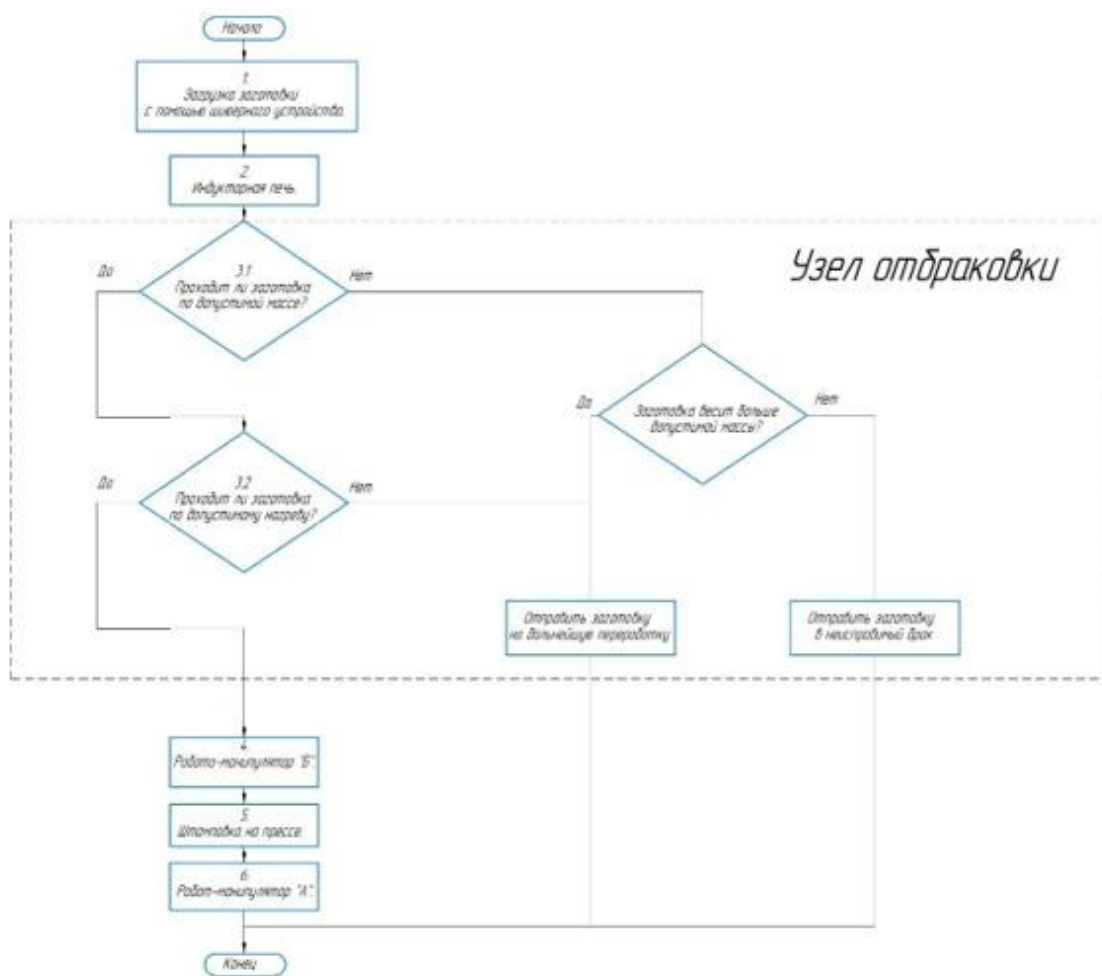


Рисунок 2. Алгоритм работы РТК горячей штамповки.

Обсуждение. Разработанный алгоритм работы комплекса позволяет решить задачу создания программного обеспечения интегрированной системы управления комплексом, включающую в себя отдельные СУ роботов и технологического оборудования. Это позволит сформировать управляющие программы как отдельных устройств, так и комплекса в целом.

Заключение. Проектируемый роботизированный комплекс имеет ряд преимуществ, которые позволяют существенным образом увеличить количество и качество выпускаемой продукции на предприятии за счёт нескольких параллельно работающих прессов и узлу отбраковки, встроенному в комплекс. Разработанный алгоритм работы комплекса в соответствии с применяемым роботизированным оборудованием позволяет выполнять операции технологического процесса штамповки полностью в автоматическом режиме, что обеспечивает более надёжную защиту операторов РТКгш от воздействия вредных производственных факторов, в том числе высоких температур.

Список источников

[1] Е.И. Семёнов. Ковка и горячая штамповка / Е.И. Семёнов — 1-е изд. — Москва: Московский государственный индустриальный университет, 2011 — 416 с.

[2] Штамповка металла: что это такое - виды процесса / [Электронный ресурс] // Роста: [сайт]. — URL: <https://www.rocta.ru/info/shtampovka-metalla-chto-eto-takoe/> (дата обращения 10.10.2025).

[3] Разработка системы управления робототехнического комплекса горячей штамповки и ее элементов / [Электронный ресурс] URL: https://vuzlit.com/1864595/razrabotka_sistemy_upravleniya_robototekhnicheskogo_kompleksa_goryachey_shtampovki_i_ee_elementov (дата обращения 02.09.2025).

[4] Клименков, С. С. Автоматизация процессов формообразования заготовок : учебное пособие / С. С. Клименков, А. Л. Климентьев. — Витебск : УО «ВГТУ», 2020. — 161с.

[5] Роботизированные технологические комплексы в кузнечно-штамповочном производстве / [Электронный ресурс] URL: <https://edu.tsu.ru/eor/resource/566/html/49.html> (дата обращения 12.10.2025).

УДК 004.89

Разработка программно-аппаратной среды функционирования коллаборативного робота в цифровом двойнике

Грбарь Даниил Михайлович¹

grabardm@ml-dev.ru

SPIN-код: 2199-0786

Иванов Юрий Сергеевич¹

ivanov_ys@icloud.com

SPIN-код: 4427-8398

¹ФГБОУ ВО «КНАГУ», Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация. Представлена архитектура цифрового двойника коллаборативного робота, обеспечивающая объединение данных от системы камер, вычислительных модулей и управляющего блока в единую среду. Представлено решение на основе ROS 2 и симулятора Webots, позволяющее в реальном времени обрабатывать информацию, оценивать поведение оператора и корректировать траекторию движения манипулятора. Показано, что применение алгоритмов анализа обстановки и распознавания действий человека повышает безопасность и точность

взаимодействия. Сделан вывод о возможности использования предложенной системы для моделирования, адаптивного управления и оптимизации производственных процессов.

Ключевые слова: цифровой двойник, коллаборативный робот, ROS 2, Webots, компьютерное зрение, нейросетевые алгоритмы, ситуационное управление

Development of a hardware and software environment for the functioning of a collaborative robot in a digital twin

Grabar Daniil Mikhailovich¹

grabardm@ml-dev.ru

SPIN-код: 2199-0786

Ivanov Yuri Sergeevich¹

ivanov_ys@icloud.com

SPIN-код: 4427-8398

¹FSBEI HE "KnASU", Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The paper presents a digital twin architecture for a collaborative robot that integrates data from camera systems, computing modules, and control units into a unified environment. A solution based on ROS 2 and the Webots simulator enables real-time data processing, operator behavior analysis, and adaptive adjustment of the manipulator's trajectory. It is shown that the use of environment analysis and human action recognition algorithms improves the safety and precision of interaction. The proposed system can be applied for modeling, adaptive control, and optimization of industrial processes.

Keywords: digital twin, collaborative robot, ROS 2, Webots, computer vision, neural network algorithms, situational control

Введение. Современные тенденции развития робототехники направлены на создание интеллектуальных коллаборативных систем, способных безопасно взаимодействовать с человеком в условиях динамично изменяющейся производственной среды [1]. Рост вычислительных возможностей и внедрение технологий искусственного интеллекта формируют предпосылки для перехода от статичных программ управления к адаптивным системам, где цифровой двойник становится ключевым элементом проектирования, анализа и верификации поведения робота [2]. Однако существующие подходы зачастую фрагментарны: данные с датчиков, алгоритмы восприятия и управляющие модули функционируют разрозненно, что ограничивает согласованность и устойчивость работы таких систем в реальном времени. В этих условиях

разработка целостной программно-аппаратной среды, объединяющей датчики, вычислительные и управляющие компоненты в единую архитектуру цифрового двойника, представляет собой актуальную научно-техническую задачу, направленную на повышение эффективности взаимодействия человека и робота в интеллектуальных производственных комплексах.

Работа посвящена созданию интегрированной архитектуры цифрового двойника коллаборативного робота, обеспечивающей сквозную обработку данных от мультикамерной системы до управляющих сигналов манипулятора с минимальными задержками и высокой степенью адаптивности. Цель исследования заключается в формировании программно-аппаратной среды функционирования коллаборативного робота, способной моделировать поведение оператора, оценивать текущее состояние окружения и планирования движения робота в режиме реального времени. Научная новизна работы заключается в разработке комплексного подхода, объединяющего функции анализа, планирования и управления в цифровом двойнике с использованием ROS 2 и нейросетевых методов обработки данных.

Материалы и методы. Экспериментальная часть исследования выполнена на основе разработанной программно-аппаратной среды цифрового двойника коллаборативного робота. Система включает мультикамерную подсистему, распределённые вычислительные модули и сервер обработки данных, объединённые в единую сеть посредством фреймворка ROS 2. Виртуальная модель манипулятора создана в среде Webots и воспроизводит параметры реального робота KUKA iiwa 7 R800.

Методы исследования основаны на интеграции технологий компьютерного зрения, нейросетевого анализа и ситуационного управления. В вычислительных модулях реализованы алгоритмы распознавания действий оператора, голосовых команд и оценивания эмоционального состояния, результаты которых использовались для построения поведенческой модели взаимодействия человека и робота.

Результаты. Система цифрового двойника, в основу которой положена интеграция мультикамерной системы, распределённых вычислительных модулей и сервера обработки данных представлена на рисунке 1.

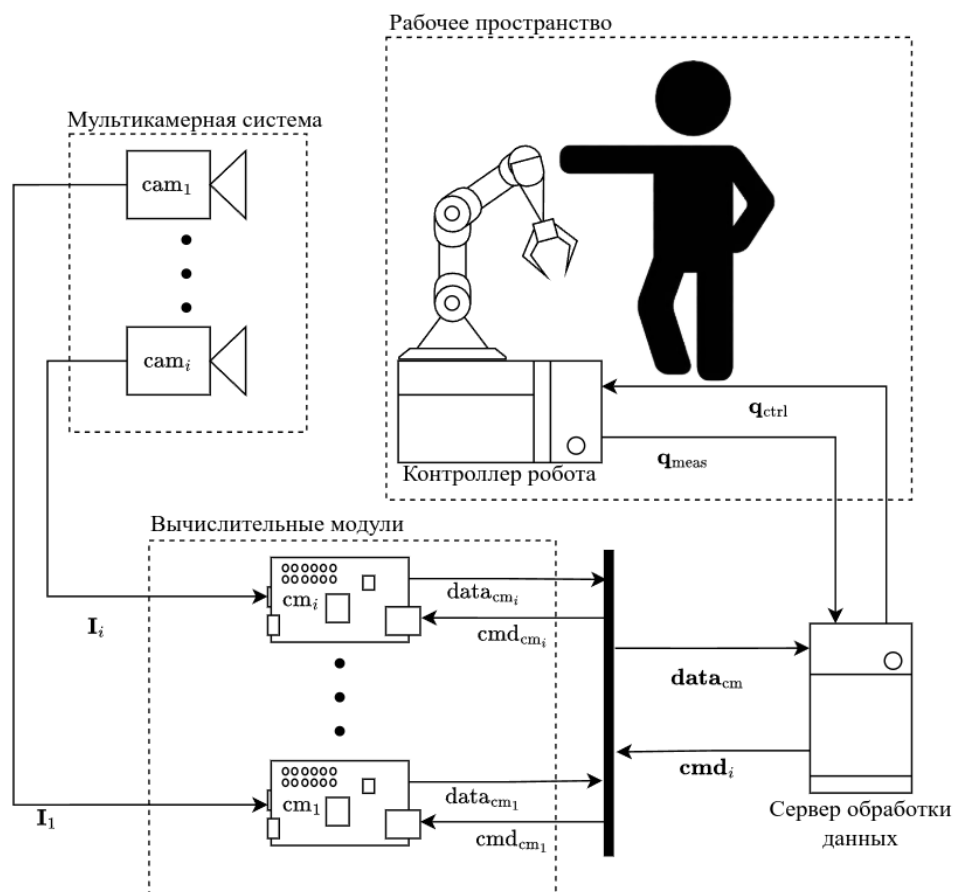


Рисунок 8. Общая архитектура интегрированной системы цифрового двойника.

Поток данных начинается с мультикамерной системы, формирующей набор изображений $I_i \in \mathbb{N}^{H \times W \times C}$ где $i = 1, \dots, n$, а интенсивности пикселей нормированы в диапазоне $[0, 255]$. Каждая камера осуществляет съёмку с частотой 30 кадров в секунду, создавая дискретные последовательности измерений во времени. Далее вычислительные модули cm_i принимают входные наборы I_i , внутри которых применяются нейросетевая функция вида $f(I_i)$, реализующие алгоритмы анализа действий оператора [3]. Совокупность результатов вычислений формирует интегральный массив данных $\mathbf{data}_{cm} = (f(I_1), \dots, f(I_i))$, который через ROS2 передается на сервер обработки данных.

Сервер не только агрегирует сообщение $\mathbf{data}_{cm}$, но и способен формировать управляющие команды $\mathbf{cmd}_{cm_i} \in \mathbf{CMD}$ в формате JSON для каждого вычислительного модуля, обеспечивая адаптивную конфигурацию работы подсистем на основе анализа текущей ситуации. Для интерпретации поведения оператора используется множество действий $A = \{\mathbf{a}_i(\Delta t_i) \mid i =$

$1, 2, \dots, n; t \in T\}$, где Δt обозначает временной интервал анализа, а элементы множества A - дискретные действия оператора в рабочей зоне. Поведенческие закономерности можно представить в виде функции: $beh = F(A, \Delta t)$, что обеспечивает формирование модели поведения в цифровом двойнике и предсказание потенциальных рисков.

На основе результатов анализа поведенческой модели и состояния окружения производится планирование траектории перемещения коллаборативного робота. При этом в случае отсутствия угрозы коллизии управляющий сигнал остаётся неизменным, тогда как при выявлении риска или преднамеренного вмешательства человека осуществляется пересчёт траектории или выполнение полной остановки. Управляющее воздействие на манипулятор описывается функцией $\mathbf{q}_{ctrl} = F(\mathbf{data}, \mathbf{q}_{meas})$, где $\mathbf{q}_{meas}$ - вектор текущих значений положения шарниров, $\mathbf{q}_{ctrl}$ - вектор командных значений, формируемый с учётом анализа ситуационной информации. Обмен данными между сервером обработки и контроллером робота происходит с задержкой порядка 10 мс, что соответствует техническим характеристикам платформы KUKA iiwa 7 R800 [4].

В ходе проектирования интегрированной архитектуры цифрового двойника разработана виртуальная модель коллаборативного роботизированного комплекса в среде Webots (рис. 2). Обмен данными между виртуальными модулями реализован посредством ROS 2, которое выступает связующим звеном интеграции датчиков, вычислительных и управляющих подсистем.

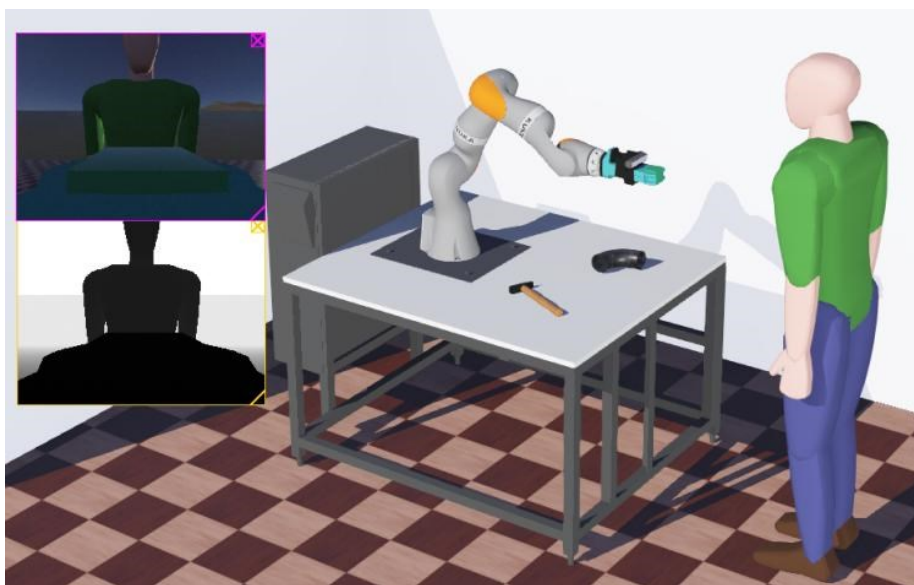


Рисунок 2. Цифровой двойник коллаборативного роботизированного комплекса.

В цифровом двойнике проведено тестирование прикладных сценариев, включающих определение положения объекта (кубика) [5] с использованием мультикамерной системы и последующее построение оптимальной траектории движения манипулятора. Формирование траектории осуществлялось с применением LLM [6], обеспечивающей планирование и адаптацию движений в реальном времени.

Обсуждение. Разработанная система цифрового двойника продемонстрировала эффективную интеграцию мультикамерного восприятия, распределённых вычислительных модулей и ROS 2 инфраструктуры для анализа поведения оператора и управления коллаборативным роботом. Проведённые эксперименты подтвердили возможность адаптивного планирования траектории на основе данных о действиях человека и состоянии рабочей зоны, что повышает уровень безопасности взаимодействия человека и робота. Использование симуляционной среды Webots позволило воспроизвести реальные сценарии и оценить точность передачи данных с минимальной задержкой.

Заключение. В результате проведённого исследования разработана и протестирована интегрированная архитектура цифрового двойника коллаборативного робота, обеспечивающая сквозную обработку данных от мультикамерной системы до управляющих сигналов манипулятора с минимальными задержками и высокой степенью адаптивности. Реализованный подход позволил объединить функции анализа, планирования и управления в едином контуре, обеспечивая согласованное и предсказуемое взаимодействие человека и робота в реальном времени, что полностью соответствует поставленной цели исследования.

Проверка системы в виртуальной среде Webots продемонстрировала корректность работы всех подсистем и возможность моделирования поведения оператора, оценки состояния окружения и адаптивного управления движением робота. Полученные результаты подтверждают практическую применимость предложенного решения для создания интеллектуальных производственных комплексов и открывают перспективы дальнейшего расширения функционала цифрового двойника с использованием методов обучения с подкреплением и более сложных сценариев взаимодействия.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 25-21-00292).

Список источников

1. Li W., Hu Y., Zhou Y. et al. Safe human–robot collaboration for industrial settings: a survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2024, vol. 35, pp. 2235–2261. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02159-4>
2. Dhanda M., Rogers B., Hall S., Dekoninck E., Dhokia V. Reviewing human-robot collaboration in manufacturing: Opportunities and challenges in the context of Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2025, vol. 93, 102937. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102937>
3. Zhiganov S. V., Ivanov Y.S., Grabar D.M. Investigation of Neural Network Algorithms for Human Movement Prediction Based on LSTM and Transformers. *Doklady Mathematics*, 2023, vol. 108, pp. 484-493 <https://doi.org/10.1134/s1064562423701624>
4. Huber M., et al. LBR-Stack: ROS 2 and Python integration of KUKA FRI for Med and IWA robots. *arXiv preprint arXiv:2311.12709*, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.12709>
5. Грабарь Д.М., Иванов Ю.С., Жиганов С.В. Комбинированный подход к классификации и семантической сегментации производственных инструментов с использованием метода One-Shot Learning. *Вычислительные технологии и прикладная математика: Материалы III научной конференции с международным участием*, 2024, с. 119–122.
6. Грабарь Д.М., Иванов Ю.С. Гибридный подход к распознаванию действий человека-оператора в коллаборативных роботизированных средах с использованием больших языковых моделей и компьютерного зрения. *Мехатроника, автоматика и робототехника*, 2025, № 15, с. 62–64. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2025-15-62-64>

УДК 681.5:622.276

Актуальность автоматизации метрологического обеспечения для нефтегазовой отрасли

Срыбник Мария Александровна¹

m_srybnik@ugrasu.ru

SPIN-код: 1911-5230

Эльман Ксения Александровна¹

k_yelman@ugrasu.ru

SPIN-код: 7946-1705

¹Институт нефти и технологий (филиал) ФГБОУ ВО "Югорский государственный университет", Сургут, Россия

Аннотация. На сегодняшний день, под понятием контроль понимается диагностирование соответствия среди свойством подконтрольного объекта и предписанным эталоном, предопределяющей первоклассные модели его положения. В то время, как под регулированием понимается сохранение стабильного значения определенного указанного параметра, описывающий процесс, либо его трансформацию, установленную законом, реализуемое с помощью трансформации положения элемента или действующих на него возмущений, а также влияния контролирующего орган субъекта.

Ключевые слова: автоматизация, метрология, нефтегазовая отрасль, Индустрия 4.0, процесс, контроль.

The relevance of metrological support automation for the oil and gas industry

Srybnik Maria Aleksandrovna¹

m_srybnik@ugrasu.ru

SPIN-code: 1911-5230

Elman Ksenia Aleksandrovna¹

k_yelman@ugrasu.ru

SPIN-code: 7946-1705

¹Institute of Oil and Technology (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yugra State University", Surgut, Russia

Abstract. Today, the concept of control is understood as the diagnosis of compliance between the property of a controlled object and a prescribed standard, which determines first-class models of its position. While regulation is understood as maintaining a stable value of a certain specified parameter, describing the process, or its transformation established by law, implemented by transforming

the position of the element or the disturbances acting on it, as well as the influence of the controlling body of the subject.

Keywords: automation, metrology, oil and gas industry, Industry 4.0, process, control.

Введение. В настоящее время жизненно необходимо дополнительная модернизация и усовершенствование комплексной системы метрологического укомплектования нефтегазовой отрасли принимая во внимание нормы законов Российской Федерации "О недрах" от 21.02.1992 № 2395-1 (с изм. от 25.12.2023 № 656-ФЗ), "О техническом регулировании" от 27.12.2002 № 184-ФЗ (с изм. от 11.06.2021 № 176-ФЗ), "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 № 102-ФЗ (с изм. от 01.03.2025).

Под роботизацией понимается ряд взаимосвязанных рабочих операций, которые реализовываются посредством особенных агрегатов без непрерывного содействия персонала. Роботизация предусматривает мониторинг, координацию, руководство производственным циклом, и обеспечение безопасности процесса от негативных ситуаций, а также систему оповещения о нештатных обстоятельствах от исходного порядка действий [1].

На сегодняшний день, под понятием контроль понимается диагностирование соответствия среди свойств подконтрольного объекта и предписанным эталоном, предопределяющей первоклассные модели его положения.

В то время, как под регулированием понимается сохранение стабильного значения определенного указанного параметра, описывающий процесс, либо его трансформацию установленную законом, реализуемое с помощью трансформации положения элемента или действующих на него возмущений, а также влияния контролирующего орган субъекта.

Также, управление представляет собой реализацию комплекса действий, подобранных из массы возможностей согласно предопределенной информации и ориентированных на сохранение либо усовершенствование процесса контролируемого объекта согласно цели регулирования.

В ближайшем времени отечественным метрологам придется выполнять значительный объем работы с контрольно - измерительными приборами [2].

Материалы и методы. В данной работе были рассмотрены труды по направлениям автоматизация, метрология, цифровая стратегия представленных в российской научной электронной библиотеке eLibrary.ru.

Результаты. Составляющие регулирования нефтегазоперерабатывающим предприятием зависимы от контроля цифровой экономики. Так, например, структура управления нефтегазоперерабатывающего предприятия характеризуется отличительными свойствами: исполнение управленческих трансформаций в основополагающихся подразделениях компании; формирование организационно - методического центра апробации цифровой экономики руководства автоматизированными системами обработки информации учитывая выполнение цифровых заключений, служб; формирование фидбэка со всей компанией.

Стоит отметить также административно - технические особенности предприятия, например: целесообразность развития современных коммерческих идей регулирования инноваций и результатов; распределение при утверждении и воплощении стратегических решений реализуется на базисе распределений конкретных компетенций; внедрение цифровых стратегий в технологический процесс. Также не стоит упускать из виду не востребуемые источники, например: необходимые ресурсы (сведения, опыт, сотрудники); не востребуемый участвующий персонал в процессе выполнения постоянного совершенствования [3].

Концепция Индустрии 4.0 стандартизации передовых производственных технологий на 2025-2030 г.г. и курс цифровой стратегии определенный указом Президента № 309 от 07 мая 2024 года "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года" установили цифровую стратегию как востребованное направление "умного производства", "цифровых фабрик и двойников", "киберфизических систем", "промышленного интернета вещей" без которых неосуществимо организовать высококонкурентоспособную продукцию в высокотехнологических направлениях промышленности.

Индустрия 4.0 является катализатором для усовершенствования индустриальной метрологии, расширения, ассортимента средств измерений, задействованных на производствах. Один из векторов курса цифровой стратегии "О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года",

"Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года", является высокотехнологичность метрологической службы, единственные в своем роде программные продукты, разрабатываемые для метрологов.

Обсуждение полученных результатов. Мониторинг усовершенствования контрольно - измерительного парка демонстрирует, что в ближайшее время за процессом измерения с профессиональным уровнем автоматизации.

Отметим, что инструменты автоматизации для нефтегазовой отрасли на сегодняшний день представляют собой совокупность технических средств и оборудования, работоспособность которых нацелена на автоматизацию конкретных процессов в нефтегазовой промышленности, что служит инструментом для снижения затрат и увеличивает продуктивность деятельность предприятий в целом [4].

Известно, что структуры для автоматизации регулирования метрологическим укомплектованием дают возможность промышленным предприятиям, а именно:

1. Выполнять экспертизу за состоянием структуры в интерактивном режиме.
2. Поддерживать продуктивную миссию метрологии для предпринимательства.
3. Модефицировать показатели измерений для приобретения исследовательских или прогнозируемых сведений.
4. Определять и высчитать показатели экспрессивных процессов.
5. Минимизировать воздействие барьеров на итог устанавливаемого параметра.
6. Осуществлять параллельное фиксирование целого ряда величин.
7. Осуществлять продолжительные, многочисленные замеры.
8. Усовершенствовать подлинность итоговых значений.

Отметим, что автоматизация метрологического гарантирования на предприятии значительно облегчает взаимоотношения с регулятором и влечет к улучшению особенностей работы метрологической службы благодаря уменьшению к рациональному минимуму вероятности принятия неверных решений, которые связаны с определениями и мониторингом качества компонентов, операции, технологии и манипуляции.

На сегодняшний день, информационно - вычислительные системы в области метрологии усовершенствуются в двух направлениях, а именно:

1. Автоматизация работы метрологической службы.

2. Автоматизация контроля и регулировки средств измерений.

Вышеперечисленные направления, в общем и целом, важны, но, тем не менее, автоматизация работы метрологической службы, в частности сбережения, технологического процесса, а также обработки информации (то есть результаты обследования, результаты анализа, результаты испытаний и др.), зачастую являются основой автоматизации метрологии [5].

Очередным шагом автоматизации метрологии может оказаться калибровка и поверка средств измерения, формирование итогов создания баз данных, применение облачных хранилищ данных.

Введение автоматических систем учета, управление измерительным оборудованием, автоматизация процессов поверки, а также калибровки позволит минимизировать человеческую составляющую, укрепит доверие к метрологической процедуре.

Заключение. В заключении отметим, что многочисленная практика утверждает, что в западных странах уменьшает на 75% время, требуемое на сопровождение парка средств измерений, а также затраты на метрологию с параллельным увеличением убежденности к процессам контроля испытания.

Список источников

1. Видникевич, С. М. Современные технологии в метрологии: цифровизация и автоматизация / С. М. Видникевич, Н. Ю. Лапинский // Science and technology research - 2025 : сборник статей Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 28 января 2025 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2025. – С. 14-17. – EDN QNLLLF.

2. Динамика изменения параметров биоэлектрической активности мышц в ответ на статическое усилие / Т. В. Гавриленко, Д. В. Горбунов, К. А. Эльман, Н. А. Черников // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. – 2015. – № 4. – С. 4. – DOI 10.12737/16780. – EDN VCDJ TZ.

3. Сениченко, С. А. Программированное обучение преподавания специальных дисциплин в училище олимпийского резерва / С. А. Сениченко // Зауралье спортивное : Сборник трудов II региональной научно-практической конференции, Курган, 22 апреля 2013 года. – Курган: Курганский государственный университет, 2013. – С. 56-57. – EDN YJXDEL.

4. Эльман, К. А. Интеграция современных педагогических и информационных технологий через формирование профессиональных компетенций / К. А. Эльман, М. А. Срыбник // Актуальные проблемы совершенствования высшего образования : Материалы XIII научно-методической конференции с международным участием, Ярославль, 22–23 марта 2018 года / Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова. – Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2018. – С. 65-66. – EDN YWDOXW.

5. Эльман, К. А. Международные стандарты и сертификация как драйверы экономического роста / К. А. Эльман, М. А. Срыбник // Стандартизация и сертификация: опыт стран Европейского союза и перспективы сотрудничества для России : материалы Международной научно-практической конференции, Нижневартонск, 05 апреля 2018 года / ответственный редактор И.А. Волкова. – Нижневартонск: Нижневартонский государственный университет, 2018. – С. 212-216. – EDN XVWLVJ.

УДК 665.6

Использование «Мир Пиа Процесс+» для моделирования процесса перегонки сырой нефти

Степанищев Владислав Алексеевич¹ v.stepanischev2006@yandex.ru

Белоглазов Илья Ильич^{1,2} beloglazov_ii@pers.spmi.ru

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

²к.т.н. доцент кафедры Автоматизации технологических процессов и производств

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы моделирования процесса перегонки сырой нефти с использованием двух программных пакетов. На основе сравнительного анализа результатов моделирования продемонстрирована возможность использования программного продукта «МиР Пиа Процесс+» в качестве аналога зарубежных систем высокоточного моделирования в нефтегазовой отрасли. Также проведен анализ возможных причин различия между результатами расчета. Полученную модель можно применять для анализа и оптимизации технологических режимов, а также дальнейшей разработки систем автоматического управления для процесса перегонки сырой нефти

Ключевые слова: PRO/II, МиР ПиА Процесс+, имитационное моделирование, атмосферная колонна, перегонка сырой нефти

Modeling the crude oil distillation process using «MiR PiA Process+»

Stepanishchev Vladislav Alekseevich¹ v.stepanischev2006@yandex.ru

Beloglazov Il'ya Il'ich^{1,2} beloglazov_ii@pers.spmi.ru

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

²assistant prof. Ph.D.

Abstract. This article examines the modeling of crude oil distillation processes using two software packages. A comparative analysis of the modeling results demonstrates the feasibility of using the "MiR PiA Process+" software product as an analogue of foreign high-precision modeling systems in the oil and gas industry. Possible causes of differences between the calculation results are also analyzed. The resulting model can be used to analyze and optimize process modes, as well as for the further development of automatic control systems for crude oil distillation.

Keywords: PRO/II, MiR PiA Process+, simulation modeling, atmospheric column, crude oil distillation

Введение. Актуальным направлением является разработка высокоточных математических моделей действующих технологических установок в нефтегазовой и химической промышленности [1-2]. Математическое и компьютерное моделирование являются важными компонентами для модернизации производства и внедрения систем усовершенствованного управления. Внедрение детализированных моделей даёт возможность производственному персоналу оперативно решать широкий спектр задач — от оценки возможности переработки сырья с переменным составом или изменения производительности установки до выявления причин отклонений качества продукции от нормативных требований [3-4].

В 1990-е годы в Россию пришли программные решения ведущих мировых производителей, которые кардинально трансформировали отраслевые бизнес-процессы и, по сути, сформировали новую технологическую культуру как в производстве, так и в подготовке специалистов [5]. Однако в последние годы наблюдается стремительный уход зарубежных вендоров из сегмента промышленной автоматизации с

российского рынка. Несмотря на то, что многие установленные системы моделирования продолжают работать, растут риски их вывода из эксплуатации — из-за прекращения технической поддержки, сложностей с миграцией на новое оборудование и возможного перехода предприятий на отечественные операционные системы.

Приступая к импортозамещению систем моделирования, целесообразно проанализировать международный опыт: изучить историю их появления, ключевые этапы развития и факторы, способствовавшие широкому внедрению. Такой подход позволит эффективно использовать накопленные мировые знания, адаптировать передовые практики к российским условиям и разработать конкурентоспособные отечественные решения, отвечающие современным технологическим вызовам и потребностям промышленности.

В данной статье рассмотрен подход импортозамещения программной платформы AVEVA PRO/II Process Simulation [6] на российский аналог «Мир Пиа Процесс+» [7] на примере моделирования процесса перегонки сырой нефти.

Материалы и методы. Для моделирования процесса перегонки сырой нефти были выбраны две платформы PRO/II Process Simulation от британской компании AVEVA и российский программный продукт «МиР Пиа Процесс+» в которой возможно создание как упрощённых, так и высокоточных моделей с использованием как классических кубических уравнений состояния, таких как уравнения Пенга – Робинсона, Соава – Редлиха – Квонга так и с модифицированными термодинамическим моделями [8-9]. Отличительной особенностью при этом является использование отечественных методик расчета в соответствии с российскими ГОСТ-ами, нормативно-техническими базами, климатическими условиями работы оборудования и особенностями исходного сырья. С учетом указанных факторов такой подход повысит точность моделирования и эффективность внедрения цифровых решений на действующих предприятиях.

В рамках работы была создана модель атмосферной колонны, в которой может учитываться большее количество факторов, влияющих на работу модели и выпуск продукции [10-11]. На основе технологических данных были заданы исходные параметры сырья и колонны и вспомогательного оборудования. Сырая нефть была задано по кривой ИТК (истинных температур кипения) с учетом компонентов легкой фракции. В

качестве базового термодинамического метода для каждого варианта был выбран метод Пенг – Робинсон.

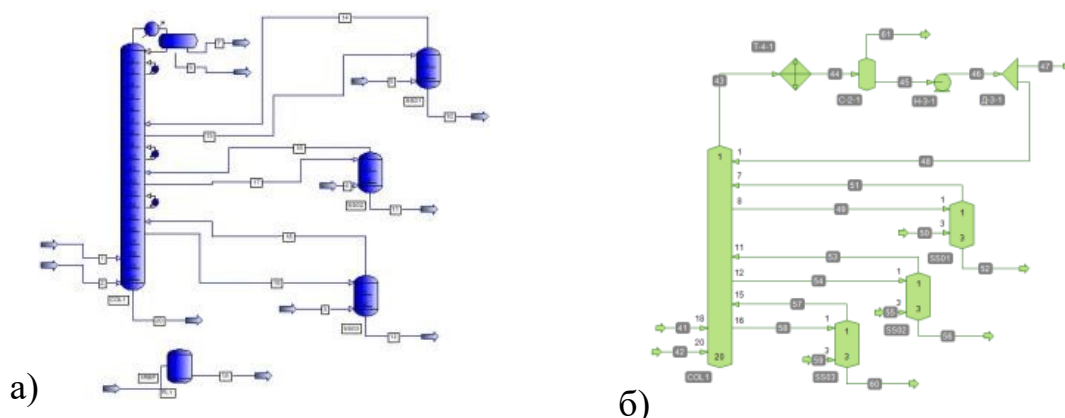


Рисунок 9. Модель атмосферно вакуумной трубчатки.

а) PRO/II Process Simulation

б) МиР ПиА Процесс+ [составлено авторами]

Результаты. В ходе моделирования, поэтапно осуществлялась настройка каждой модели, для достижения сходимости, после чего результаты моделирования сравнивались. Представленные программные продукты позволяют автоматически генерировать ряд нефтяных фракций и рассчитывать для каждой из них молекулярную массу, плотность и температуру кипения. Эти данные затем используются в стандартных корреляциях для нефтепродуктов для получения всех остальных необходимых свойств. При задании исходных свойств важно отметить, что кривая ИТК должна быть согласована с данными по лёгким фракциям для получения плавной кривой. Для этого температура кипения (36°C) н-пентана вводится в качестве дополнительной точки 3,0% в начале кривой.

Данные по вязкости и теплопроводности для потоков так же автоматически генерируются для использования в процессе расчёта. Для уточнения свойств вязкости и других свойств флюидов могут быть выбраны дополнительные методы.

Основные отличия в схеме моделирования заключаются в настройке конденсатора. В случае использования PRO/II Simulaton конденсатор моделируется совместно с настройками колонны посредством внешнего испарительного сепаратора. А в случае «МиР ПиА Процесс+» необходимо

собрать контур с теплообменником сепаратором, насосом и делителем как показано на рисунке 1.

Практически всё тепло, выделяемое при дистилляции, поступает с сырой нефтью, поэтому крайне важно обеспечить корректную температуру сырья. По этой причине для подбора тепловой нагрузки в PRO/II Simulaton печь (в виде сепаратора) включена в моделирование в качестве источника тепла на тарелке питания.

Моделирование демонстрирует, что расчет колонны сошелся с получением требуемых продуктов. В таблице 1 представлено сравнение анализов продуктов, полученных в МиР ПиА и PRO/II Simulaton.

Таблица 1

**Сравнение результатов моделирования ИТК
[составлено авторами]**

Об. %	Газойль		Отбензиненная нефть	
	МиР	PRO/II	МиР	PRO/II
1	514	422	434	573
5	612	605	695	720
10	638	641	749	768
30	691	698	871	885
50	729	735	975	992
70	771	779	1173	1190
90	850	853	1449	1456
95	885	885	1524	1527
98	951	949	1569	1574
кг/ч 10^3	14.21	14.41	8.13	7.99

Обсуждение. Данная работа показывает возможность точного моделирования в среде «МиР ПиА Процесс+», а полученные результаты подходят для анализа режимов работы и последующей настройки системы автоматического управления. Программное обеспечение с достаточной точностью симулирует работу реального оборудования. Полученные результаты продемонстрировали хорошее соответствие, особенно в верхней части колонны. Различие во фракционировании в значительной степени обусловлено допущениями, принятыми в модели «МиР ПиА» т.к. в текущей

версии PRO/II Simulaton имеет более гибкий функционал настройки ректификационных колонн.

Заключение. В результате проделанной работы были созданы две модели модель атмосферной перегонки сырой нефти в среде AVEVA PRO/II и «МиР ПиА Процесс+», которые показали хорошее соответствие. В дальнейшем существует возможность совершенствования модели «МиР ПиА Процесс+» за счет настройки термодинамических методов и подбора параметров модели с использованием контроллеров или универсальных регуляторов.

Российский аналог программного обеспечения для моделирования технологических процессов успешно конкурирует с западными решениями. Разработка и проектирование технологических решений будет стимулировать развитие отечественной IT-индустрии, создаст спрос на высококвалифицированные кадры в области инженерного ПО, а также будет способствовать формированию экосистемы отечественных разработок.

Список источников

1. Вейс, Ю. В. Цифровизация на предприятиях нефтегазового комплекса как драйвер инвестиционного развития / Ю. В. Вейс, Т. В. Галянина // Фундаментальные исследования. – 2024. – № 4. – С. 111-118. – DOI 10.17513/fr.43603. – EDN UGBUAD
2. Воеводский, В. В. Построение и развитие бизнес-экосистем при цифровой трансформации нефтегазовой отрасли / В. В. Воеводский // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 3. – С. 205-208. – EDN GVZDNN.
3. Ахмеров, Д. Р. Повышение эффективности технологических установок нефтеперерабатывающих заводов с применением Aspen HYSYS / Д. Р. Ахмеров, А. Г. Мухаметзянова // Вестник Технологического университета. – 2025. – Т. 28, № 1. – С. 127-131. – DOI 10.55421/1998-7072_2025_28_1_127. – EDN ZJZMVY.
4. Тугашова Л. Г., Гапонцев А. Д. Применение программ технологического моделирования в задачах управления процессами подготовки нефти. Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание, 2023, № 2, с. 36–44. EDN: FIGZKY
5. Белоглазов И. И., Курбанов Б. Х. Автоматизация процессов нефтепереработки с использованием современных средств разработки. Деловой журнал Neftegaz.ru, 2016, № 2, с. 34–37. EDN: VLFTJT

6. AVEVA PRO/II Process Simulation. URL: <https://www.aveva.com/en/products/pro-ii-simulation/> (дата обращения 18.09.2025).
7. Мир Пиа Процесс+. URL: <https://mirpia.ru/> (дата обращения 18.09.2025).
8. Коноваленко, Д. В. «МиР ПиА Процесс+» - российский программный продукт для моделирования технологических процессов и оборудования нефтегазовой отрасли / Д. В. Коноваленко // Нефть. Газ. Новации. – 2023. – № 9(274). – С. 35-37. – EDN TCJDYA.
9. Коньгин, С. Б. Анализ точности расчета давления насыщенных паров в программном продукте "МиР ПиА Процесс+" / С. Б. Коньгин // Научный альманах. – 2023. – № 8-2(106). – С. 19-21. – EDN JRRKAN.
10. Трифонова, М. Е. Моделирование в PRO/II атмосферного блока перегонки нефти / М. Е. Трифонова // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сборник научных статей XI международной научной конференции, Казань, 29–30 ноября 2021 года. Том Часть 1. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "КОНВЕРТ", 2021. – С. 65-66. – EDN ZYWMMY.
11. Minh V. T., A. M. A. Rani. Modeling and Control of Distillation Column in a Petroleum Process. Mathematical Problems in Engineering, 2009, 14 p. DOI: 10.1155/2009/404702

УДК 654.924.3

Алгоритм обнаружения квадрокоптера как нарушителя воздушного пространства при физической защите территорий охраняемых объектов

Тельный Андрей Викторович¹

andre.izi@mail.ru

Монахов Михаил Юрьевич¹

mmonakhov@vlsu.ru

Матвеева Екатерина Александровна¹

eamatveeva16@mail.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. В настоящее время актуальной задачей обеспечения физической защиты территорий охраняемых объектов является обнаружение фактов нарушений их воздушного пространства малоразмерными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) типа квадрокоптер. Наиболее эффективным средством обнаружения БПЛА является использование систем видеонаблюдения (СВН) с

интеллектуальной обработкой изображений из видеопотока в реальном времени. В данной работе предложен алгоритм интеллектуальной обработки видеоизображений в зоне обнаружения СВН. Новизна представленного решения заключается в предложенной схеме функционирования интеллектуального обнаружителя на основе видеодетекции. Предлагаемый алгоритм может быть внедрен в виде программного дополнения в действующие системы видеодетекции для периметральных СВН и использоваться в системах физической защиты.

Ключевые слова: ложные срабатывания сигнализации, система видеонаблюдения, квадрокоптер, воздушное пространство защищаемых объектов

An algorithm for detecting a quadcopter as an airspace intruder during physical protection of protected areas

Telny Andrey Viktorovich¹

andre.izi@mail.ru

Monakhov Mikhail Yurievich¹

mmonakhov@vlsu.ru

Matveeva Ekaterina Alexandrovna¹

eamatveeva16@mail.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. Currently, a pressing issue in ensuring the physical security of protected areas is the detection of airspace violations by small unmanned aerial vehicles (UAVs) such as quadcopters. The most effective means of UAV detection is the use of video surveillance systems (VSS) with intelligent processing of live images in real time. This paper proposes an algorithm for intelligently processing video images in the VSS detection zone. The novelty of the presented solution lies in the proposed operating scheme of an intelligent detector based on video detection. The proposed algorithm can be implemented as a software add-on to existing video detection systems for perimeter video surveillance systems and used in physical security systems.

Keywords: false alarms, video surveillance system, quadcopter, airspace of protected facilities

Введение. Вопросам использования видеоизображений для выявления нарушителей систем физической защиты в технологических процессах охраны объектов и территорий посвящено большое количество научных публикаций. В публикациях [1, 2, 3] приведены общие подходы к описанию вариантов использования средств охранного телевидения в задачах ситуационной видеоаналитики. Важным направлением развития

систем физической защиты объектов является интеграция подсистем безопасности в рамках единых программно-аппаратных интегрированных систем безопасности (ИСБ). Новые варианты структурного построения ИСБ предложены в [4, 5]. Особый интерес представляет работа [5], так, как ее тематика схожа с темой исследований по физической защите периметров территорий.

Проблематике использования комбинаций видеопотоков при многокамерной видеоаналитике посвящена работа [6]. В данной публикации акцентируется применение алгоритмов обработки видеопотоков с нескольких камер для интерполяции траекторий перемещения контролируемых объектов на охраняемой территории. Из современных программных средств для обработки видеоизображений наиболее популярным является применение сверточных нейронных сетей (CNN). В частности, технологии YOLOv11 обработки видеоизображений позволяют осуществлять детекцию событий, классифицировать объекты (человек, машина, животное и др.), решать задачи сегментации изображений, реализовывать оценку позы, обнаруживать ориентированные объекты, отслеживать движущиеся объекты (BoT-SORT и ByteTrack).

Материалы и методы. Стандартно используемые технические средства охраны периметра в основном различаются физическим принципом действия, например, проводные, радиоволновые, оптико-электронные, сейсмические, манометрические, вибрационные, волоконно-оптические и прочие [7, 8].

Типовыми средствами периметральной сигнализации невозможно решить задачу обнаружения летящего объекта при нарушении им контролируемой зоны. Типовые уличные охранные извещатели могут устанавливаться только на ограждения периметра и требуют стационарной установки, они не предназначены для защиты от «воздушных» нарушителей, так, как имеют ограниченную зону действия и ограничения по скорости обнаружения движения. Кроме того, такие извещатели реагируют на любые движущиеся объекты, в том числе на животных и птиц.

В качестве альтернативы существующим периметральным охранным извещателям можно использовать для охраны воздушного пространства территории СВН. Современные видеокамеры оснащаются датчиками движения, способными активироваться, если ранее зафиксированное изображение изменилось. Для детектора движения видеокамеры можно настроить размер зоны обнаружения по горизонтали вертикали,

чувствительность и другие параметры в соответствии с контролируемым периметром территории. Однако, при использовании СВН без интеллектуальной обработки изображений, количество ложных срабатываний (ошибок 1 рода) окажется неприемлемо большим.

Для снижения количества ложных тревог предлагается осуществлять захват изображения от видеокамеры в момент срабатывания датчика тревоги и подвергать изображение интеллектуальному анализу путем классификации типа изображения, отделяя квадрокоптеры от других объектов (птицы, облака, самолеты, вертолеты, воздушные шары). Таким образом, возникает актуальная задача разработки классификатора изображений на основе CNN способного проводить классификацию квадрокоптеров, различая их от других объектов с высокой точностью, максимальной скоростью с помощью технологий YOLOv11. При этом можно руководствоваться требованиями по использованию видеоаналитики в системах видеонаблюдения [9].

Цель исследования – Сформировать алгоритм интеллектуальной обработки изображений при помощи СВН для обнаружения квадрокоптеров с минимальным количеством ошибок 1 рода. Практическая значимость работы состоит в возможности применения предложенного алгоритма при создании реальных систем охраны воздушного пространства территорий.

Результаты. Охраняемая территория защищается видеокамерой (или камерами) с программным датчиком движения. Важно, чтобы датчик движения обязательно был именно программным. В этом случае видеокамера находится в режиме ожидания. Специальное программное обеспечение (ПО) камеры попиксельно отслеживает разницу изображений в последовательных кадрах и при обнаружении движения активируется оптическая система. При обнаружении цели (в нашем случае движущегося объекта в секторе обзора камеры охраняемого пространства), камера формирует видеопоток, поступающий на плату видеозахвата. Формируемое изображение оценивается нейросетью на предмет обнаружения квадрокоптера. В случае положительного решения при классификации видеоизображения, формируется сигнал тревоги для оператора. Видеокамера и сервер работают в фоновом режиме и активируются только при срабатывании датчика движения камеры. По сути, предлагаемое решение является дальнейшим развитием программного датчика движения для видеокамеры. Классификация изображений нужна только для снижения количества ложных тревог (ошибок 1 рода).

Для практического применения лучше использовать несколько камер, контролирующих один сектор пространства. Пусть имеется три видеокамеры, срабатывающие на одного и того же нарушителя (движущийся объект). Сигнал тревоги формируется если срабатывает все три канала. Если классификация изображений от каждой камеры происходит по собственному, независимому каналу и погрешность классификации для каждой камеры не зависят от изображений от других камер, то очень высокая точность классификации не нужна, а на первое место выходит показатель скорости классификации. Согласно правилу сложения вероятностей совместных независимых событий $P(K1 \cap K2 \cap K3) = P(K1) + P(K2) + P(K3) - P(K1 \cap K2) - P(K1 \cap K3) - P(K2 \cap K3) + P(K1 \cap K2 \cap K3)$. Например, при точности классификации в 85% от каждой камеры $K1-K3$ общая погрешность классификации составит $0,85+0,85+0,85 - 3 \times 0,85 \times 0,85 + 0,85 \times 0,85 \times 0,85 = 0,9966$.

Пусть по результатам классификации от каждой камеры есть два типа исходов $P(K1; K2; K3) = \{0; 1\}$ 0 – объект не классифицирован как квадрокоптер; 1 – объект классифицирован как квадрокоптер. Предлагается следующий алгоритм классификации:

Шаг 1: $if \{ P(K1) \cap P(K2) \cap P(K3) = 1 \} \Rightarrow$ Тревога ;

Шаг 2: $if P[\{(K1) \cup P(K2) \cup P(K3) = 1\} \cap \{(K1) \cap P(K2) \cap P(K3) = 0\}] \Rightarrow$ Внимание;

Шаг 3: Пауза τ ;

Шаг 4: $if P[\{(K1) \cup P(K2) \cup P(K3) = 1\} \cap \{(K1) \cap P(K2) \cap P(K3) = 0\}]|_{t+\tau} \Rightarrow$ Пауза τ ;

Шаг 5: $if P[\{(K1) \cup P(K2) \cup P(K3) = 1\} \cap \{(K1) \cap P(K2) \cap P(K3) = 0\}]|_{t+2\tau} \Rightarrow$ Пауза τ ;

Шаг 6: $if P[\{(K1) \cup P(K2) \cup P(K3) = 1\} \cap \{(K1) \cap P(K2) \cap P(K3) = 0\}]|_{t+3\tau} \Rightarrow$ Ошибка;

Шаг 7: $if P[\{(K1) \cup P(K2) \cup P(K3) = 0\} \cap \{(K1) \cap P(K2) \cap P(K3) = 0\}] \Rightarrow$ Отбой Тревоги;

В случае, если срабатывают не все три канала, а только один или два, то для оператора формируется сигнал «внимание» и спустя определенную программируемую при настройке системы паузу до нескольких секунд, ($\tau = 0,5 \div 3$ с), система опять захватывает изображения по всем трем каналам и проводится классификация. При нескольких подряд идущих ситуациях (например, 3 раза), когда срабатывают не все три канала, а только один или

два, должно формироваться оператору сообщение «Ошибка» или «Неисправность». Теоретически это возможно, например, при плохих климатических условиях или значительных помехах в детекции движения на изображениях (например, стая птиц).

Обсуждение. Для практической реализации системы обнаружения нарушителей воздушного пространства территорий объектов можно использовать, например, уличные купольные IP-камеры AXIS с встроенным ПО AXIS Video Motion Detection. Поддержка платформы AXIS Camera Application Platform, обеспечивает установку приложений сторонних производителей, а видеодетектор движения AXIS VMD 2.1 – это бесплатное, приложение для гибкого обнаружения движения, которое устанавливается на все сетевые камеры Axis и видеокодеры для поддержки прикладных программ AXIS Camera. Во встроенном детекторе движения алгоритм основан на попиксельном сравнении кадров с последующей обработкой для исключения ложных срабатываний при изменении локальной освещенности или её резкой смены. Данное программное приложение интегрируется во внутренний диспетчер событий камеры с возможностью следующих системных оповещений: начало записи; изображение на FTP сервер; включение индикатора на камере; включение звукового предупреждения с камеры; включение датчика сирены и т.п. В режиме ожидания сетевая камера такого класса записывает изображение в буфер памяти с программируемой длительностью до 10 секунд. Видеодетектору движения AXIS VMD 2.1 может потребоваться около 400 мс для обнаружения движущегося объекта, но всегда имеется возможность настройки записи до события.

Заключение. Интеллектуальные системы обнаружения нарушений воздушного пространства территорий охраняемых объектов и временных площадок можно строить на основе систем охранного телевидения, оснащенных программными датчиками движения. Для выявления квадрокоптеров- нарушителей можно использовать обученную на классификацию (квадрокоптеры, птицы, облака, самолеты, вертолеты, воздушные шары) CNN нейросеть на основе технологии YOLOv11. Главным фактором, влияющим на точность при многоклассовой классификации изображений летящих объектов, является качество подобранного набора данных видеоизображений для датасета и сбалансированность классов. Необходимо добиваться, чтобы изображения квадрокоптеров, птиц и других объектов было именно в состоянии полета,

чтобы на изображениях не было крупных неоднородных объектов (не составляющих общий фон). На изображениях не должно быть множества искомых объектов (стаи птиц или нескольких квадрокоптеров). При решении задачи классификации размер изображения объекта нарушителя составляет довольно небольшую площадь от всего изображения, так, как расстояние до объекта довольно большое, поэтому разрешение изображения должно быть большим, желательно более 200x200 dpi. Практические эксперименты показывают, что быстродействие распознавания составляет примерно 70мс на одно изображение, что является вполне приемлемым для задач создания интеллектуальных обнаружителей квадрокоптеров, и ниже времени срабатывания охранных периметральных извещателей.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Российского научного фонда инициативного проекта № 25-21-20146 (РНФ-1246/25).

Список источников

1. Тельный А. В. О возможности использования ситуационной видеоаналитики. Шуйская сессия студентов, аспирантов, педагогов, молодых ученых: Материалы XIII Международной научной конференции, Москва-Иваново-Шуя, 25 сентября 2020 года. – Шуя: Ивановский государственный университет, 2020, С. 224 – 227.
2. Токарев В. Л., Абрамов Д. А. Алгоритмы видеоаналитики для обнаружения и классификации нештатных ситуаций. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2016, № 11-1, С. 72 – 80.
3. Токарев В. Л., Абрамов Д. А. Методы выделения нештатных ситуаций в информационно-измерительных системах видеонаблюдения. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2015, № 11-1, С. 258 – 265.
4. Куделькин В. А. Интеллектуальная интегрированная система безопасности и способ контроля оператора безопасности. Патент на изобретение RU № 2625095 C1 опубл. 11.07.2017, бюл. №.20.
5. Ермаков К. С., Руссакова Е. Р. Автоматическая установка для активной защиты воздушного пространства от птиц и малых беспилотных летательных аппаратов. Патент на изобретение RU № 2794379 C1 опубл. 17.04.2023, бюл. №.11.

6. Дубровский А. В. Алгоритм работы многокамерной видеоаналитики. Информационные технологии в УИС, 2023, № 2, С. 72 – 78.

7. Рекомендации по использованию технических средств обнаружения, основанных на различных физических принципах, для охраны огражденных территорий и открытых площадок. Методические рекомендации Р068, 2017, – М.: ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии, Саратов: Амирит, 110 с. ISBN 978-5-00140-078-3.

8. ГОСТ Р 52651-2022. Извещатели охранные линейные радиоволновые для периметров. Общие технические требования и методы испытаний [Электронный ресурс]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/793/79384.pdf> (дата обращения 02.11.2025).

9. Об утверждении требований к функциональным свойствам технических средств обеспечения транспортной безопасности и правил обязательной сертификации технических средств обеспечения транспортной безопасности. Постановление Правительства Российской Федерации от 26 сентября 2016г. № 969. Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/71500596/> (дата обращения 02.11.2025).

УДК 004.942; 303.732.4

Алгоритм идентификации спорадических контекстных сообществ на основе поведенческих паттернов

Толокнов Егор Альбертович¹

tolegork@mail.ru

Монахов Михаил Юрьевич¹

mmonakhov@vlsu.ru

¹ВЛГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача верификации принадлежности пользователей к спорадическим контекстным сообществам (СКС) в системах открытой массовой онлайн-коммуникации. Предложен гибридный алгоритм, сочетающий атрибутивный отбор, семантический анализ и поведенческую фильтрацию на основе временных паттернов активности. Введена модель хронометрической фильтрации с использованием «тепловой карты» связей, отражающей актуальность взаимодействий в рамках временного окна события. Эксперимент на данных социальной сети «ВКонтакте» по теме «Празднование Нового года» показал, что применение поведенческого анализа увеличивает плотность

связей внутри ядра СКС на 59,37% и позволяет выявить скрытые компоненты сильной связности, недоступные статическому анализу. Показано, что 8 из 23 верифицированных агентов проявляют устойчивую активность в 2023 году, а узел 2 формирует новую SCC из 9 узлов, подтверждая гипотезу о поведенческой замкнутости СКС. Алгоритм повышает точность идентификации с 70% до 82%.

Ключевые слова: спорадические контекстные сообщества, поведенческие паттерны, хронометрическая фильтрация, тепловая карта, временные окна, SQL Server, верификация пользователей.

Algorithm for identifying sporadic contextual communities based on behavioral patterns

Toloknov Egor Albertovich¹

tolegork@mail.ru

Mikhail Yuryevich Monakhov¹

mmonakhov@vlsu.ru

¹VLSU, Vladimir, Russia

Abstract. The problem of verifying user membership in sporadic contextual communities (SCC) in open mass online communication systems is considered. A hybrid algorithm is proposed that combines attributive selection, semantic analysis, and behavioral filtering based on temporal activity patterns. A chronometric filtering model is introduced using a “heat map” of links reflecting the relevance of interactions within the event time window. An experiment on VKontakte social network data on the topic “New Year Celebration” showed that behavioral analysis increases link density within the SCC core by 59,37% and reveals hidden strongly connected components inaccessible to static analysis. It is demonstrated that 8 out of 23 verified agents exhibit sustained activity in 2023, and node 2 forms a new SCC of 9 nodes, confirming the hypothesis of behavioral closure of SCC. The algorithm increases identification accuracy from 70% to 82%.

Keywords: sporadic contextual communities, behavioral patterns, chronometric filtering, heat map, time windows, SQL Server, user verification.

Введение. Спорадические контекстные сообщества (СКС) представляют собой кратковременные, слабоструктурированные группы пользователей, объединённые общей темой или событием, но не имеющие формальной идентичности [1]. Их выявление остаётся сложной задачей из-за отсутствия устойчивых связей и преобладания односторонних взаимодействий [2]. Существующие методы, основанные на статическом

анализе графа и атрибутивных признаках, не учитывают динамику активности и часто приводят к ложным включениям [3].

Целью данной работы является разработка и верификация алгоритма, интегрирующего поведенческие паттерны и хронометрическую фильтрацию для повышения достоверности классификации пользовательских групп.

Материалы и методы. В качестве источника данных использовалась социальная сеть «ВКонтакте» за период 2017–2023 гг. по теме «Празднование Нового года». Атрибутивный профиль: возраст 19–25 лет, место жительства — Владимир и область, обучение в ВлГУ. Семантический словарь содержал 210 релевантных терминов. Временное окно события: 1 декабря – 8 января.

Алгоритм реализован в Microsoft SQL Server Management Studio и включает три этапа:

1. Атрибутивно-семантический отбор — отбор кандидатов по профилю и релевантности сообщений.

2. Поведенческая фильтрация — выявление агентов с непрерывной активностью ≥ 7 дней подряд в 2023 году и активностью $\geq$ медианы по выборке.

3. Хронометрическая взвешенная фильтрация — построение «тепловой карты» связей с весом:

$$w_{uv} = e^{-\alpha|t-t_{\text{пик}}|}$$

где:

- $t_{\text{пик}} = 2023$
- $\alpha = 0.3$

Графовая визуализация и расчёт SCC выполнены с использованием Python-библиотеки NetworkX.

На этапе атрибутивного отбора получено 28 узлов. После фильтрации по числу взаимодействий ($\geq$ медианы по выборке) осталось 23 узла и 32 связи, сформировав 4 SCC из ≥ 2 узлов:

- SCC 1: [1, 9]
- SCC 2: [3, 4, 5, 7, 12]
- SCC 3: [8, 18]
- SCC 4: [20, 23]

Результаты. Применение поведенческого анализа и хронометрической фильтрации выявило 19 дополнительных связей (всего

51), не изменив множество узлов. Ключевой результат — формирование новой SCC из 9 узлов: [2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 15], где узел 2, ранее изолированный, становится центральным элементом. Это подтверждает, что узел 2 проявляет устойчивую активность в 2023 году и функционирует как «центр притяжения». Графы с примененной фильтрацией изображены на рисунках 1 и 2.

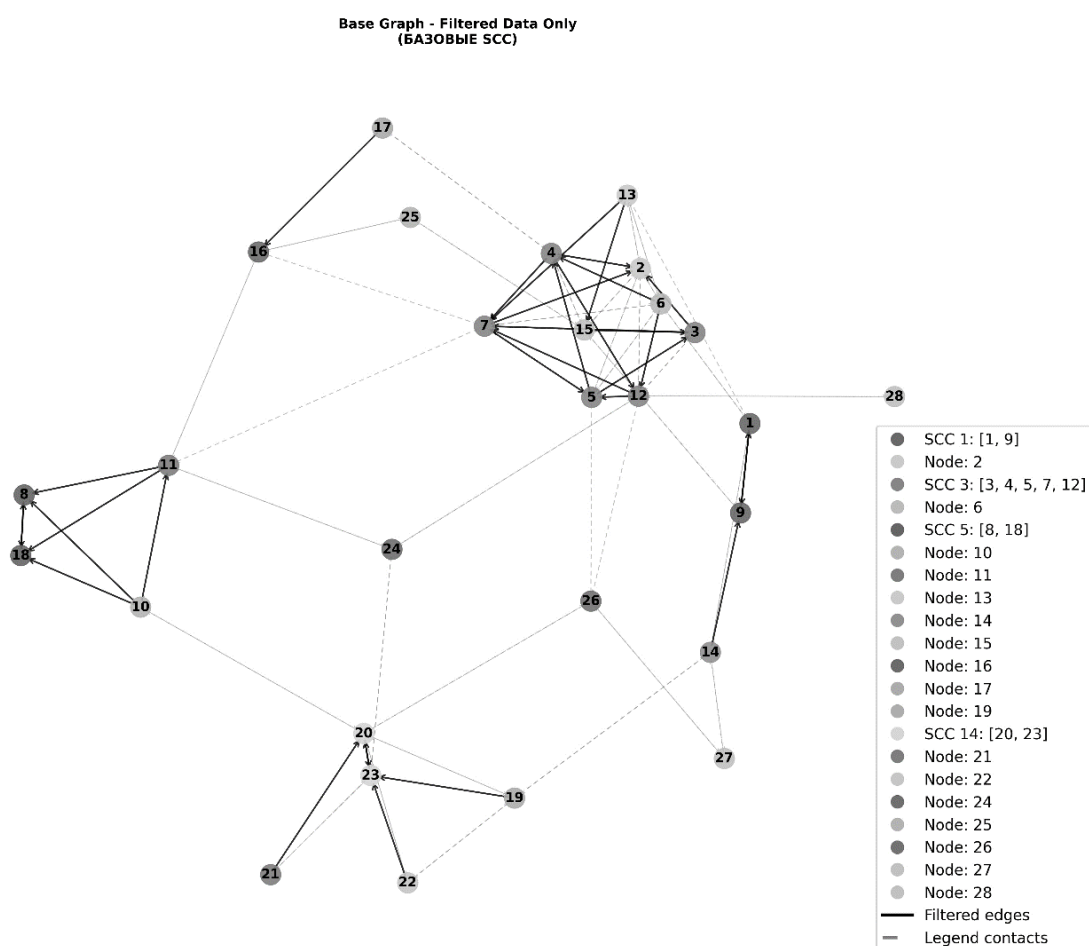


Рисунок 1. Граф со статическими связями.

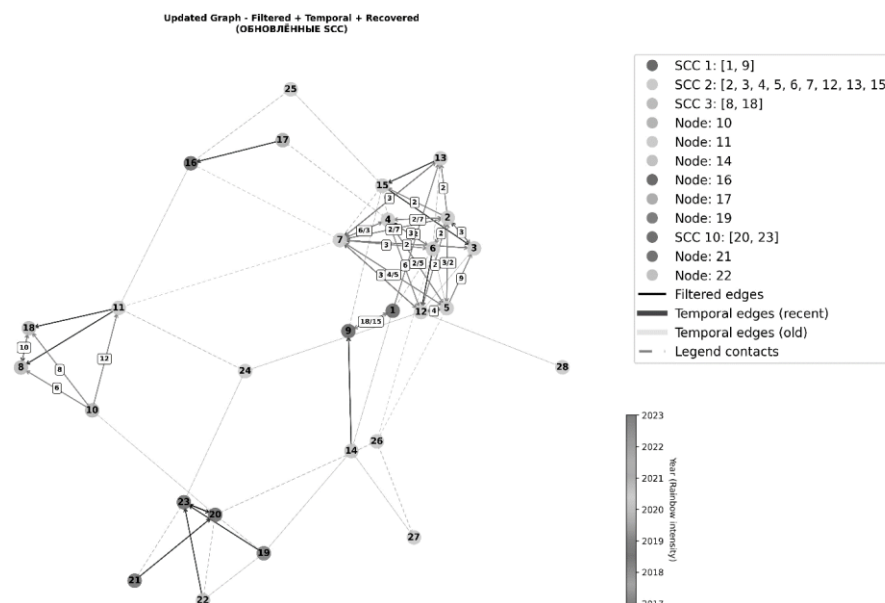


Рисунок 2. Граф с включенными динамическими связями.

Обсуждение. Полученные данные демонстрируют, что статический анализ недооценивает связность СКС из-за кратковременности наблюдения. Поведенческая верификация позволяет:

- исключить «одноразовые» встречи,
- выявить скрытые связи через устойчивую активность,
- подтвердить гипотезу о поведенческой замкнутости: новые узлы не добавляются, но связи внутри существующего множества насыщаются.

Результат согласуется с моделью порогового поведения (Дмитриевич Р.А. [4]) и моделью пуассоновского процесса (Торопова А.В. [5]): активность в 2023 году резко возрастает, формируя ядро СКС. Повышение точности с 70% (по результатам предыдущей работы [1]) до 82% (сформулирован словарь, связи уточняются динамическим анализом) подтверждает эффективность гибридного подхода.

Заключение. Предложенный алгоритм верификации на основе поведенческих паттернов и хронометрической фильтрации решает ключевую проблему идентификации СКС — кратковременность и динамичность связей. Метод позволяет не только повысить точность выявления, но и качественно оценить актуальность взаимодействий через «тепловую карту». Результаты эксперимента подтверждают, что СКС обладает свойством поведенческой замкнутости, а его ядро формируется за счёт усиления внутренних связей, а не притока новых участников.

Разработанный подход может быть интегрирован в системы анализа социальных сетей для мониторинга скрытых групп и оценки их влияния.

Список источников

1. Толокнов Е.А., Монахов М.Ю., Матвеева Е.А. Алгоритм поиска спорадического контекстного сообщества в социальных сетях интернета // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2025. № 1. С. 41–47.
2. [Сулов С.И. Сетевые агенты политической интернет коммуникации в русскоязычном онлайн пространстве: автореф. дис. канд. соц. наук. — СПб., 2017. — 26 с.
3. Chesnokov V.O., Klyucharev P.G. Social Graph Community Differentiated by Node Features with Partly Missing Information // Science and Education of the Bauman MSTU, 2015. № 9. С. 188–199.
4. Дмитриевич Р.А. Вероятностные модели порогового коллективного поведения: дис. канд. техн. наук. — М.: ИПУ РАН, 2019. — 142 с.
5. Торопова А.В. Методы и алгоритмы обработки неопределенности данных при оценивании интенсивности пуассоновского процесса: автореф. дис. канд. техн. наук. — СПб., 2022. — 23 с.

УДК 519.71; 519.855

Метод создания программных комплексов моделирования и оптимизации химико-технологических процессов

Бахтадзе Наталья Николаевна^{1,2}

bahtadzenn@bmstu.ru

SPIN-код: 6945-4536,

Быков Андрей Александрович³

bykovaa1@gmail.com

SPIN-код: 4064-2700,

Громов Олег Борисович⁴

ollgromov@mail.ru

SPIN-код: 4394-7437,

Михеев Петр Иванович¹

pmikheev@bmstu.ru

SPIN-код: 9243-3670,

Травин Сергей Олегович⁵

travinso@yandex.ru

SPIN-код: 6533-3713

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, ²ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, ³ООО «Русатом МеталлТех», ⁴ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, ⁵ФИЦХФ РАН им. Н.Н. Семенова

Аннотация. Представлен подход к созданию интеллектуальных моделирующих комплексов технологических процессов на примере химико-технологических процессов. Предложены методы формирования и настройки баз знаний производственных процессов на основе интеллектуального анализа данных. Представлена структура интеллектуального анализатора для моделирующих комплексов технологических процессов с применением прогнозирующих моделей процесса, настраиваемых в реальном времени с использованием знаний.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, модель, база знаний, идентификатор, система поддержки принятия решений.

Method for implementing software systems for modeling and optimizing chemical and technological processes.

Bakhtadze Natalia^{1,2}

bahtadzenn@bmstu.ru

Spin code: 6945-4536,

Bykov Andrey

bykovaal@gmail.com

Spin code: 4064-2700,

Gromov Oleg⁴

ollgromov@mail.ru

Spin code: 4394-7437,

Mikheev Peter¹

pmikheev@bmstu.ru

Spin code: 9243-3670,

Travin Sergey⁵

travinso@yandex.ru

SPIN code: 6533-3713

¹BMSTU, ² Trapeznikov ICS RAS, ³ Rosatom Metal Tech LLC, ⁴Bochvar VNIINM, ⁵ Semenov FRCCP RAS, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents an approach to creating intelligent modeling complexes of technological processes using the example of chemical and technological processes. The paper proposes methods for creating and configuring knowledge bases of production processes based on data mining. The paper presents the structure of an intelligent analyzer for modeling complexes of technological processes using predictive process models that are configured in real time using knowledge.

Keywords: software and hardware complex, model, knowledge base, identifier, decision support system

Введение. Создание моделирующих комплексов технологических процессов в условиях функционирования на производстве современных средств автоматизации и информационных технологий становится все более актуальным в различных аспектах. Такие программно-аппаратные комплексы могут быть использованы: на стадии проектирования производственных установок, в качестве тренажеров для технологического персонала и обучающих систем для студентов профильного образования. Но наибольшую значимость такие системы приобретают в автоматизированном управлении технологическими процессами [1].

Особенно эффективной представляется разработка программно-аппаратных комплексов моделирования и оптимизации, относящихся к классу систем поддержки принятия решений (СППР), основанных на знаниях (knowledge based system) [2]. Основным атрибутом таких систем искусственного интеллекта является способность накопления и использования знаний (формализованных посылок, выводов, закономерностей, относящихся к исследуемому объекту), а также формирования рекомендаций по управлению в режиме реального хода процесса. По сравнению с применяемыми сегодня на производстве СППР, системы такого типа обретают способность корректировать управление в зависимости от особенностей текущей производственной ситуации. Это может быть формализовано как введение в вектор состояния системы компонент, вычисляемых с использованием текущих знаний. Такой подход позволяет учитывать, в том числе, изменения, которые невозможно было предвидеть, и поэтому - предусмотреть в изначальной структуре модели. Интеллектуальность модели предопределяет гибкость в управлении. Применение в управлении прогнозирующих моделей, использующих пополняемую в темпе процесса базу знаний, предоставляет неоценимые возможности с точки зрения диагностики технологического оборудования и контроля приближения режима к критическим границам, в частности, к границе устойчивости объекта.

Программно-аппаратный комплекс моделирования и оптимизации ХТП как интеллектуальная информационная система.

Современный этап разработки интеллектуальных систем управления в значительной степени ориентирован на разработку систем с интеллектуальным интерфейсом: от самообучающихся, адаптивных, - до

гибридных систем искусственного интеллекта, объединяющих возможности нейронных сетей и моделей представления знаний [3]

Специалисты в области разработки интеллектуальных систем управления делают основной акцент на развитие направлений искусственного интеллекта, связанных с моделированием. Отмечается, [3], что в случае машинного интеллекта имеет место с моделирование феноменологическое, имитационное, а в случае искусственного разума — структурное.

В настоящей статье представлен метод создания программно-аппаратного моделирующего комплекса, представляющего собой информационно-управляющую систему с прогнозирующей моделью, основанной на знаниях.

Особенности построения модели: использование дополнительной априорной информации и интеллектуальный анализ архивов технологических данных.

Для создания математической модели технологического процесса рассмотрим пример химико-технологических процессов. Моделирование должно обеспечивать не только достаточно точное описывание физико-химических свойств реагентов, но и адекватно отражать конкретику протекающей реакции и технологической установки. Кроме того, необходимо учитывать все ограничения и особенности, определяемые как технологическим регламентом, так и экспертными мнениями. В качестве эксперта, анализирующего ситуацию, выступает лицо, принимающее решения. В этом качестве могут выступать как оператор технологической установки, так и специалисты, просчитывающие, например, экономику процессов — с целью прогнозирования, и т.п. Их мнение учитывается посредством интерактивного интерфейса. Возможен вариант, когда эксперт предлагает опорный вариант решения задачи. Дальше начинается работа интеллектуального анализатора текущей ситуации с варьированием отдельных параметров с целью оптимизации модели (рисунок 1).

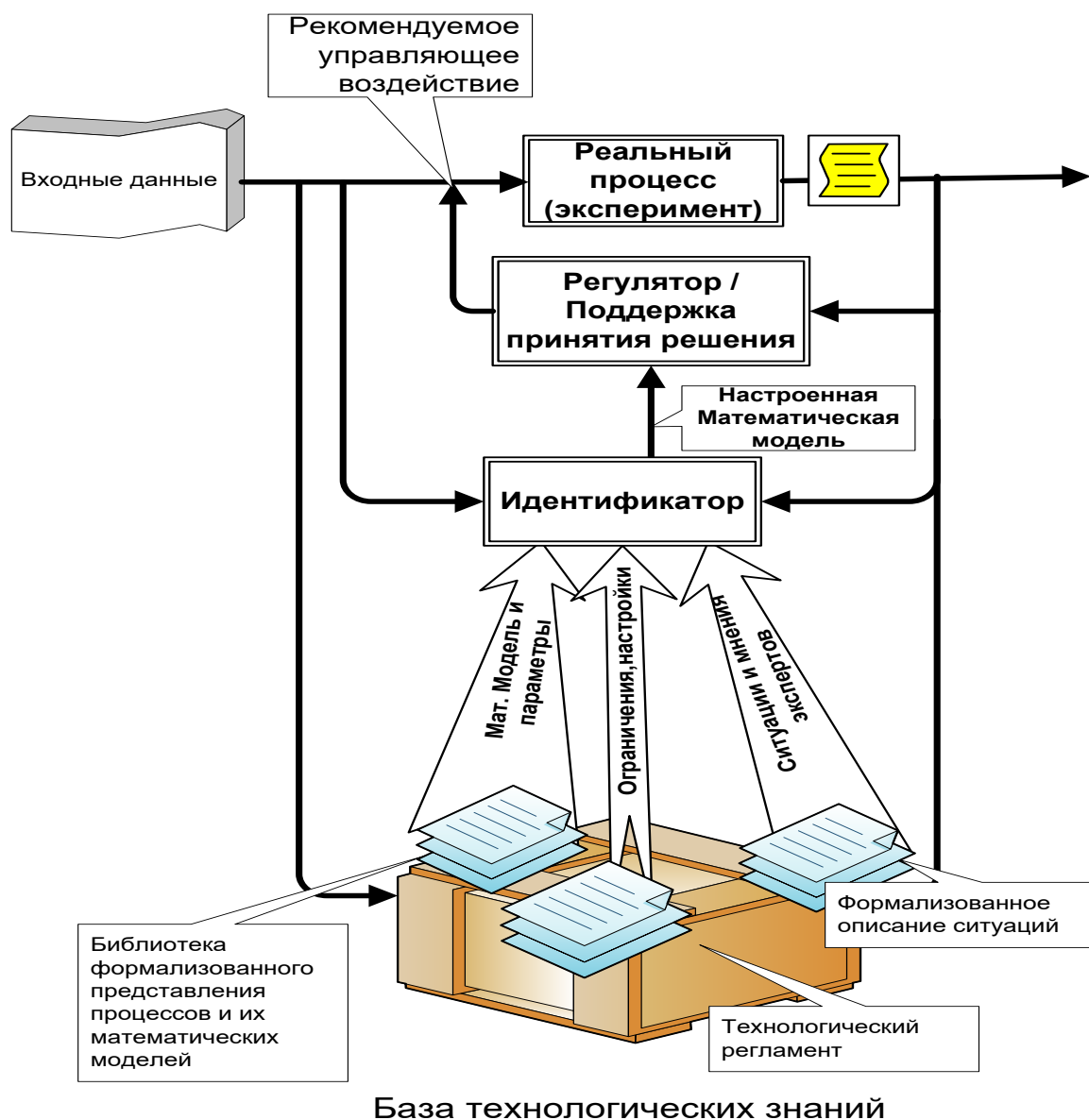


Рисунок 1. Структура системы анализа и/или управления на основе интеллектуальной системы моделирования.

Интеллектуальный анализ, являющийся основой поддержки принятия решений, реализует взаимодействие Идентификатора (рисунок 2) и Базы знаний.

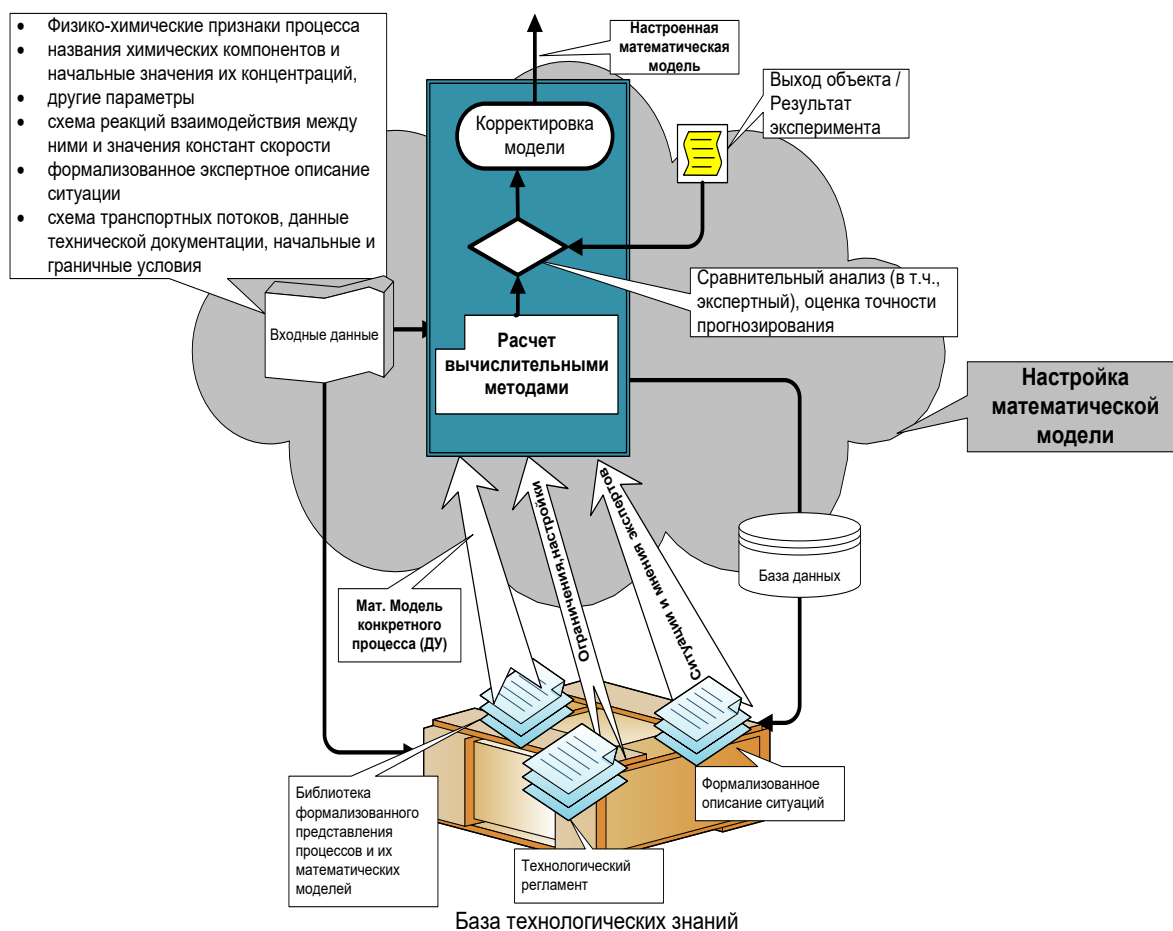


Рисунок 2. Идентификатор.

В Базе знаний содержится ряд библиотек, накапливающих «производственный опыт» – от синхронизированных во времени входов и соответствующих им выходов и уравнений для известных физико-химических процессов – до архивов настроенных моделей и архивов формализованных ситуаций – «закодированных» признаков и характеристик текущего состояния. Такие нетривиальные библиотеки требуются как для экспертного анализа, так и для функционирования интеллектуальных алгоритмов, моделирующих процесс принятия решений человеком-оператором. С помощью таких алгоритмов можно осуществлять аналитические операции, которые реальному оператору, анализирующему ситуацию, могут оказаться сложны, либо он не сможет учесть все факторы, неявно влияющие на ход процесса, т.е. его не моделируемую внутреннюю динамику. В последнем случае хорошо зарекомендовал себя метод интеллектуального анализа данных, получивший название «ассоциативного поиска». Метод использует для анализа и прогноза достаточное количество

аналогов – ситуаций, близких в соответствии с определенным критерием к текущей [4].

В результате интеллектуального анализа экспертом (либо алгоритмом) набора данных, составляющих текущее состояние, он выдает рекомендацию по «управлению».

В данном контексте под управлением понимаем корректировку математической модели перед непосредственным вычислением.

Процесс вычисления осуществляется в блоке «Вычислитель». Блок состоит из Парсера, осуществляющего синтаксический и семантический анализ сформированной математической модели и Сольвера. В моделирующем комплексе могут быть реализованы различные схемы, позволяющие получать решения уравнений/систем уравнений. Получаемое решение проверяется на пригодность посредством сравнения с результатом эксперимента или с реальным выходом объекта. На этом этапе осуществляется дополнительная настройка параметров уравнений. «Вычислитель», «Сравнение с реальным выходом» и «Настройка параметров уравнений» образуют блок «Идентификатор».

Разработка структуры интеллектуального анализатора для моделирующих комплексов производственных процессов.

Предлагаемый метод разработки систем моделирования технологических процессов химического производства является интеллектуальным в силу трех признаков:

- использование при построении модели процесса определенных технологических знаний
- привлечение экспертных знаний для оптимизации модели
- формализация экспертных знаний посредством нечеткого моделирования.

В общем случае модель процесса используется для анализа, прогнозирования и управления (либо поддержки принятия решений) [5-6].

Схема анализа и/или управления с помощью интеллектуальной системы моделирования.

Если не рассматривается управление, интерфейс ограничивается анализом различных вариантов имитационного моделирования, сравнением различных вариантов и выбором приемлемого [7], также сценарным прогнозированием.

Идентификатор.

Рассмотрим более детально схему идентификатора. На вход идентификатора поступают различные элементы формализованного описания, как самого процесса, так и его текущего состояния.

К описанию процесса относятся: его физико-химические признаки, позволяющие описать процесс с помощью известных математических моделей. Выбор конкретного описания процесса осуществляется из Библиотеки моделей, содержащейся в Базе технологических знаний. К этому же классу относится учет отдельных данных технической документации, в частности, технологического регламента, что позволяет ввести все необходимые ограничения.

Описание текущего состояния.

Схема транспортных потоков, формируемая пользователем системы с помощью интерактивного интерфейса, позволяет конкретизировать описание моделируемого процесса в виде дифференциальных либо разностных уравнений. Это же относится (для химико-технологических процессов) к перечню химических компонентов, начальным значения их концентраций, и ряду других параметров, характеризующих данный моделируемый процесс.

Конкретизирует задачу введение замечаний эксперта (технолога, оператора технологической установки, и т.д.) по текущей ситуации. Эти замечания также вводятся интерактивно в виде выбора из предлагаемого набора ситуаций с возможной детальной конкретизации значений отдельных параметров. Набор ситуаций содержится в соответствующей библиотеке базы знаний. Далее замечания эксперта могут быть обработаны в системе (формализованы) с последующим учетом при настройке модели. Формализация осуществляется на основе нечетких продукционных правил, которые также содержатся в БЗ.

В идентификаторе осуществляются следующие операции:

- Формирование математической модели конкретного процесса на основе схемы транспортных потоков и задания ограничений и начальных условий
- корректировка модели с учетом описания текущего состояния
- расчет процесса по созданной модели дифференциальных уравнений. Данная операция включает в себя решение систем дифференциальных уравнений с помощью известных вычислительных методов

- сравнение с результатами эксперимента (псевдо-эксперимента) и корректировка модели
- занесение ситуации и результатов моделирования в БЗ с целью ее дальнейшего обучения

Описание разработки структуры базы знаний.

Знания, извлекаемых из технологического архива, основаны на применении интеллектуального анализа данных. Эффективным методом является кластеризация данных. База знаний пополняется и корректируется в темпе технологического процесса [8]. Основными элементами структуры базы для формирования и хранения знаний, интерпретируемых как закономерности, характеризующие технологический процесс, являются:

- База реального функционирования ТП. Содержит наборы значений входов и соответствующих им выходов (готовая продукция, побочная продукция, отходы) по данным мониторинга – из архива.
- Оценки результатов - формализованные значения оценок экспертов (например, с помощью нечетких моделей) и оценок, получаемых с помощью интеллектуальных алгоритмов идентификации в соответствии с выбранными критериями.

База технологических регламентов содержит (в формализованном виде):

- Методы производства
- Технические средства
- Технологические нормативы: условия технологического процесса, операции
- Правила выполнения операций в различных ситуациях
- Детальный порядок осуществления технологического процесса
- Правила ведения режима;
- Параметры режима: температуры, давления, расходы, скорости реакций, ..., последовательности ведения режима.

Формализованные индикаторы нештатных ситуаций и характеризующие их параметры наборы параметров, характеризующих особенности протекания процесса, например, для процессов химико-технологических производств:

- тепловой эффект реакции
- значение изменения энтальпии

- изменение числа молей газообразных реагентов
- оценка изменения энтальпии реакции с температурой
- теплоемкости
- оценка температуры смены знака свободной энергии
- вычисленное распределение температур по реактору
- температура, при которой достигается нулевое значение свободной энергии

- Учет влияния пространственных и временных факторов и т.д.

База формализованных экспертных оценок ситуаций, содержащая комментарии экспертов в виде правил нечеткого вывода.

База библиотек формализованного представления процессов и их математических моделей (наборы уравнений, соответствующие элементам схем транспортных потоков).

База данных реального функционирования технологического процесса (Данные технологического оборудования): фактические расходы в данный момент времени технологических параметров: расходы, давления, температуры и т.д. В данной базе отражаются также возможные отклонения от штатных ситуаций (набор шаблонов), дополнительные ограничения.

База построенных математических моделей процессов (Архив построенных моделей).

Архив уточненных моделей (с использованием дополнительной априорной информации из Базы знаний).

- **Архив настроенных** (посредством идентификатора) моделей.

Поведение Базы знаний как класса информационной системы.

Интеллектуальный анализ качества построенных моделей, являющийся основой поддержки принятия решений, является результатом взаимодействия Идентификатора и Базы знаний (рисунок 3).

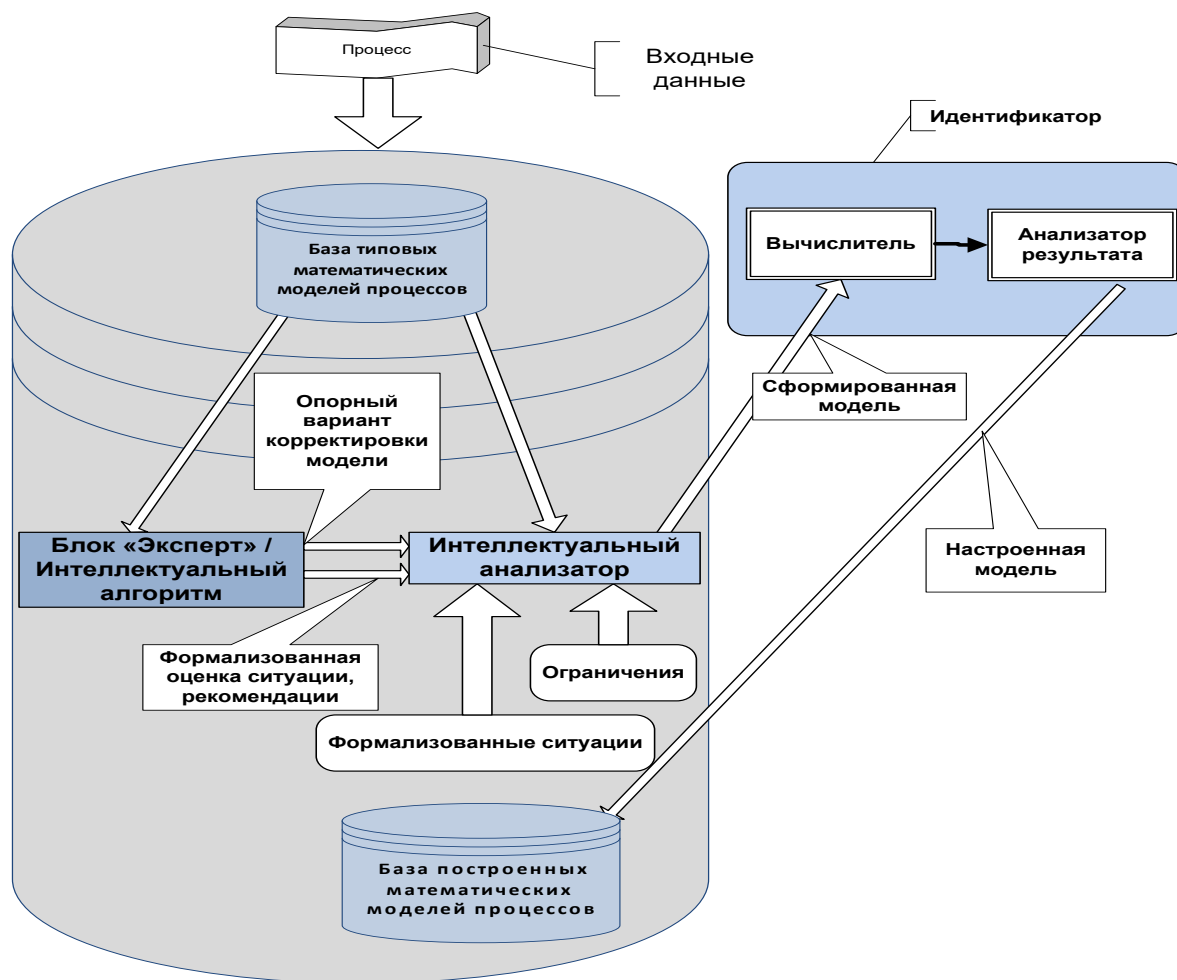


Рисунок 2. База знаний в интеллектуальной системе моделирования технологических процессов.

При этом эксперт предлагает опорный вариант решения задачи и, возможно, вводит дополнительные ограничения, связанные с оценкой ситуации по оперативным данным. Далее возможно в интерактивном режиме варьирование отдельных параметров, с последующей проверкой критериев эффективности – на стадии идентификации.

В моделирующей системе предусмотрен другой способ формирования решения о корректировке модели, основанный на применении интеллектуальных алгоритмов идентификации и прогнозирования.

Они называются алгоритмами ассоциативного поиска и реализуют моделирование процесса принятия решений на основе извлечения и интеллектуального анализа знаний, содержащихся в БЗ.

По сути, алгоритм фиксирует формализованную ситуацию (которая характеризуется текущим значением вектора состояния, вектора входа и возможных дополнительных ограничений), и сравнивает ее с набором формализованных ситуаций из архива по выбранному критерию (метод аналогов). В общем случае задача формулируется в терминах логики предикатов. Общие знания, используемые для нахождения решений, называют механизмом вывода решений (выводом логических заключений).

Системы в этом случае выполняют функцию экспертов и обладают компетентностью (искусственно воспроизводят компетентность экспертов). Применение такого алгоритма может дать существенно более эффективный результат по сравнению с экспертной системой, особенно для сложных задач. Возможна реализация гибридного метода – с одновременным использованием экспертных рекомендаций и результатов работы алгоритма ассоциативного поиска решений.

База знаний и заложенный в систему механизм вывода решений составляют ядро любой интеллектуальной информационно-управляющей системы. Эти компоненты определяют две основные интеллектуальные характеристики системы: способность хранить знания о чем-то и умение оперировать этими знаниями. Механизм вывода решений представляет обоснование, прогнозирование и подтверждение своих заключения и рекомендации.

В данном моделирующем комплексе используются два метода логического вывода:

а) прямой логический вывод – для поиска решений просматривается база знаний;

б) обратный логический вывод – система выдвигает гипотезу, а затем проверяет с помощью элементов базы знаний для возможного опровержения или поддержки.

Чтобы реализовать объяснение, система способна преобразовать экспертные эвристические правила в цепочку рассуждений, которая покажет, как начальное множество данных и утверждений, а также набор эвристических или иных правил приводят систему к данному заключению.

Оценка ситуаций, складывающихся во внешней среде, а также необходимость оценки развития событий в результате принятия решения, т. е. определение и прогнозирование наиболее важных свойств процесса на основе интерпретации имеющихся данных, является важнейшей операцией

системы. На основании этих оценок и прогнозов вырабатываются обоснованные рекомендации.

Система содержит также интеллектуальный редактор базы знаний.

Система обладает способностью к обучению, т. е.:

- приобретать новые знания,
- расширять базу знаний,
- корректировать знания в соответствии с изменяющимися условиями и ситуацией.
- пополняются не только архивы входов, настроенных моделей и результатов, но и формализованные значения различных производственных ситуаций.

Благодаря возможности использовать интеллектуальные алгоритмы идентификации система обладает ограниченной способностью к формированию метазнаний (такие системы получили название мудрых):

- формулировать и излагать основные правила, которые подытоживают их опыт;
- принимать к сведению допустимые уровни риска и «действовать по обстоятельствам». Например, запрашивать мнение нескольких экспертов (либо эксперта и интеллектуального алгоритма), применять многоуровневые формальные модели к данным на выходе или комбинировать их.

В данном комплексе используется эвристический подход (в отличие от логического формального) к представлению знаний. Эвристический (когнитивный) подход ориентируется на эвристическое моделирование.

При моделировании технологических процессов в качестве средства типизации используется графическое представление, которое отражает процедуру моделирования как систему, позволяя разложить эту сложную процедуру на отдельные составляющие и представить алгоритм моделирования в виде композиции шаблонов объектов, их действий и кооперации.

Уделяется первоочередное внимание тому, чтобы процедура была реализуемой, а генерируемая и настраиваемая модель – оптимальной в смысле выбранного критерия с учетом ситуативного контекста.

Анализ контекста (состояния процесса, дополнительных технологических признаков и ограничений и т.п.) учитывается на основе анализа и учета в модели формализованной экспертной информации.

Реализация такой процедуры осуществляется с использованием средств нечеткого моделирования.

Реализовать указанное графическое представление процедуры моделирования, на наш взгляд, целесообразно на основе методологии SADT (Методология структурного анализа и проектирования (Structured Analysis and Design Technique, SADT)).

Методология SADT является основой семейства методологий моделирования IDEF. В данном комплексе методологии моделирования реализуются средствами языка UML.

Заключение. Применение интеллектуальных алгоритмов идентификации в системах управления технологическими процессами и поддержки принятия решений позволяет настраивать в реальном времени модели технологических процессов на основе учета априорной информации, представляемой на основе формализованных комментариев экспертов и формализованного учета дополнительной информации, характеризующей текущую технологическую ситуацию (расширение вектора состояния). Учет и интеллектуальный анализ априорной информации повышает эффективность моделей в системах поддержки принятия решений и системах автоматизированного управления.

Список источников

1. Vassilyev S.N., Novikov D.A., and Bakhtadze N.N. Intelligent Control of Industrial Processes // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, 2013. Saint Petersburg, Russia, June 19-21. IFAC Proceedings Volumes. Series Title: Manufacturing Modelling, Management, and Control, Vol. 7, Part 1. P.49-57. ISBN: 978-3-902823-35-9.
2. Struss P.A. Conceptualization and General Architecture of Intelligent Decision Support Systems. Proceedings of the 19th International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2011, P. 2282-2288. ISBN: 978-0-9872143-1-7.
3. Павлов С.Н. Системы искусственного интеллекта - Томск: «Эль Контент», 2011, 176 с.
4. Bakhtadze N.N., Lototsky V.A., and Maximov E.M. (2012). Associative Search Method in System Identification // Pr. of 14th International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation (ACMOS '12). Saint Malo & Mont Saint-Michel, France.

5. Qin S.J. and Badgwell T.A. A survey of industrial model predictive control technology // Control Engineering Practice, 2003, No 11. P. 733–764.
6. Kern A.G. (2007). Summiting with multivariable predictive control // Hydrocarbon Processing.
7. Люгер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем - М.: "Вильямс", 2003, 456 с.
8. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем - СПб: Питер, 2000, 282 с.

УДК 681.513:004.932.72:534.1

Техническое зрение как средство идентификации динамики колебаний механических систем

Кузнецова Светлана Владимировна¹ svkyznecova@dksta.ru
SPIN-код: 9968-4656

¹ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева», Ковров, Россия

Аннотация. В работе изложены результаты экспериментальных исследований по использованию технического зрения в задаче идентификации параметров модели динамического объекта. Объектом исследования является процесс механических колебаний. Средства технического зрения выполняют функцию слежения за параметрами движения объекта в переходном режиме. Создан лабораторный стенд для получения динамической модели механического объекта. Программная часть реализована на базе среды разработки виртуальных приборов LABVIEW. Автоматизированный расчет коэффициентов динамической модели объекта выполнен с помощью инструментов System Identification Toolbox MATLAB. Проверка динамической модели механической системы на адекватность выполнена путем сравнения ее результатов с экспериментальными данными. Результаты исследований могут быть полезны при разработке интеллектуальных сенсоров механических колебаний.

Ключевые слова: виртуальный прибор, динамическая модель, идентификация объекта, механические колебания, расчет коэффициентов, регистрация переходного процесса, средства технического зрения.

Machine vision as a means of identifying the dynamics of vibrations of mechanical objects

Kuznetsova Svetlana Vladimirovna¹

svkyznecova@dksta.ru

SPIN-код: 9968-4656

¹FSBEI of HE "KSTA named after V.A. Degtyarev", Kovrov, Russia

Abstract. This paper presents the results of experimental studies on the use of machine vision to identify the parameters of a dynamic object model. The object of study is mechanical vibrations. Machine vision tools track the parameters of the object's motion during transient conditions. A laboratory setup was created to generate a dynamic model of the mechanical object. The software part is implemented on the basis of the LABVIEW virtual instrument development environment. Automated calculation of the coefficients of the dynamic model of the object was performed using the System Identification Toolbox in MATLAB. The adequacy of the dynamic model of the mechanical system was verified by comparing its results with experimental data. The research results may be useful in the development of intelligent mechanical vibration sensors.

Keywords: virtual instrument, dynamic model, object identification, mechanical vibrations, coefficient calculation, transient process registration, machine vision tools.

Введение. Наиболее полное представление о свойствах и закономерностях функционирования технологического объекта управления обеспечивается посредством его математической модели. Такая модель отражает динамические характеристики объекта, то есть описывает изменение его состояния во времени под воздействием внешних и внутренних факторов. Процесс определения или уточнения параметров модели по результатам эксперимента называется идентификацией [1]. Идентификация осуществляется на основе экспериментальной переходной характеристики объекта, отражающей его реакцию на типовое воздействие. В ходе идентификации выполняется аппроксимация экспериментальной зависимости, заключающаяся в замене реальной кривой – типовой переходной характеристикой, соответствующей одному из известных динамических звеньев теории автоматического управления. Полученное таким образом математическое описание выбранного звена принимается в качестве модели исследуемого объекта управления.

Объектом исследования является процесс механических колебаний. Механические колебательные системы [2] встречаются в различном технологическом оборудовании: системы амортизации и балансировки механизмов, виброизолирующие опоры станков и прессов, элементы вибропитателей, маятниковые подвесы в лабораторных установках, подвески измерительных платформ и датчиков. Традиционно экспериментальные данные о механических колебаниях получают с датчиков ускорения, перемещения или силы [3], устанавливаемых непосредственно на исследуемом объекте. В данной работе предлагается использовать средства технического зрения как бесконтактный способ измерения перемещений во времени для задачи идентификации. Идея заключается в следующем: временные зависимости координат характерных точек объекта можно восстановить на основе видеопоследовательности, а затем – идентифицировать параметры модели колебаний.

Материалы и методы. Экспериментальная установка для регистрации процесса механических колебаний представлена на рисунке 1.

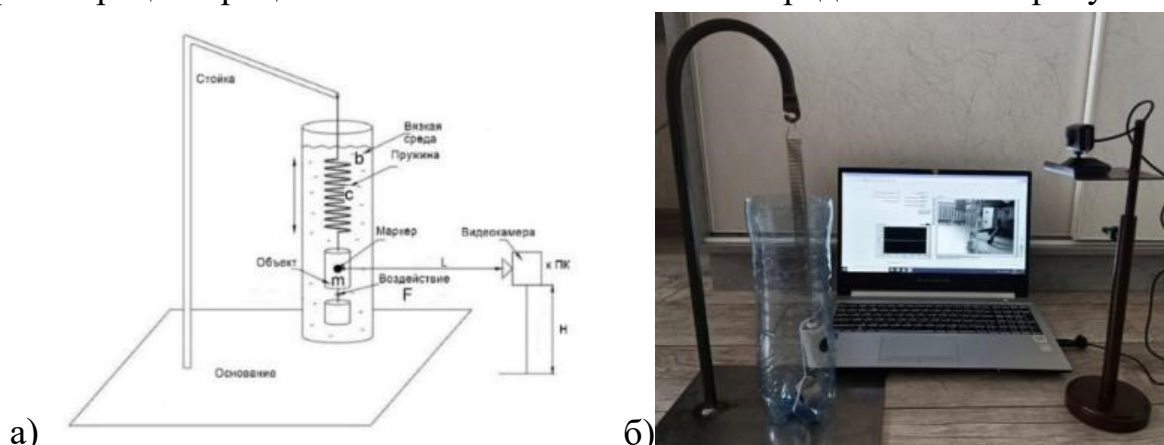


Рисунок 1. Экспериментальная установка для регистрации процесса механических колебаний: а) схема; б) фотография

Исследуемый объект представляет собой механическую колебательную систему, состоящую из груза массой m , пружины жесткостью c , среды с вязким трением с коэффициентом b . Динамические свойства объекта описываются линейным дифференциальным уравнением:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + c = F$$

Передаточная функция имеет вид: $W(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{k}{ms^2 + bs + c}$ или $\frac{\frac{k}{m}}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{c}{m}}$. Экспериментальным путем требуется определить значения коэффициентов динамической модели.

Регистрация переходного процесса механических колебаний осуществляется средствами технического зрения с помощью виртуального прибора, созданного в среде графического программирования LabVIEW [4], представлено на рисунке 2.

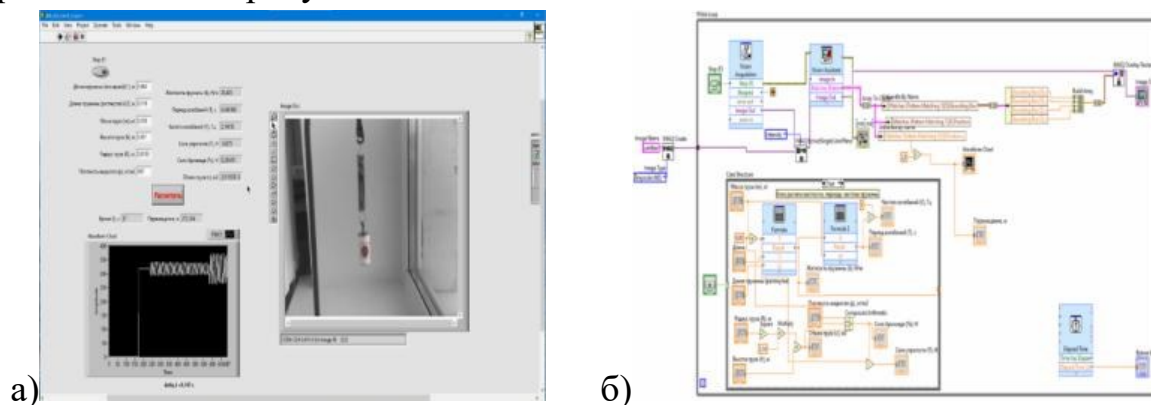


Рисунок 2. Виртуальный прибор для регистрации процесса механических колебаний с помощью средств технического зрения:
а) лицевая панель; б) блок-диаграмма.

Техническое зрение реализовано с помощью инструментов LabVIEW: захват видеопотока – модуль Vision Acquisition; обработка изображений – модуль Vision Assistant. Алгоритм слежения за перемещением объекта – Pattern Matching (детектирование маркера) [5].

Для автоматизированного расчета коэффициентов динамической модели процесса механических колебаний используется программное обеспечение MATLAB и набор инструментов System Identification Toolbox [6]. Этапы обработки экспериментальных данных показаны на рисунке 3.

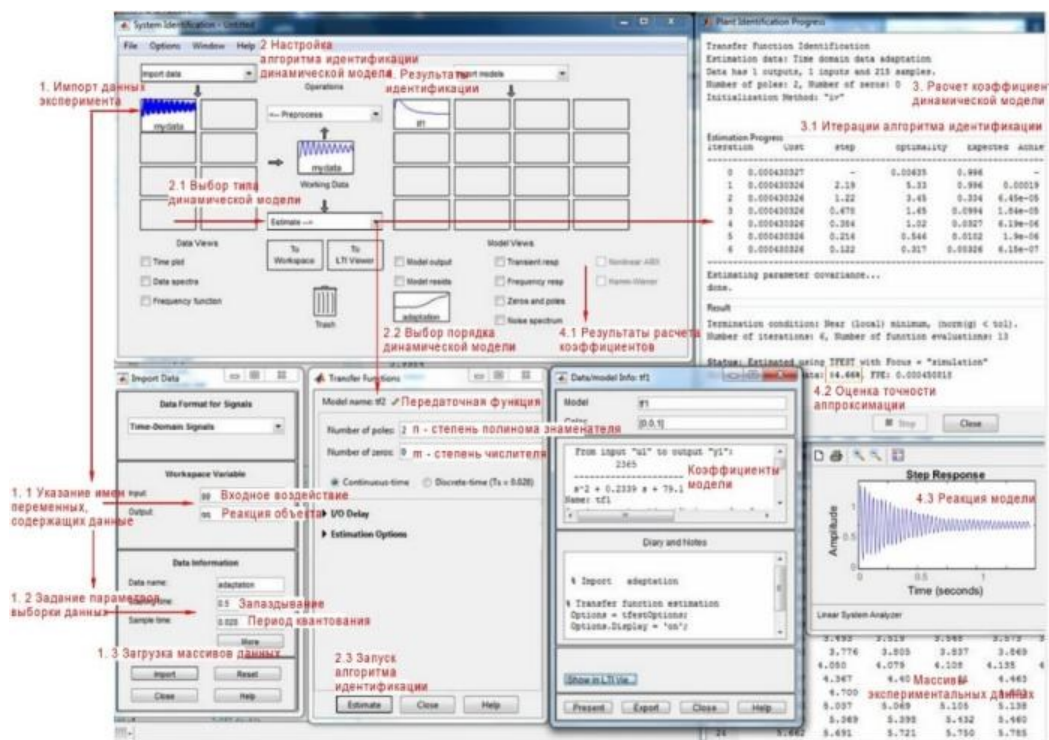


Рисунок 3. Идентификация параметров динамической модели с помощью инструментов System Identification Toolbox MATLAB.

Результаты. Результаты идентификации параметров динамической модели механической колебательной системы представлены на рисунке 4 и в Таблице 1.

Результаты идентификации параметров динамической модели механической колебательной системы.

Таблица 1

Передаточная функция $W(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{\frac{k}{m}}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{c}{m}}$	Передаточная функция $W(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{k}{ms^2 + bs + c}$	Значения параметров модели
$W(s) = \frac{2365}{s^2 + 0,2339s + 79,1}$	$W(s) = \frac{461,175}{0,195s^2 + 0,0456s + 15,42}$	m = 0,195 кг b = 0,045 $\frac{H \cdot c}{m}$ c = 15,42 $\frac{H}{m}$

На графике (Рисунок 4) сопоставлены: экспериментально полученный динамический процесс механических колебаний, регистрация которого

осуществлялась средствами технического зрения, и переходный процесс, построенный на основе модели, найденной при идентификации.

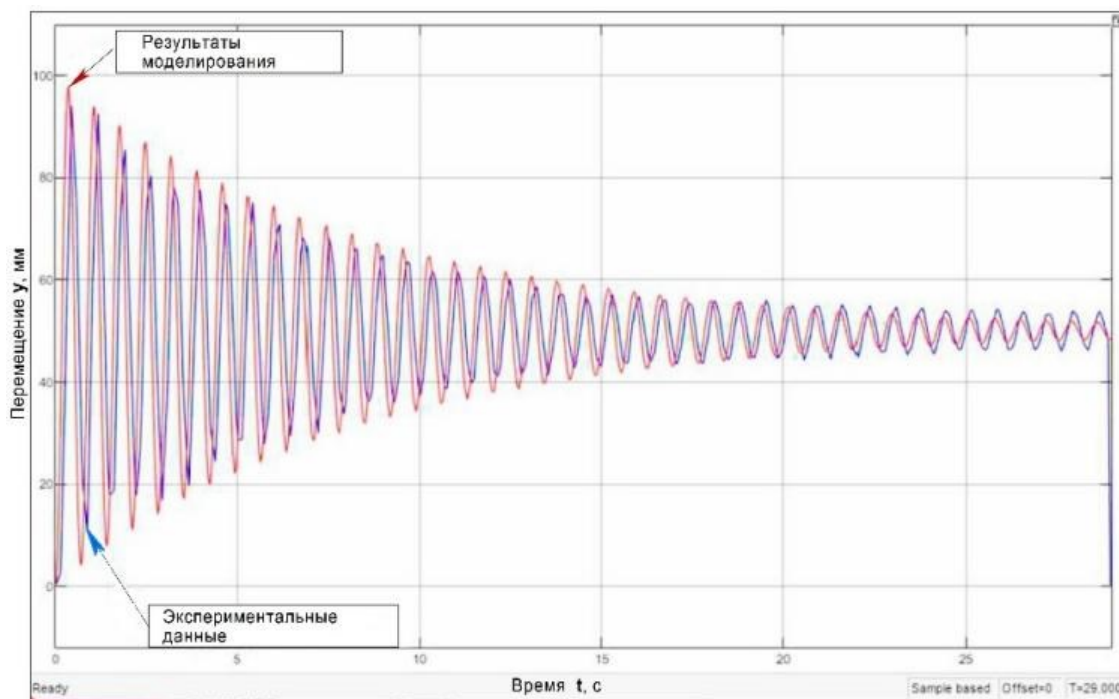


Рисунок 4. Проверка адекватности модели механической колебательной системы: сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования.

Проверка адекватности модели механической колебательной системы выполнена путем сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования. Сходимость данных составила 85 %, что подтверждает достоверность результатов.

Обсуждение полученных результатов. Практическая ценность предлагаемого решения заключается в бесконтактном измерении характеристик колебательных систем, что исключает влияние на исследуемый процесс. Перспективными областями применения разработки являются следующие. Во-первых, экспериментальная установка может быть использована при диагностике механических систем для регистрации параметров колебаний без установки датчиков на контролируемом объекте. Во-вторых, результаты идентификации могут быть применены для автоматизированной настройки и управления вибрационными системами. В-третьих, результаты исследований могут быть полезны при разработке интеллектуальных сенсоров механических колебаний (анализ динамических характеристик микромеханических элементов акселерометров с использованием макросъемки). Ограничением применимости решения является линейный характер динамической модели.

Заключение. Получены следующие результаты:

1. Разработана экспериментальная установка для регистрации процесса механических колебаний в системах типа "масса–пружина–демпфер" с помощью средств технического зрения.
2. Предложены программные средства для обработки экспериментальных данных и расчета параметров динамической модели механической колебательной системы.
3. Идентифицированы параметры математической модели динамической системы – инерционный, диссипативный, позиционный коэффициенты.
4. Области применения предлагаемого решения являются: - бесконтактное измерение параметров движения колебательных систем; - экспериментальное определение значений параметров упругих и диссипативных элементов оборудования; - анализ поведения механизмов под динамическими нагрузками.

Список источников

1. Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Применение технического зрения для идентификации динамической модели объекта управления при автоматизированной сборке. Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 3 (74). с. 113-122. DOI 10.47617/2072-3172_2025_3_113.
2. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. Учебное пособие для вузов. Москва: Наука, 1991. 256 с. ISBN 5-02-014137-2.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден; пер. с англ. Ю. А. Заболотной; под ред. Е. Л. Свинцова. Москва: Техносфера, 2005. 588 с. ISBN 5-94836-050-4.
4. Кузнецова С.В. Виртуальные приборы в задачах автоматизации: учебно-методическое пособие. Ковров: ФГБОУ ВО «КГТА им. В. А. Дегтярева», 2024. 100 с. ISBN 978-5-86151-734-8.
5. Кузнецова С.В. Экспериментальная установка для распознавания движений деталей в процессе сборки. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019 . Т. 20. № 4(225). с. 161-165.
6. Дьяконов В. П. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: спец. справ. СПб: Питер, 2002. 444 с. ISBN 5-318-00359-1.

Исследование устойчивости двухкаскадной системы электропитания, построенной на базе понижающих преобразователей напряжения с ПИ-регуляторами

Баранчиков Максим Викторович¹

mbaranchikov@mail.ru

SPIN-код: 8041-8945

¹ФГБОУ ВО «БГТУ», Брянск, Россия

Аннотация. Рассмотрена агрегатированная система электропитания (АСЭ), состоящая из двух понижающих преобразователей напряжения с ПИ-регуляторами в контуре управления. Управление транзисторами в каждом преобразователе происходит по закону широтно-импульсной модуляции первого рода. Представлены нелинейная динамическая математическая модель и линейная малосигнальная непрерывная модель исследуемой АСЭ. Приведены результаты анализа устойчивости АСЭ, полученные с помощью каждой модели. Установлено, что если при автономной работе преобразователи демонстрируют устойчивое поведение, то при их каскадном соединении в результирующей системе возникают низкочастотные колебания большой амплитуды. Показано, что обе модели могут применяться для анализа устойчивости рассматриваемого класса систем электропитания, однако нелинейная динамическая математическая модель даёт более точные результаты.

Ключевые слова: импульсный преобразователь напряжения, агрегатированная система электропитания, устойчивость, математическая модель

Analyze of Stability of a Two-Stage Power Supply System Based on Step-Down Voltage Converters with PI Regulators

Baranchikov Maksim Victorovich¹

mbaranchikov@mail.ru

SPIN-code: 8041-8945

¹FSBEI MD «BSTU», Bryansk, Russia

Annotation. An aggregated power supply system (ASE) consisting of two step-down voltage converters with PI regulators in the control circuit is considered. The transistors in each converter are controlled according to the law of pulse width modulation of the first kind. A nonlinear dynamic mathematical model and a linear low-signal continuous model of the studied ASE are presented. The results of the ASE stability analysis obtained using each model are presented.

It has been established that if the converters exhibit stable behavior during autonomous operation, then when they are cascaded together, low-frequency oscillations of large amplitude occur in the resulting system. It is shown that both models can be used to analyze the stability of the considered class of power supply systems, but the nonlinear dynamic mathematical model provides more accurate results.

Keywords: pulse voltage converter, aggregated power supply system, stability, mathematical model

Введение. При проектировании систем электропитания разработчики всё чаще прибегают к применению модульных преобразователей напряжения. Такой подход позволяет создать гибкую систему электропитания, где в случае возникновения аварии достаточно заменить вышедший из строя модуль преобразователя на новый, аналогичный по параметрам. Зачастую подобные системы электропитания формируются с помощью каскадно-последовательного соединения определённого количества модулей преобразователей напряжения, что позволяет совершать ступенчатое преобразование напряжения и благодаря чему достигаются более точные значения выходного напряжения системы.

Модули, применяемые в подобных системах электропитания, являются сложными самостоятельными устройствами, выполненными, как правило, на базе импульсных преобразователей напряжения с замкнутой обратной связью. Системы электропитания, строящиеся на таких преобразовательных модулях, относятся к классу агрегатированных систем электропитания (АСЭ).

Целью данной работы является исследование устойчивости двухкаскадной АСЭ, представленной на рисунке 1. Подобные системы электропитания часто встречаются на практике, когда разница между входным и выходным напряжениями достигает несколько сотен вольт, а преобразование с помощью одного каскада является неэффективным.

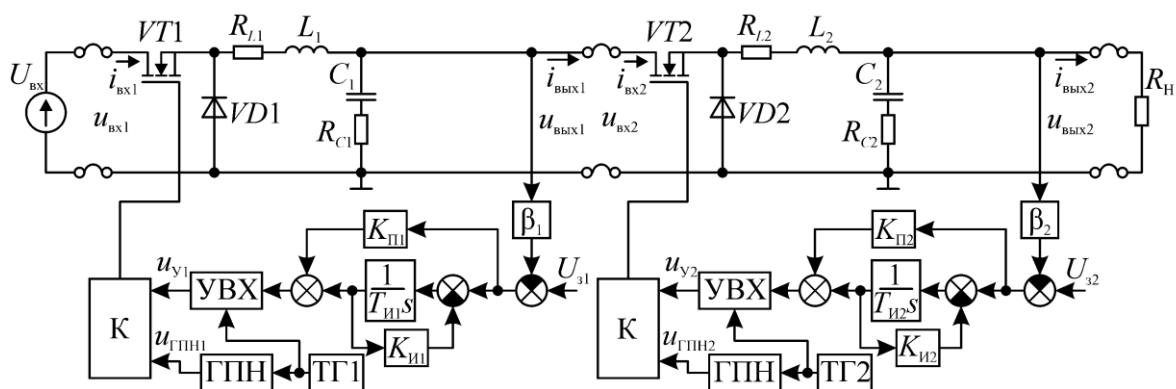


Рисунок 1. Структурная схема исследуемой АСЭ.

На рисунке 1 каждый из преобразователей выполнен в виде понижающего импульсного преобразователя с замкнутой обратной связью по выходному напряжению. Силовая часть преобразователей состоит из транзистора VT_i ($i=1,2$), диода VD_i , дросселя с индуктивностью L_i и активным сопротивлением R_{Li} , конденсатора с ёмкостью C_i и активным сопротивлением R_{Ci} . Контуры управления преобразователями при этом оснащены пропорционально-интегральными регуляторами (ПИ-регуляторами) с коэффициентом пропорционального усиления K_{Pi} , с постоянной интегрирования T_{Ii} и коэффициентом обратной связи интегратора K_{Ii} . Управление преобразователем осуществляется по закону широтно-импульсной модуляции первого рода, т.е. когда управляющий сигнал u_{yi} формируется устройством-выборки хранения (УВХ) в дискретные моменты времени, определяемые соответствующим тактовым генератором $ТГ_i$ преобразователя. Компаратор K сравнивает управляющий сигнал u_{yi} и сигнал, образованный генератором пилообразного напряжения (ГПН), и формирует на своём выходе управляющие импульсы с периодом $T_{ШИМ_i}$. Согласование силового выходного напряжения с системой управления осуществляется с помощью коэффициента β_i . Постоянный сигнал задания U_{zi} является управляющим и задаёт желаемый уровень выходного напряжения. Ко входу АСЭ подключён источник постоянного напряжения $U_{вх}$, к выходу – сопротивление нагрузки R_H .

Из рисунка 1 видно, что каждый преобразователь оснащён особой системой управления и при необходимости может применяться как отдельное самостоятельное устройство. И если при автономной работе преобразователь будет показывать устойчивое поведение, то при включении этого же преобразователя в структуру АСЭ, в системе электропитания могут возникнуть высокоамплитудные колебания токов и

напряжений. Поэтому при каскадном соединении преобразователей напряжения необходимо выполнять предварительную оценку устойчивости результирующей системы электропитания.

В настоящее время для анализа устойчивости подобных систем применяются в основном линейные малосигнальные непрерывные модели импульсных преобразователей напряжения. В данном случае сперва линеаризуют в заданной рабочей точке каждый импульсный преобразователь, входящий в состав АСЭ, а затем, используя полученные частотные характеристики, анализируют корни характеристического уравнения и оценивают устойчивость системы. Характеристическое уравнение АСЭ, образованной двумя каскадно-соединёнными преобразователями, имеет вид [1]

$$1 + \frac{Z_{\text{ВЫХ1}}(s)}{Z_{\text{ВХ2}}(s)} = 0, (1)$$

где $Z_{\text{ВЫХ1}}(s)$ – выходное операторное сопротивление первого каскада; $Z_{\text{ВХ2}}(s)$ – входное операторное сопротивление второго каскада.

Однако при линеаризации системы теряется информация о нелинейной природе импульсных преобразователей напряжения. В связи с чем, с помощью линейных моделей не всегда можно получить верные результаты. Наиболее точную оценку устойчивости импульсных преобразователей напряжения и систем, собранных на их основе, могут дать нелинейные динамические математические модели и соответствующий математический аппарат для анализа нелинейных систем.

Методы и материалы. Исследование устойчивости АСЭ, представленной на рисунке 1, проводилось как с помощью линейных малосигнальных моделей, так и с применением нелинейных динамических математических моделей.

Линейная малосигнальная модель АСЭ была получена путём каскадного соединения двух канонических линейных малосигнальных моделей преобразователей (рисунок 2).

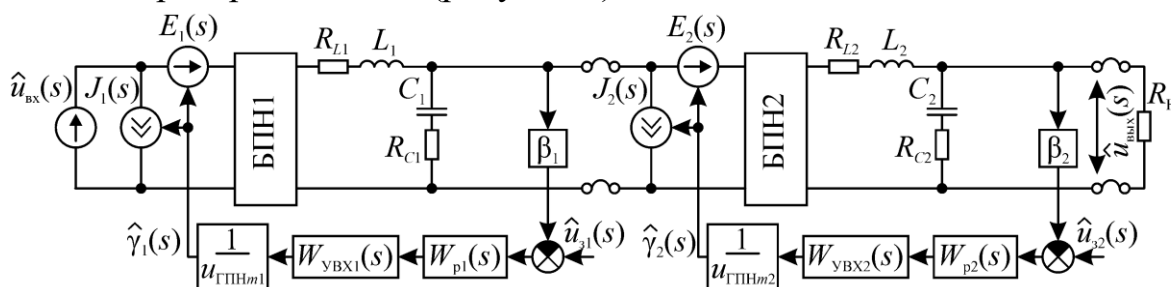


Рисунок 2. Малосигнальная модель АСЭ.

На рисунке 2 БПН i ($i=1,2$) – блок передачи напряжения с коэффициентом передачи Γ_i , где Γ_i – коэффициент заполнения ШИМ; $u_{\text{ГПН}mi}$ – амплитуда пилообразного напряжения; J_i – коэффициент передачи источника тока, управляемого напряжением, $J_i=U_{\text{ВЫХ}i}/R_{\text{Н}1}$; E_i – коэффициент передачи источника напряжения, управляемого напряжением, $E_i=U_{\text{ВЫХ}i}/\Gamma_i^2$; $U_{\text{ВЫХ}i}$ – постоянное выходное напряжение i -ого каскада; $W_{pi}(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_{\text{ВЫХ}i}(s)$ – передаточная функция устройства выборки-хранения, которую можно определить, применив аппроксимацию Паде к экстраполятору нулевого порядка.

С помощью малосигнальной модели были определены передаточные функции, необходимые для уравнения (1). Получение данных передаточных функций производилось в соответствии с методиками, описанными в литературе [2, 3]. Рабочая точка системы находилась с учётом того, что в контурах управления преобразователей присутствует ПИ-регулятор.

Основные концепции создания нелинейной динамической математической модели двухкаскадной АСЭ представлены в работе [4]. В нынешней работе использовалась расширенная математическая модель, позволяющая моделировать различные комбинации преобразователей с определёнными силовыми частями и системами управления. Было получено стробоскопическое отображение АСЭ. Матрица монодромии $\mathbf{M}$ рассчитывалась в неподвижной точке $\mathbf{X}^*$ [5]. Неподвижная точка $\mathbf{X}^*$ искалась как решение уравнения $\mathbf{X}^*=\Phi(\mathbf{X}^*)$ с помощью численного метода Ньютона-Рафсона.

Результаты. В ходе работы были найдены такие параметры преобразователей, при которых преобразователи, работая автономно, показывали устойчивое поведение. Но при каскадном соединении преобразователей и при определённых наборах входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ и сопротивления нагрузки $R_{\text{Н}}$, в АСЭ наблюдались колебания.

На рисунке 3 представлена параметрическая диаграмма, на которой изображены границы устойчивости исследуемой системы. Границы были получены с помощью линейной малосигнальной и нелинейной динамической моделей. Параметры системы были выбраны следующие: $L_1=L_2=5$ мГн; $R_{L1}=0,2$ Ом; $R_{L2}=0,1$ Ом; $C_1=100$ мкФ; $C_2=10$ мкФ; $R_{C1}=R_{C2}=0,01$ Ом; $K_{\text{П}1}=K_{\text{П}2}=1$; $\beta_1=0,104167$; $\beta_2=0,166667$; $U_{31}=U_{32}=2,5$; $u_{\text{ГПН}m1}=u_{\text{ГПН}m2}=5$; $T_{\text{И}1}=0,01$; $T_{\text{И}2}=0,001$; $K_{\text{И}1}=K_{\text{И}2}=10^{-6}$; $T_{\text{ШИМ}1}=10$ мкс; $T_{\text{ШИМ}2}=5$ мкс. Входное напряжение АСЭ $U_{\text{ВХ}}$ варьировалось в пределах от 35 В до 60

В, сопротивление нагрузки АСЭ R_H изменялось от 25 Ом до 30 Ом. Области устойчивых режимов располагаются со стороны штриховки.

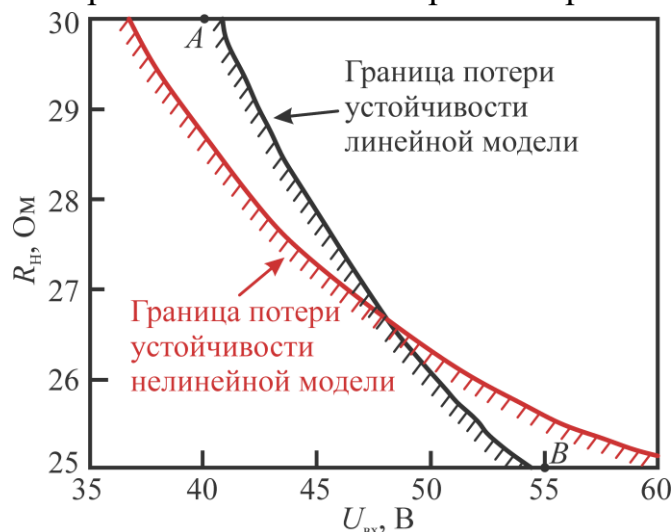


Рисунок 3. Границы потери устойчивости АСЭ.

Линейная граница устойчивости определялась на основе анализа корней характеристического уравнения (1): если хоть один из корней характеристического уравнения имел положительную вещественную часть, то система считалась неустойчивой. Нелинейная граница устойчивости определялась на основе анализа собственных чисел матрицы монодромии: если хоть одно из собственных значений матрицы лежало за единичным кругом на комплексной плоскости, то рассматриваемая система считалась неустойчивой.

Обсуждение полученных результатов. Из рисунка 3 видно, что границы устойчивости, определённые с помощью линейной и нелинейной моделей, не совпали. При этом на карте наблюдаются области, где нелинейная динамическая модель показывает устойчивое поведение, а линейная малосигнальная – неустойчивое. И наоборот, существуют области, где нелинейная модель показала неустойчивые режимы работы, а линейная – устойчивые. Дополнительно было произведено временное моделирование исследуемой системы в среде Matlab/SIMULINK при наборах параметров, соответствующих на карте точкам, обозначенным как A (с координатами $R_H=30$ Ом, $U_{вх}=40$ В) и B (с координатами $R_H=25$ Ом, $U_{вх}=55$ В). При этом, в точке A наблюдались высокоамплитудные низкочастотные колебания токов и напряжений системы, а в точке B – затухающие колебания. Таким образом, наиболее точные результаты

анализа устойчивости АСЭ были получены с помощью нелинейной динамической модели и соответствующего математического аппарата.

Заключение. Разработанные нелинейная динамическая математическая модель и линейная малосигнальная модель позволяют исследовать устойчивость двухкаскадной АСЭ, созданной на базе понижающих преобразователей с ПИ-регулятором. Как показали результаты, границы устойчивости, найденные с помощью обеих моделей, располагаются довольно близко друг к другу. При этом, граница устойчивости, обнаруженная с помощью нелинейной динамической модели, оказалась наиболее точной. Из чего следует, что для приблизительной оценки устойчивости АСЭ следует применять линейные малосигнальные модели, ввиду их простоты. Однако если необходимо оценить поведение системы более точно, то лучше использовать нелинейные динамические математические модели.

Список источников

1. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. Москва: Научно-техническое издательство «Горячая линия-Телеком», 2019, 540 с.
2. Middlebrook R.D. Input filter considerations in design and application of switching regulators input filter. – IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1977, pp. 30-57.
3. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. М.: Энергоатомиздат, 1988, 294 с.
4. Андриянов А.И., Баранчиков М.В. Разработка математической модели двухкаскадного преобразователя постоянного напряжения. – Вестник Московского энергетического института, 2024, № 6, с. 11-19.
5. Andriyanov A.I. A comparative analysis of efficiency of nonlinear dynamics control methods for a buck converter. IOP conference series: materials science and engineering, 2017, no. 177, pp. 1-9. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012001

Разработка RC-контроллера для пропорционального радиоуправления летающей моделью

Чесноков Артем Валерьевич¹

artemche33@gmail.com

Ифанов Андрей Владимирович¹

ifanov@mail.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Рассмотрена разработка контроллера для управления и отработки программного обеспечения радиоуправления летающей моделью на базе Arduino Pro Mini. Предложен вариант печатной платы и корпуса. Проект может быть использован в качестве наглядного пособия по монтажу радиоэлектронной аппаратуры и приборов, а также с целью получения и совершенствования навыков в области программирования микроконтроллеров.

Ключевые слова: контроллер для радиоуправления летающей моделью, Arduino, программирование микроконтроллеров.

Development of an RC controller for proportional radio control of a flying model

Chesnokov Artem Valerievich¹

artemche33@gmail.com

Ifanov Andrey Vladimirovich¹

ifanov@mail.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. The development of a controller for controlling and testing the radio control software of a flying model based on the Arduino Pro Mini is considered. A variant of a printed circuit board and a case is proposed. The project can be used as a visual guide for the installation of electronic equipment and devices, as well as for obtaining and improving skills in the field of microcontroller programming.

Keywords: controller for radio control of a flying model, Arduino, microcontroller programming.

Введение. В условиях современности, развития новых технологий и геополитической обстановки всё больше набирают популярность различные беспилотные системы, ещё вчера являющиеся лишь концепцией, а для рядовых граждан – уделом фантастических романов. Сегодня это – стремительно развивающаяся реальность. Беспилотные системы вышли

далеко за рамки военных БПЛА и прототипов автономных автомобильных систем.

В нынешнее время беспилотные системы постепенно проникают во все отрасли народного хозяйства и сферы жизни человека: от логистики до сельского хозяйства и обслуживания городской инфраструктуры.

Отдельную популярность имеют беспилотные авиационные системы (БАС), являющиеся возможностью для человека получить все преимущества, недоступные для него от природы. Беспилотные авиационные системы перестали быть просто технологической новинкой.

Их ключевые достоинства можно разделить на несколько категорий:

1. Экономическая эффективность
2. Повышение безопасности
3. Оперативная эффективность и гибкость
4. Высокое качество и детализация данных
5. Экологичность
6. Простота эксплуатации и обслуживания

Материалы и методы. В данной работе будет рассмотрен процесс разработки RC-контроллера для управления БПЛА самолётного типа на базе микроконтроллера Arduino Pro Mini.

Радиосвязь контроллера будет основана на приемопередающем модуле NRF24L01, который при использовании с усиленной антенной может обеспечивать стабильную связь на расстоянии до 700 метров на открытой местности. Модуль имеет 14 каналов, 6 из которых являются аналоговыми входами, а 8 — цифровыми.

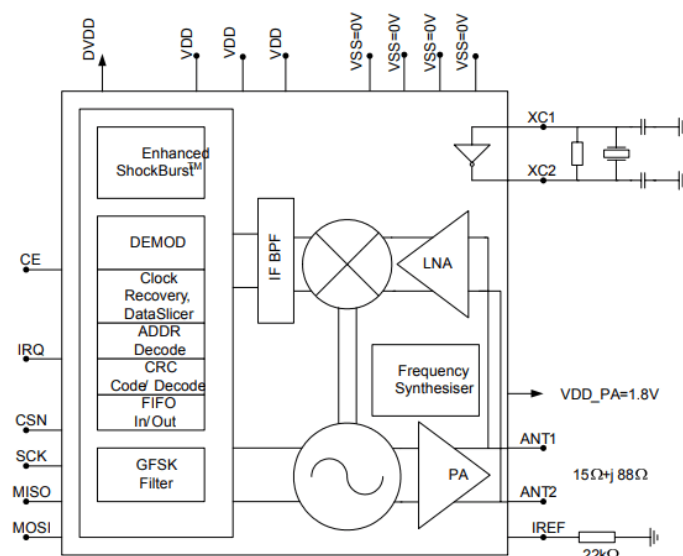


Рисунок 1. Схема модуля.

Для управления будет смонтировано два джойстика, два потенциометра, два тумблера, шесть кнопок и дополнительный внутренний измерительный блок, состоящий из акселерометра и гироскопа, который можно использовать для пропорционального управления, просто перемещая или наклоняя контроллер.

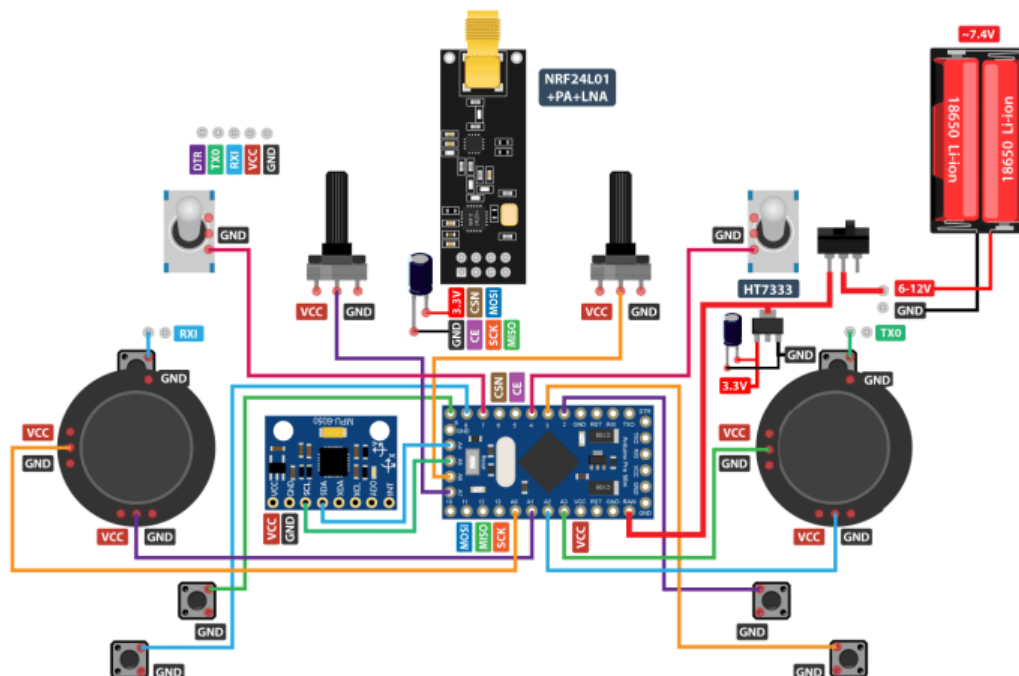


Рисунок 2. Схема подключения.

«Мозгом» этого радиоуправляемого контроллера является Arduino Pro Mini, который питается от двух литий-полимерных аккумуляторов с напряжением 7,4 В.

Мы можем подключить их напрямую к контакту RAW (используемый для подключения нерегулируемого напряжения) на Arduino Pro Mini, где есть регулятор напряжения, снижающий напряжение до 5 В. При выборе модификации необходимо учитывать, что существуют модификации, работающие от 5В и от 3,3В.

Результаты и обсуждение. Учитывая то, что модулю NRF24L01 требуется строго 3,3 В и рекомендуется использовать специальный источник. Поэтому нам нужно использовать стабилизатор напряжения на 3,3 В, который подключается к батареям и преобразует 7,4В в 3,3В. Также нам нужно использовать помехоподавляющий конденсатор рядом с модулем, чтобы обеспечить более стабильное напряжение, а значит, и более стабильную радиосвязь. Модуль NRF24L01 взаимодействует с Arduino по

протоколу SPI, а модуль акселерометра и гироскопа MPU6050 использует протокол I2C.

Следующим шагом становится разработка печатной платы. Для разработки использовался бесплатный онлайн-сервис с user-friendly интерфейсом EasyEDA.

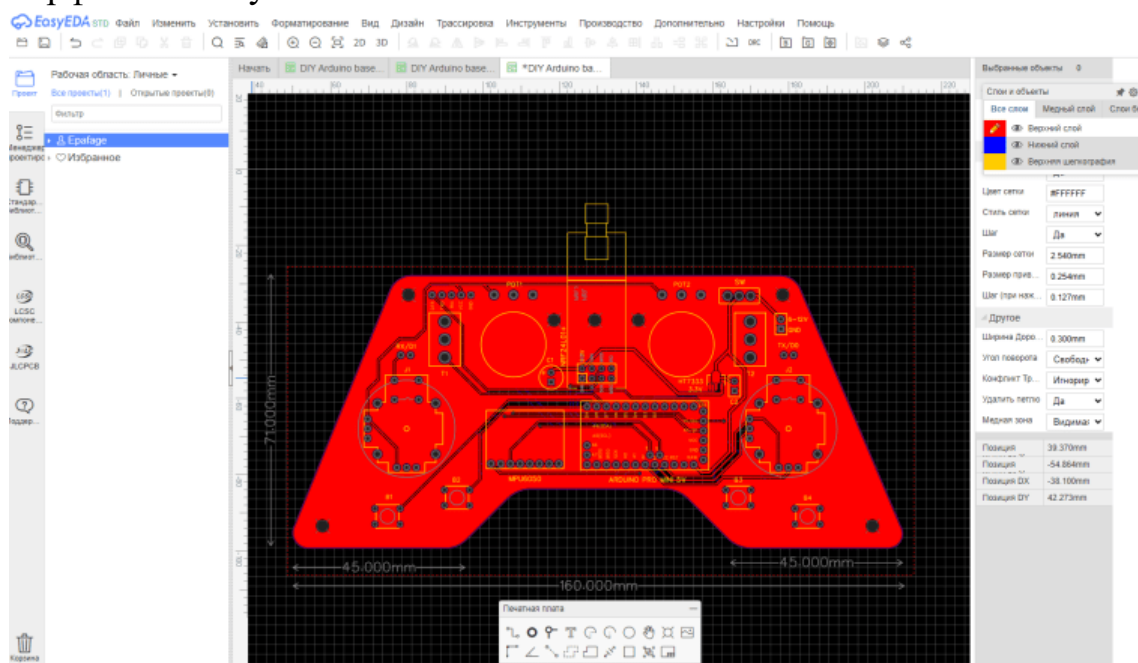


Рисунок 3. Процесс дизайна печатной платы.

Далее следует этап сборки устройства. Для защиты компонентов было необходимо разработать корпус. Для этого использовалась САПР Компас 3D, далее проект был импортирован в специальную САМ систему OrcaSlicer.

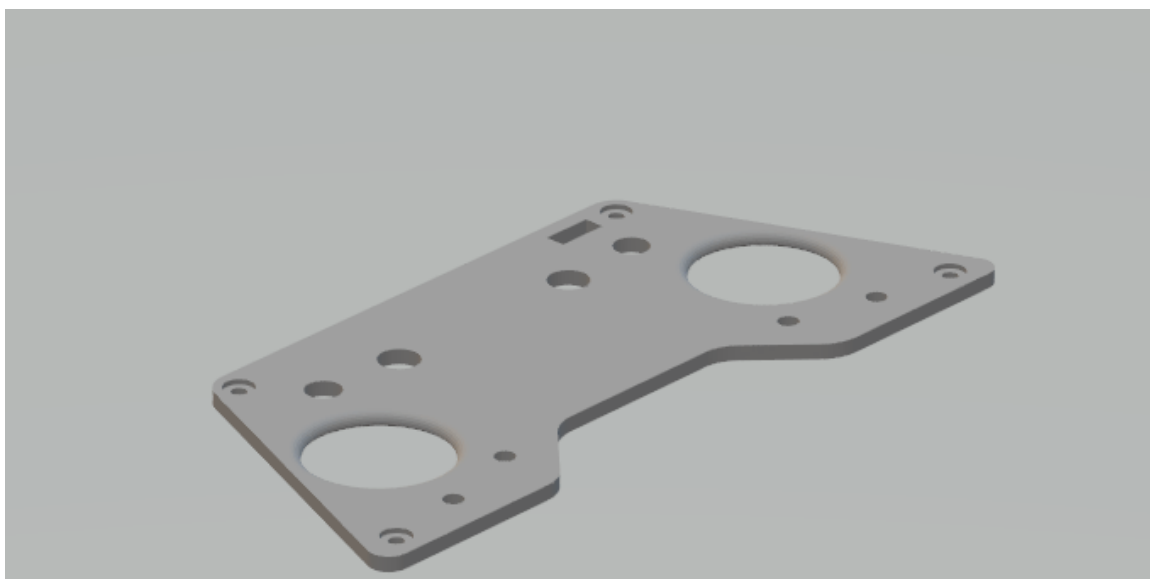


Рисунок 4. 3Д модель корпуса.



Рисунок 5. Изделие в сборе (вид сбоку).



Рисунок 6. Изделие в сборе (вид сверху).

Заключение. Разработанный контроллер может быть использован как непосредственно для управления, так и для отработки программного обеспечения. В учебных целях данный проект может получить своё

применение в качестве наглядного пособия по монтажу радиоэлектронной аппаратуры и приборов, а также – с целью получения и совершенствования навыков в области программирования микроконтроллеров.

Список источников.

1. Белов, А. В. Создаем устройства на микроконтроллерах [Текст] / А. В. Белов. — 5-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2022. — 352 с. : ил. — (Современная электроника). — ISBN 978-5-94387-980-9.
2. Рюмик, С. М. Беспроводные интерфейсы связи микроконтроллеров: nRF24L01+, Bluetooth, Wi-Fi [Текст] : практическое руководство / С. М. Рюмик. — Москва : Солон-Пресс, 2020. — 200 с. : ил., табл. — (Библиотека инженера). — ISBN 978-5-91359-345-2.
3. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] : учебное пособие для вузов / А. Б. Сергиенко. — 4-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2021. — 768 с. : ил. — (Учебное пособие). — ISBN 978-5-9775-3744-7.
4. Иванов, И. И. Алгоритм помехоустойчивого управления мобильным роботом по радиоканалу в условиях урбанизированной среды / И. И. Иванов, П. П. Петров, С. С. Сидоров // Информатика и системы управления. — 2023. — № 2(74). — С. 56–67. — DOI: 10.22250/isu.2023.74.56-67.
5. Белов, А. В. Программирование микроконтроллеров AVR: от Arduino к ассемблеру [Текст] / А. В. Белов. — Санкт-Петербург : Наука и Техника, 2020. — 352 с. : ил. — (Современная электроника). — ISBN 978-5-94387-874-1.
6. Иванов, И. И. Алгоритм помехоустойчивого управления мобильным роботом по радиоканалу в условиях урбанизированной среды / И. И. Иванов, П. П. Петров, С. С. Сидоров // Информатика и системы управления. — 2023. — № 2(74). — С. 56–67. — DOI: 10.22250/isu.2023.74.56-67.
7. Arduino Pro Mini [Электронный ресурс] : техническое описание // Официальный сайт Arduino (arduino.cc). — Режим доступа: <https://docs.arduino.cc/retired/boards/arduino-pro-mini> (дата обращения: 12.09.2025). — Загл. с экрана. — Текст: электронный.

Экспериментальный стенд для исследования систем управления манипуляционных роботов

Фетисова Юлия Александровна¹

yuliafestova@yandex.ru

Назаров Алексей Александрович¹

anazarov1954@mail.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. В статье описывается экспериментальный стенд, разработанный и изготовленный на кафедре «Автоматизация, мехатроника и робототехника» Владимирского государственного университета, предназначенный для полунатурного моделирования и исследования динамических характеристик систем управления манипуляционных роботов. Приводятся технические характеристики основных элементов стенда, включая исполнительные приводы, датчики и имитаторы нагрузки. Описаны режимы работы стенда для исследования следящего привода с необратимой передачей и систем двустороннего действия, а также методика регистрации исследуемых процессов. Представленная установка позволяет существенно сократить сроки и затраты на разработку новых структур приводов за счет повышения достоверности получаемых результатов.

Ключевые слова. манипуляционный робот, система управления, экспериментальный стенд, полунатурное моделирование, следящий привод, контур отражения усилия, момент инерции, датчик момента, червячный редуктор.

Experimental stand for the study of control systems of manipulative robots

Fetisova Julia Alexandrovna¹

yuliafestova@yandex.ru

Nazarov Alexey Alexandrovich¹

anazarov1954@mail.ru

¹VISU, Vladimir, Russia.

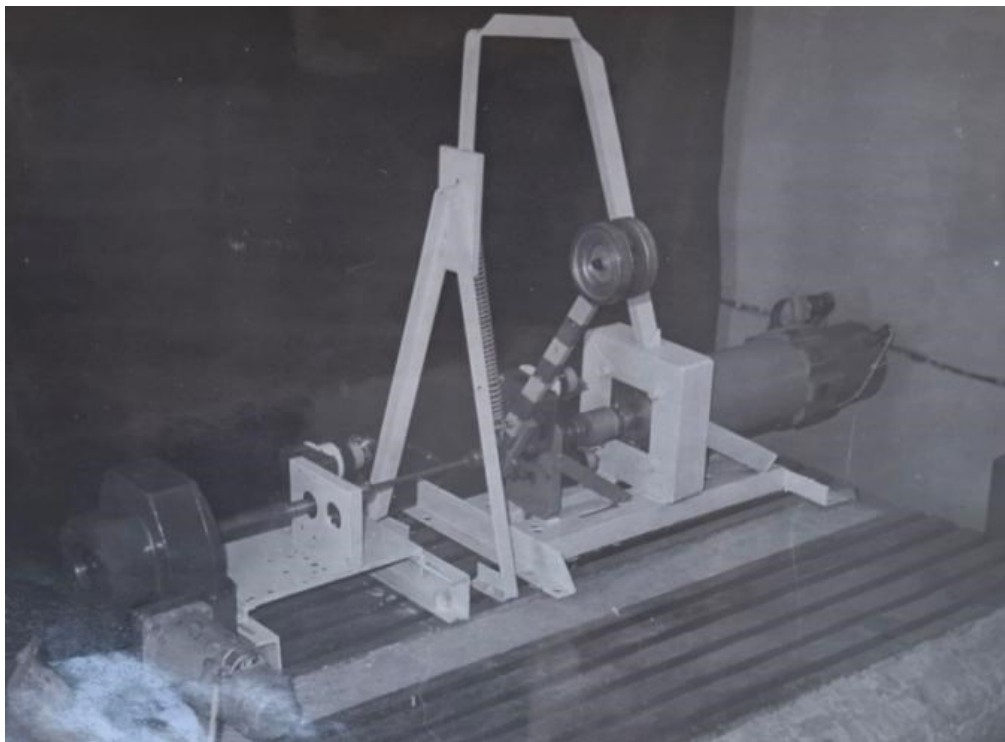
Abstract. The article describes an experimental stand developed and manufactured at the Department of Automation, Mechatronics and Robotics of Vladimir State University, designed for semi-natural modeling and investigation of dynamic characteristics of manipulator robot control systems. Technical specifications of the main stand components, including executive drives, sensors, and load simulators, are provided. The operating modes of the stand for studying a servo drive with an irreversible transmission and bilateral action systems are described, along with the methodology for recording investigated processes. The

presented setup allows significantly reducing development time and material costs for new drive structures by increasing the reliability of obtained results.

Keywords. manipulator robot, control system, experimental stand, semi-natural modeling, servo drive, force reflection loop, moment of inertia, torque sensor, worm gear reducer.

Введение. Одним из методов подтверждения (проверки) результатов теоретических исследований динамических характеристик новых структур приводов манипуляционных роботов является проведение их полунатурных экспериментальных испытаний. Такой подход позволяет не только повысить достоверность получаемых результатов, но и существенно сократить время разработки и материально-технические затраты на разработку новых структур приводов.

С этой целью на кафедре «Автоматизация, мехатроника и робототехника» (АМиР) Владимирского государственного университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ) была разработана и изготовлена установка для экспериментального определения динамических характеристик различных структур приводов манипуляционных роботов. Внешний вид установки представлен на рисунке 1.



Рисунке 1. Внешний вид экспериментальной установки (исполнительная следящая система).

Материалы и методы. На данной установке были выполнены экспериментальные исследования методом полунатурного моделирования следящего привода с необратимой механической передачей на выходе и системы двустороннего действия инвариантных к изменениям момента инерции нагрузки.

При этом в качестве основного контура исполнительной следящей системы (ИСС) и контура отражения усилия (КОУ) использовались реальные макеты, а наблюдатель момента инерции, вырабатывающий корректирующий сигнал в функции момента инерции нагрузки в (ИСС) и ЭПЗН элемент с переменной зоной нечувствительности (ЭПЗН) в КОУ (контур отражения усилия) моделировались на ПЭВМ в среде СИМУЛИНК. Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2.

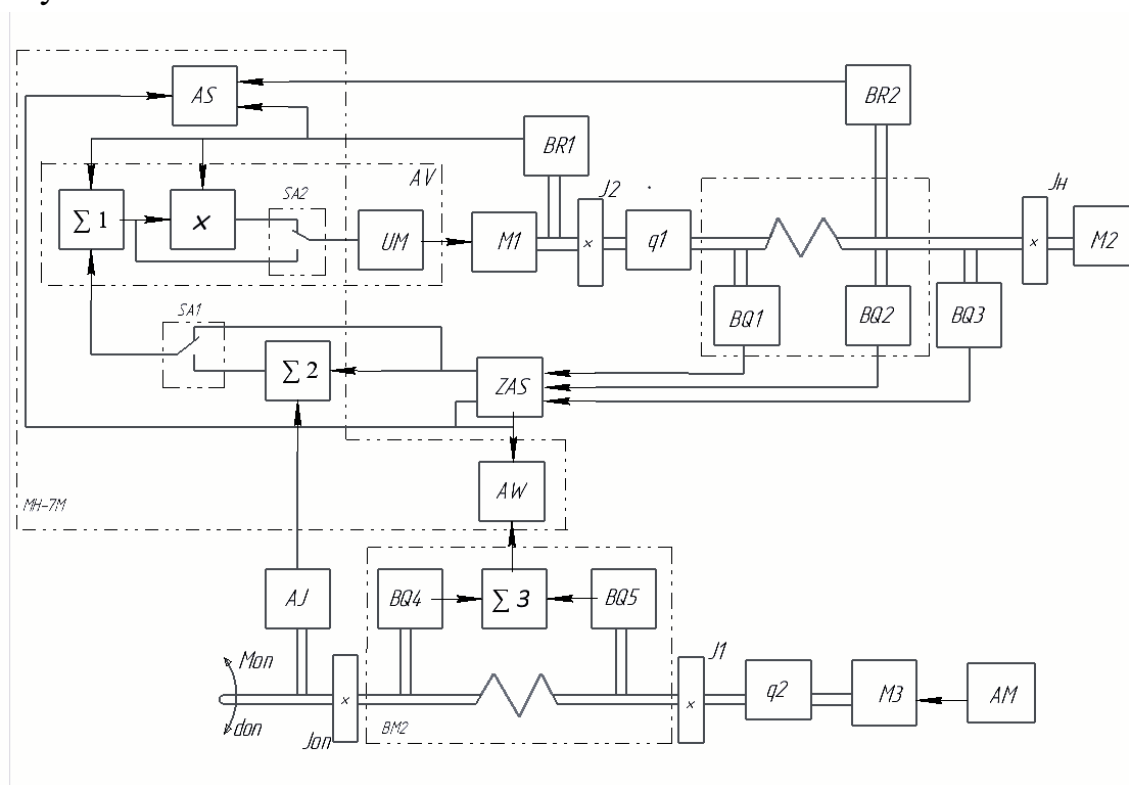


Рисунок 2. Функциональная схема экспериментальной установки.

В качестве базового электропривода ИСС использовался серийно выпускаемый регулятор скорости ЭТШМ-05У с исполнительным двигателем ДТ-550ПБ, применяемый в приводах поворота колонны промышленных роботов РТ-10, РТ-20 и РТ-60 отечественной разработки. Основные технические характеристики регулятора приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические данные ЭПМ ОБУ

№	Наименование	Обозначение	Значение
1	Номинальная мощность	$P_{н1}$	0,5 кВт
2	Диапазон регулирования частоты вращения	$D1$	2–600 об/мин
3	Жесткость механической характеристики	$\delta 1$	15%
4	Время переходного процесса при пуске и остановке	$t_{п1}$	0,1–0,2 с
5*	Добротность по скорости	$D\lambda 1$	48 мм/с МА

Определена экспериментально для привода с механической передачей с $U_0 = 36$.

Кинематическая схема макета ИСС включает исполнительный двигатель М1, силовую механическую передачу $q1$, датчик момента МВ1, выполненный в виде торсиона Т1, охваченного с двух сторон датчиками положения ВQ1 и ВQ2, датчик положения ВQ3, имитатор переменного момента инерции нагрузки J_n и двигатель-нагружатель М2.

В качестве имитатора переменного момента инерции нагрузки J_n служит рычаг с закрепляемыми на нем грузами "m". Разность сигналов датчиков положения ВQ1 и ВQ2 определяется углом закручивания торсиона, пропорциональным в линейной зоне упругости моменту в зацеплении передачи $q1$.

Конструкция макета блочная, позволяющая заменять силовые механические передачи $q1$, торсионы Т1 и двигатели нагружатели М2. Все элементы силовой части ИСС монтируются на специальных испытательных плитах с прямоугольными пазами. Плиты забетонированы в фундамент пола.

В качестве силовой необратимой механической передачи использовался червячный редуктор с кинематическим передаточным отношением $U_n = 72$.

Датчики положения ВQ1 и ВQ2 (ВТМ-ИМ) соединены с торсионом Т1 через повышающие приборные редукторы с кинематическим передаточным отношением $U_{п1} = 1/15$.

В качестве торсиона Т1 служит металлический стержень длиной $L_1 = 225$ мм и диаметром $D_1 = 12$ мм. Торсион выполненный из специальной стали марки ХВГ и подвергнут окончательной термической обработке улучшению (HRC =40). Расчетная жесткость торсиона $C_1 = 78,9$ кГм/рад допускает обеспечивать углы закручивания торсиона Т1 $\gamma_1 = 0,057$ рад, что позволяет измерять максимальные крутящие моменты $M_1 = 455$ кГсм.

Датчик ВQ 3 (ВТМ-ІМ) соединен с выходным валом ИСС через повышающую передачу с кинематическим передаточным отношением $U_{ос} = 1/4$ и служит для замыкания следящего привода по положению.

Для моделирования переменного момента инерции нагрузки использовался рычаг Р длиной $L_2 = 500$ мм, на конце которого закреплялись грузы различной массы m_i .

В качестве двигателя нагружателя М2 использовался высокомоментный электродвигатель УПС2.

Привод контура отражения усилия - оригинальной конструкции, специально разработан в лаборатории кафедры АМиР ВлГУ для экспериментального исследования различных структур систем двустороннего действия (ДСД). Основные параметры привода приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные технические характеристики электропривода в КОУ

№	Наименование	Обозначение	Значение
1	Номинальная мощность	$P_{н2}$	0–0,0125 кВт
2	Диапазон регулирования частоты вращения	$D_{н2}$	2–400 об/мин
3	Жесткость механической характеристики	δ_2	20%
4	Время переходного процесса при пуске и остановке	$t_{п2}$	0,2 с

Кинематическая схема привода КОУ содержит исполнительный двигатель МЗ (Д25А), необратимый червячный редуктор q2 ($u=400$, $\eta_{пх}=0,42$, $\eta_{ох}=0,242$), датчик момента ВМ2, датчики положения ВQ4, ВQ5 и задачик положения АJ, в качестве которых служат проволоочные многооборотные прецизионные резисторы типа ППМЛТ, соединенные с выходным валом червячной передачи и валом оператора соответственно

через приборные редукторы с кинематическими передаточными отношениями $u_1=I$, $u_2=I$ и $u_3=I/10$. Датчики ВQ4, ВQ5 служат для формирования сигнала пропорционального моменту оператора $M_{оп}$, а сигнал задатчика положения АJ используется в качестве сигнала управления по положению для ИСС при исследовании приводов МР с дистанционным управлением.

В качестве датчика момента служит торсион Т2. Торсион выполнен в виде металлического стержня длиной $l_3 = 250$ мм и диаметром $D_3 = 3,5$ мм. Жесткость торсиона составляет $C_2 = 1,44$ нм/рад. Он допускает углы закручивания $\psi_2 = 24^\circ$, что позволяет измерять максимальные крутящие моменты $M_2 = 0,483$ Нм.

Все элементы привода контура отражения усилия смонтированы на отдельной плите, установленной на столе оператора.

Аналоговые схемы ЭПЗН и наблюдателя момента инерции на валу двигателя приведены на рисунках 3 и 4.

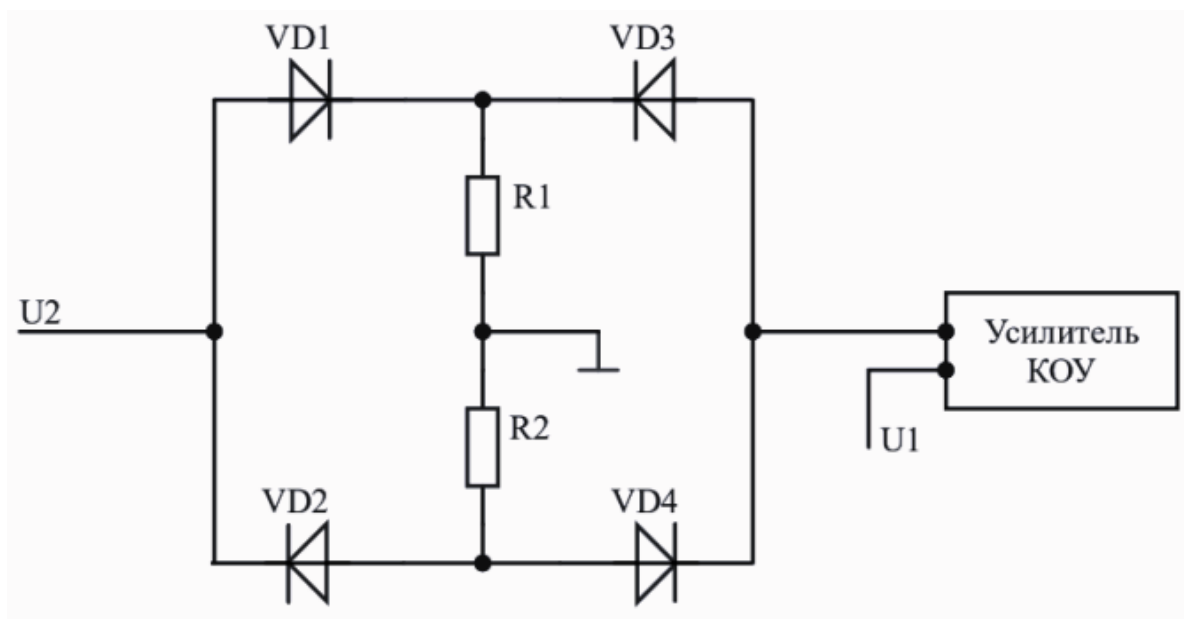


Рисунок 3. Аналоговая схема ЭПЗН.

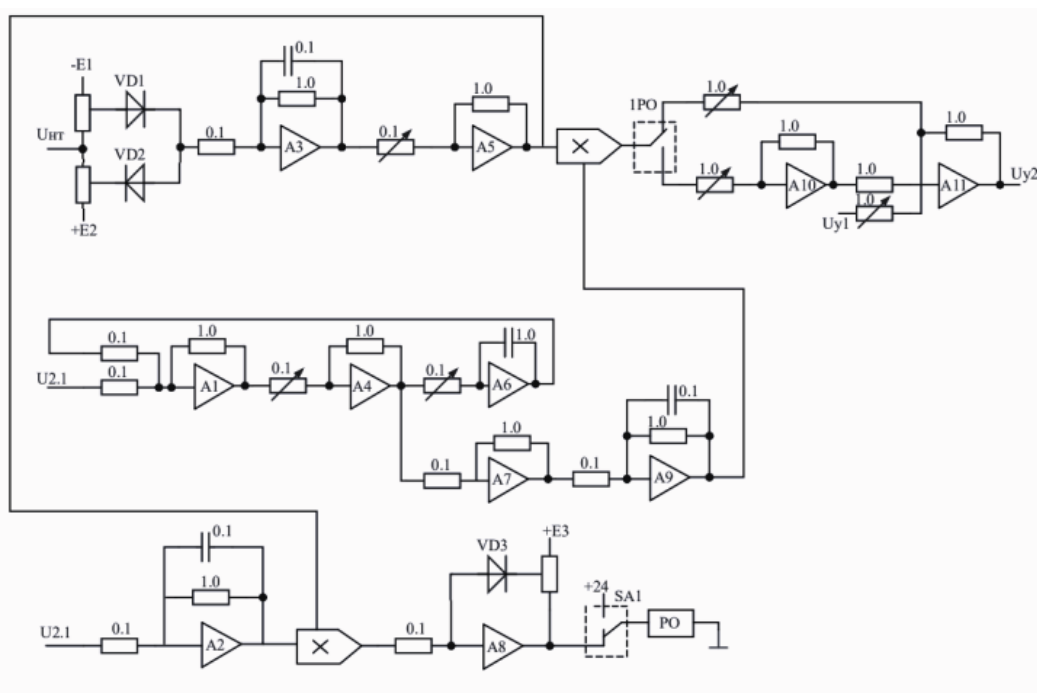


Рисунок 4. Аналоговая модель наблюдателя суммарного момента инерции на валу исполнительного двигателя.

В зависимости от положения тумблера SA1 на экспериментальной установке могут моделироваться либо система управления автоматическим манипуляционным роботом, либо система ДСД.

В первом режиме работы экспериментального стенда управление исполнительным двигателем MI осуществляется стойкой УЧПУ НЗЗ-2М (зав. № 57) ZAS и приводом ЭТШМ-05У (AV). Замыкание привода по положению осуществляется датчиком обратной связи BQ3 и каналом управления координатой Z УЧПУ НЗЗ-2М. Согласование выходных сигналов устройства числового программного управления с сигналом обратной связи по скорости ЭТШМ-05У осуществлялось с помощью устройства согласования, встроенного в УЧПУ и выполненного на основе штатных плат согласования и блоков питания для них. Формирование сигнала, пропорционального моменту в зацеплении передачи $\phi 1$ осуществляется датчиками обратной связи BQ1 и BQ2, охватывающими торсион T1 с двух сторон через повышающие передачи и включенными в фазовом режиме. Для этого используются каналы управления координатами X и Y УЧПУ НЗЗ-2М. Датчик BQ1 является задатчиком фазы, а датчик BQ2 формирует сигнал обратной связи для этого задания.

Во втором режиме работы управление макетом осуществляется от задающей рукоятки оператором.

Для регистрации исследуемых процессов использовался шлейфовый осциллограф НИ7 (зав. № 5334) с магазином делителей напряжения К121 (зав. № 7395).

Основные технические характеристики исполнительных двигателей, используемых в экспериментальной установке, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Основные технические характеристики двигателей

№	Наименование	Ед. изм	Обознач	Тип двигателя		
				ДТ550ПБ	УПС-2	Д25А
1	Номинальная мощность	кВт	P_H	0,55	1,28	0,025
2	Скорость холостого хода	об/мин	n	6000	500	6000
3	Номинальный вращающий момент	Н·м	M_H	0,876	12,5	$4,07 \cdot 10^{-2}$
4	Пусковой момент	Н·м	M_P	12,9	100	0,37
5	Номинальное напряжение на якоре	В	U_H	110	42	36
6	Номинальный ток якоря	А	I_H	6,2	44	1,8
7	Активное сопротивление якорной обмотки	Ом	$R_{Я}$	1,2	0,17	1,6
8	Момент инерции якоря	кг·м ²	$J_{Я}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	0,12	$0,141 \cdot 10^{-5}$
9	Электрическая постоянная времени	мс	$T_{Э}$	1,5	13,9	0,625
10	Крутизна характеристики встроенного тахогенератора на линейном участке	В·с/рад	$U_{ТГ}$	0,19	0,19	—/30
11	Масса двигателя	кг	M	11	—	0,5

Список источников

1. Москвин В.К. Приводы роботов технологического назначения // Технология машиностроения. 2013. № 4. С. 50-54.
2. Москвин В.К., Кузнецов П.М. Сравнительная оценка вариантов приводов промышленных роботов в роботизированных технологических комплексах // Инновационная наука. Уфа: Науч.-изд. центр АЭТЕРНА, 2016. № 3-3. С. 118-122.
3. Тимофеев А.Г. Варианты самоторможения и модификации самотормозящихся зубчатых передач. Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение, 2023, №4 (147), с.55-67.
4. Тывес Л.И., Корендяев А.И., Саламандра Б.Л. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. Кн. 1. М.: Наука, 2006.

УДК 681.5

Полунатурное моделирование электроприводов экзоскелета

Логинов Даниил Дмитриевич¹

logodan@mail.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Рассматривается метод полунатурного моделирования, применяемый для моделирования электроприводов экзоскелета нижних конечностей. Представлена схема стенда, где механизмы и силовая часть конечности экзоскелета выполнены в виде реальных механизмов (аппаратная часть), а система управления представляет модель, созданную в MATLAB Simulink, которая связана с аппаратной частью при помощи микроконтроллера. Все процессы и измерения происходят в реальном времени, что позволяет оперативно вносить коррекцию в контуры регулирования электроприводов и отслеживать состояние системы.

Ключевые слова: экзоскелет, моделирование, полунатурное моделирование, электропривод, система управления, регулятор

Semi-natural modeling of electric drives of an exoskeleton

Loginov Daniil Dmitrievich¹

logodan@mail.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. A semi-natural modeling method is considered that is applicable for modeling electric drives of the exoskeleton of the lower extremities. A diagram of the stand is presented, where the mechanisms and the power part of the exoskeleton limb are made in the form of real mechanisms (hardware), and

the control system represents a model created using MATLAB Simulink, which is connected to the hardware using a microcontroller. All processes and measurements take place in real time, which allows you to quickly make adjustments to the control circuits of electric drives and monitor the state of the system.

Keywords: exoskeleton, modeling, semi-natural modeling, electric drive, control system, controller

Введение. Спрос на системы экзоскелетов в том числе на активные весьма высок. Он исходит от областей медицины, промышленности, а также военного сектора. Исследования установили [1-2], что наиболее перспективным является применение электропривода, управляемого биоэлектрическим сигналом напряженности мышц. Чтобы в полной мере удовлетворить эти запросы, а также соответствовать высоким требованиям стандартам безопасности необходимо решить множество проблем и задач. Одной из задач на этапе создания экспериментальных образцов является моделирование электромеханической системы, а также системы управления. Условия при полунатурном моделировании максимально приближают исследования к реальным, поскольку часть системы выполняется в виде реальных устройств, где влияние внешней среды наиболее критично, что невозможно достичь, ограничиваясь лишь математическим моделированием. Часть же устройств, представляющих систему управления (контуры регулирования, сигналы задания, управление аппаратной частью) могут представлять модель, неразрывно связанную с аппаратной частью.

Материалы и методы. Для создания рабочего макета системы взаимосвязанных электроприводов необходимо построение экспериментального стенда с реальными механизмами и силовыми агрегатами для исследования работы электроприводов с реальным оборудованием, которое невозможно отследить при создании исключительно математической модели. Также этап полунатурного моделирования необходим перед созданием экспериментального образца. Удобен он тем, что параметры контуров регулирования можно настраивать непосредственно при экспериментах оперативно наблюдая как это отражается на работе внешнего оборудования. На рисунке 1 представлено общий вид полунатурного моделирования электроприводов.

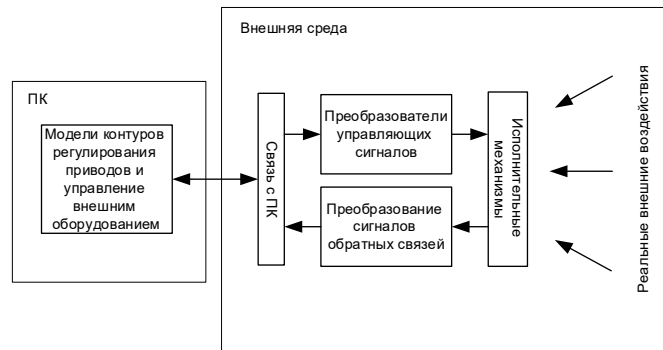


Рисунок 1. Схема полунатурного моделирования.

Структура лабораторного стенда для полунатурного моделирования электроприводов должна содержать непосредственно ПК с программным обеспечением моделирования контуров регулирования приводов и возможностью связи с внешним оборудованием в реальном времени. Всеми этими свойствами обладает MATLAB Simulink. Также внешнее оборудование должно содержать двигатели, которые приводят в движение механизмы, датчики обратной связи, преобразование сигналов с датчиков, силовые преобразователи, блоки питания двигателей и внутренних схем, а также устройство управления этим оборудованием со связью с ПК. Структура лабораторного стенда приведена на рисунке 2.

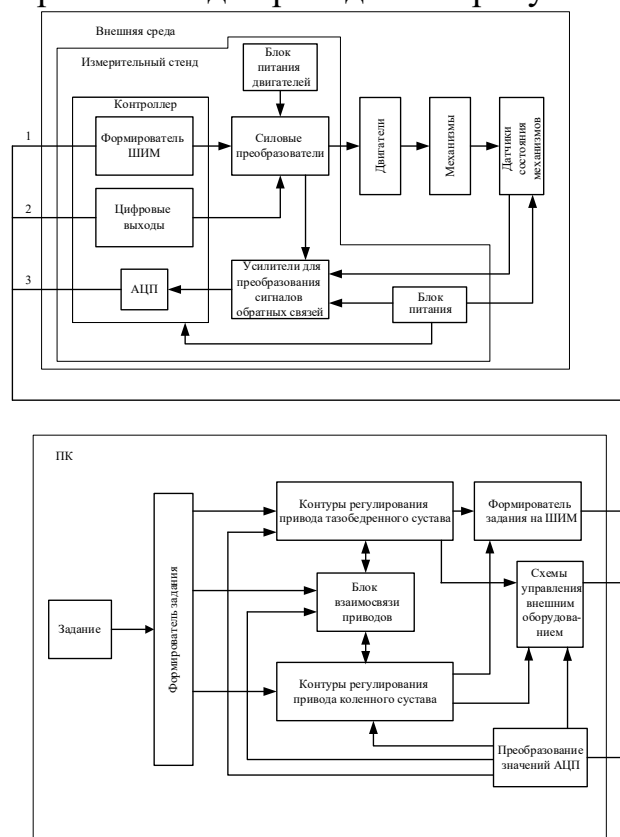


Рисунок 2. Структура стенда для полунатурного моделирования взаимосвязанных электроприводов экзоскелета.

В виде реальных устройств выполнены следующие компоненты аппаратной части: электродвигатели, редукторы, звенья тазобедренного и коленного суставов, датчики обратной связи (скорость, угловое положение), силовые преобразователи, преобразователи сигналов датчиков обратной связи.

Установлено [3], что двигатель должен обладать номинальным моментом не менее $0,19 \text{ Н*м}$, коэффициент редукции при этом должен составлять не менее 400. Суммарное быстродействие системы должно быть не менее 0,2 с. На основе этих данных выбран двигатель и редуктор. Максимальная скорость, развиваемая суставами, составляет не более 3 рад/с. Разработана принципиальная схема силового преобразователя в соответствии с токовыми характеристиками двигателя. Силовой преобразователь управляется широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), формируемой в устройстве связи аппаратной части с программной. Коэффициент заполнения ШИМ задаётся системой управления. В качестве датчиков обратной связи избраны тахогенератор (скорость) и потенциометр (угловое положение), ввиду упрощения преобразования их сигналов для системы управления. На рисунке 3 представлена схема силового преобразователя, а также преобразователь сигнала датчика скорости.

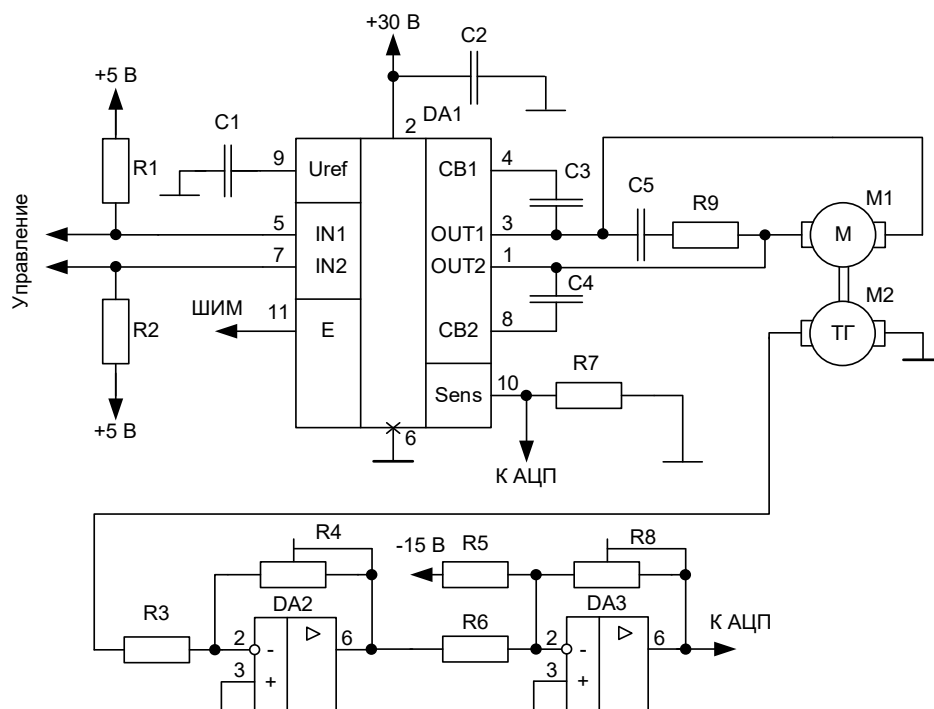


Рисунок 3. Силовой преобразователь и преобразователь для АЦП.

MATLAB Simulink позволяет осуществлять связь с дискретными, а также аналоговыми внешними устройствами в реальном времени. Что способствует быстрому переходу от математического моделирования к полунатурному. В данном случае ранее выполненная [4] модель электропривода сустава экзоскелета корректируется с учетом появляющихся связей с оборудованием. Также весомым преимуществом являются встроенные средства автоматизированного программирования устройства приема-передачи информации между выполненной на ПК модели контуров регулирования и аппаратной частью. Этим устройством является микроконтроллер Atmega328p. На рисунке 4 представлена программная часть, выполненная в виде Simulink-модели.

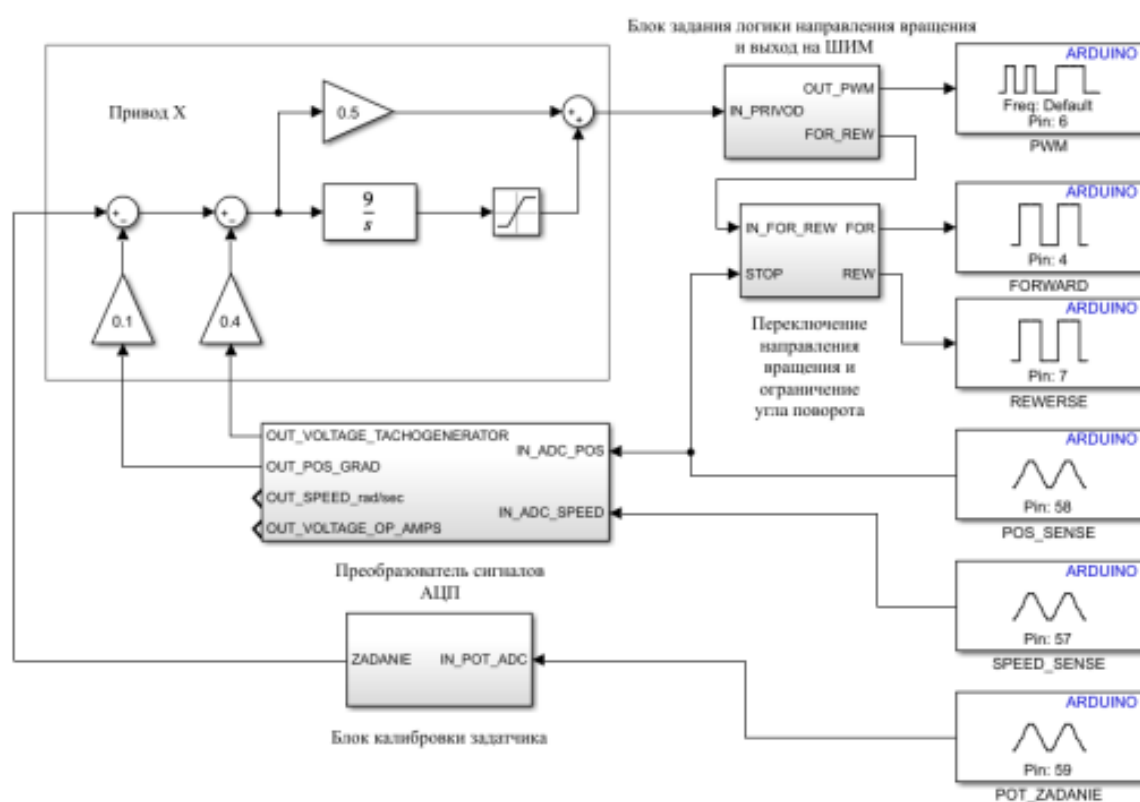


Рисунок 4. Связи модели системы управления аппаратной частью стенда.

Результаты. На рисунке 5 представлены результаты полунатурного моделирования работы электропривода сустава экзоскелета в период переноса конечности без нагрузки. В качестве задания для электропривода использован смоделированный обработанный биоэлектрический сигнал.

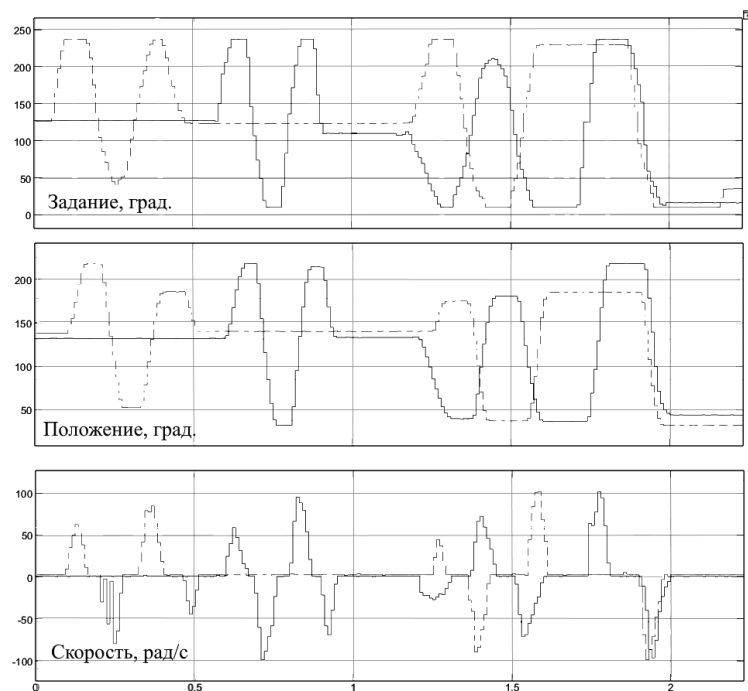


Рисунок 5. График одновременной работы приводов тазобедренного и коленного суставов. (тазобедренный сустав – непрерывная линия, коленный – пунктирная).

Обсуждение полученных результатов. Задержка выходного сигнала при работе цикла приёмо-передачи информации не нарушает требуемое быстродействие и остаётся в требуемом пределе, а именно 0,1 с, что выше на 0,3 с чем в ранее проведенных исследованиях [5]. С учётом коэффициента редукции скорость не превышает заданного значения.

Заключение. Полученный результат подтверждает возможность использования полунатурного моделирования для проектирования электроприводов экзоскелета. Однако поскольку электроприводы не имеют межконтурных связей друг с другом при возникновении возмущений на одном из приводов, компенсация его не учитывается другим приводом. Возникающее рассогласование при одновременном изменении положения обоих координат может привести к снижению точности позиционирования, что требует введения дополнительных связей между контурами регулирования обоих электрических приводов.

Список источников

1. Котов Е. А. Разработка экзоскелета нижних конечностей человека для медицинской реабилитации / Е.А. Котов, А.Д. Друк, Д.Н. Клыпин // Омский научный вестник

2. Николенко, М. Н. Активный модуль медицинского экзоскелета с синхронным электроприводом и системой векторного управления / М. Н. Николенко, Д. А. Котин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 4 (24). – С. 155–167.

3. Логинов Д.Д. Расчёт моментов, возникающих в бедренном и коленном суставах при поднятии нижней конечности / Д.Д. Логинов // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств [Электронный ресурс] : материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти проф. Юрия Васильевича Баженова. 21 – 22 нояб. 2024 г., Владимир / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Ин-т машиностроения и автомобил. трансп. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2024. – С. 358. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

4. Логинов, Д.Д. Модель взаимосвязанных электроприводов экзоскелета / Д.Д. Логинов, О.В. Веселов // СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. – 2022. – №7. – С. 14.

5. Сафаров Д.И. Моделирование взаимодействия человека и реабилитационного экзоскелета / Д.И. Сафаров, Е.Д. Тисцов, С.Ф. Яцун // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – vol. 12. – №4

УДК 621.9.04

Применимость аддитивных технологий в различных отраслях промышленности РФ

Фоменко Владислав Валерьевич¹ vladfomenko200@gmail.com

Посажеников Артур Андреевич²

¹Студент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

²Доцент, кафедра АМиР, ВлГУ, РФ, г. Владимир

Аннотация. В статье рассматривается потенциал аддитивных технологий (3D-печати) для автоматизации технологических процессов и производств в ключевых отраслях промышленности Российской Федерации. Анализируются возможности их внедрения в авиастроении, автомобилестроении, энергетике, медицине, строительстве, металлургии и нефтепереработке. Особое внимание уделяется повышению уровня автоматизации, сокращению производственных циклов, снижению затрат и увеличению гибкости производства.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, автоматизация производства, промышленность РФ, цифровизация, промышленные процессы.

Applicability of additive technologies in various industries of the Russian Federation

Fomenko Vladislav Valerievich¹

vladfomenko200@gmail.com

Posazhennikov Artur Andreevich²

¹Student, Department of AMIR, VISU, Russian Federation, Vladimir

²Associate Professor, Department of AMiR, VISU, Russian Federation, Vladimir

Abstract. The article examines the potential of additive technologies (3D printing) for automating technological processes and productions in key industries of the Russian Federation. The possibilities of their implementation in the aircraft industry, automotive industry, energy, medicine, construction, metallurgy and oil refining are analyzed. Special attention is paid to increasing the level of automation, reducing production cycles, reducing costs and increasing production flexibility.

Keywords: additive technologies, 3D printing, production automation, Russian industry, digitalization, industrial processes.

Введение. Аддитивные технологии, представляющие собой процесс послойного синтеза изделий на основе цифровых моделей, становятся одним из главных драйверов Четвёртой промышленной революции (Индустрия 4.0) [1]. Их главное преимущество с точки зрения автоматизации заключается в возможности бесшовной интеграции в цифровую цепочку создания стоимости – от проектирования (CAD) до непосредственного изготовления детали без необходимости сложной оснастки и промежуточных операций. Для промышленности РФ внедрение аддитивных технологий является стратегической задачей, направленной на повышение технологического суверенитета, сокращение издержек и рост конкурентоспособности на глобальном рынке [5]. В данной статье анализируется применимость аддитивных технологий в различных отраслях с фокусом на их роль в автоматизации и роботизации ключевых производственных процессов.

Материалы и методы. Для подготовки настоящей статьи был проведён аналитический обзор научной литературы, отраслевых отчётов,

материалов конференций и публикаций в рецензируемых журналах за период 2014–2023 годов, посвящённых аддитивным технологиям.

Результаты. Проведённый анализ позволил выявить следующие ключевые результаты относительно применимости аддитивных технологий для автоматизации в различных отраслях промышленности РФ.

Внедрение SLM-технологий в авиа- и двигателестроение позволило автоматизировать производство сложнопрофильных деталей (лопатки, топливные форсунки, элементы кронштейнов) с сокращением производственного цикла до 60% по сравнению с фрезерованием. Автоматизированные поставочные и постобрабатывающие линии, интегрированные с 3D-принтерами, минимизируют ручные операции, повышая повторяемость и качество. Основным барьером остаётся высокая стоимость сертификации деталей для критических применений.

Аддитивные технологии (FDM, SLA) активно используются для автоматизации создания прототипов, оснастки и штампов в автомобилестроении [2]. Это сокращает время подготовки производства (time-to-market) на 30–50%. Наблюдается тренд на создание автоматизированных «цифровых складов» для печати запасных частей по требованию, что снижает логистические издержки и устраняет необходимость хранения большого ассортимента деталей.

Применение технологий Directed Energy Deposition (DED) в энергетике и тяжёлом машиностроении для автоматизированного ремонта и восстановления лопаток турбин и крупногабаритных деталей позволило увеличить межремонтный интервал оборудования на 20–40%. Роботизированные комплексы на основе аддитивных технологий работают в опасных для человека средах, полностью автоматизируя процесс наплавки.

Автоматизация через аддитивные технологии достигла высокого уровня в персонализированной медицине. Цифровой workflow от КТ-сканирования до печати имплантата практически исключает ручные этапы моделирования [4]. Биопринтеры с автоматическим контролем параметров среды позволяют создавать тканеинженерные конструкции, хотя вопрос массовой автоматизации в данной области ещё требует решения.

Развитие контурного строительного Crafting (CNC Concrete Printing) демонстрирует потенциал для роботизации трудоёмких процессов кладки. Автоматизированные строительные платформы способны снизить сроки возведения конструкций до 70% и минимизировать человеческий фактор.

Однако требуется дальнейшая стандартизация и автоматизация процессов подготовки бетонных смесей и армирования.

Внедрение установок Binder Jetting и SLA для автоматизированного производства катализаторов, фильтров и элементов реакторов позволило перейти к быстрому итерационному проектированию (rapid tooling). Это сократило цикл НИОКР и позволило автоматизировать изготовление сложной оснастки для литья в металлургии и нефтехимии.

Таблица 1

Аддитивные технологии по отраслям промышленности РФ

Отрасль промышленности	Метод производства	Принцип работы
Авиастроение	SLM	Лазерное плавление металла
Металлургия	SLA	УФ-закрепление фотополимеров
	FDM	Послойное наплавление пластика
Строительство	CNC	Печать слоями цементных смесей

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что аддитивные технологии выступают не просто как альтернативный метод изготовления, а как системный элемент автоматизации. Их интеграция с системами CAD/CAM/PLM, промышленными роботами и IoT-платформами создаёт основу для полностью автоматизированных «умных» цехов (smart factories). Основными вызовами для РФ остаются: необходимость развития отечественного парка промышленных 3D-принтеров, создание цифровых библиотек материалов и автоматизированных систем контроля качества в процессе печати (in-process quality control). Преодоление этих барьеров позволит вывести автоматизацию на основе аддитивных технологий на новый уровень.

Заключение. Аддитивные технологии доказали свою высокую применимость в качестве катализатора автоматизации технологических процессов в ключевых отраслях промышленности России. Они обеспечивают:

- Сокращение количества операций и длительности производственного цикла.

- Минимизацию участия ручного труда в основных и вспомогательных процессах.

- Повышение гибкости и адаптивности производства к изменяющимся требованиям.

- Создание основ для полностью цифровых и роботизированных производственных ячеек.

Наиболее значимый эффект автоматизации наблюдается в авиастроении, медицине и опытном строительстве. Для достижения синергетического эффекта от интеграции аддитивных технологий в национальную промышленную стратегию необходима консолидированная работа по развитию отечественного оборудования, программного обеспечения и подготовке кадров. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку стандартов и методик для автоматизированного проектирования под аддитивное производство (DFAM) и создание замкнутых автоматических циклов с применением искусственного интеллекта для контроля и оптимизации процесса печати.

Список источников

1. Михайлова А.Е., Дошина А.Д. 3D-принтер — технология будущего // Молодой ученый. 2015. №20. С. 40-44.

2. Баева Л.С., Маринин А.А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17. № 1.С. 7-12.

3. Ланг Н.В., Шляхова М.М. НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. №1. С. 1-4.

4. Шацкий В. А., Картечина Н. В., Чиркин С. О. ИННОВАЦИЯ В 3Д-ПЕЧАТИ // Наука и образование. 2023. №1. С.

5. Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 N 1913-р (ред. от 21.10.2024)

Обзор основных типов жидкостных амортизаторов

Рыкалов Святослав Игоревич¹

rykalov93@mail.ru

SPIN-код: 4291-6505

Килина Мария Степановна¹

mariya-kilina@yandex.ru

SPIN-код: 8039-0060

¹Донской Государственный Технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В данной статье рассматриваются основные типы жидкостных амортизаторов, которые играют ключевую роль в современных механизмах и транспортных средствах. Жидкостные амортизаторы, использующие вязкость рабочих жидкостей для поглощения энергии и уменьшения колебаний, делятся на несколько категорий, включая гидравлические, газовые, регулируемые и масляные амортизаторы. Также в статье рассмотрены принципы работы однотрубного и двухтрубного типов жидкостного амортизатора, их конструктивные особенности и области применения.

Ключевые слова: позиционирование выходного звена гидропривода, жидкостный амортизатор, газовый амортизатор, гидравлический амортизатор, динамические характеристики гидравлической системы.

An overview of the main types of liquid shock absorbers

Rykalov Svyatoslav Igorevich¹

rykalov93@mail.ru

SPIN-code: 4291-6505

Kilina Maria Stepanovna¹

mariya-kilina@yandex.ru

SPIN-code: 8039-0060

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. This article discusses the main types of liquid shock absorbers that play a key role in modern mechanisms and vehicles. Liquid shock absorbers, which use the viscosity of working fluids to absorb energy and reduce vibrations, are divided into several categories, including hydraulic, gas, adjustable, and oil shock absorbers. The article also discusses the principles of operation of single-tube and double-tube types of liquid vaporizer, their design features and applications.

Keywords: positioning of the output link of the hydraulic drive, liquid amortizer, gas amortizer, hydraulic amortizer, dynamic characteristics of the hydraulic system.

Введение. В современных гидравлических системах точное и надежное управление положением выходного звена является критически важным для обеспечения высокой производительности, безопасности и долговечности оборудования. В связи с этим активно разрабатываются и внедряются различные технические решения, направленные на повышение точности позиционирования, снижение энергозатрат и увеличение эффективности тормозных механизмов [1].

Одним из таких устройств является жидкостный амортизатор, принцип работы которого основан на перемещении рабочей жидкости через специальные каналы и поршни, что позволяет контролировать динамические характеристики системы.

Систематизация данных о амортизаторах позволяет проанализировать различные технические решения, дает возможность оценить существующие подходы, их преимущества и недостатки, а также выявить пробелы и перспективные направления для дальнейших исследований [2].

Такой комплексный подход является важной основой для разработки новых решений, позволяющих повысить эффективность и надежность систем гидропривода, а также способствует формированию конкурентных преимуществ в области автоматизации и управления гидравлическими механизмами.

Обзор существующих технических решений. Современная промышленность предлагает большое количество технических решений конструкций амортизаторов, заточенных под самые разные задачи. Простое оборудование, как, например, резиновые бамперы и витые пружины (Рисунок 1 А, Б) ограничены в применении, особенно в контексте амортизации и поглощения энергии ударов. Они способствуют эффекту возвратного отражения, когда большая кинетическая энергия, поглощенная этим оборудованием, во время удара опять переносится на тормозимое тело и способствует тем самым неконтролируемому удару, который может привести к повреждению затормаживаемого тела [3].

Также при применении данных технических устройств происходит увеличение времени реакции в связи с неоптимальным поведением таких

систем, что в свою очередь может потребовать дополнительных мер контроля и реагирования, увеличивая время отклика. А использование резиновых бамперов и витых пружин в системах, где требуется надежное и контролируемое гашение колебаний или ударов, является низкоэффективным.



Рисунок 1. Конструкция простейших амортизаторов. А – резиновый бампер, Б – витая пружина.

Для решения этих проблем рассмотрим более совершенные системы амортизации. Широкое распространение получили конструкции гидравлических амортизаторов (Рисунок 2 А, Б). Они обеспечивают высокую степень поглощения энергии, снижая негативный эффект от ударов и колебаний, могут быть адаптированы к различным условиям нагрузки и типам использования, однако, если система повреждена или имеет утечки, это несет за собой снижение амортизирующих свойств.

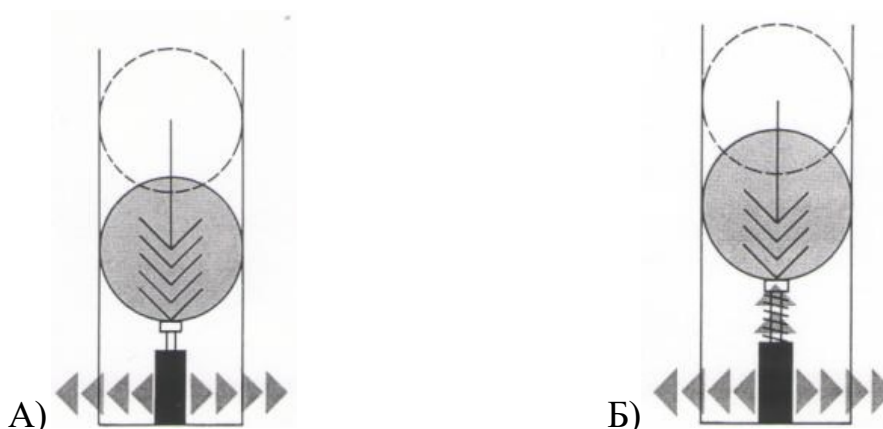


Рисунок 2. Конструкция усовершенствованных амортизаторов.

А – гидравлический амортизатор,
Б – гидравлический амортизатор с возвратной пружинной.

Принцип работы гидравлического амортизатора (Рисунок 2 А) основан на преобразовании кинетической энергии в тепловую, которая затем рассеивается в атмосферу. Движение, направленное на поршень амортизатора, воздействует на жидкость внутри корпуса амортизатора, сдвигая ее и заставляя протекать ее через специальные отверстия, способствуя быстрому нагреву. Затем, тепловая энергия переносится на корпус цилиндра, который излучает ее в атмосферу. Наличие же специальных каналов и поршней позволяет контролировать динамические характеристики системы.

Использование внешней или внутренней возвратной пружины (Рисунок 2 Б) позволяет регулировать время, необходимое для возвращения поршня в исходное положение, а также накапливать часть кинетической энергии, облегчая обратный ход.

По своей конструкции амортизаторы делятся на однотрубные (Рисунок 3), двухтрубные (Рисунок 4), магнитные, рычажные, резинометаллические, цельнометаллические и пружинные с воздушным или фрикционным демпфированием. По принципу действия на регулируемые, нерегулируемые и активные. В зависимости от наполняемой жидкости различаются гидравлические, газовые, гидравлические с газовым подпором и магнитно – жидкостные. Однако, имеются еще низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные амортизаторы, зависящие от частоты внутренних колебаний [4].

Однотрубные амортизаторы состоят из корпуса, в котором размещаются поршень, совершающий движение внутри корпуса, и, разделяющий амортизатор на две камеры (рабочую и резервную), и рабочая жидкость, клапанов, размещенных на поршне или в корпусе, и, регулирующих поток жидкости между двумя камерами, обеспечивая необходимое демпфирование, газового пространства, заполненного сжатым азотом, помогающим уменьшить пенообразование и компенсировать изменение давления жидкости.

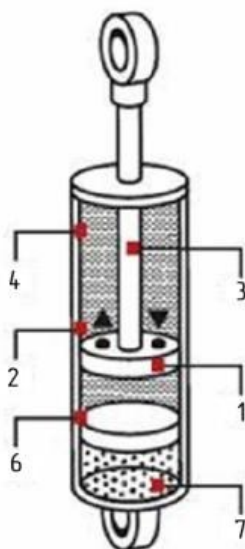


Рисунок 3. Однотрубный амортизатор. 1 – рабочий поршень, 2 – клапаны, 3 – шток, 4 – масло, 6 – разделительный поршень, 7 – газовый подпор высокого давления.

Принцип работы однотрубного амортизатора основан на использовании рабочей жидкости и поршня для обеспечения поглощения ударов и демпфирования колебаний. Когда происходит сжатие амортизатора, поршень движется вниз, сжимая жидкость в рабочей камере. Жидкость начинает проходить через клапаны, заполняя резервную камеру, где находится сжатый газ (чаще всего азот), что позволяет поддерживать давление и избегать образования пузырьков (пенообразования) в жидкости. Стоит учитывать, что чем выше давление газа в газовом подпоре высокого давления, тем быстрее происходит срабатывание амортизатора. После снятия нагрузки, поршень возвращается в исходное положение, а газовая пружина в верхней части амортизатора помогает вытолкнуть поршень обратно, обеспечивая быстрое восстановление. Клапаны же, установленные на поршне, открываются и закрываются в зависимости от скорости и направления движения, позволяя настроить уровень демпфирования в зависимости от входных данных.

Двухтрубные амортизаторы являются одним из самых распространенных типов амортизирующих устройств. Основное отличие двухтрубного амортизатора от однотрубного – наличие двух отдельных камер (внутренняя рабочая камера и внешняя резервная камера).

Конструктивно двухтрубный амортизатор состоит из корпуса, представляющего собой два цилиндра, где внутренний цилиндр содержит поршень, разделяющий рабочую камеру на две части для обеспечения демпфирования, и рабочую жидкость, а внешний цилиндр служит для хранения дополнительной жидкости. Также, на корпусе и поршне установлены клапаны, регулирующие поток жидкости между обеими камерами.

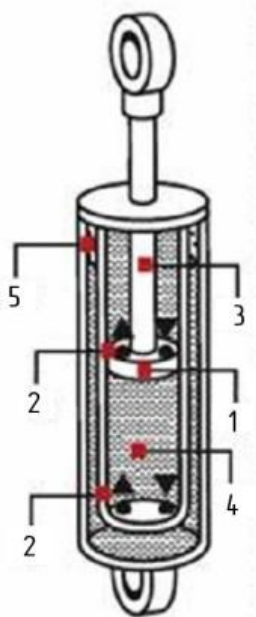


Рисунок 4. Двухтрубный амортизатор. 1 – рабочий поршень, 2 – клапаны, 3 – шток, 4 – масло, 5 – воздушный подпор.

Принцип работы двухтрубного амортизатора основан на использовании рабочей жидкости и поршня для обеспечения поглощения ударов и демпфирования колебаний. Когда происходит сжатие амортизатора, поршень движется вниз, сжимая жидкость в рабочей камере. Это провоцирует движение рабочей жидкости через клапаны, открывающиеся в зависимости от направления движения, создавая демпфирующее сопротивление. Из – за давления в рабочей камере жидкость проходит через клапаны во внешний резервуар, где имеется дополнительное пространство, предотвращающее процесс пенообразования. При возвращении поршня в исходное положение жидкость из резервной камеры возвращается в рабочую камеру, однако, данный процесс может быть менее быстрым, нежели в случае с однотрубным амортизатором [5].

Более подробные сравнительные характеристики однотрубного и двухтрубного амортизатора приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики однотрубного и двухтрубного амортизаторов

Характеристика	Однотрубные амортизаторы	Двухтрубные амортизаторы
Конструкция	Имеют одну цилиндрическую трубку, содержащую поршень и рабочую жидкость с газом сверху	Состоят из двух труб: внутренней (рабочей) и внешней (резервной), разделённых поршнем.
Принцип работы	При сжатии поршень перемещает жидкость через клапаны, создавая демпфирующее сопротивление.	Поршень сжимает жидкость обеспечивая демпфирование.
Управление демпфированием	Могут иметь регулируемые характеристики для настройки жесткости.	Клапаны позволяют регулировать демпфирование, но имеют более медленный отклик.
Потенциал для пенообразования	Газовая камера сокращает риск пенообразования, что улучшает стабильность работы.	Уменьшает риск пенообразования за счёт резервного пространства, но при слишком большом количестве жидкости может быть склонен к этому.
Масса и габариты	Обычно легче и компактнее из-за простой конструкции.	Чуть тяжелее и объемнее из-за двухкамерной конструкции.
Стоимость	Дороже в производстве, но имеет лучшую производительность	Менее дорогие в производстве и ремонте.

Области применения	Применяются в спортивных автомобилях, мотоциклах и других областях, где требуется высокая производительность.	Используются в большинстве стандартных автомобилей и коммерческой техники, где важна комфортность и надёжность.
Возврат поршня	Быстрая реакция и возврат поршня к исходной позиции благодаря газовому подпору.	Восстановление может быть менее быстрым из-за большего объёма жидкости, с которой нужно работать.
Эффективность поглощения	Более быстрое и стабильное демпфирование благодаря сжимаемому газу и менее сложной конструкции.	Эффективно для контроля колебаний, но может быть менее чувствительным при быстром движении.

Заключение. В данной статье был представлен обзор основных типов жидкостных амортизаторов, а также их принципов работы, конструктивных особенностей и областей применения. Жидкостные амортизаторы играют ключевую роль в системах управления колебаниями, обеспечивая комфорт и безопасность во время движения различных транспортных средств и в многомеханических установках. Жидкостные амортизаторы остаются актуальной и важной темой в инженерии и автомобильной промышленности.

Постоянное совершенствование этих систем и внедрение новых технологий создают уникальные возможности для улучшения потребительского опыта и расширения границ применения амортизаторов в различных сферах.

Список источников.

1. В. Е. Щерба, Е. А. Павлюченко, Е. Ю. Носов, А. В. Григорьев. Гидравлика и гидропривод. Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020. – 187 с.

2. Wang, K., Zhang, Y. "Research on the Dynamic Performance of Vehicle Suspension System Using Different Types of Dampers." Automotive Engineering Journal, 2016, 225-234.

3. Müller, W., Schmidt, U. "Evaluation of Novel Suspension Systems in Automotive Applications." International Journal of Automotive Technology, 2019, 89-101.

4. Чернавский В.А. Расчет клапанных гидравлических амортизаторов. Современное состояние и перспективы развития гидромашиностроения в XXI веке: тр. междунар. науч.-техн. конф. 4-6 июня/СПб ГПУ-СПб, 2003, с. 90 – 98.

5. Килина М.С., Чернавский В.А. Гидросистема с управлением по давлению агрегатного станка СТК-2253//Металлургия, машиностроение, станкоинструмент 2006: сб. трудов междунар. науч.-техн. конф. 6-8 сентября/ Ростов-на-Дону, 2006, с. 8 – 18.

УДК 621.5-1/-9

Области применения пусковых установок с камерным торообразным приводом

Сысоев Сергей Николаевич¹

ssysoev50@yandex.ru

Енюхин Евгений Сергеевич¹

eenyuhin2001@mail.ru

Жулин Сергей Васильевич¹

zerger@list.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. Одним из направлений является применение торообразных камер является их использование в качестве силовой части стартовых установок. Приводятся расчетные значения тягового усилия камерного торообразного привода и траектории полета объекта, разогнанного пусковой установкой. На основе анализа качественных и количественных характеристик делается вывод о том, что применять пусковые установки с камерным торообразным приводом перспективно как в областях, где требуется наибольшая начальная скорость и дальность запуска объекта, так и в сфере безлюдных технологий, где требуется повышенная надежность и предсказуемость работы исполнительных устройств. Выявлены возможности повышения эффективности пусковых установок с торообразным приводом путем поиска и разработки материалов для изготовления оболочки, а также технического решения, позволяющего обеспечить постоянное давление в камере в процессе работы устройств.

Ключевые слова: камерный привод, торообразная камера, оболочка, пусковая установка, безлюдные технологии.

Areas of Application for Chambered Torus Drive Launch Systems

Sysoev Sergey Nikolaevich¹

ssysoev50@yandex.ru

Enyukhin Evgeniy Sergeyevich¹

eenyuhin2001@mail.ru

Zhulin Sergey Vasilievich¹

zenger@list.ru

¹VISU, Vladimir, Russia

Abstract. One area of application for toroidal chambers is their use as the power component of launch devices. The calculated values of the thrust force of the chamber-type toroidal drive and the flight trajectory of the object accelerated by the launcher are presented. Based on the analysis of qualitative and quantitative characteristics, it is concluded that the use of launchers with a chamber-type toroidal drive is promising both in areas requiring the highest initial velocity and launch range of the object, and in the field of unmanned technologies, where increased reliability and predictability of actuator performance are required. The potential for improving the efficiency of toroidal drive launchers has been identified through the search for and development of materials for manufacturing the shell, as well as technical solutions to maintain constant pressure in the chamber during device operation.

Keywords: chamber-type drive, toroidal chamber, shell, launching device, unmanned technologies

Введение. Одним из направлений разработок, позволяющих повысить эффективность работы устройств за счет изменения принципа работы, являются торовые технологии. Торообразным оболочкам на сегодняшний день нашли широкое применение в различных устройствах и способах [1, 2].

Отдельным направлением использования торообразных оболочек является применение их в составе стартовых установок [3]. Отличительными особенностями данных устройств является: высокая мощность, скрытность работы, а также высокая надежность за счет простой конструкции.

Целью статьи является выявление эффективных областей применения пусковых установок с камерным торообразным приводом.

Задачами статьи является анализ качественных и количественных характеристик стартового устройства с камерным торообразным приводом.

Научная значимость заключается в выявлении и анализе областей, в которых применение пусковых установок с торообразным приводом наиболее эффективно, а также путей повышения эффективности их работы.

Материалы и методы. Выявление эффективных областей применения пусковых установок с камерным торообразным приводом выполнялось анализом их качественных и количественных характеристик.

Для оценки значения тягового усилия F , создаваемого камерным торообразным приводом используется формула (1):

$$F = p \cdot S_{\text{эфф.к}}, \text{ где (1)}$$

F – тяговое усилие, Н

p – избыточное давление в камере, Па

$S_{\text{эфф.к}}$ – эффективная площадь камеры, м²

Из этого следует, что задавать величину тягового усилия F возможно путем изменения давления p и эффективной площади $S_{\text{эфф.к}}$. При этом максимальное значение давления p зависит от прочностных характеристик материала оболочки торообразной камеры, а максимальное значение $S_{\text{эфф.к}}$ – от габаритных размеров торообразной камеры (установки).

Начальная скорость объекта, разогнанного пусковой установкой, без учета диссипативных сил может быть оценена по следующей из II-го закона Ньютона формуле (2):

$$v = \sqrt{\frac{2p \cdot S_{\text{эфф.к}} \cdot l}{m}}, \text{ где (2)}$$

p – избыточное давление в камере, Па

$S_{\text{эфф.к}}$ – эффективная площадь камеры, м²

l – длина запускаемого объекта, м

m – масса запускаемого объекта, кг

Результаты. Наиболее эффективно применять пусковые установки с торообразным приводом перспективно в областях, где требуется получить наибольшую начальную скорость объекта за счет возможности создания мощных установок с высоким тяговым усилием.

В таблице 1 приводятся расчетные значения F при различных значениях p и $S_{\text{эфф.к}}$ без учета диссипативных сил.

Таблица 1

Значения F при различных p и $S_{\text{эфф.к}}$

p , МПа	$S_{\text{эфф.к}}, \text{м}^2$						
	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,5	1
0,05	0,5 кН	1 кН	2 кН	4 кН	8 кН	25 кН	50 кН
0,1	1 кН	2 кН	4 кН	8 кН	16 кН	50 кН	100 кН
0,2	2 кН	4 кН	8 кН	16 кН	32 кН	100 кН	200 кН
0,3	3 кН	6 кН	12 кН	24 кН	48 кН	150 кН	300 кН
0,4	4 кН	8 кН	16 кН	32 кН	64 кН	200 кН	400 кН
0,5	5 кН	10 кН	20 кН	40 кН	80 кН	250 кН	500 кН
0,8	8 кН	16 кН	32 кН	64 кН	128 кН	400 кН	800 кН

Из таблицы видно, что в теории сила тяги, развиваемая торообразной оболочкой, может достигать высоких значений. Так, например, при давлении в камере p 0,5 МПа и эффективной площади $S_{\text{эфф.к}}$ 1 м² тяговое усилие F достигает значения 500 кН (50986 кгс).

Экспериментально установлено, что наиболее эффективно применять устройство для запуска объектов цилиндрической формы, при этом в течение всего процесса разгона объекта эффективная площадь камеры постоянна и имеет максимальную величину (рисунок 1).

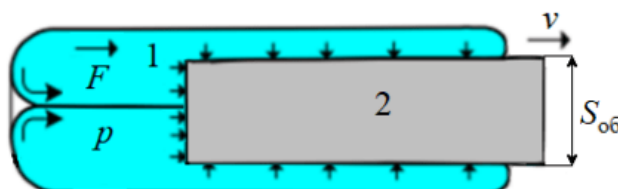


Рисунок 1. Схема разгона объекта торообразной оболочкой.

Оболочка 1 выталкивает объект 2 с постоянным усилием F (при условии, что давление p поддерживается на постоянном уровне). При этом эффективная площадь камеры $S_{\text{эфф.к}}$ принимается равной площади поперечного сечения запускаемого объекта $S_{\text{об}}$, поскольку значение площади внутреннего кольца торообразной камеры со стороны торца, противоположного направлению запуска стремится к нулю. На рисунке 2 изображены теоретические траектории полета объекта, запущенного пусковой установкой с торообразным камерным приводом.

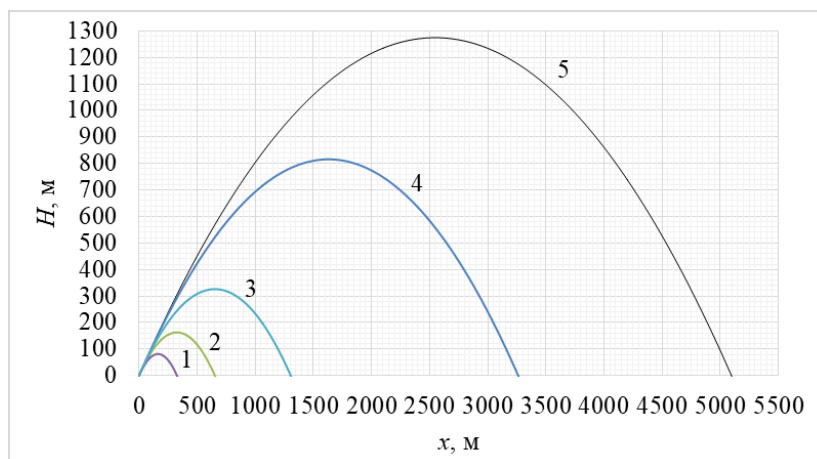


Рисунок 2. Теоретические траектории полета объекта (запуск под углом 45° к горизонту).

В качестве примера траектории построены в соответствии со следующими данными:

кривая 1 – при $m = 1$ кг, $l = 0,4$ м, $p = 0,2$ МПа, $S_{эфф.к} = 0,02$ м² ($v_0 = 56,6$ м/с);

кривая 2 – при $m = 1$ кг, $l = 0,4$ м, $p = 0,4$ МПа, $S_{эфф.к} = 0,02$ м² ($v_0 = 80$ м/с);

кривая 3 – при $m = 2$ кг, $l = 0,5$ м, $p = 0,3$ МПа, $S_{эфф.к} = 0,08$ м² ($v_0 = 109,5$ м/с);

кривая 4 – при $m = 2$ кг, $l = 0,5$ м, $p = 0,4$ МПа, $S_{эфф.к} = 0,16$ м² ($v_0 = 178,9$ м/с);

кривая 5 – при $m = 15$ кг, $l = 1,5$ м, $p = 0,5$ МПа, $S_{эфф.к} = 0,5$ м² ($v_0 = 223,6$ м/с).

В ходе расчетов траекторий были приняты следующие допущения: давление p постоянно; диссипативные силы не учтены. Для достижения необходимого значения $S_{эфф.к}$ объект может быть запущен в контейнере.

Выявленным новым перспективным направлением является применение пусковых установок с торообразным приводом в области безлюдных технологий. Известны устройства, предназначенные для перемещения рабочего органа (механической руки) в воздушном пространстве цехов, получившее название «манипланы» [4].

Возможность применения пусковой установки с камерным торообразным приводом в данной области обусловлена простотой конструкции установки, обеспечивающей ее надежность и продолжительное время наработки на отказ, что характеризуется низким

временем простоя производственного участка, на котором используется установка, для осуществления ремонтных работ. Устройство также отличается простотой управления (задают давления в оболочке и приводят в действие спусковой механизм [5], приводящий торообразную оболочку в состояние начала разгона).

Например, в производственных условиях установка с камерным торообразным приводом, имеющая небольшие габаритные размеры (длиной около 500 мм, и диаметром 110..120 мм) способна отправить объект диаметром 100 мм, длиной 450 мм и массой 1 кг при значении давления в камере 0,4 МПа на расстояние около 110 м при запуске под углом к горизонту 10° (рисунок 3).

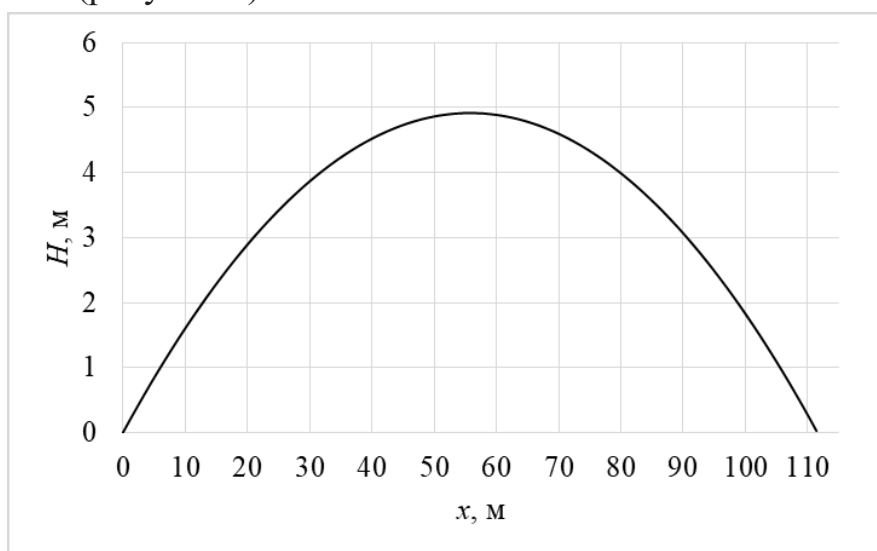


Рисунок 3. Теоретическая траектория движения объекта.

Дальность полета объекта x может быть увеличена за счет повышения его аэродинамических качеств, а давление в камере при этом уменьшено.

Обсуждение. Исходя из проведенных расчетов тягового усилия в зависимости от давления и эффективной площади, а также анализа полученных траекторий полета объекта, видно, что теоретически имеется возможность создания мощных пусковых установок, способных запускать объекты различного назначения по баллистической траектории на большие расстояния.

Возможно также создание компактных установок для применения их в условиях производственного цеха. Простота управления и конструкции делает пусковую установку с камерным торообразным приводом надежным и предсказуемым исполнительным устройством для применения ее в безлюдных системах автоматизации.

Заключение. Пусковые установки с камерным торообразным приводом эффективно применять для запуска объектов, для которых критически важна высокая начальная кинетическая энергия. Результаты анализа качественных характеристик устройства показывают его применимость в области безлюдных технологий.

По результатам расчетов и исследований выявлены также пути повышения эффективности работы пусковых установок с камерным торообразным приводом: 1) поиск и разработка эластомерных тканевых материалов, способных выдерживать высокое и сверхвысокое избыточное давление, для изготовления из них рабочей камеры пусковой установки, с целью возможности получения более высокого значения тяговой силы при сохранении габаритных размеров устройства; 2) разработка технического решения, позволяющего на всем пути разгона объекта поддерживать в оболочке постоянное значение давления.

Список источников

[1] Шишкин В.В., Акиншина А.В. *Способ диагностики технического состояния трубопроводов и устройство для его осуществления*. Патент РФ № 2445613, бюл. № 8, 2012, 7 с.

[2] Нгуен В.Х. *Обеспечение непрерывности процесса десорбции на основе использования дозаторов с торовым приводом*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2015, 20 с.

[3] Сысоев С.Н., Черкасов Ю.В., Федин А.В., Федина М.А. *Стартовое устройство*. Патент РФ № 2771300, бюл. №13, 2022, 10 с.

[4] Сысоев С.Н., Черкасов Ю.В., Воздуган А.А., Подъячев П.Н. *Привод с рекуперацией механической энергии (маниплан)*. Патент РФ № 116804, бюл. № 16, 2011, 12 с.

[5] Сысоев С.Н., Жулин С.В., Енюхин Е.С. *Стартовое устройство с торообразным силовым приводным механизмом. Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*, 2025, № 32, с. 57-62. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2025-32-57-62>

Автоматизированный сбор данных о качестве воды и санитарно-техническом состоянии систем горячего и холодного водоснабжения

Романов Роман Вячеславович¹ romanov.roman.5@yandex.ru

SPIN-код: 1148-2240

Семин Роман Васильевич¹ roma_murom@mail.ru

Горячев Максим Сергеевич¹ maximgoryachev97@yandex.ru

SPIN-код: 9921-7295

Стриканова Светлана Дмитриевна¹ strikanowa.swetlana@yandex.ru

¹ВлГУ, Владимир, Россия

Аннотация. В данной статье был рассмотрен современный подход мониторинга состояния труб в системе горячего и холодного водоснабжения, который основан на методах электропроводности, кислотности гидродинамических показателей состояния воды в системах водоснабжения. Были определены основные применяемые методы и инструменты интеграции данных контроля в системы мониторинга систем горячего и холодного водоснабжения.

Анализ состояния труб в системах горячего и холодного водоснабжения осуществляется в автоматизированном режиме. Для автоматизированного сбора данных применяется оборудование компании «ОВЕН». Данные передаются по каналам мобильной связи 4G. Доступ к данным о состоянии труб и качестве воды производится через облачный сервис.

В представленной работе была разработана структурная схема автоматизированного сбора данных о качестве воды и санитарно-техническом состоянии систем горячего и холодного водоснабжения, представлен макет системы.

Ключевые слова: централизованное водоснабжение, автоматизированный сбор данных, анализ качества воды, облачные технологии.

Automated data collection on water quality and sanitary condition of hot and cold-water supply systems

Romanov Roman Vyacheslavovich¹ romanov.roman.5@yandex.ru
SPIN-code: 1148-2240

Semin Roman Vasilyevich¹ roma_murom@mail.ru

Goryachev Maxim Sergeevich¹ maximgoryachev97@yandex.ru
SPIN-code: 9921-7295

Strykanova Svetlana Dmitrievna¹ strikanowa.swetlana@yandex.ru

Abstract. This article discusses a modern approach to monitoring the condition of pipes in a hot and cold water supply system, which is based on methods of electrical conductivity, acidity, and hydrodynamic parameters of the water condition in the systems. The main applied methods and tools for integrating monitoring data into monitoring systems of hot and cold water supply systems were identified. The analysis of the condition of pipes in hot and cold water supply systems is carried out in an automated mode. OWEN company's equipment is used for automated data collection. The data is transmitted via 4G mobile communication channels. Data on the condition of pipes and water quality is accessed through a cloud service. In the presented work, a block diagram of automated data collection on water quality and the sanitary condition of hot and cold water supply systems was developed, and a mock-up of the system was presented.

Keywords: centralized water supply, automated data collection, water quality analysis, cloud technologies

Введение. Системы водоснабжения являются неотъемлемой частью инфраструктуры городов и играют важную роль в обеспечении охраны здоровья и улучшения качества жизни населения. Но, несмотря на свою важность, они подвержены различным проблемам, требующим регулярного обследования для оптимизации работы и улучшения качества.

Большинство водопроводных труб, используемых в настоящее время, были установлены десятилетия назад и находятся в изношенном состоянии. С ростом городского населения к существующей сети добавляются новые трубопроводы разного возраста, материалов и размеров, тем самым осложняя задачу мониторинга эксплуатации и технического обслуживания [1]. В результате коррозионных процессов возникают утечки, что приводит к потере большого количества воды и ухудшению ее качества. Потери воды в водопроводных сетях достигают до 65% из-за утечек, связанных с

естественным старением труб, низким качеством материала труб, температурой и давлением, геологическими изменениями и т. д. [2,3]. Мониторинг в реальном времени и сбор данных имеют решающее значение для создания надежных и практичных информационных систем, который позволяет собирать данные о расходе и давлении воды практически в режиме реального времени [4].

Целью данной статьи является применение современных подходов для автоматизированного мониторинга состояния труб в системе горячего и холодного водоснабжения.

Материалы и методы. Для оценки качества воды может применяться лабораторный и производственный контроль. Он выполняется в местах забора воды из скважин, на пунктах очистки, в узловых точках сети централизованного водоснабжения и включает в себя комплекс мероприятий, по оценке органолептических, химических и биологических свойств воды. В рамках данной работы анализ качества воды производится с помощью датчиков, установленных непосредственно в системах водоснабжения, они непрерывно измеряют электропроводность уровень кислотности, гидродинамические показатели и передают данные в сеть. Локализовать места ухудшения санитарно-технического состояния систем горячего и холодного водоснабжения предлагается на основе пространственно-временной обработки данных из ключевых точек контроля, принимая во внимание пиковые значения давления, электропроводности и кислотности, при которых возможны повреждения сети [5]. Электропроводность воды формируется на таких показателях как температура воды, жесткость минерализация. Минерализация воды зависит от содержания ионов натрия, кальция, хлора, калия, гидрокарбоната, сульфата [6].

В системе мониторинга горячего и холодного водоснабжения используется следующее оборудование:

- Датчик давления жидкости ППД100. Датчик ПД100 представляет собой преобразователь давления с сенсором типа КНК (кремний на кремнии) с мембраной из нержавеющей стали с выходным сигналом 4...20 мА.

- Датчик электропроводности ЕС-3 с выходом 4 - 20 мА, 1мкСм/см-20МСм/см. Принцип действия датчика основан на изменении электропроводности между общим и сигнальным электродами в зависимости от содержания солей в воде.

- РН-метр рНМ1 предназначен для измерения уровня кислотности воды (рН), передачи данных в виде тока 4...20 мА. Прибор измеряет кислотность в диапазоне 0...14 рН.

- Сетевой шлюз – ПМ и ПВ ОВЕН. Данные с ключевых участков сети централизованного горячего и холодного водоснабжения будут передаваться по Ethernet, Wi-Fi, в местах, где отсутствует интернет, по сети LTE (4G), с использованием соответствующих шлюзов ПВ 210 и ПМ 210 от фирмы «ОВЕН», которые передают данные в облачный сервис OwenCloud.

б) Модуль аналогового ввода MB110-224.8А ОВЕН. Модуль предназначен для измерения аналоговых сигналов (4-20мА), преобразования измеренных величин в значение физической величины и последующей передачи этого значения по сети RS-485.

Для проведения мониторинга состояния труб в системах горячего и холодного водоснабжения была разработана схема подключения (Рисунок 1).

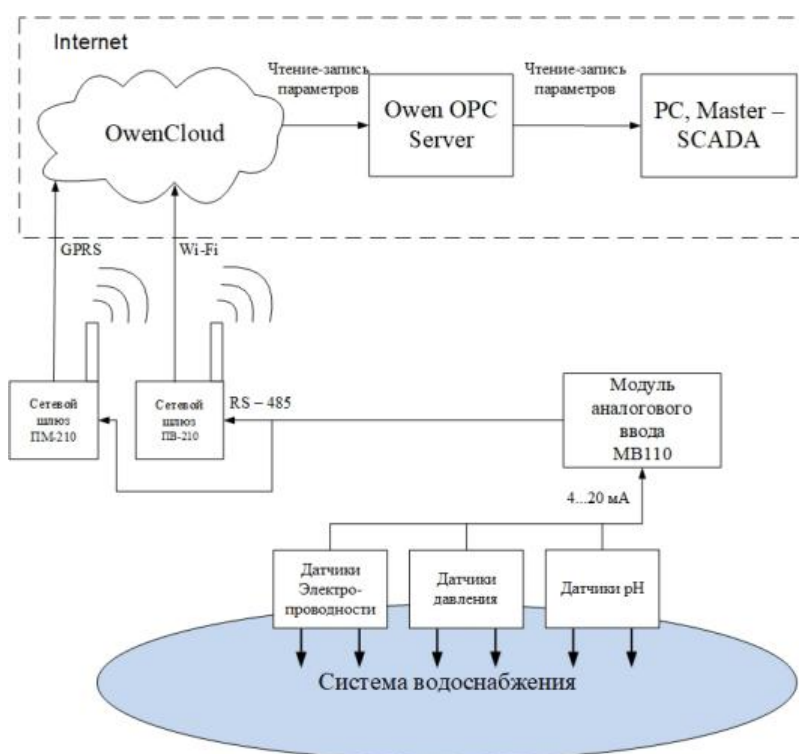


Рисунок 1. Схема системы мониторинга.

Результаты. В ходе работы была собрана система сбора данных о состоянии систем холодного и горячего водоснабжения по разработанной выше схемы и установлена в одной из котелен города Муром (Рисунок 2).



Рисунок 2. Система сбора данных о состоянии воды.

Для исследования будет анализироваться контур из 6 объектов (5 жилых домов и 1 детский сад). Датчики установлены на подаче в сеть (выходе горячей воды из теплообменника) и на входе в котельную в обратном контуре.

Обсуждение. На данном этапе проведены лабораторные исследования, подтверждающие теорию определения износа труб по показателям электропроводности, кислотности и гидравлического давления в системах водоснабжения [7]. Проведена установка оборудования в котельне на подаче и в обратном контуре. В дальнейшем будут проведены исследования по состоянию труб систем горячего и холодного водоснабжения в реальном времени длительный период с получением результатов, обработки и прогнозирования вероятности наступления аварийных ситуаций на исследуемом контуре котельной города Муром.

Заключение. В представленной статье был рассмотрен современный подход мониторинга состояния труб в системе горячего и холодного водоснабжения. Рассмотрено оборудование для получения данных об электропроводности, кислотности гидродинамических показателей состояния воды в системах водоснабжения. Для автоматизированного сбора данных применяется оборудование компании «ОВЕН», которое позволяет в онлайн режиме проводить мониторинг состояния труб от качества воды в системе горячего и холодного водоснабжения. Применение данных подходов позволит определить негативный сценарий долговременного изменения качества воды и технического состояния систем горячего и холодного водоснабжения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20069, <https://rscf.ru/project/25-21-20069/>

Список источников

- [1] Cen H., Huang D., Liu Q., Zong Z., Tang A. Application Research on Risk Assessment of Municipal Pipeline Network Based on Forest Machine Learning Algorithm. *Water*, 2023, 15(10):1964. <https://doi.org/10.3390/w15101964>
- [2] Navarro-Díaz A., Delgado-Aguíñaga J., Begovich O., Besançon G. Two Simultaneous Leak Diagnosis in Pipelines Based on Input-Output Numerical Differentiation. *Sensors*, 2021, 21, 8035
- [3] Тулакин А.В., Цыплакова Г.В., Амплеева Г.П., Козырева О.Н., Пивнева О.С., Трухина Г.М. Региональные проблемы обеспечения гигиенической надежности питьевого водопользования. *Гигиена и санитария*, 2016, Т. 95. №11, с. 1025-1028
- [4] Павлов Ю.Н., Кузьминский Р.А. Исследование вопросов мониторинга систем водоснабжения. проблемы и пути их решения. *Наука и техника транспорта*, 2016, №4, с.48-53
- [5] Романов Р.В., Кочеткова С.С. Разработка параметрической модели технического состояния централизованного водоснабжения. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2022, №10, с. 137-140
- [6] Анциферов С.А., Усманова Е.А. Анализ влияния внутренней коррозии на эксплуатацию трубопроводов. *Вестник НГИЭИ*. 2015. № 6 (49). С. 5-10.
- [7] Романов Р.В., Кочеткова С.С., Буров А.А. Проведение корреляционного анализа показателей химического состава воды от санитарно-технического состояния водопроводной сети. *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*, 2022, №1, с. 46-49.

УДК 620.178.152.32

**Конечно-элементное моделирование процесса
наноиндентирования изотропных вязкоупругопластичных
материалов**

Боровкова Татьяна Владимировна¹

borovkovatv@bmstu.ru

SPIN-код: 9648-7764

Гаврюшин Сергей Сергеевич¹

gss@bmstu.ru

SPIN-код: 3142-3809

Мурашов Михаил Владимирович¹

murashov@bmstu.ru

SPIN-код: 5043-2892

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В данной работе рассмотрена проблема моделирования процесса инструментального наноиндентирования в вязкоупругопластичные материалы. Для моделирования процесса наноиндентирования была разработана двумерная осесимметричная конечно-элементная модель, учитывающая упругопластические свойства материала образца. Сравнение прогноза модели с результатами наноиндентирования образцов стали 12X18H10T сфероконическим алмазным индентором с радиусом наконечника 10 мкм показало, что расхождение не превышает 7%. Показано, что учет вязкоупругопластических свойств материала необходим для повышения точности расчета. Разработанная модель может использоваться в базе данных цифровых паспортов материалов, а также при разработке портативных приборов неразрушающего контроля.

Ключевые слова: конечно-элементная модель, наноиндентирование, сфероконический индентор, база данных, моделирование

Finite element modeling of the process of nanoindentation of isotropic viscoelastic-plastic materials

Borovkova Tatyana Vladimirovna¹

borovkovatv@bmstu.ru

SPIN-код: 9648-7764

Gavryushin Sergey Sergeevich¹

gss@bmstu.ru

SPIN-код: 3142-3809

Murashov Mikhail Vladimirovich¹

murashov@bmstu.ru

SPIN-код: 5043-2892

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Annotation. This paper examines the problem of modeling instrumental nanoindentation in viscoelastic-plastic materials. To model the nanoindentation process, a two-dimensional axisymmetric finite element model was developed that takes into account the elastic-plastic properties of the sample material. A comparison of the model prediction with the results of nanoindentation of 12Kh18N10T steel samples using a spherical-conical diamond indenter with a tip radius of 10 μm showed that the shift does not exceed 7%. It is shown that taking into account the viscoelastoplastic properties of the material is necessary to improve the accuracy of the calculation. The developed model can be used in a database of digital material passports, as well as in the development of portable non-destructive testing devices.

Keywords: finite element model, nanoindentation, sphericoconical indenter, database, modeling

Введение. Метод инструментального индентирования основан на непрерывном измерении нагрузки и перемещения индентора при индентировании [1, 2]. На основании данных, полученных при индентировании, строится диаграмма нагружения в координатах

«приложенная нагрузка – глубина внедрения индентора». В результате анализа диаграммы могут быть получены такие механические характеристики исследуемого материала как модуль упругости, показатели твердости, коэффициент упругого восстановления, энергия деформации и другие [3-5]. Для получения механических характеристик могут быть использованы как феноменологические методики, так и численное моделирование [6]. Целью данной работы является создание верифицированной конечно-элементной модели процесса наноиндентирования металлов для наполнения базы данных цифровых паспортов материалов.

Метод решения. Разработана двумерная осесимметричная конечно-элементная модель системы «индентор со сферическим алмазным наконечником - цилиндрический образец из стали 12X18H10T». Модель наконечника индентора - сфера диаметром 10 мкм. Модель образца представляет собой цилиндр радиусом 100 мкм и высотой 100 мкм. Моделирование осуществлялось в программном комплексе ANSYS. Особое внимание было уделено контактному моделированию, а также выбору сетки для оптимальной производительности расчета. При моделировании наконечника индентора и образца был использован четырехузловой

четырехугольный элемент (PLANE182). В области предполагаемого контакта двух тел ожидалось возникновение высокой геометрической нелинейности, что потребовало создания сетки с плавным изменением ее плотности в зоне контакта, применения элементов, имеющих большую протяженность в направлении движения индентора для компенсации искажения формы. Для улучшения сходимости решения при моделировании контакта двух тел использовались контактные элементы на инденторе и сетка ответных контактных элементов на образце. При решении использовался метод штрафа с множителями Лагранжа. В модели учитывалось трение между индентором и образцом с коэффициентом трения равным 0,1.

Исходя из особенностей расчета (квазистатическое приложение нагрузки и необходимость моделирования упругопластической деформации) была выбрана модель однородного изотропного упругопластического материала с кусочно-линейным изотропным упрочнением (MISO). Вязкопластичность учитывалась с помощью модели Perzyna [7].

Наноиндентирование. В эксперименте, проведенном в ИПРИМ РАН на приборе NanoTest 600 в соответствии с ISO 14577, были исследованы два образца из стали 12X18H10T с различным качеством поверхности (для образца №1 $R_a = 0,096$ мкм, для образца №2 $R_a = 0,086$ мкм). Каждый образец представлял собой цилиндр диаметром 10 мм и толщиной 5 мм. Точность определения нагрузки на индентор в эксперименте составляла 60 мкН, а точность определения глубины индентирования составляла 0,04 нм. Нагрузка на образец увеличивалась с постоянной скоростью до достижения заданной максимальной нагрузки (50 мН и 200 мН) в течение 20 с. Таким образом, нагружение образцов производилось со скоростями 2.5 мН/с и 10 мН/с.

Анализ результатов и выводы. Проверка конечно-элементной модели в области упругопластической деформации осуществлялась путем сравнения ее прогноза с результатами наноиндентирования. Результаты эксперимента для разных максимальных значений усилия на инденторе и результат расчета численной модели показаны на рисунке 1.

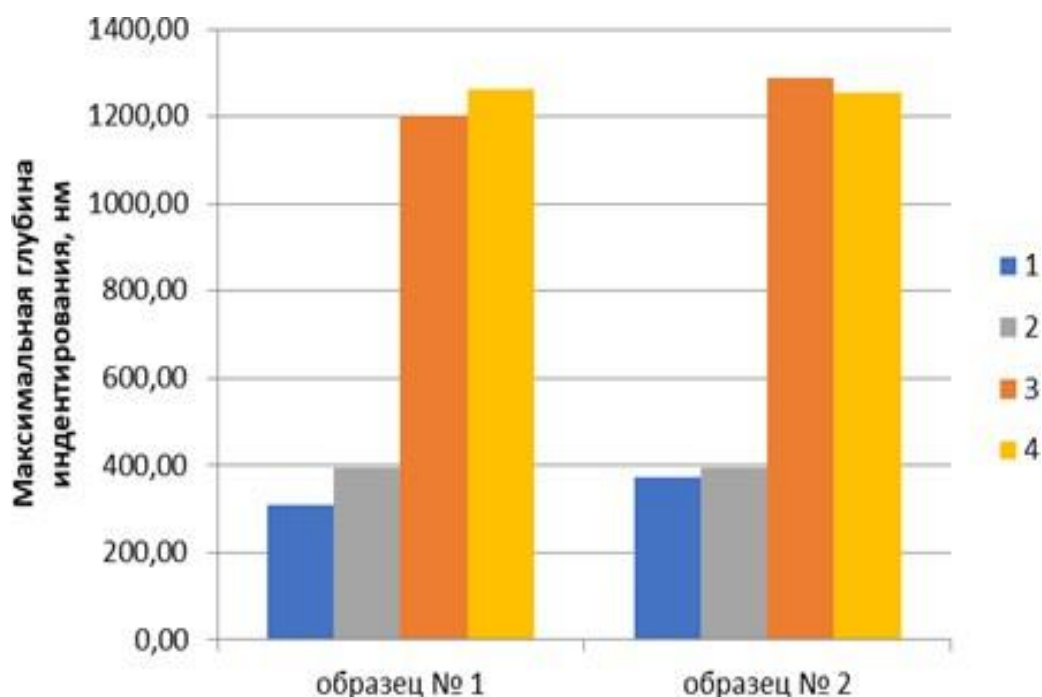


Рисунок 1. Максимальная глубина индентирования и результаты расчета конечно- элементной модели: 1 – эксперимент при нагрузке 50 мН; 2 – расчет при нагрузке 50 мН; 3 – эксперимент при нагрузке 200 мН; 4 – расчет при нагрузке 200 мН.

Видно, что рассчитанные величины погрешностей определения глубины внедрения в основном не превышают 7%, что является приемлемым. Наблюдаемые отклонения экспериментальных данных могут быть обусловлены изменениями микроструктуры материала, шероховатостью поверхности и погрешностью проведения эксперимента. Так же можно заключить, что влияние шероховатости поверхности на результаты тем меньше, чем выше нагрузка, прикладываемая к индентору.

Важной особенностью модели является учет вязкоупругопластических свойств материала. Для стали на наномасштабе предсказание модели без учета этого фактора не описывает наблюдаемый в эксперименте эффект ползучести (рисунок 2). На рисунке 3 показаны экспериментальные данные для образца №1 при нагрузке на индентор 50 мН и предсказание поведения материала КЭ моделью, учитывающей вязкоупругопластичность материала.

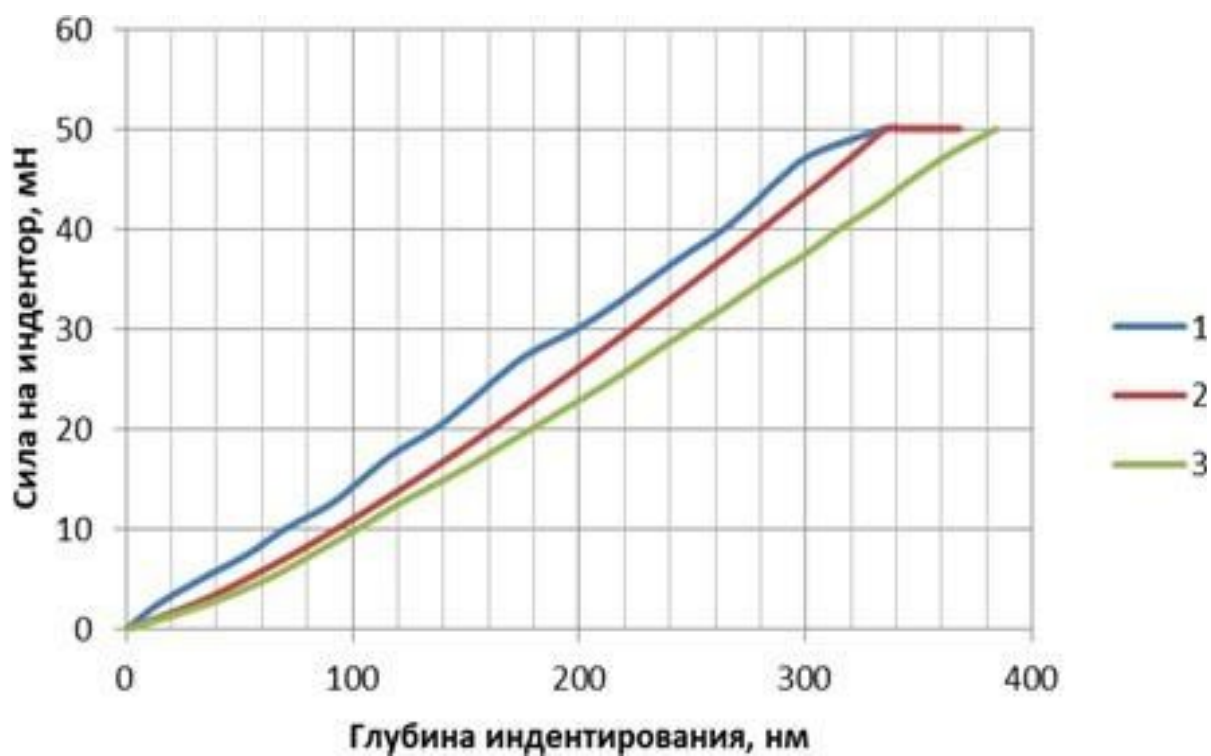


Рисунок 2. Максимальная глубина внедрения для образца №1 при нагрузке 50мН:

- 1- эксперимент;
- 2 – расчет КЭ модели с учетом ползучести;
- 3 – расчет КЭ модели без учета ползучести.

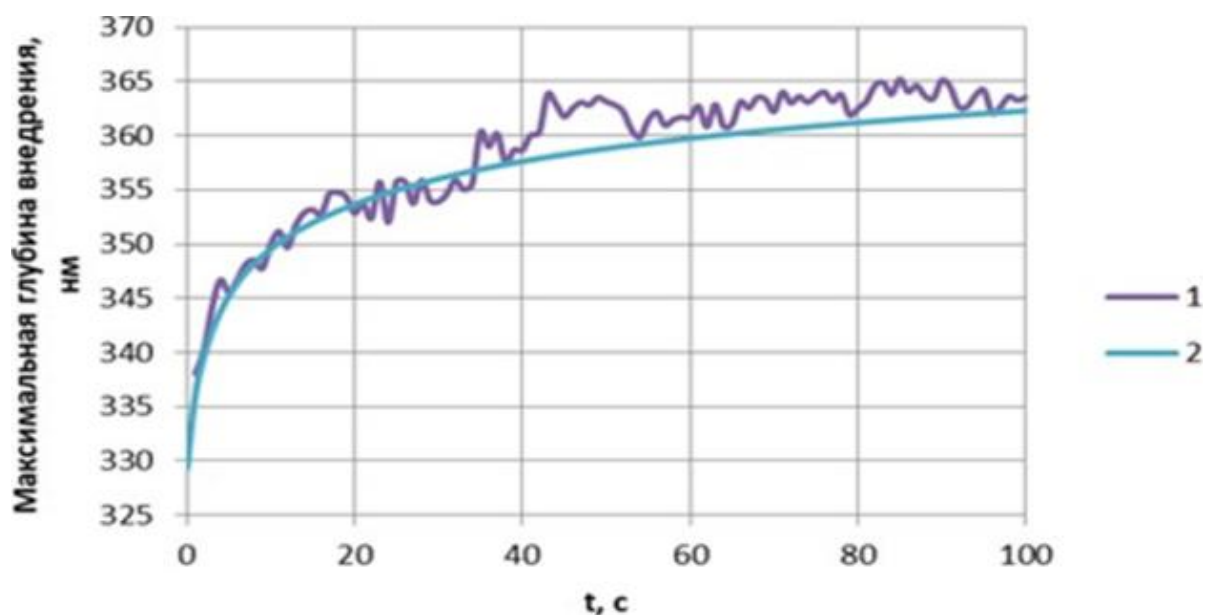


Рисунок 3. Зависимость «глубина индентирования — время» для образца № 1 (ползучесть):

- 1 – эксперимент (ползучесть);
- 2 – расчет КЭ модели с учетом ползучести.

С помощью разработанной конечно-элементной модели было определено поле напряжений и деформаций под индентором на всех этапах нагружения. При максимальном значении нагрузки на индентор (200 мН) глубина, на которой зарегистрированы напряжения большие или равные пределу текучести материала, в 20 раз превысила максимальную глубину внедрения индентора (h_{max}^m). Можно заключить, что это значение определяет минимальную высоту образца в конечно-элементной модели, позволяющая избежать влияния краевых эффектов на результат расчета.

Заключение. Была разработана конечно-элементная осесимметричная модель наноиндентора и образца из стали 12X18H10T, учитывающая вязкоупругопластическое поведение материала образца и разные скорости приложения нагрузки на индентор. Модель была верифицирована по результатам наноиндентирования образцов стали 12X18H10T сфероконическим алмазным индентором с радиусом наконечника 10 мкм. Расхождение результатов расчета с экспериментальными данными в основном не превысило 7%. Было показано, что при моделировании необходимо учитывать влияние вязкоупругопластических свойств материала для повышения точности расчета. Разработанная конечно-элементная модель может быть использована при создании базы цифровых паспортов материалов, а также при разработке портативных приборов для неразрушающего контроля конструкций летательных аппаратов и нефтегазового оборудования с помощью инструментального индентирования.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSN-2024-0082).

Список литературы

1. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.
2. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства материалов в субмикро- и наномасштабе // Физика твердого тела. 2021, Т.63, №1. С.3-42. DOI:10.21883/FTT.2021.01.50395.171
3. Fischer-Cripps AC. Nanoindentation. Berlin: Springer, 2004. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4757-5943-3> (дата обращения 17.09.2025)

4. Соловьев В.В., Гоголинский К.В., Усеинов С.С. и др. Особенности применения метода наноиндентирования для измерения твердости на наномасштабе // Нанотехника. Инженерный журнал. 2008. №1 (13). С. 111-115.
5. Sneddon, I.N. The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile // International Journal of Engineering Science, 1965, V.3(47), pp. 47–57.
6. Мурашов М.В. Численное моделирование термомеханического контакта упрочненных шероховатых поверхностей: Дис. д-ра техн. наук. М., 2020. 324 с.
7. Perzyna, P. The constitutive equations for rate-sensitive plastic materials // Quarterly of Applied Mathematics, 1963, 20(4), pp. 321–332.

Научное электронное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Материалы I Международной научно-практической конференции

19 – 21 ноября 2025 г.

Издается в авторской редакции

*За содержание, точность приведенных фактов и цитирование
несут ответственность авторы публикаций*

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10;
Adobe Reader; дисковод CD-ROM.

Тираж 8 экз.

Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.