

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»



На правах рукописи

Шейкин Максим Олегович

**Повышение эффективности электропневматических приводов
с дискретными распределителями на основе
многокритериальной оптимизации алгоритмов управления с
использованием анализа фронтов Парето**

Специальность 2.5.10 —

«Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника,
гидро- и пневмосистемы»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидат технических наук

Научный руководитель:

уч. степень, уч. звание
Фамилия Имя Отчество

Москва — 2024

Оглавление

	Стр.
Введение	6
 Глава 1. АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛЕЙ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	 11
1.1 Области применения пневмоприводных устройств и их особенности	11
1.2 Анализ и выделение основного направления производительности позиционного пневмопривода	18
1.3 Анализ задачи разгона и повышения максимальной скорости позиционного пневмопривода	22
1.4 Анализ задачи торможения позиционного пневмопривода	26
1.5 Анализ задач разгона и торможения в контексте системы управления	32
1.5.1 Исследование управления с использованием ШИМ	32
1.5.2 Исследование управления в скользящих режимах	38
1.5.3 Исследование управления с применением интеллектуальных алгоритмов	42
 Глава 2. СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМОПРИВОДА	 43
2.1 Структура и принцип работы исследуемого пневмопривода	43
2.2 Моделирование пневмоцилиндра	44
2.2.1 Уравнение движения пневмоцилиндра	45
2.2.2 Уравнения изменения давлений в полостях пневмоцилиндра	47
2.2.3 Уравнения изменения температур в полостях пневмоцилиндра	50
2.3 Моделирование силы трения	52
2.4 Моделирование силы реакции опоры	55
2.5 Моделирование дискретных распределителей	56
2.5.1 Уравнения массового расхода рабочего тела	56
2.5.2 Динамика переключения распределителей	58

2.6	Адаптация математической модели к эффективному численному расчету на ЭВМ	59
2.6.1	Векторизация уравнений	59
2.6.2	Оптимизация нелинейных функций	61
2.6.3	Аналитическое вычисление якобиана для численного решения ОДУ	63
2.7	Реализация математической модели	66
2.8	Верификация математической модели	68
2.8.1	Теоретические основы верификации	69
2.8.2	Проверка математической корректности	71
2.8.3	Анализ предельных случаев	74
2.8.4	Оценка физичности результатов моделирования	75
2.8.5	Заключение о достоверности модели	75

Глава 3. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ С ДИСКРЕТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ 76

3.1	ШИМ управление с использованием ПИД регулятора	77
3.1.1	Принципы реализации ШИМ в пневматических системах с дискретным управлением	77
3.1.2	Реализация ПИД-регулирования для пневмоприводов с дискретными распределителями	80
3.1.3	Модифицированные структуры ПИД регулятора	81
3.1.4	Применение усреднителя Смита для компенсации запаздывания	81
3.1.5	Каскадные и комбинированные структуры ПИД регуляторов	81
3.1.6	Математическое описание и анализ динамических характеристик	81
3.2	Управление в скользящих режимах	81
3.3	Нечеткое управление	81
3.4	Прогнозное управление	81

Глава 4. МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОПРИВОДА 82

4.1	Постановка задачи многокритериальной оптимизации параметров пневмопривода	82
4.1.1	Концепция оптимальности по Парето	83
4.2	Методы построения суррогатных моделей	86
4.2.1	Обзор методов суррогатного моделирования	87
4.2.2	Выбор оптимального метода построения суррогатных моделей	94
4.3	Разработка нейросетевой суррогатной модели	98
4.3.1	Архитектура модели	99
4.3.2	Процесс обучения	102
4.3.3	Оптимизация гиперпараметров	102
4.4	Алгоритм построения фронта Парето	102
4.4.1	Генерация начальной выборки методом латинского гиперкуба	102
4.4.2	Обучение ансамбля нейронных сетей	102
4.4.3	Генерация и отбор Парето-оптимальных решений	102
4.5	Визуализация и анализ фронта Парето	102
4.5.1	Методы визуализации многомерных фронтов Парето	102
4.5.2	Метрики сравнения фронтов Парето	102
4.5.3	Анализ чувствительности и робастности решений	102

Глава 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ИССЛЕДОВАНИЕ

	ПНЕВМОПРИВОДА С ДИСКРЕТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ . . .	103
5.1	Описание экспериментальной установки	103
5.1.1	Аппаратная часть установки	103
5.1.2	Програмное обеспечение установки	103
5.2	Методика проведения экспериментов	103
5.3	Экспериментальное исследование ШИМ управления с использованием ПИД регулятора	103
5.4	Экспериментальное исследование управления в скользящих режимах	103
5.5	Экспериментальное исследование нечеткого управления	103
5.6	Экспериментальное исследование прогнозного управления	103
5.7	Сравнительный анализ методов управления с расчетными данными	103

Глава 6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ С ДИСКРЕТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	104
6.1 Анализ эффективности алгоритмов по экспериментальным данным	104
6.2 Построение фронтов Парето для алгоритмов управления	104
6.3 Сравнительные анализ фронтов Парето	104
6.4 Оценка робастности алгоритмов управления	104
6.5 рекомендации по выбору алгоритма управления для различных условий эксплуатации	104
Глава 7. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ	105
7.1 Концепция гибридных алгоритмов управления	105
7.2 Разработка гибридного алгоритма управления на основе скользящего и прогнозного управления	105
7.3 Экспериментально исследование гибридного алгоритма управления	105
7.4 Сравнение фронтов Парето для гибридного и базовых алгоритмов управления	105
Заключение	106
Словарь терминов	107
Список литературы	108
Список рисунков	115
Список таблиц	116

Введение

Целью диссертационной работы является повышение эффективности электропневматических приводов с дискретными распределителями путем анализа и оптимизации различных алгоритмов управления. Работа направлена на разработку методики выбора оптимального алгоритма управления для пневмоприводов с учетом специфических условий эксплуатации и множества показателей качества, таких как точность позиционирования, частота переключений, и других релевантных показателей.

Предлагаемая методика основывается на многокритериальной оптимизации с использованием фронтов Парето и суррогатных моделей, что позволяет обеспечить баланс между различными требованиями к качеству работы пневмопривода.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать математические модели электропневматического привода с дискретными распределителями, которые учитывают нелинейную динамику системы и дискретный характер управляющих воздействий для различных алгоритмов управления.
2. Исследовать и проанализировать эффективность различных алгоритмов управления пневмоприводом, включая скользящее управление, управление с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), интеллектуальные алгоритмы (нечеткая логика, нейронные сети и другие) и предложенный алгоритм управления, с учетом их влияния на ключевые показатели качества работы привода.
3. Определить критерии оптимальности и ограничения для многокритериальной оптимизации параметров различных алгоритмов управления, учитывая широкий спектр показателей качества, таких как точность позиционирования, частота переключений, энергопотребление, надежность и быстродействие системы.
4. Разработать методику построения фронтов Парето для сравнительного анализа эффективности различных алгоритмов управления, используя суррогатные модели для снижения вычислительной сложности и объективной оценки компромиссов между показателями качества.

5. Провести численное моделирование работы пневмопривода под управлением различных алгоритмов, включая предложенный алгоритм, и построить фронты Парето для оценки их эффективности в условиях реальных эксплуатационных требований.
6. Выполнить сравнительный анализ полученных фронтов Парето для определения областей эффективности каждого алгоритма управления и выявить условия, при которых тот или иной алгоритм наиболее оптимален.
7. Разработать методику выбора оптимального алгоритма управления электропневматическим приводом, ориентированную на конкретные эксплуатационные условия и требования к качеству работы системы, включая предложенный алгоритм.
8. Провести экспериментальные исследования работы электропневматического привода с различными алгоритмами управления, в том числе с предложенным алгоритмом, для верификации полученных численных результатов и подтверждения адекватности разработанных моделей и методик в реальных условиях.

Оценить робастность исследуемых алгоритмов управления и предложенной методики к изменению параметров системы и ошибкам моделирования для обеспечения стабильной и надежной работы пневмопривода в реальных эксплуатационных условиях.

Научная новизна:

1. Разработана методика многокритериального сравнения различных алгоритмов управления электропневматическими приводами с дискретными распределителями на основе анализа фронтов Парето и суррогатных моделей, что позволяет объективно оценить компромиссы между различными показателями качества управления.
2. Впервые проведен комплексный сравнительный анализ эффективности скользящего управления, управления с ШИМ, интеллектуальных алгоритмов (нечеткая логика, нейронные сети и другие) и предложенного алгоритма, что позволяет выявить условия эффективности каждого алгоритма в зависимости от эксплуатационных требований.
3. Разработан новый алгоритм управления для электропневматических приводов, который демонстрирует преимущества по сравнению с тра-

диционными методами, обеспечивая более эффективное сочетание точности позиционирования и частоты переключений.

4. Предложен подход к выбору оптимального алгоритма управления на основе экспериментальных данных и численного моделирования, что позволяет адаптировать систему управления под конкретные условия эксплуатации, обеспечивая высокую робастность и надежность работы привода.
5. Проведены экспериментальные исследования для верификации численных моделей и методик, что подтверждает их адекватность и применимость для реальных промышленных задач.

Практическая значимость ...

Методология и методы исследования. В работе использовался комплексный подход, включающий как теоретические, так и экспериментальные методы исследования. Основу методологии составила многокритериальная оптимизация алгоритмов управления электропневматическими приводами с дискретными распределителями на основе анализа фронтов Парето и суррогатного моделирования. Теоретическая часть исследования включала разработку математических моделей пневмопривода, описывающих его динамику и взаимодействие с различными алгоритмами управления, включая скользящее управление, ШИМ, интеллектуальные алгоритмы (нечеткая логика, нейронные сети и другие), а также предложенный алгоритм.

Для снижения вычислительной сложности и ускорения процесса оптимизации использовались суррогатные модели, реализованные в виде нейронных сетей, что позволило эффективно оценивать компромиссы между различными критериями качества управления, такими как точность позиционирования, частота переключений и энергопотребление. На основе численного моделирования проводился сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов управления, строились фронты Парето, с помощью которых выявлялись оптимальные области применения каждого алгоритма.

Экспериментальная часть исследования включала проведение испытаний на реальном электропневматическом приводе для верификации разработанных моделей и методик. В ходе экспериментов проверялись основные положения теоретических расчетов, проводился анализ переходных процессов и проверялась робастность алгоритмов управления к изменению параметров системы. Результаты экспериментов использовались для коррекции моделей и уточне-

ния рекомендаций по выбору алгоритма управления в зависимости от условий эксплуатации. Такой подход обеспечил комплексную проверку эффективности разработанных методов и их применимость для реальных промышленных задач.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика многокритериального сравнения алгоритмов управления электропневматическими приводами с дискретными распределителями на основе фронтов Парето и суррогатного моделирования, позволяющая учитывать компромисс между различными показателями качества управления.
2. Комплексный сравнительный анализ скользящего управления, управления с ШИМ, интеллектуальных алгоритмов (нечеткая логика, нейронные сети) и предложенного алгоритма, который выявил условия эффективности каждого алгоритма в зависимости от эксплуатационных требований.
3. Новый алгоритм управления для электропневматических приводов, демонстрирующий улучшение сочетания точности позиционирования и частоты переключений по сравнению с традиционными методами.
4. Разработанная методика выбора оптимального алгоритма управления на основе численного моделирования и экспериментальных данных, обеспечивающая адаптацию системы управления под конкретные условия эксплуатации.
5. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие адекватность и применимость разработанных моделей и методик для решения практических задач управления электропневматическими приводами с дискретными распределителями.

Достоверность полученных результатов обеспечивается ... Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: перечисление основных конференций, симпозиумов и т. п.

Личный вклад. Автор принимал активное участие ...

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 4 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 1 патент и 1 программа для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и 0 приложений. Полный объем диссертации составляет 116 страниц, включая 21 рисунок и 5 таблиц. Список литературы содержит 65 наименований.

Глава 1. АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПОСТАНОВКА ЦЕЛЕЙ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Области применения пневмоприводных устройств и их особенности

Пневмоприводные устройства находят широкое применение в различных областях техники и промышленности; от автоматизации в машиностроительной области до химической и пищевой. Одной из первых работ в этой области была работа А.П. Германа «Применение сжатого воздуха в горном деле», опубликованная в 1933 году [44]. Исторический аспект развития пневмопривода исследован учеными, такими как И.И. Артоболевский, который сыграл важную роль в систематизации знаний по теории и проектированию пневмосистем.

Расчет данного класса приводов сопряжен со значительными трудностями. Это обусловлено тем, что движение твердых тел, таких как поршни, должно рассматриваться как следствие протекающих газо- и термодинамических процессов, характеризующих перемещения частиц воздуха. При этом необходимо комплексно учитывать сжимаемость воздушной среды, а также неравномерность перемещения механических элементов привода под воздействием изменяющихся нагрузок, сил трения, веса и иных факторов.

Ввиду высокой сложности данной предметной области, при разработке теоретических основ пневматических приводов исследователям приходилось вводить значительное количество упрощающих допущений, что в ряде случаев приводило к расхождениям между расчетными и экспериментальными данными.

Наиболее ранние работы были сосредоточены на разработке методов для приводов с постоянным противодавлением, равным атмосферному. В частности, Н.А. Бухарин [43] предложил метод определения времени срабатывания ПП, а Н.М. Маркевич [54] разработал альтернативную методику динамического расчета. Особо выделяется исследование, где с применением электронно-вычислительной техники были получены обобщенные графики и номограммы, позволяющие упростить практические расчеты пневматических приводов различных конструкций.

Обобщение результатов многочисленных теоретических и экспериментальных изысканий, а также сопоставление их с данными натурных испытаний,

позволило авторам разработать рациональные инженерные методики расчета пневматических приводов и определить оптимальные области их эффективного применения в зависимости от конструктивных параметров. В основу разработанных методик были положены фундаментальные труды ученых в области термодинамики, теории механизмов и машин, газовой динамики, в том числе работы В. Шюле [65], А.М. Литвина [51], И.И. Артоболевского [41], К.И. Страховича [59], И.П. Гинзбурга [47], М.А. Мамонтова [52; 53] и других.

Большая область применения ПП связана с особенностями рабочей среды — воздуха. В отличие от жидкости, которую при некоторых допущениях можно считать несжимаемой, воздух наоборот, имеет достаточно малую плотность порядка $\rho_{\text{воздух}} = 1,1839 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ при нормальных условиях и достаточно высокую сжимаемость, которой нельзя пренебречь при научных или инженерных расчетах. Также, из-за отсутствия смазочных свойств воздуха и наличия определенного содержания водяного пара, который может конденсироваться в рабочих камерах пневмодвигателей при интенсивных термодинамических процессах, возникает необходимость в предварительной обработке воздуха, чтобы обеспечить надлежащую работоспособность и увеличить срок службы приводных устройств.

Рассмотрим основные преимущества и недостатки пневмопривода в сравнение с остальными типами приводов.

Простота конструкции, экологическая безопасность и легкость в монтаже. Одно из главных преимуществ ПП заключается в их простоте и относительной дешевизне конструкции. Элементы, из которых состоит ПП — устройства подготовки воздуха, пневмодвигатели, распределители и т. д. достаточно просты в изготовлении и не требуют использования редких или дорогостоящих материалов, что снижает стоимость производства. Дополнительно, системы на основе ПП легко масштабируются, что позволяет использовать их в различных отраслях промышленности.

Рабочая среда ПП является более безопасным по сравнению с гидравлическими системами, где используются специальные, возможно воспламеняющиеся или токсичные, жидкости. Именно поэтому ПП находят широкое применение в промышленности, включая пищевую, химическую и нефтегазовую отрасли.

Воздух, использующийся в ПП, легко доступен, а также очень легко и быстро переходит из сжатого состояния в исходное (и наоборот), что позволяет практически моментально реагировать на изменения в системе. Управление ПП

может быть весьма простым или, наоборот, сложным и автоматизированным, что делает их гибким решением для большинства промышленных задач.

Кроме того, благодаря простой конструкции, предусмотрительному размещению деталей и отсутствию особых требований к условиям эксплуатации, монтаж ПП обычно не требует больших затрат по сравнению с другими видами приводов, что делает их еще более привлекательным вариантом для предприятий различных отраслей.

Надежность работы пневмопривода при тяжелых условиях окружающей среды. ПП, в меру своих особенностей, способностью работать в сложных и грубых условиях. Они способны выдерживать и продолжать работать в широком диапазоне температур, включая крайне высокие и крайне низкие. Это особенно важно для применения в отраслях, где температура может колебаться или когда оборудование подвержено значительным температурным перепадам.

Кроме того, ПП являются относительно невосприимчивы к воздействию пыли и влаги. Воздух довольно просто очистить от примесей и осушить (пыль, влага), предотвращая её засорение и обеспечивая надежную работу. Естественная устойчивость к влажности делает ПП подходящими для использования в условиях высокой влажности.

Эти свойства делают ПП отличными для использования в самых разных промышленных секторах, начиная от пищевой промышленности, где температура и влажность могут быть довольно высокими, до строительства и горнодобывающей промышленности, где оборудование может быть подвержено значительному загрязнению и пыли. Мало того, что они способны работать в этих условиях, они также продолжают работать надежно и эффективно.

Пожаро- и взрывобезопасность пневмопривода. ПП обладают высокой степенью пожаро- и взрывобезопасности благодаря отсутствию возможности искрообразования во время их работы. В отличие от электроприводов, где электрические искры представляют потенциальную опасность. Это делает ПП надежным и безопасным решением для применения в условиях, подразумевающих высокие требования по пожаро- и взрывобезопасности, таких как нефтегазовая промышленность и химическое производство. Эта характеристика делает ПП особенно привлекательными в контексте строгого соблюдения стандартов безопасности в промышленности.

Срок службы пневмопривода. ПП обладают значительно более длительным сроком службы по сравнению с гидро- и электроприводами. Это обусловлено несколькими ключевыми факторами.

Во-первых, ПП обычно имеют более простую конструкцию, чем гидро- и электроприводы, что снижает вероятность возникновения неисправностей и износа. Отсутствие сложных механизмов также означает, что ПП требуют меньше обслуживания и ремонта.

Во-вторых, ПП работают на сжатом воздухе, что исключает ряд проблем, с которыми часто сталкиваются гидро- и электроприводы. Например, в гидроприводе довольно часто возникают утечки масла, коррозия и износ подвижных механизмов, что может привести к сокращению срока службы и необходимости в ремонте. ПП, в свою очередь, избавлены от этих проблем, что способствует увеличению их долговечности.

Возможность развивать большую скорость выходного звена. ПП обладают способностью развивать высокие скорости на выходном звене, так как реализация больших скоростей в гидро- и электроприводах ограничивается их большей инерционностью (масса жидкости и инерция роторов) и отсутствием демпфирующего эффекта, которым обладает воздух. способность пневмопривода достигать высоких скоростей на выходном звене до $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ для пневмоцилиндра и до $100\,000 \text{ мин}^{-1}$ для пневмомоторов делает их привлекательным решением для использования во многих сферах промышленности. Это достоинство в полной мере реализуется в приводах циклического действия, где высокая скорость операций играет важную роль. Кроме того, ПП идеально подходят для использования в высокопроизводительных оборудовании, таких как манипуляторы, сварочные машины, плоскошлифовальные станки и другие виды оборудования, где необходимы быстрые и достаточно точные движения.

Невосприимчивость пневмопривода к радиационным и электромагнитным возмущениям. Пневмоприводы обладают преимуществом нечувствительности к радиационному и электромагнитному излучению благодаря отсутствию использования электрических компонентов [48; 49], высокой рабочей надежности и устойчивости к воздействию внешних электрических полей. Это делает пневмоприводы предпочтительным выбором в условиях, где требуется обеспечение стабильной работы оборудования в окружающей среде с высоким уровнем радиационного или электромагнитного излучения, таких как

в ядерной и космической промышленности, а также в устройствах, работающих вблизи силовых и электрических установок.

Возможность передачи пневмо энергии на относительно большие расстояния. ПП обладают преимуществом в передаче пневмоэнергии на относительно большие расстояния по пневмолиниям. В сравнении с электроприводом, ПП уступает в этом вопросе, однако превосходит гидропривод за счет меньших потерь по длине в протяженных магистральных линиях. Для электрической энергии характерно передача по линиям электропередач на значительные расстояния без существенных потерь, в то время как передача пневмоэнергии экономически целесообразна до нескольких десятков километров, что обычно реализуется в пневмосистемах промышленных предприятий с централизованным питанием от компрессорной станции.

Однако, несмотря на все свои преимущества ПП обладает рядом недостатков.

Высокий уровень шума. ПП при работе создает достаточно большое шумовое давление, прежде всего связанное с истечением сжатого воздуха из отверстий распределителей, дросселированием. Уровень шума может достигать порядка $130 \div 145$ дБ [17]. Наиболее шумными являются компрессорные установки, распределители, в которых одна из линий связана с атмосферой и пневмодвигатели.

Высокая сжимаемость и малая напряженность рабочей среды. Напряженность рабочей среды в ПП аналогична электроприводу и составляет $0.4 \div 1$ МПа [61], что примерно на 2 порядка меньше чем у гидропривода ($3 \div 100$ МПа [61]). Такое низкое значение напряженности рабочей среды делает ПП достаточно инерционным. При большой инерционной нагрузке выходное звено пневмопривода, начинает совершать колебательный процесс, а при достаточной силовой нагрузке, выходное звено начинает «продавливаться», что естественно снижает точность позиционирования или точность слежения за входным сигналом. Отсюда следует тот факт, что у пневмопривода возникает трудность в поддержании постоянной скорости движения и позиционирования в промежуточных положениях.

Большая стоимость пневмоэнергии. ПП обладает достаточно низким КПД, что увеличивает стоимость технологического процесса при той же полезной мощности, по сравнению с электро- и гидроприводом. КПД пневмопривода

может составлять порядка 10%, а в некоторых случаях и до 1%. Поэтому применение пневмопривода в длительных процессах является нецелесообразным.

Большие габаритные размеры. Из-за той же небольшой напряженности рабочей среды, средние габаритные размеры пневмопривода и электропривода при аналогичной мощности в несколько раз больше чем у гидропривода.

На основе описанных недостатков и преимуществ пневмопривода, а также беря во внимание характеристики различных типов приводов, можно составить сводную таблицу характеристик. Ниже в таблице 1.1 представлены сводные характеристики различных типов приводов.

Таблица 1 — Сравнение различных типов приводов

Показатель	Тип привода		
	Пневмопривод	Электропривод	Гидропривод
Развиваемая нагрузка	до 30 кН	до 1000 кН	до 3000 кН
Предельная нагрузка	допустима	ограничена силой тока	допустима
Скорость передачи энергии	ограничена скоростью распространения продольной волны в среде. (При нормальных условиях теоретический максимум $331,45 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$)	ограничена скоростью распространения электромагнитной волны. (При нормальных условиях теоретический максимум $299\,792\,458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$)	ограничена скоростью распространения продольной волны в среде. (При нормальных условиях $1390 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ для машинного масла)
Передача энергии на расстоянии	до 1000 м	до 100 м (при большой силе тока)	100 м
Накопление энергии	легко осуществимо	затруднительно	затруднительно
Линейное движение	легко осуществимо	затруднительно	легко осуществимо
Вращательное движение	легко осуществимо	легко осуществимо	легко осуществимо
Максимальная линейная скорость исполнительного механизма	10 м^2	зависит от устройства и конкретных условий	$0,5 \text{ м}^2$

Продолжение таблицы 1

Показатель	Тип привода		
	Пневмопривод	Электропривод	Гидропривод
Экологичность	безвреден из-за использования атмосферного воздуха	утечки масла, которые являются токсичными отходами для окружающей среды	создает зачастую маломощный электромагнитный фон
Точность позиционирования	1 мкм	1 мкм	100 мкм

В основном при выборе типа привода оказывают влияние следующие факторы: закон движения выходного звена, качество выполнения технологических операций, стоимость всего оборудования, энергоэффективность, эксплуатационные параметры, экологические характеристики, компоновка и технологические возможности элементов оборудования, система управления, доступность и однотипность источников энергии, пожарная и взрывоопасность и т. д., и благодаря своим преимуществам, ПП особенно широкое применение нашли в цикловой автоматике. Где требуются высокие скорости движения и достаточно точное позиционирование.

Однако, во многих случаях целесообразно применять комбинированные системы приводов, такие как электрогидравлические, электропневматические [58; 60]. Их особенность состоит в том, что они используют преимущества обоих исполнений. Появляется возможность точного позиционирования в промежуточных положениях. Точное слежение за определенной траекторией движения, которая достаточно простым способом можно задать в микроконтроллере. Таким образом появляется грамотное разделение обязанностей, где за непосредственное движение объекта регулирования отвечает ПП, а обработка информации приходится электронно-вычислительными средствами.

1.2 Анализ и выделение основного направления производительности позиционного пневмопривода

Классификация пневмоприводов может осуществляться по нескольким ключевым критериям, таким как тип движения объекта регулирования и способ управления. На основе этих критериев ПП подразделяются на два основных типа: цикловые и следящие. Особый интерес представляет подкатегория следящих ПП — позиционные приводы. Рисунок 1.13 иллюстрирует схему классификации ПП согласно указанным критериям.

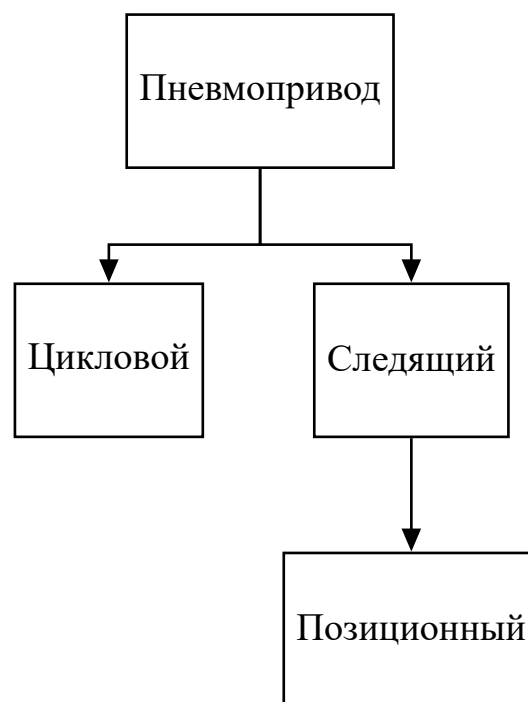


Рисунок 1.1 — Классификация пневмопривода

Одним из первых исследователей позиционных ПП является Филлипов И. Б. В своей работе [62] автор рассматривает вопрос расширения функциональных возможностей промышленных роботов, оснащенных ПП, за счет внедрения в их конструкцию принципиально новой схемы ПП с переменной структурой. Предлагаемая автором система привода способна работать в двух различных режимах - релейном и следящем. Предлагаемая структура представлена на рисунке 1.2

На участках разгона и установившегося движения рабочего органа промышленного робота ПП функционирует в релейном режиме, аналогично традиционным решениям. Однако при осуществлении торможения и точного позиционирования привод переключается в следящий режим работы. Это достигается путем введения в схему дополнительных элементов, таких как

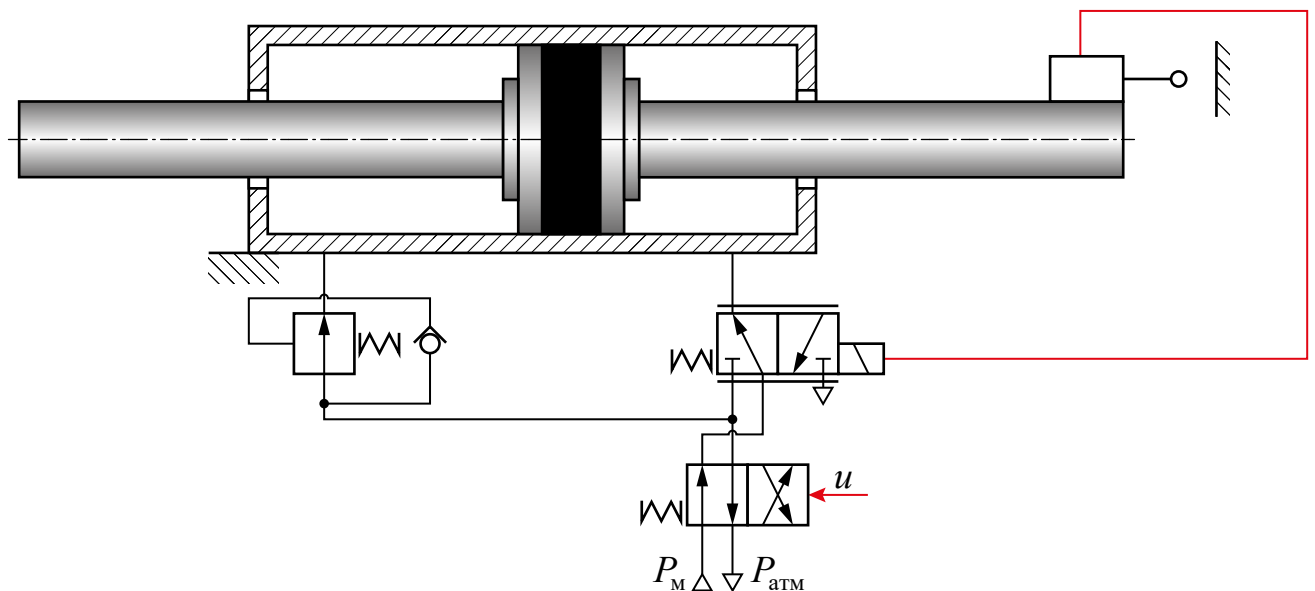


Рисунок 1.2 — Типовая схема следящего пневмопривода

пропорциональный распределитель и датчик обратной связи, установленный непосредственно на РО.

Ключевой особенностью предлагаемой автором конструкции пневмопривода является возможность позиционирования рабочего органа в любой точке по ходу поршня пневмоцилиндра. В отличие от традиционных приводов, имеющих ограниченное число точек позиционирования, в данной схеме параметры привода, такие как давления, расходы и объемы полостей, могут изменяться в зависимости от текущей координаты поршня в точке позиционирования.

Автором упоминается, что к позиционным приводам, в том числе пневматическим с позиционированием в следящем режиме, предъявляются ключевые требования, связанные с обеспечением высокой точности остановки рабочего органа в заданной точке, устойчивости состояния равновесия и минимального перерегулирования при торможении [64]. Данные требования к качеству переходного процесса были учтены автором при исследовании динамики предлагаемого пневмопривода с переменной структурой.

Таким образом можно утверждать, что точки зрения схемотехники, позиционные ПП идентичны следящим и также способны отслеживать непрерывный входной сигнал. И в современных реалиях для этой цели используются специальные пропорциональные распределители, золотник которых может занимать промежуточные положения. Подобные системы отличаются большей сложностью и, соответственно, более высокой стоимостью. Они обеспечивают точное воспроизведение движения объекта регулирования в соответствии с заданным

алгоритмом. Вероятность ошибки при обработке заданной траектории ограничивается точностью и быстродействием измерительных и управляющих устройств, а также алгоритмом управления. Основными элементами системы являются:

1. Датчики снимающие те или иные физические параметры пневмопривода (положение объекта регулирования, давления в полостях пневмодвигателя и т. д.) в процессе работы;
2. Системы сбора информации и электронно-вычислительные устройства задающие управляющий сигнал для регулирующего оборудования;
3. Исполнительное оборудование выполняющее перемещение объекта регулирования (пневмомоторы, пневмоцилиндры);
4. Направляющее и регулирующее оборудование (распределители, клапана и т. д.);
5. Энергообеспечивающие устройства (компрессорные станции, устройства подготовки воздуха).

На рисунке 1.3 представлена типовая схема следящего пневмопривода.

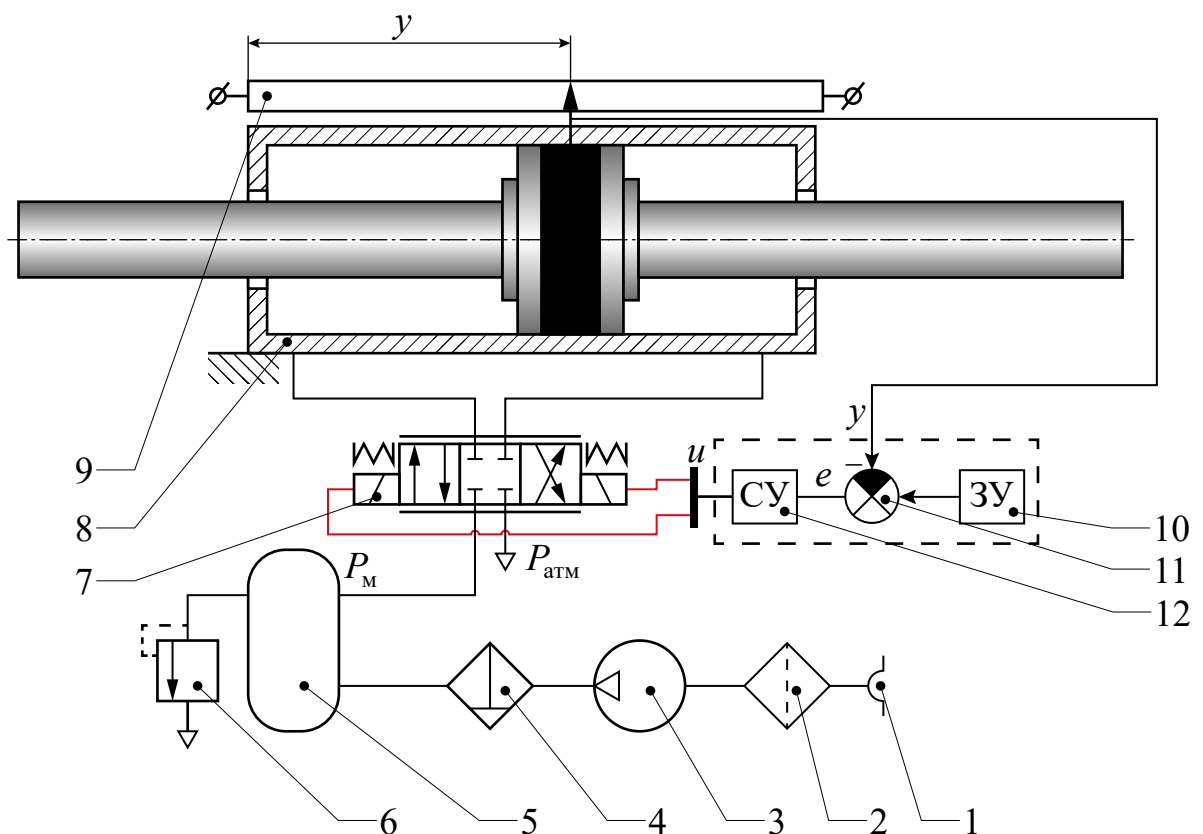


Рисунок 1.3 — Типовая схема следящего пневмопривода

На представленном выше рисунке 1.13: 1 — воздухозабор; 2 — воздушный фильтр; 3 — компрессор; 4 — влаго-маслоотделитель; 5 — ресивер; 6 — предохранительный клапан; 7 — пропорциональный распределитель 4/3; 8 —

пневмоцилиндр; 9 — потенциометрический датчик положения; 10 — задающее устройство; 11 — сравнивающее устройство; 12 — система управления.

Однако для позиционных пневмоприводов, задача которых заключается в позиционировании в заданной координате без отработки определенной траектории, использование такой структуры является избыточным. В этом случае целесообразно упрощение схемы за счет применения дискретных распределителей. Один из возможных вариантов исполнения пневмопривода с дискретным управлением показан на рисунке 1.4.

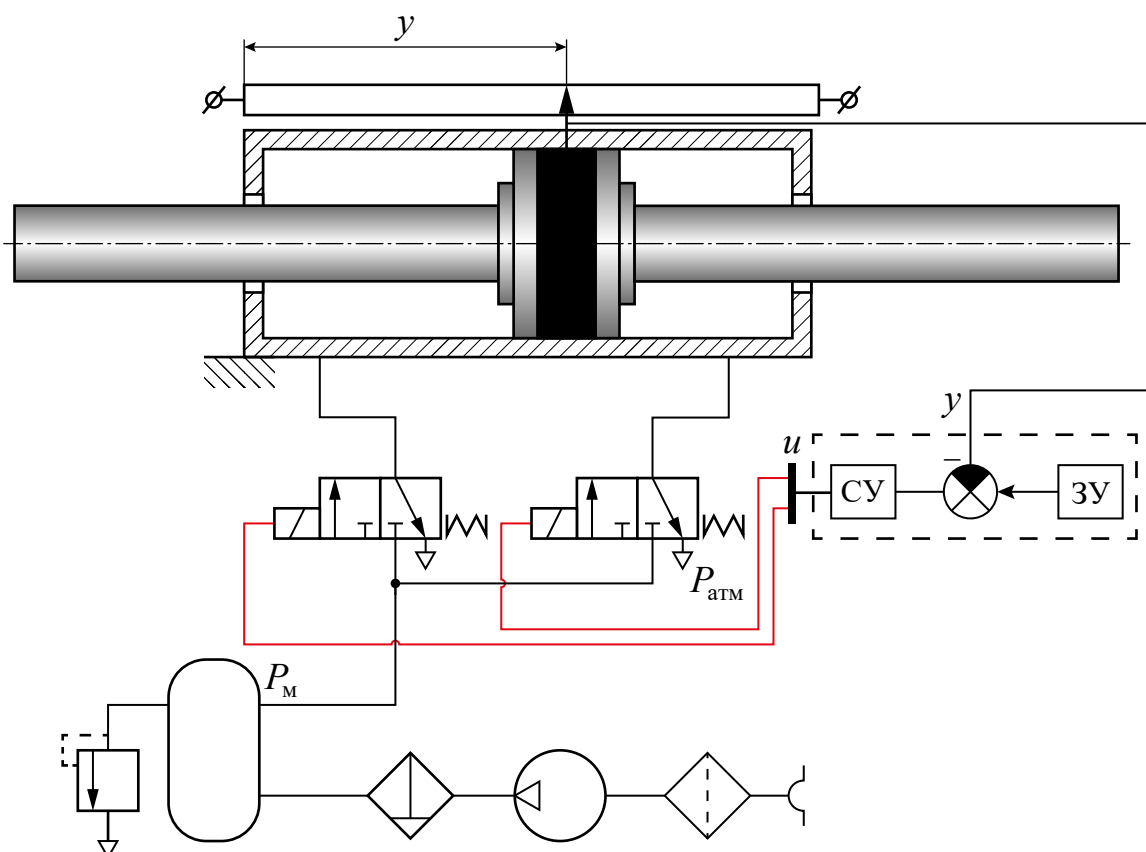


Рисунок 1.4 — Типовая схема позиционного пневмопривода с дискретным управлением

Поскольку, как было упомянуто ранее, нет необходимости отрабатывать конкретную траекторию движения, то на рисунке 1.5 можно представить идеализированный процесс позиционирования ОП [].

Согласно представленному рисунку видно, что идеализированный процесс позиционирования состоит из трех этапов:

1. разгон с постоянным ускорением;
2. движение с постоянной скоростью;
3. торможение с постоянным ускорением.

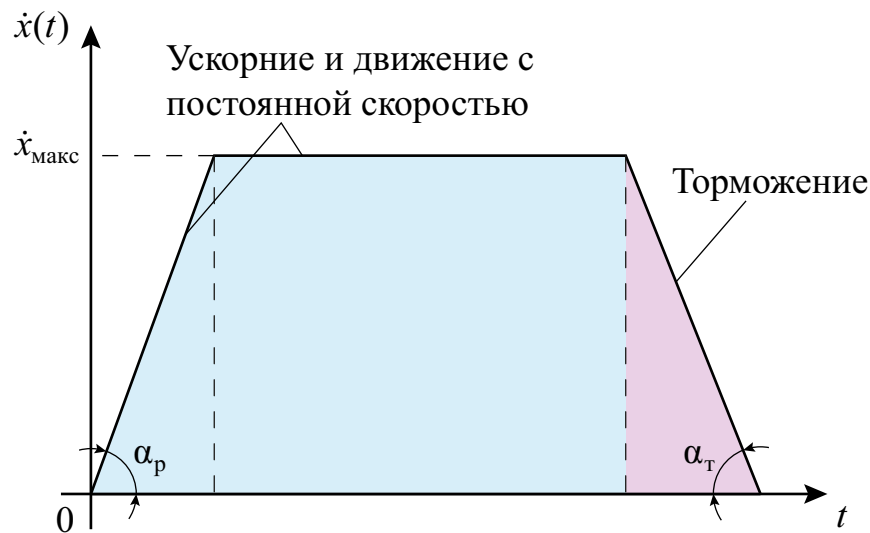


Рисунок 1.5 — Идеализированный закон движения РО

Основополагающими этапами, которые определяют быстродействие системы, являются — этап разгона до максимальной скорости и этап торможения до точки позиционирования.

Чтобы оптимизировать работу позиционного ПП и повысить его эффективность, необходимо детально рассмотреть каждый из этих ключевых этапов. Анализ особенностей разгона до максимальной скорости и торможения до точки позиционирования позволит выявить потенциальные области для улучшения и определить наиболее подходящие методы и подходы для достижения оптимальной производительности системы.

Разберём подробно данные основополагающие этапы, уделяя особое внимание факторам, влияющим на быстродействие системы, а также рассмотрим возможные пути повышения эффективности каждого этапа. Это позволит сформировать целостное представление о функционировании позиционного ПП и определить наиболее перспективные направления совершенствования.

1.3 Анализ задачи разгона и повышения максимальной скорости позиционного пневмопривода

Как было сказано ранее, основным исследователем в области ПП устройств является Е.В. Герц. В работах [45; 46] проанализирована проблема повышения быстродействия и производительности пневматических приводов в различных

отраслях машиностроения. Рассмотрены вопросы динамики, составлены математические модели, на основе которых возможно произвести расчет высокоскоростных ПП. Отмечено, что типовые ПП, выпускаемые промышленностью, обладают недостаточной скоростью рабочих органов — не более $0,5 \div 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. Это значительно ниже требований ряда ответственных технологических процессов, где необходима скорость $5 \div 20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$, например, при клеймении, маркировке, в ударных системах.

Для решения данной проблемы автор предлагает использование более совершенных высокоскоростных ПП. Основной принцип повышения скорости рабочих органов в таких приводах заключается в обеспечении значительного перепада давлений на рабочем поршне. Этого удастся достичь за счет введения в конструкцию дополнительной встроенной полости-резервуара, из которого сжатый воздух поступает непосредственно в рабочую полость привода. При этом давление в рабочей полости можно поддерживать близким к магистральному ($0,5 \div 0,7 \text{ МПа}$), а в выхлопной — стремиться к атмосферному, создавая, таким образом, необходимый большой перепад. Кроме того, увеличение площади поршня также способствует росту ускорения, но этот путь ограничен требованиями к компактности и массе привода.

Проведенные исследования и практический опыт эксплуатации, по мнению автора, показали, что высокоскоростные ПП со встроенным резервуаром имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными аналогами. Они позволяют значительно увеличить рабочее усилие и скорость поршня, повысить энергетическую эффективность механизма за счет более рационального расширения воздуха, обеспечивают возможность точной регулировки выпуска воздуха из резервуара, а также увеличивают ударную мощность рабочих органов. Такие приводы продемонстрировали скорости поршня до $5,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ на коротких ходах. Вместе с тем, их конструкция несколько сложнее типовых, и они требуют больших затрат на подготовку и расход сжатого воздуха.

Автор отмечает, что использование высокоскоростных ПП со встроенным резервуаром является эффективным решением для повышения быстродействия и производительности ряда ответственных технологических процессов в современном машиностроении.

В работе [42] рассматривался выбор оптимальных параметров управления пневматическим приводом промышленного робота. Целью было обеспечение высокой скорости работы при сохранении требуемой точности позиционирования.

Авторы Л.В. Божкова и О.А. Дащенко предложили повысить быстродействие путем одновременной работы динамически независимых узлов привода. Это позволяет избежать последовательной активации пневматических двигателей, что является типичной практикой для современных промышленных роботов.

Для реализации программного управления без обратной связи, авторы дают ряд рекомендаций по наладке системы. Это позволяет сократить время переналадки, обеспечить плавность и безударность движения.

Таким образом, предложенный подход направлен на повышение производительности промышленных роботов с пневматическим приводом без ущерба для точности позиционирования.

В патенте [56] предложена конструкция позиционного пневмопривода, в которой управляющая полость исполнительного пневмоцилиндра сообщена с регулируемым дозатором в виде плавающего поршня с дросселирующим каналом. Запорный элемент входной камеры дозатора жестко связан с плавающим поршнем, а выходная камера дозатора постоянно сообщена с управляющей полостью пневмоцилиндра.

Повышение производительности пневмопривода достигается благодаря созданию управляемого перепада давления на быстроперемещающийся плавающий поршень дозатора из-за дросселирования потока через канал, а также за счет упрощения конструкции путем жесткой связи запорного элемента с поршнем и обеспечения быстрой прямой подачи рабочей среды из выходной камеры дозатора в управляющую полость цилиндра. Это ускоряет процессы подачи и перекрытия рабочей среды, повышая быстродействие и производительность пневмопривода.

В следующем патенте [57] подошли к вопросу повышения быстродействия с точки зрения систем управления. Автором предложена конструкция позиционного пневмопривода, которая обеспечивает повышение его быстродействия.

Ключевым элементом изобретения является использование специальной схемы управления пневмораспределителями и пневмоклапанами. Она позволяет осуществлять быстрый выхлоп рабочей среды из полостей пневмоцилиндра при реверсе движения поршня.

В типичных пневмоприводах при реверсировании возникает необходимость создания разности давлений в рабочих полостях цилиндра для изменения направления движения поршня. Это приводит к появлению выстоя поршня в точке остановки, что снижает быстродействие системы.

Предлагаемое техническое решение устраняет данный недостаток за счет управляемой отсечки полостей цилиндра от магистрали слива. Когда поршень подходит к точке реверса, полость, из которой будет происходить выхлоп, отсекается от магистрали слива на таком уровне давления, который обеспечивает быстрое преодоление сил трения и ускорение поршня в обратном направлении. Это позволяет практически исключить выстой поршня и сократить длительность переходных процессов позиционирования.

Управление пневмораспределителями и клапанами осуществляется программным устройством на основе информации о текущем положении поршня и давлениях в полостях. Таким образом, система автоматически подстраивается под динамические характеристики привода, обеспечивая оптимальный режим работы.

В результате применения данной конструкции пневмопривода достигается значительное, до $3 \div 5$ раз, повышение его быстродействия по сравнению с традиционными решениями. Это позволяет повысить производительность автоматизированного оборудования, использующего такие ПП.

Развитие ПП шло по пути повышения ускорения и максимальной скорости движения рабочих органов. Это достигалось за счет использования более совершенных конструкций, обеспечивающих значительный перепад давлений на поршне, а также совершенствования систем управления для оптимизации процессов реверсирования движения поршня. Эти исследования позволяли существенно увеличить скорость и ускорение рабочих органов по сравнению с типовыми решениями.

Параллельно с этим, развивались и исследования, направленные на точное позиционирование пневмопривода в момент останова. Данный вопрос напрямую связан с эффективным торможением рабочих органов. Таким образом, исследователи ПП решали задачу не только повышения динамических характеристик, но и обеспечения точного позиционирования в конечных точках.

Однако на данный момент, несмотря на достигнутые успехи в обеих областях, исследования практически не продолжаются. Для промышленности необходимы решения, в которых баланс между скоростью и точностью позиционирования является определяющим фактором.

1.4 Анализ задачи торможения позиционного пневмопривода

Одним из первопроходцев, начавший комплексное исследование задач торможения и позиционирования РО ПП в заданной точке является А.А. Парой. В своей работе [55] автор статьи отмечает, что более 40% современных промышленных роботов используют пневматические приводы, что объясняется их высокой надежностью и низкой стоимостью. ПП применяются в качестве основного привода в промышленных роботах с циклическим управлением и грузоподъемностью до $20 \div 30$ кг. Конструктивное решение таких роботов предполагает использование длинноходовых пневмоцилиндров, которые позволяют реализовать режим торможения в конце хода с помощью специальных тормозных устройств.

Согласно работе, существует два наиболее распространенных способа задания тормозного усилия в выхлопной полости пневмопривода. Первый способ заключается в резком уменьшении площади сечения выхлопного отверстия в определенной точке хода с последующим поддержанием этой площади постоянной до конца хода. Второй способ предполагает полное перекрытие площади сечения выхлопного отверстия на первом этапе торможения с последующим открытием до определенной величины и уменьшением до нуля по определенному закону на втором этапе. Автор статьи предлагает рассмотреть график, иллюстрирующий эти два режима (рисунок 1.6).

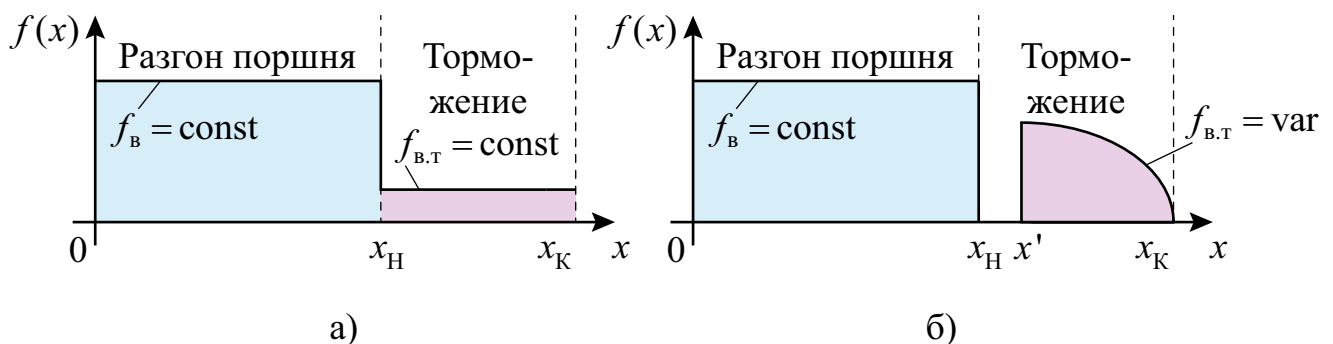


Рисунок 1.6 — Режимы торможения

Для проектирования тормозных устройств, использующих указанные способы, необходимо определить ряд параметров, таких как координата начала торможения, площадь сечения выхлопного отверстия, а также дополнительные координаты и закон изменения площади выхлопа для второго способа. Автор статьи приводит математические модели, основанные на термодинамических и механических законах, для расчета этих параметров.

Дальнейшей степенью развития стало комплексное рассмотрение способов торможения ПП в статье «К вопросу выбора способа торможения пневмоприводов с большими присоединенными массами» Г.А. Крутикова, А.И. Кудрявцева и Л.А. Пекаря [50] рассмотрено 12 схем торможения ПП, разделенные на 3 основные группы (I, II, III), показанные на рисунке 1.7.

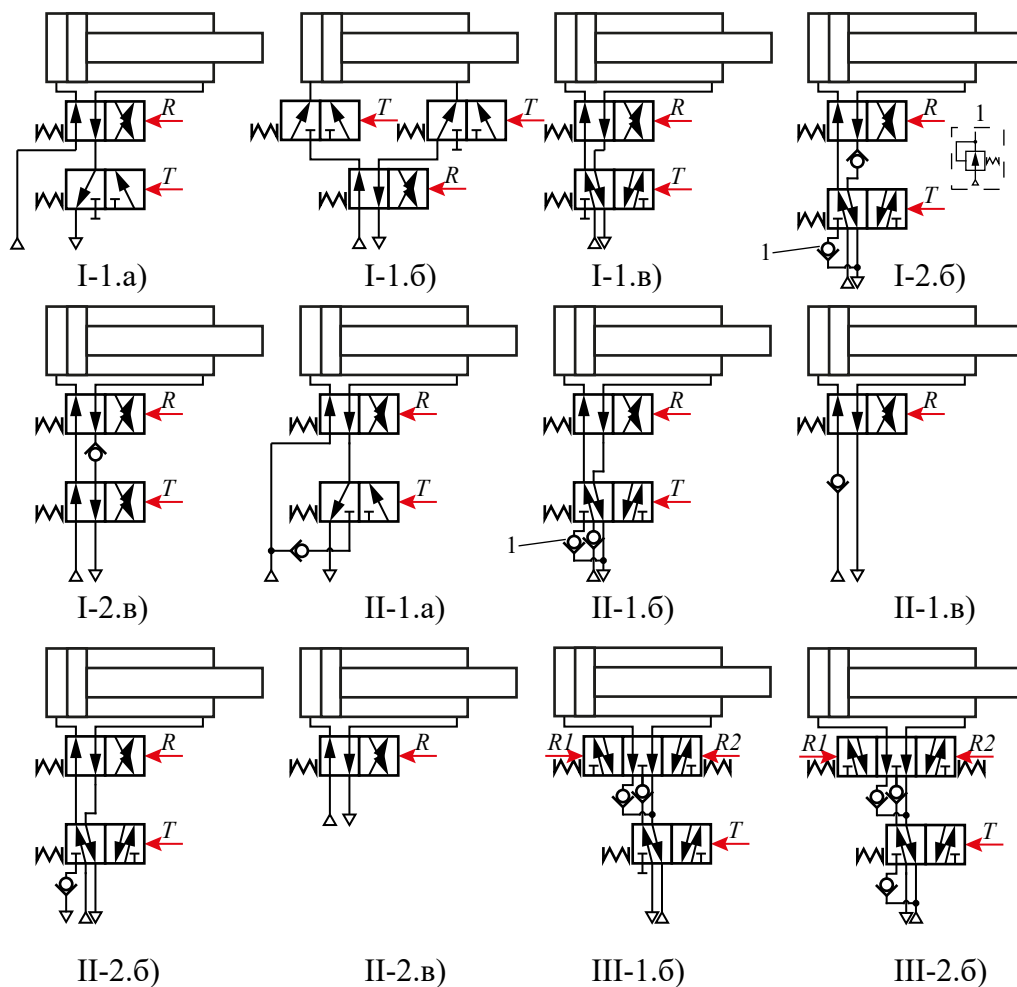


Рисунок 1.7 — Эффективные схемы торможения ПП

Отличительной особенностью этих схем является отсутствие регулируемых дросселей и емкостей — настройка оптимального режима торможения осуществляется только изменением тормозного пути.

Оценка эффективности каждой схемы осуществлялась по ряду ключевых критериев: время срабатывания ПП, относительная масса сжатого воздуха, потребляемого за один цикл, осредненный за цикл КПД ПП, максимальное ускорение при торможении, максимальная степень сжатия воздуха в тормозной полости, относительная стоимость аппаратной реализации и относительный тормозной путь. Для объективного сравнения каждой схеме была дана оценка в

баллах от 1 до 10 по каждому из показателей, причем максимальный балл присваивался схеме с наилучшим значением параметра. Коэффициенты весомости различных критериев были определены экспертным методом в соответствии с рекомендациями.

Наилучшие комплексные показатели качества продемонстрировали схемы III-2.б и III-1.б, которые, несмотря на более высокую стоимость реализации, обладают лучшими энергетическими характеристиками, высоким быстродействием и более плавным режимом торможения. Принципиальное отличие этих схем группы III заключается в том, что в них используется не только вторая составляющая удельной работы сжатого воздуха (изотермическое расширение), но и его потенциальная энергия, что существенно повышает КПД ПП.

Особого внимания заслуживает схема I-2.б с обратным клапаном, которая позволяет устранить недостатки схемы I-1.б с высокими пиковыми ускорениями и отскоком поршня. Максимальное ускорение в этом случае снижается с $15,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ до $4,16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$, отскок минимален, а время срабатывания составляет 1,05 с. Энергетические характеристики также улучшаются за счет частичной рекуперации воздуха из тормозной полости.

Дальнейшее улучшение режима торможения обеспечивает модификация схемы I-2.б с установкой редукционного клапана вместо обратного. Это позволяет реализовать практически равнозамедленный режим торможения с постоянным отрицательным ускорением $1,38 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$, полностью устраняет отскок поршня и обеспечивает предохранение тормозной полости от недопустимо высоких давлений. Основными преимуществами такой схемы являются мягкий и плавный режим торможения с регулируемым ускорением, экономное использование сжатого воздуха за счет рекуперации, высокое быстродействие и удобство настройки.

Таким образом, комплексная оценка и сравнение различных схем торможения ПП, проведенная авторами, позволила выявить наиболее эффективные решения. В частности, схема I-2.б с редукционным клапаном демонстрирует оптимальное сочетание высокого быстродействия, плавного режима торможения с заданным ускорением, экономного расхода сжатого воздуха и защиты тормозной полости от чрезмерных давлений. Эта схема рекомендуется авторами для использования в качестве внешнего тормозного устройства для ПП с большими инерционными нагрузками.

Итоговой компиляцией стала работа И.Б. Филипова [63]. В своей монографии, автором подробно рассмотрены конструкции и принципы построения

тормозных устройств, применяемых преимущественно для торможения рабочих органов и звеньев машин с пневмоприводами. Отмечается, что данные тормозные устройства весьма разнообразны по своему устройству и могут быть механическими, пневматическими, гидравлическими, электрическими или комбинированными. Механические тормозные устройства включают в себя пружинные, резиновые, эластомерные, инерционные и фрикционные конструкции, в то время как пневматические могут быть напорными или вакуумными. Гидравлические тормозные устройства представляют собой устройства дроссельного регулирования, а к электрическим относятся электромагнитные тормоза с сухим или жидким фрикционным наполнителем. Кроме того, существуют комбинированные тормозные устройства, сочетающие в себе два или более типов перечисленных.

Автор классифицирует тормозные устройства по виду силовой характеристики или способу преобразования кинетической энергии подвижных масс, схема классификации представлена на рисунке 1.8.

Выделяются устройства, создающие упругие, диссипативные или упруго-диссипативные силы сопротивления. Большинство применяемых в настоящее время тормозных устройств относятся к последнему типу, частично рассеивающих кинетическую энергию и частично преобразующих ее в потенциальную. Также тормозные устройства могут быть возвратно-поступательного или поворотно-вращательного типа движения выходного звена, а по виду действия - одностороннего или двустороннего.

Особое внимание в работе уделено автономным управляемым тормозным устройствам, которые могут быть унифицированы и использованы для торможения движущихся масс механизмов с различными типами приводов. Их применение существенно упрощает задачи компоновки и проектирования, а также эксплуатацию и обслуживание промышленного оборудования. Автор приводит примеры конструктивного исполнения таких тормозных устройств, в том числе встроенных в пневмоцилиндры для позиционирования выходного звена.

Помимо этого, в работе изложены основные требования к тормозным устройствам, такие как обеспечение заданного закона торможения, ограничение ускорений, плавность торможения, высокая надежность и быстродействие, простота и компактность конструкции, стабильность характеристик и другие. Для оценки эффективности применения тормозных устройств предлагается использовать показатели, основанные на сравнении кинетической энергии, действующих



Рисунок 1.8 — Классификационная схема тормозных устройств

сил, скоростей, ускорений и других параметров движения выходного звена до и после их внедрения.

Так же, в данной монографии, автор подробно рассматривает особенности позиционных пневматических механизмов с дискретным управлением, предназначенных для перемещения выходных звеньев или объектов из точки в точку по заданной программе. Отмечается, что для таких механизмов основными требованиями являются обеспечение максимального быстродействия и необходимой точности позиционирования при ограниченных динамических нагрузках.

Описывается конструкция и принцип работы разработанного позиционного ПП с одной дискретно управляемой полостью, представленного на рисунке 1.9.

Его силовая часть состоит из пневмоцилиндра, в поршневой полости которого через редукционный клапан поддерживается постоянное давление, а в штоковой полости давление регулируется трехлинейным двухпозиционным кла-

давать частоту вынужденных колебаний для обеспечения необходимого качества переходного процесса и требуемого запаса устойчивости.

1.5 Анализ задач разгона и торможения в контексте системы управления

В настоящее время, благодаря стремительному развитию микроэлектроники и её применению в различных областях, стало возможным использование сложных алгоритмов управления. Эти достижения позволяют решать вопросы, которые были исследованы ранее, при помощи разнообразных алгоритмов управления.

Однако применение алгоритмов управления, предназначенных для непрерывных систем, к системам с дискретными элементами может быть затруднительным или даже невозможным. Для использования ПИД-регулятора исследователи применяют различные преобразователи и модуляции сигнала. Например, широко распространено использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в сочетании с ПИД.

Аналогично, инженеры используют разнообразные интеллектуальные алгоритмы управления на основе нейросетей или нечёткой логики. Также особую популярность получило управление в скользящих режимах, которое зарекомендовало себя в управлении электроприводом. Это связано с тем, что модель представляет собой дискретную систему.

1.5.1 Исследование управления с использованием ШИМ

В работе [37] подробно рассмотрена разработка системы позиционного ПП, схема которого представлена на рисунке 1.10, с использованием недорогих дискретных распределителей с электромагнитным управлением, вместо дорогостоящих пропорциональных. Особое внимание уделено проектированию системы управления, обеспечивающей высокое быстродействие и точность позиционирования.

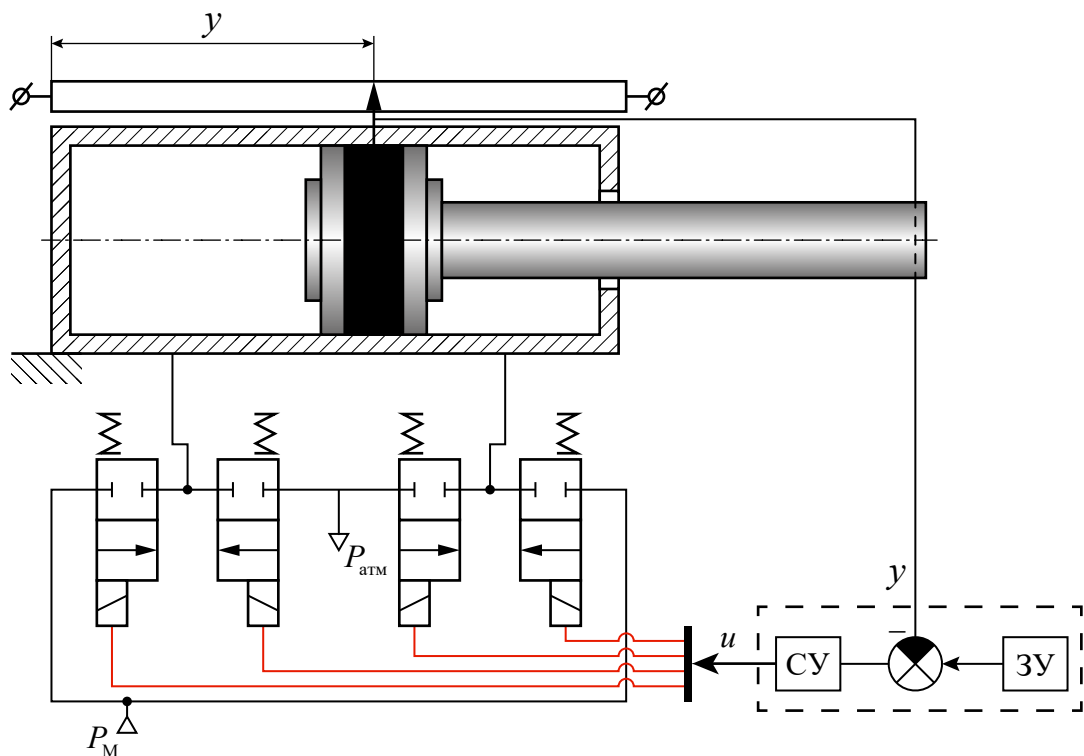


Рисунок 1.10 — Схема позиционного ПП с дискретными распределителями

Авторами предложен новый алгоритм с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления распределителями, позволяющий получить практически симметричную и линейную характеристику скорости РО ПП в зависимости от управляющего сигнала. Это достигается за счет согласованного управления магистральными и выхлопными распределителями, что компенсирует асимметрию, вызванную разницей активных площадей поршня в поршневой и штоковой полостях. Экспериментальные исследования подтвердили высокую линейность и симметрию полученной характеристики.

На основе экспериментальных данных авторами синтезирована линейная авторегрессионная модель ПП. Анализ модели показал, что демпфирование системы существенно зависит от положения поршня, достигая минимума в центральной части хода. Это объясняется наличием сухого кулоновского трения.

Для компенсации влияния трения в систему управления введен ПИД-регулятор с дополнительной компенсацией трения и интегральной составляющей ограниченной с двух сторон. Применение этих мер позволило существенно уменьшить статическую ошибку позиционирования.

В ходе экспериментальных исследований авторам удалось достичь высокого быстродействия системы управления – время нарастания составило всего 180 мс. При этом статическая ошибка позиционирования не превышала 0,21 мм,

что сопоставимо с результатами, полученными другими исследователями [18; 19; 28; 34], использовавшими более дорогостоящие пропорциональные распределители. Кроме того, система продемонстрировала инвариантность к шестикратному изменению инерционной нагрузки. Авторы также показали возможность точного отслеживания S -образных траекторий с ошибкой не более 2 мм.

Статья [30] посвящена сравнительному анализу различных схем ШИМ для улучшения позиционирования ПП. Авторы рассматривают пять основных ШИМ-схем представленных на рисунке 1.11.

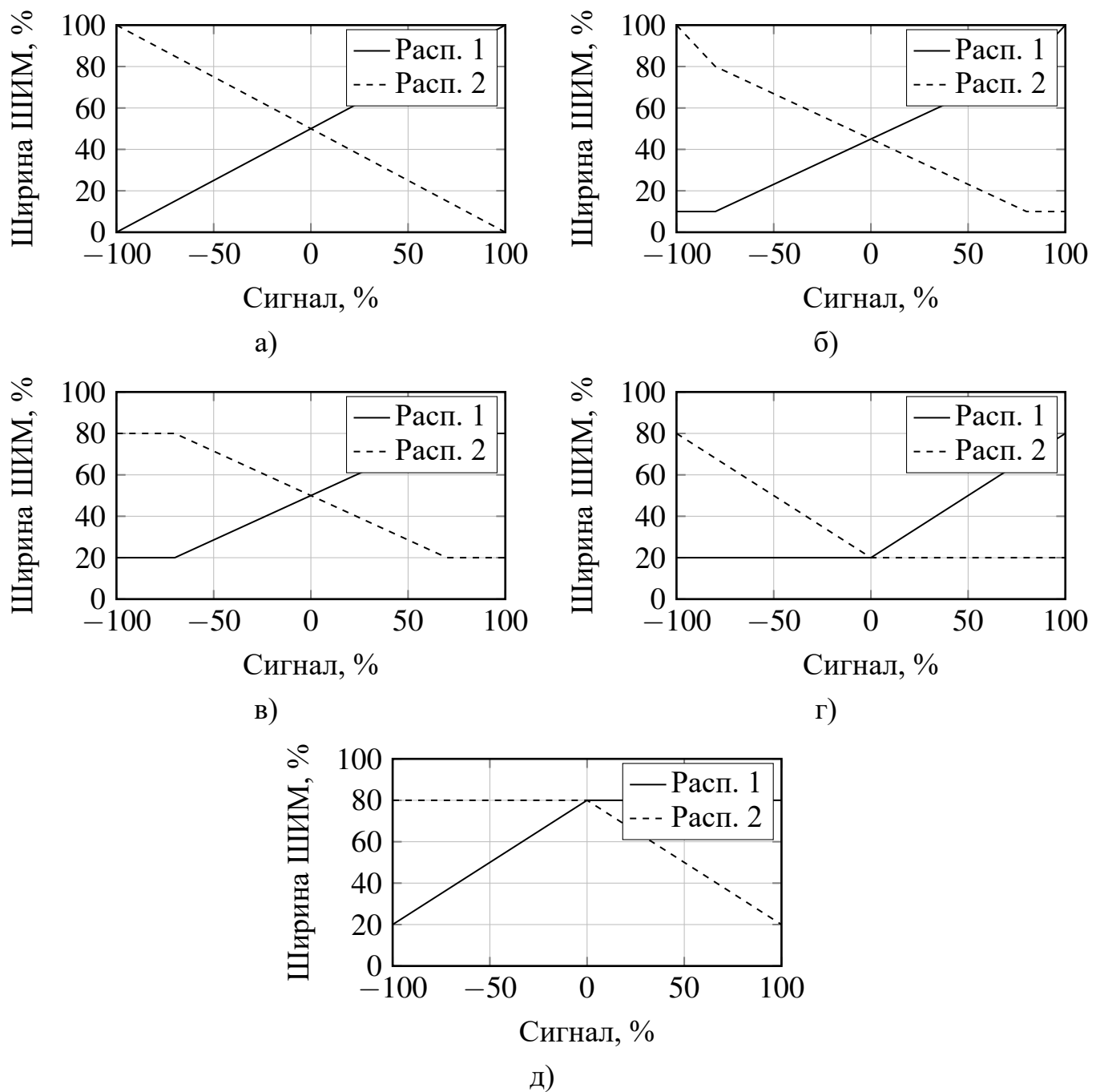


Рисунок 1.11 — Схемы ШИМ

Схема 1.11а не учитывает динамику включения/выключения распределителей, что приводит к нелинейностям при крайних значениях входного сигнала. Схема 1.11б учитывает только динамику включения распределителей и добавляет точку перегиба, чтобы минимизировать ширину импульса ниже определенного значения. Схема 1.11в учитывает как задержку включения, так и задержку выключения распределителей, вводя два пограничных значения для ширины импульса. Схема 1.11г является модифицированным вариантом схемы 1.11а, учитывающим задержки клапанов, и обеспечивает меньшую сумму коэффициентов заполнения сигнала поступающего на распределитель, особенно вблизи нулевого входного сигнала. Схема 1.11д представляет собой модификацию схемы 1.11в с учетом задержек включения и выключения клапанов, давая большую суммарную ширину импульса вблизи нулевого входа.

Авторы провели ряд экспериментов со ступенчатыми и гармоническими входными воздействиями, чтобы изучить характеристики различных ШИМ-схем. По характеристикам позиционирования при ступенчатом входе, схема 1.11а показала наименьшее время нарастания, но большую статическую ошибку позиционирования, схема 1.11г продемонстрировала наименьшее перерегулирование, но худшую ошибку, а схема 1.11д имела самое большое время нарастания и ошибку. При отслеживании гармонического сигнала, первые три схемы показали близкие результаты по среднеквадратичной ошибке, в то время как схемы 1.11г и 1.11д имели большую ошибку слежения. Эксперименты с увеличением нагрузки показали, что схема 1.11г оказалась наименее устойчивой к увеличению инерционной нагрузки, а схема 1.11д, имеющая высокое рабочее давление, продемонстрировала наибольшую устойчивость.

Чтобы компенсировать влияние различий в эффективных площадях, авторы предложили модифицированные версии каждой ШИМ-схемы. Модификация заключается в сдвиге диаграмм ШИМ-схем с целью достижения нулевой выходной силы при нулевом входном сигнале.

Экспериментальные результаты при ступенчатом входном воздействии продемонстрировали, что модифицированные ШИМ-схемы, особенно для схем 1.11а, 1.11б, 1.11в и 1.11д, обеспечивают значительное улучшение характеристик позиционирования, в частности, снижение статической ошибки позиционирования. Это связано с тем, что при высоких рабочих давлениях различия в эффективных площадях поршня становятся более значимыми, и предложенные модификации эффективно компенсируют этот эффект.

В следующей статье [33] авторами представлен модифицированный метод позиционного управления ПП с использованием четырех дискретных электромагнитных распределителей, схема ПП аналогична схеме представленной на рисунке 1.10.

Первоначально в работе проведен анализ алгоритма, разработанного другим автором [24] в 2007 году. Установлено, что данный алгоритм демонстрирует существенное перерегулирование при задании малых положений поршня, что обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования методов управления.

С целью повышения качества позиционирования авторами была предложена модификация алгоритма. Ключевым аспектом модификации стало разделение диапазона задаваемых положений на две области: малые положения ($x_d \leq 50$ мм) и большие положения ($x_d > 50$ мм). Для каждой области авторами разработаны индивидуальные законы управления с использованием семи различных режимов работы четырех электромагнитных распределителей в сочетании с ШИМ.

Для диапазона малых положений при значительной ошибке позиционирования $e \leq -\alpha$ авторами введен новый режим M_6 , предполагающий одновременное открытие двух распределителей, что обеспечивало плавное низкоскоростное движение. В области промежуточных ошибок $-\alpha < e < -\beta$ применялся режим M_2 с импульсным открытием одного из распределителей, способствующий быстрому замедлению движения и устранению перерегулирования.

Для диапазона больших положений авторами модифицированы режимы M_2 и M_2 контроллера посредством организации поочередного импульсного открытия распределителей. Данный подход позволял плавно замедлять движение поршня.

Экспериментальные исследования подтвердили, что модифицированный алгоритм обеспечивает существенное улучшение качества позиционного управления по сравнению с исходным алгоритмом, особенно при отработке малых положений. Более того, при частотах задающего воздействия до 0,1 Гц модифицированный алгоритм продемонстрировал сопоставимые или превосходящие характеристики относительно алгоритма для ПП с пропорциональными распределителями. Однако при более высоких частотах (например, 0,5 Гц) характеристики модифицированного алгоритма значительно ухудшались, что связано с ограниченной скоростью переключения используемых распределителей.

Таким образом, результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что предложенный модифицированный алгоритм позволяет существенно

но повысить качество позиционного управления пневматическим приводом с дискретными распределителями при низких и средних частотах задающего воздействия по сравнению с ранее разработанными решениями.

В следующей работе [2] так же представлен подход к разработке системы управления ПП с использованием дискретных электромагнитных распределителей вместо традиционных пропорциональных распределителей. Авторы предлагают модифицированный алгоритм ШИМ для точного позиционного управления ПП при помощи этих дискретных распределителей.

Центральным элементом разработанной системы управления является трехконтурная схема, представленная на рисунке 1.12, с обратной связью по

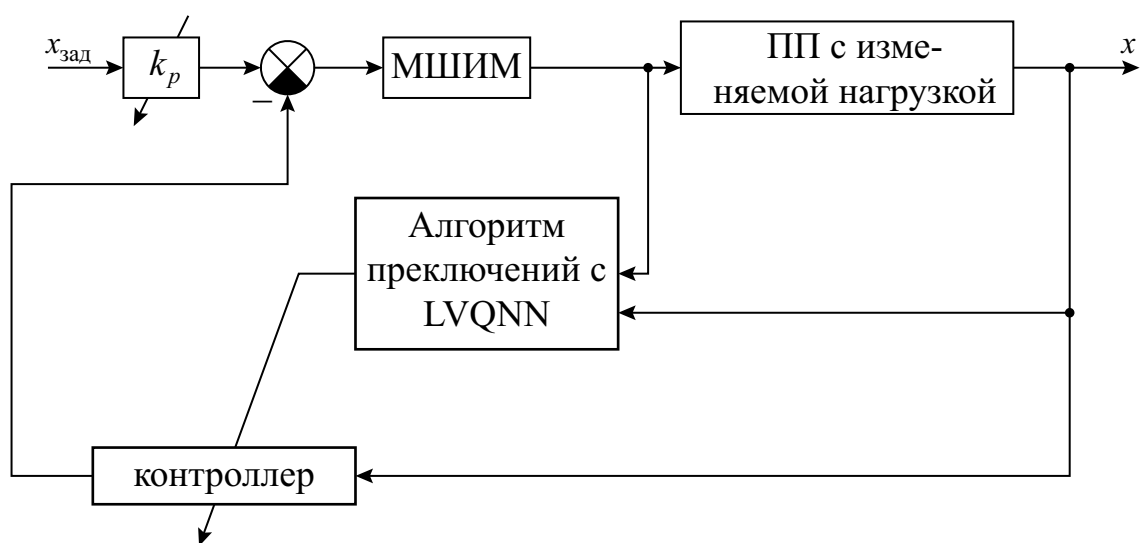


Рисунок 1.12 — Структурная схема системы управления с МШИМ и LVQNN

положению, скорости и ускорению. Такая структура обеспечивает высокое быстродействие и точность позиционирования. Для адаптации параметров регулятора к изменяющимся внешним нагрузкам авторы применяют нейронную сеть на основе векторного квантования (LVQNN). Данная интеллектуальная система классификации нагрузки динамически подстраивает коэффициенты регулятора, компенсируя влияние возмущающих воздействий.

Проведённые экспериментальные исследования подтвердили, что предложенный алгоритм МШИМ обеспечивает точность позиционирования в пределах 0,2 мм, что существенно превосходит результаты стандартного ШИМ-алгоритма (ошибка около 1,75 мм). Применение LVQNN и адаптивной настройки параметров регулятора позволило эффективно компенсировать влияние изменяющейся внешней нагрузки и добиться высокой стабильности системы управления.

Таким образом, ключевыми элементами разработанной системы управления являются алгоритм МШИМ, трёхконтурная схема регулирования с обратной связью, а также интеллектуальная система адаптации параметров регулятора на основе LVQNN. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность предложенных методов для точного позиционного управления пневматическим пневмоприводом в условиях изменяющихся внешних нагрузок.

1.5.2 Исследование управления в скользящих режимах

Управление в скользящих режимах [35] – это класс нелинейных методов управления, которые делают систему управления разрывной. Процесс проектирования делится на два этапа: выбор поверхностей переключения для желаемого режима движения и синтез разрывного управления для движения системы по этим поверхностям.

Движение системы по поверхностям переключения обладает рядом преимуществ: снижение порядка системы, инвариантность к параметрическим и внешним возмущениям. Для описания движения используются специальные математические методы, такие как регуляризация и метод эквивалентного управления.

Управление в скользящих режимах эффективно решает задачи управления сложными нелинейными динамическими объектами в условиях неопределённости и широко применяется в электроприводах, робототехнике и системах автоматического управления. Поскольку позиционный ПП с дискретными распределителями представляет из себя дискретную систему с релейным управлением, то предоставляется возможным использовать управление в скользящих режимах в ПП.

В статье [31] рассматривается исследование, посвящённое управлению положением РО ПП с использованием дискретных распределителей.

Авторы предлагают использование алгоритма управления скользящим режимом с коррекцией ошибки регулирования (SMCE), который использует ШИМ для управления распределителями.

Для управления движением пневматического цилиндра авторы используют только три режима работы четырёх распределителей, представленные ниже:

1. Режим 1 – выдвижение штока;
2. Режим 2 – задвижение штока;
3. Режим 3 – удержание положения штока;

С целью оптимизации параметров SMCE и ПИД-регулятора была разработана модель в Simulink. Экспериментальные исследования проводились на стенде ПП.

Результаты моделирования и экспериментов показывают, что SMCE обеспечивает более высокую точность позиционирования, меньшее время установления и меньший выброс по сравнению с традиционным ПИД-регулятором. Для гармонического входного сигнала среднеквадратичная ошибка при использовании SMCE составляет 0,22 мм, а для ПИД – 0,69 мм. Максимальная абсолютная ошибка для SMCE составляет 0,66 мм, а для ПИД – 1,46 мм. Таким образом, предложенный метод SMCE показал своё превосходство над ПИД-регулятором при управлении положением РО ПП.

Статья [32] аналогично посвящена разработке алгоритма управления в скользящих режимах для регулирования ПП с четырьмя дискретными распределителями.

Ключевым отличием от предыдущих работ является расширение числа доступных дискретных режимов управления с трех до семи.

В основе контроллера лежит скользящая поверхность s , которая определяется как функция ошибки позиционирования e , её производной и второй производной. Авторы вводят семь возможных режимов переключения распределителей ($M_1 \div M_7$), выбор которых производится в зависимости от текущего значения s и её производной. Диаграмма переходов представлена на рисунке.

Режимы M_7 и M_6 применяются при больших по модулю значениях s для обеспечения максимальных ускорений в положительном и отрицательном направлениях соответственно. Эти режимы позволяют быстро сократить большие ошибки позиционирования.

Режимы M_2, M_3, M_4 и M_5 используются при малых ошибках позиционирования ($|s| < \beta$). Их применение позволяет снизить частоту переключений распределителей, что способствует увеличению срока службы пневматической системы.

Для выбора оптимального режима в области малых ошибок авторы вводят дополнительные критерии, основанные на разности давлений в камерах пневмопривода. Это позволяет определить режим, обеспечивающий максимальное

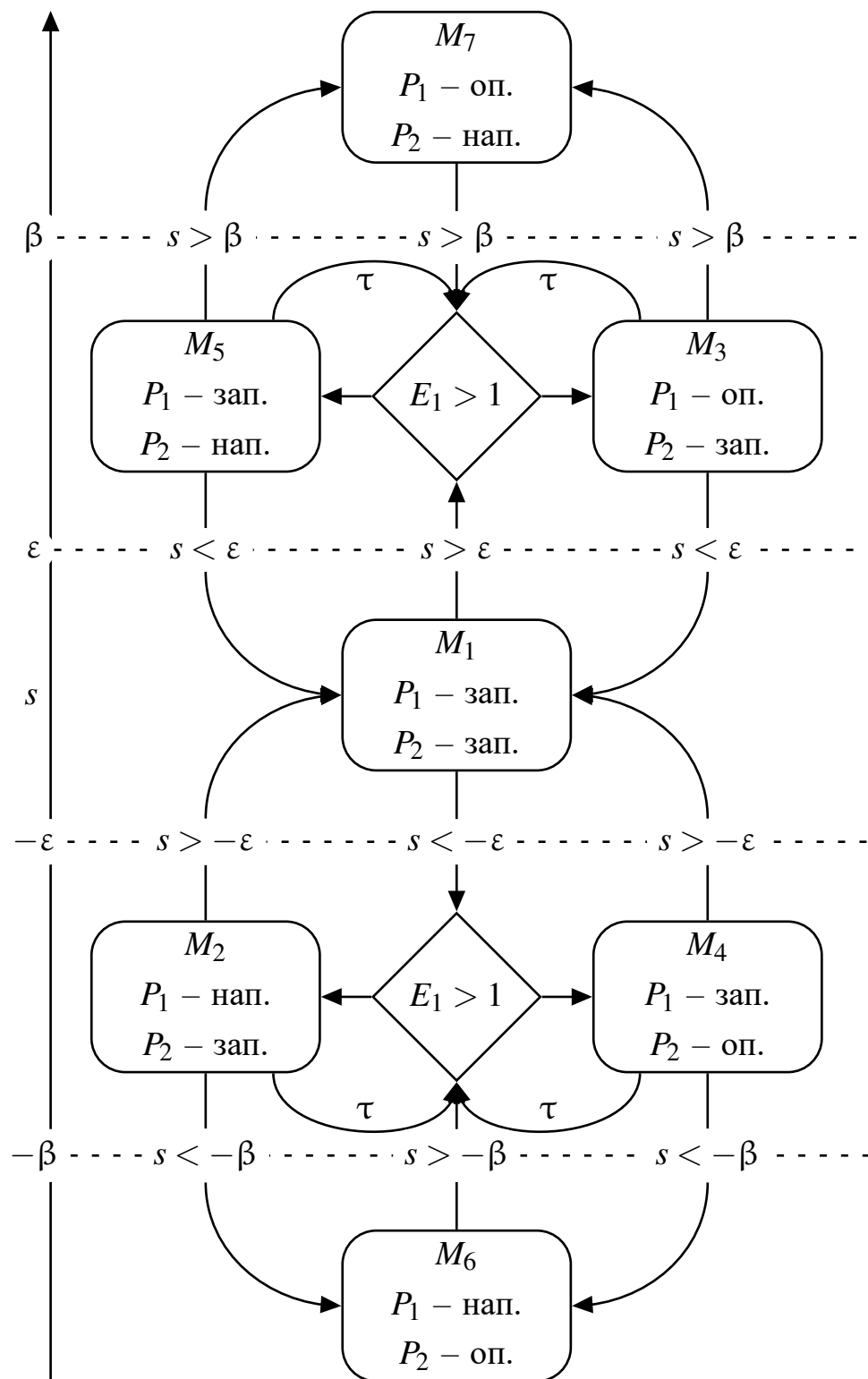


Рисунок 1.13 — Диаграмма переключения режимов

ускорение при минимальном переключении распределителей. Кроме того, вводится параметр τ , задающий минимальное время между переключениями в этой области, что также способствует снижению частоты переключений распределителей.

Теоретический анализ показывает, что при достаточно больших значениях параметров распределителей, предложенный алгоритм обеспечивает асимптотическую устойчивость замкнутой системы. Результаты моделирования и экспериментальных исследований подтверждают, что семирежимный скользящий контроллер демонстрирует улучшение точности позиционирования и значительное снижение переключений соленоидных распределителей по сравнению с трехрежимным аналогом.

Таким образом, данная работа предлагает эффективное решение для управления пневматическими приводами с дискретными входами, обеспечивая высокую точность позиционирования при сокращении нагрузки на исполнительные механизмы.

Аналогично, в статье [9] рассматривается разработка и проверка алгоритма управления в скользящем режиме с использованием ШИМ для систем позиционирования в ПП. Этот алгоритм был так же применён к ПП с четырьмя дискретными распределителями.

Основная цель исследования заключалась в снижении ошибок позиционирования и повышении точности слежения. В статье подробно рассматриваются существующие подходы к управлению в ПП системах.

Разработанный алгоритм основан на использовании семи режимов переключения распределителей. В отличие от традиционных методов, использующих высокое или низкое напряжение в одном периоде ШИМ, предложенная методика применяет два режима переключения за один период, что улучшает производительность, комбинируя управление фазами ШИМ.

Статья подробно описывает процесс разработки алгоритма управления с использованием скользящего режима. Он начинается с математической модели и заканчивается настройкой параметров и верификацией системы на платформе FPGA. Использование FPGA в электропневматических системах является инновационным подходом. Авторы продемонстрировали эффективность предложенного алгоритма как в математической модели, так и в экспериментальных условиях.

Экспериментальная часть включает настройку аппаратной части системы и платформы FPGA, а также тестирование на реальной установке. Результаты подтвердили высокую точность и надёжность предложенного метода по сравнению с традиционными подходами.

Авторы подытоживают, что предложенный алгоритм обеспечивает высокую точность и устройчивость управления. Предложенный алгоритм позволил

уменьшить статическую ошибку позиционирования с 2,5 мм до 0,8 мм, что составляет снижение ошибки на 68%. В свою очередь, точность позиционирования при математическом моделировании достигла 98,5% по сравнению с 91,2% при использовании традиционных методов.

Кроме того, время отклика системы сократилось на 33%, обеспечивая более высокое быстродействие. В эксперименте отклонение при повторяющихся циклах позиционирования не превышало 1,2 мм, тогда как у традиционного алгоритма с ШИМ, это значение было в среднем 3,7 мм.

1.5.3 Исследование управления с применением интеллектуальных алгоритмов

Интеллектуальные алгоритмы представляют из себя класс методов, основанных на применении ИИ и МО для решения задач управления, в которых требуется адаптация, обучаемость и предсказательность поведения в процессе функционирования. В отличие от классических методов, интеллектуальные методы способны анализировать поступающие данные, обучаться на их основе и принимать решения, основываясь на полученном или накопленном опыте.

Можно выделить основные аспекты, которыми владеют интеллектуальные алгоритмы:

1. способность к адаптации к изменяющимся условиям;
2. способность к обучению на основе данных;
3. способность к принятию решений на основе полученной информации;
4. способность поиска оптимальных решений в условиях неопределённости.

Одним из таких интеллектуальных алгоритмов является - нечеткая логика. Данный алгоритм

Глава 2. СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМОПРИВОДА

Данная глава посвящена математическому моделированию ПП с дискретными распределителями. Рассматриваются следующие ключевые аспекты:

1. Структура и принцип работы исследуемого ПП;
2. Моделирование пневмоцилиндра;
3. Моделирование дискретных распределителей;
4. Моделирование силы трения и упругих деформаций;
5. Адаптация математической модели к эффективному численному расчету на ЭВМ.
6. Верификация математической модели.

Математическая модель включает:

1. Уравнения движения поршня;
2. Уравнения изменения давления в полостях цилиндра;
3. Уравнения изменения температуры рабочего тела в полостях цилиндра;
4. Модель массового расхода воздуха;
5. Модель динамики распределителей;
6. Модель сил трения;
7. Модель силы реакции опоры.

Используются уравнения термодинамики и газовой динамики. Учитываются нелинейные эффекты: сжимаемость воздуха, особенности течения через дросселирующие элементы, силы трения и реакции опоры.

Верификация модели проводится путем проверки математической корректности.

2.1 Структура и принцип работы исследуемого пневмопривода

Исследуемый электропневматический привод включает пневматический цилиндр двустороннего действия с односторонним штоком и четыре двухпозиционных распределителя. Цилиндр содержит две рабочие полости, разделенные поршнем.

Ключевой особенностью привода является конфигурация распределителей. К каждой полости цилиндра подключены два независимых распределителя: один для подачи сжатого воздуха из магистрали, другой для выхлопа в атмосферу. Такая конфигурация обеспечивает гибкое управление потоками воздуха в обеих полостях цилиндра.

[Рисунок: Принципиальная пневматическая схема привода с указанием подключения распределителей]

Каждый распределитель имеет два дискретных состояния: открыто и закрыто. Общее количество возможных комбинаций состояний распределителей определяется формулой:

$$N = 2^k,$$

где N - число комбинаций, k - количество распределителей.

Для рассматриваемой системы с четырьмя распределителями:

$$N = 2^4 = 16.$$

Таким образом, система имеет 16 дискретных состояний, что обеспечивает широкие возможности управления при сохранении относительной простоты конструкции.

Система управления генерирует дискретные сигналы для активации электромагнитных клапанов распределителей. Обратная связь по положению реализуется посредством датчика линейного перемещения на штоке цилиндра. Дополнительно могут применяться датчики давления в полостях цилиндра для повышения точности управления.

[Рисунок: Функциональная схема системы управления приводом]

Использование дискретных распределителей вместо пропорциональных снижает стоимость системы, однако требует разработки более сложных алгоритмов управления для компенсации нелинейного характера коммутации пневматических линий.

2.2 Моделирование пневмоцилиндра

При разработке математической модели пневмоцилиндра были приняты следующие основные допущения:

1. Рабочим телом является идеальный газ (воздух), подчиняющийся уравнению состояния Клапейрона-Менделеева;
2. Процессы в рабочих полостях пневмоцилиндра рассматриваются как адиабатические, теплообмен с окружающей средой не учитывается;
3. Температура газа в магистрали и температура окружающей среды принимаются постоянными;
4. Утечки газа через уплотнения поршня и штока не учитываются;
5. Давление в выхлопной магистрали принимается равным атмосферному;
6. Влияние сил тяжести на движение поршня не учитывается ввиду горизонтального расположения пневмоцилиндра;
7. Пневматические линии между распределителями и рабочими полостями цилиндра считаются короткими, их объем пренебрежимо мал по сравнению с объемом рабочих полостей;
8. Эффекты сжимаемости воздуха в трубопроводах не учитываются.

С учетом принятых допущений, математическая модель пневмоцилиндра может быть представлена системой дифференциальных уравнений, описывающих изменение давлений в рабочих полостях, температур газа и движение поршня. Данная система уравнений формирует основу для дальнейшего анализа динамики пневмопривода и синтеза алгоритмов управления.

2.2.1 Уравнение движения пневмоцилиндра

Рассмотрим пневмоцилиндр как систему с одной степенью свободы. Обобщенной координатой выберем положение поршня x . Для применения принципа Гамильтона необходимо составить функцию Лагранжа:

$$L = T - U, \quad (2.1)$$

где T – кинетическая энергия системы; U – потенциальная энергия системы; L – функция Лагранжа.

Кинетическую энергию системы можно представить в виде:

$$T = \frac{M}{2} \dot{x}^2, \quad (2.2)$$

где M – масса подвижных частей системы; \dot{x} – скорость движения поршня.

Потенциальная энергия системы включает в себя работу силы давления газа в рабочих полостях цилиндра:

$$U = p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_{\text{атм}}(V_1 - V_2), \quad (2.3)$$

где p_1 и p_2 – давления в рабочих полостях цилиндра; V_1 и V_2 – объемы рабочих полостей; $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление.

Объемы рабочих полостей связаны с положением поршня следующим образом:

$$\begin{aligned} V_1 &= F_1(x - x_0), \\ V_2 &= F_2(L - x + x_0), \end{aligned} \quad (2.4)$$

где $F_1 = \pi D^2/4$ и $F_2 = \pi(D^2/4 - D^2/4)$ – активные площади поперечного сечения поршня в поршневой и штоковой полостях соответственно; x_0 – начальное положение поршня; L – ход поршня.

Подставляя (2.2), (2.3) и (2.4) в (2.1), получим функцию Лагранжа:

$$\begin{aligned} L &= \frac{M}{2} \dot{x}^2 - p_1 F_1(x - x_0) - p_2 F_2(L - x + x_0) \\ &\quad - p_{\text{атм}}(F_1(x - x_0) - F_2(L - x + x_0)). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Обобщенную силу Q_x , действующую на систему учитывающую силу трения и реакции упоров, можно представить в виде:

$$Q_x = -R_{\text{тр}} - R_{\text{упор}}, \quad (2.6)$$

где $R_{\text{тр}}$ – сила трения; $R_{\text{упор}}$ – сила реакции упора.

Запишем уравнение лагранжа в общем виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = Q_x. \quad (2.7)$$

Вычислим частные производные функции Лагранжа (2.5) по обобщенной координате x и ее производной \dot{x} :

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} &= M\dot{x}, \\ \frac{\partial L}{\partial x} &= p_1 F_1 - p_2 F_2 - p_{\text{атм}}(F_1 - F_2). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Подставляя (2.8) и (2.6) в (2.7), получим уравнение движения пневмоцилиндра:

$$M\ddot{x} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - p_{\text{атм}}(F_1 - F_2) - R_{\text{тр}} - R_{\text{упор}}. \quad (2.9)$$

где \ddot{x} – ускорение поршня.

2.2.2 Уравнения изменения давлений в полостях пневмоцилиндра

Первоначально получим дифференциальные уравнения изменения давлений в полостях пневмоцилиндра, основываясь на началах термодинамики и уравнения Максвелла с учетом ранее принятых допущений. Ключевыми допущениями для данного вывода являются: рассмотрение воздуха как идеального газа, адиабатический характер процессов в полостях цилиндра, отсутствие утечек газа через уплотнения, и пренебрежение объемом пневматических линий между распределителями и рабочими полостями.

Согласно первому началу термодинамики для открытой системы, изменение внутренней энергии рабочего тела описывается уравнением:

$$dU = \partial Q - \partial W + hdm, \quad (2.10)$$

где dU – изменение внутренней энергии; Q – подведенное тепло; W – совершенная работа; h – удельная энтальпия; dm – изменение массы системы.

Учитывая, что процесс рассматривается как адиабатический, то $Q = 0$ и работа совершается только за счет изменения объема газа в полостях цилиндра:

$$\partial W = -pdV.$$

Тогда уравнение изменения внутренней энергии примет вид:

$$dU = -pdV + hdm.$$

Используя определение энтальпии $H = U + pV$, получим:

$$d(H - pV) = -pdV + hdm.$$

Раскрывая дифференциалы, получим:

$$dH - pdV - Vdp = -pdV + hdm.$$

Сокращая слагаемые, получим уравнение изменения энтальпии:

$$dH = Vdp + hdm. \quad (2.11)$$

Выражение (2.11) позволяет описать изменение энтальпии рабочего тела в процессе сжатия и расширения, а также в при изменении массы рабочего тела.

Обратимся к уравнению Максвелла для энтальпии, которое связывает изменение энтальпии с изменением давления и температуры:

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT. \quad (2.12)$$

Приравнивая правые части уравнений (2.11) и (2.12), получаем:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT = Vdp + hdm. \quad (2.13)$$

На данном этапе воспользуемся одним из соотношений Максвелла:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p.$$

Подставляя это выражение в (2.13), получим:

$$\left(V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right) dp + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT = Vdp + hdm.$$

После упрощения и группировки членов, приходим к следующему выражению:

$$-T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT = hdm. \quad (2.14)$$

Здесь можно воспользоваться еще одним важным термодинамически соотношением

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = c_p, \quad (2.15)$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Подставляя (2.15) в уравнение (2.14), получим:

$$-T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp + c_p dT = hdm. \quad (2.16)$$

Для идеального газа справедливо соотношение:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p},$$

где R – газовая постоянная.

Используя данное выражение, преобразуем уравнение:

$$-\frac{RT}{p}dp + c_p dT = h dm.$$

Разделив обе части на dt и учитывая, что $dm/dt = G$ (массовый расход), получаем дифференциальное уравнение:

$$-\frac{RT}{p} \frac{dp}{dt} + c_p \frac{dT}{dt} = hG.$$

Теперь обратимся к уравнению состояния идеального газа $pV = mRT$. Дифференцируя его по времени, получаем:

$$V \frac{dp}{dt} + p \frac{dV}{dt} = RT \frac{dm}{dt} + mR \frac{dT}{dt}.$$

Подставляя выражение для dT/dt из предыдущего уравнения и учитывая, что для идеального газа

$$c_p - c_v = R,$$

где c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме, после ряда алгебраических преобразований получаем:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma}{V} \left(RT \frac{dm}{dt} - p \frac{dV}{dt} \right), \quad (2.17)$$

где $\gamma = c_p/c_v$ – показатель адиабаты.

Теперь учтем, что к каждой полости пневмоцилиндра подключены два независимых распределителя: один для подачи сжатого воздуха из магистрали, другой для выхлопа в атмосферу.

Для полного описания динамики пневмоцилиндра записываем уравнение (2.17) для обеих полостей:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = \frac{\gamma}{V_1} \left(RT_1 \frac{dm_1}{dt} - p_1 \frac{dV_1}{dt} \right), \\ \frac{dp_2}{dt} = \frac{\gamma}{V_2} \left(RT_2 \frac{dm_2}{dt} - p_2 \frac{dV_2}{dt} \right), \end{cases} \quad (2.18)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют левой и правой полостям пневмоцилиндра.

Изменение массы газа в каждой полости определяется суммарным массовым расходом через оба распределителя, подключенных к этой полости:

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{dt} = G_{1\text{ВХ}} - G_{1\text{ВЫХ}}, \\ \frac{dm_2}{dt} = G_{2\text{ВХ}} - G_{2\text{ВЫХ}}, \end{cases} \quad (2.19)$$

где $G_{1\text{ВХ}}$ и $G_{2\text{ВЫХ}}$ – массовые расходы воздуха, поступающего в полости через впускные распределители; $G_{1\text{ВХ}}$ и $G_{2\text{ВЫХ}}$ – массовые расходы воздуха, выходящего из полостей через выпускные распределители.

Изменение объемов полостей связано с движением поршня:

$$\frac{dV_1}{dt} = F_1 \frac{dx}{dt}, \quad \frac{dV_2}{dt} = -F_2 \frac{dx}{dt},$$

где A_1 и A_2 – эффективные площади поршня в левой и правой полостях соответственно.

Таким образом, окончательная система уравнений, описывающая изменение давлений в полостях пневмоцилиндра с учетом конфигурации распределителей, принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = \frac{\gamma}{V_1} \left(RT_1(G_{1\text{ВХ}} - G_{1\text{ВЫХ}}) - p_1 F_1 \frac{dx}{dt} \right), \\ \frac{dp_2}{dt} = \frac{\gamma}{V_2} \left(RT_2(G_{2\text{ВХ}} - G_{2\text{ВЫХ}}) + p_2 F_2 \frac{dx}{dt} \right). \end{cases} \quad (2.20)$$

2.2.3 Уравнения изменения температур в полостях пневмоцилиндра

Для вывода уравнений изменения температур в полостях пневмоцилиндра аналогично воспользуется термодинамическими уравнениями Максвелла.

Запишем уравнение изобарического расширения:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_V = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p,$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Второе уравнение Максвелла, известное как соотношение изохорического нагрева, записывается как:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p = -\frac{T}{c_V} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V.$$

где c_V – удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Для описания изменения температуры используется уравнение полного дифференциала температуры:

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_V dp + \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p dV.$$

Подставляя в это выражение уравнения Максвелла, получаем расширенное уравнение изменения температуры:

$$dT = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p dp - \frac{T}{c_V} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V dV.$$

Для дальнейшего преобразования применяется уравнение состояния идеального газа:

$$pV = mRT. \quad (2.21)$$

Дифференцируя уравнение (2.21) по температуре при постоянном объеме, получаем соотношение изохорического давления:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V = \frac{mR}{V} = \frac{p}{T}.$$

Аналогично, дифференцируя уравнение (2.21) по температуре при постоянном давлении, получаем соотношение изобарического объема:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = \frac{mR}{p} = \frac{V}{T}.$$

Подставляя эти выражения в расширенное уравнение изменения температуры, получаем:

$$dT = \frac{T}{c_p} \cdot \frac{V}{T} \cdot dp - \frac{T}{c_V} \cdot \frac{p}{T} \cdot dV.$$

Упрощая это выражение и переходя к производным по времени, получаем дифференциальное уравнение изменения температуры:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{V}{c_p} \cdot \frac{dp}{dt} - \frac{p}{c_V} \cdot \frac{dV}{dt}.$$

Для дальнейшего преобразования учитывается соотношение теплоемкостей идеального газа, известное как показатель адиабаты:

$$\frac{c_p}{c_v} = \gamma.$$

Используя это соотношение, выражаем теплоемкости через газовую постоянную и показатель адиабаты:

$$c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R, \quad c_v = \frac{1}{\gamma - 1} R.$$

Подставляя эти выражения в дифференциальное уравнение изменения температуры и учитывая уравнение состояния идеального газа, после алгебраических преобразований получаем окончательное уравнение для изменения температуры в полости пневмоцилиндра, которое можно назвать уравнением термодинамического состояния полости:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T}{p} \cdot \frac{dp}{dt} - (\gamma - 1) \frac{T}{V} \cdot \frac{dV}{dt}.$$

Это уравнение применимо к обеим полостям пневмоцилиндра. Для левой и правой полостей соответственно получаем уравнения термодинамического состояния левой и правой полостей:

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = \frac{T_1}{p_1} \cdot \frac{dp_1}{dt} - (\gamma - 1) \frac{T_1}{V_1} \cdot \frac{dV_1}{dt}, \\ \frac{dT_2}{dt} = \frac{T_2}{p_2} \cdot \frac{dp_2}{dt} - (\gamma - 1) \frac{T_2}{V_2} \cdot \frac{dV_2}{dt}, \end{cases} \quad (2.22)$$

где индексы 1 и 2 относятся к левой и правой полостям пневмоцилиндра соответственно.

2.3 Моделирование силы трения

В рамках математического моделирования электропневматического привода с дискретными распределителями особое внимание уделяется детальному описанию сил трения. Адекватное моделирование фрикционных эффектов критически важно для точного прогнозирования динамики системы и разработки эффективных алгоритмов управления.

В данном исследовании применяется комплексная статическая модель трения, учитывающая различные аспекты фрикционного взаимодействия, характерные для пневматических систем. Рассматриваемая модель включает статическое, кулоновское и вязкое трение, а также эффект Штрибека, позволяющий описать нелинейное поведение силы трения при малых скоростях движения.

Общее выражение для силы трения может быть представлено в виде:

$$R_{\text{тр}} = \left[R_{\text{к}} + (R_{\text{с}} - R_{\text{к}}) e^{-\left| \frac{v}{v_{\text{ш}}} \right|^{\delta}} \right] \text{sign}(v) + R_{\text{в}} v, \quad (2.23)$$

где $R_{\text{тр}}$ – сила кулоновского трения; $R_{\text{с}}$ – сила статического трения; v – относительная скорость скольжения; $v_{\text{ш}}$ – характеристическая скорость скольжения (Штрибека); δ – эмпирический параметр, определяющий форму кривой Штрибека; $R_{\text{в}}$ – коэффициент вязкого трения.

Графическая интерпретация модели трения представлена на рисунке 2.1.

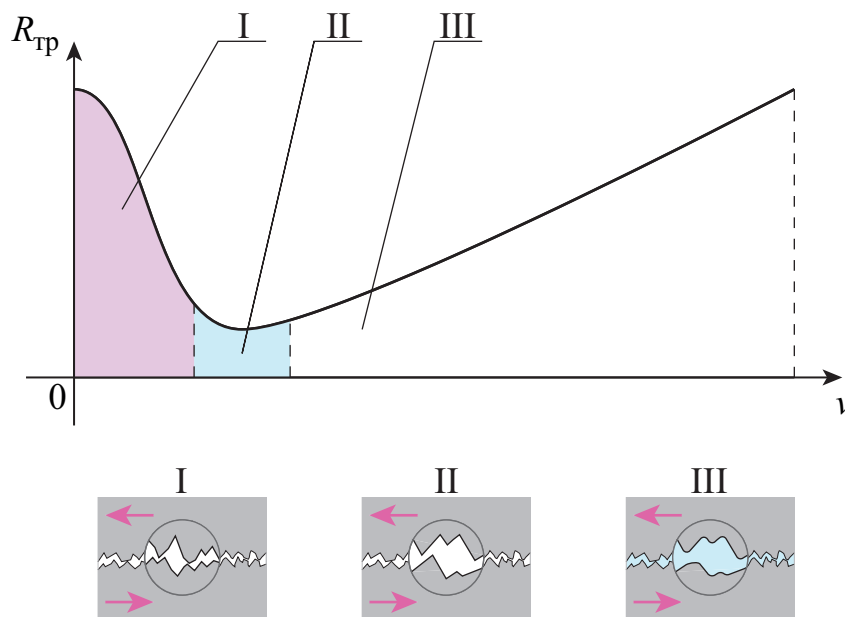


Рисунок 2.1 — Графическое представление модели трения

Данная модель позволяет учесть ключевые особенности фрикционного взаимодействия в пневмоприводе:

Рассмотрим каждый компонент модели более подробно:

1. Кулоновское трение:

$$R_{\text{к}} = \mu_{\text{к}} N \text{sign}(v)$$

где $\mu_{\text{к}}$ – коэффициент кулоновского трения, N – нормальная сила. Кулоновское трение обеспечивает постоянную составляющую силы трения при установившемся движении;

2. Статическое трение:

$$R_c = \mu_c N \text{sign}(R_{\text{вн}})$$

где μ_c - коэффициент статического трения, $R_{\text{вн}}$ - внешняя приложенная сила. Статическое трение препятствует началу движения при малых управляющих воздействиях;

3. Эффект Штрибека:

$$R_{\text{ш}} = (R_c - R_k) e^{-\left|\frac{v}{v_{\text{ш}}}\right|^\delta}$$

Эффект Штрибека описывает падение силы трения при переходе от состояния покоя к движению;

4. Вязкое трение:

$$R_v = \sigma_2 v$$

где σ_2 - коэффициент вязкого трения. Вязкое трение зависит от скорости движения и преобладает при высоких скоростях.

Для определения параметров статической модели трения применяется следующий подход:

1. Идентификация R_k и R_v : Проводятся тесты с постоянной скоростью движения. При установившемся движении сила трения описывается уравнением:

$$R_{\text{тр}} = R_k \text{sign}(v) + R_v v$$

Линейная регрессия по экспериментальным данным позволяет определить R_k и R_v ;

2. Идентификация R_c : R_c оценивается по максимальному значению силы трения при начале движения:

$$R_c = \max(|R_{\text{тр}}|) \text{ при } v \approx 0;$$

3. Идентификация $v_{\text{ш}}$ и δ : Параметры $v_{\text{ш}}$ и δ определяются путем минимизации среднеквадратичной ошибки между экспериментальной кривой зависимости силы трения от скорости и теоретической кривой:

$$\min_{v_{\text{ш}}, \delta} \sum_{i=1}^N (R_{\text{тр},i}^{\text{эксп}} - R_{\text{тр},i}^{\text{модель}}(v_{\text{ш}}, \delta))^2$$

.

Верификация статической модели трения осуществляется путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на

реальном пневмоприводе. Проводится серия экспериментов с различными режимами движения, включая:

1. Движение с постоянной скоростью;
2. Разгон и торможение;
3. Реверсивное движение;
4. Движение с малыми перемещениями.

Для каждого эксперимента вычисляется среднеквадратичная ошибка между предсказанными и измеренными значениями силы трения:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{\text{тр},i}^{\text{эксп}} - R_{\text{тр},i}^{\text{модель}})^2}$$

Адекватность модели оценивается по совокупности критериев, включая RMSE, коэффициент детерминации R^2 , и визуальный анализ графиков зависимости силы трения от скорости. Данная статическая модель трения позволяет учесть основные нелинейные эффекты фрикционного взаимодействия в пневмоприводе, что критически важно для точного моделирования и эффективного управления системой. Однако следует отметить, что статическая модель имеет ограничения в описании некоторых динамических эффектов, таких как предварительное смещение и гистерезис, которые могут быть существенными при прецизионном позиционировании.

2.4 Моделирование силы реакции опоры

В контексте математического моделирования электропневматического привода существенную роль играет адекватное описание силы реакции опоры. Данная сила возникает при контакте поршня пневмоцилиндра с ограничителями хода и оказывает значительное влияние на динамику системы, особенно в крайних положениях.

Сила реакции опоры $R_{\text{оп}}$ может быть представлена как функция положения поршня x и его скорости \dot{x} :

$$R_{\text{оп}} = f(x, \dot{x}).$$

При этом необходимо учитывать, что данная сила проявляется только при достижении поршнем крайних положений. Таким образом, модель силы реакции опоры должна включать условия её активации.

Наиболее распространенным подходом к моделированию силы реакции опоры является использование кусочно-линейной модели с учетом жесткости и демпфирования. Данная модель может быть описана следующим образом:

$$R_{\text{оп}} = \begin{cases} k_{\text{оп}}(x - x_{\text{мин}}) + b_{\text{оп}}\dot{x}, & \text{если } x < x_{\text{мин}} \\ 0, & \text{если } x_{\text{мин}} \leq x \leq x_{\text{макс}} \\ k_{\text{оп}}(x - x_{\text{макс}}) + b_{\text{оп}}\dot{x}, & \text{если } x > x_{\text{макс}} \end{cases} \quad (2.24)$$

2.5 Моделирование дискретных распределителей

2.5.1 Уравнения массового расхода рабочего тела

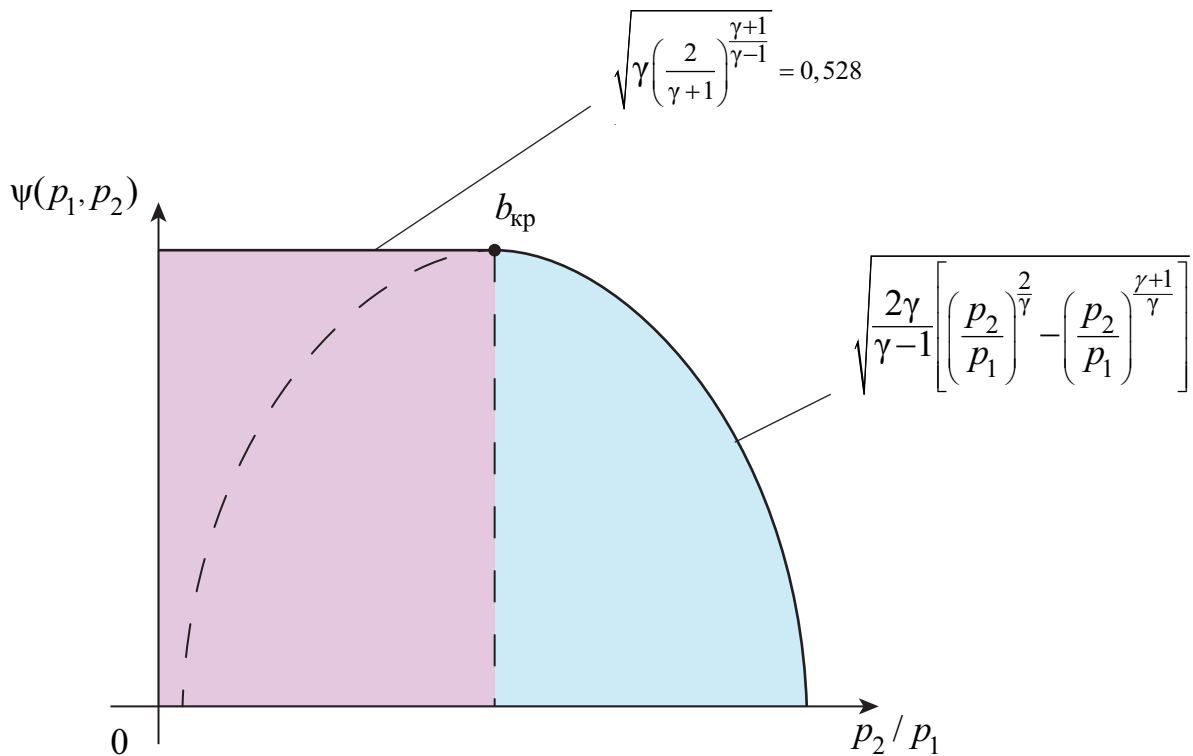
Массовый расход воздуха через дискретный распределитель является ключевым параметром, определяющим динамику пневматической системы. Для его описания используется модель, основанная на уравнении Сен-Венана-Ванцеля:

$$G = \psi(p_1, p_2) \cdot u C_d F_e \frac{p_1}{\sqrt{RT_{\text{вх}}}}, \quad (2.25)$$

где G – массовый расход воздуха; $\psi(p_1, p_2)$ – расходная функция; u – положение золотника ($0 \div 1$); C_d – коэффициент расхода; F_e – эффективная площадь проходного сечения; p_1 – давление на входе; p_2 – давление на выходе; R – газовая постоянная для воздуха; $T_{\text{вх}}$ – температура воздуха на входе.

Ключевым элементом в данном уравнении является расходная функция $\psi(p_1, p_2)$, которая учитывает влияние отношения давлений на входе и выходе распределителя на массовый расход. Эта функция определяется следующим образом:

$$\psi(p_1, p_2) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & \text{если } \frac{p_2}{p_1} > b \\ \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, & \text{если } \frac{p_2}{p_1} \leq b \end{cases}$$

Рисунок 2.2 — График расходной функции $\psi(p_1, p_2)$

где γ — показатель адиабаты для воздуха; $b = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ — критическое отношение давлений.

Для наглядного представления характера изменения расходной функции $\psi(p_1, p_2)$ в зависимости от отношения давлений p_2/p_1 приведен график представленный на рисунке 2.2.

На графике отчетливо видны две области: докритическое и закритическое течение, разделенные точкой критического отношения давлений b .

В области докритического течения ($p_2/p_1 > b$) расход зависит от отношения давлений и описывается нелинейной функцией. Здесь наблюдается плавное увеличение расхода с уменьшением отношения давлений.

В закритической области ($p_2/p_1 \leq b$) расход достигает максимального значения и остается постоянным независимо от дальнейшего снижения отношения давлений. Это явление связано с достижением скорости потока воздуха в самом узком сечении распределителя скорости звука.

Критическая точка b соответствует условию, при котором скорость потока воздуха в самом узком сечении распределителя достигает скорости звука. Для воздуха при нормальных условиях значение b составляет приблизительно 0,528. Эффективная площадь проходного сечения $F_{др}$ зависит от положения запорно-регулирующего элемента распределителя и может быть представлена как

функция управляющего сигнала u :

$$F_{др} = F_{max} \cdot f(u),$$

где F_{max} – максимальная эффективная площадь проходного сечения; $f(u)$ – функция, описывающая зависимость площади от управляющего сигнала.

Представленная модель массового расхода позволяет точно описать процесс истечения воздуха через дискретный распределитель в различных режимах работы пневмопривода. Учет нелинейного характера расходной функции и влияния критического отношения давлений особенно важен при анализе динамики системы и разработке алгоритмов управления, обеспечивающих высокую точность и быстроедействие электропневматического привода.

2.5.2 Динамика переключения распределителей

Процесс переключения дискретного распределителя характеризуется определенной динамикой, которую необходимо учитывать для точного моделирования поведения системы. Динамика переключения может быть описана дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\tau \frac{du}{dt} + u = u, \quad (2.26)$$

где: u – текущее положение запорно-регулирующего элемента; u – заданное положение (0 или 1 для дискретного распределителя); τ – постоянная времени переключения.

Альтернативно, для более точного описания динамики переключения может быть использована модель второго порядка:

$$\frac{d^2u}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{du}{dt} + \omega_n^2 u = \omega_n^2 u \quad (2.27)$$

где ζ – коэффициент демпфирования; ω_n – собственная частота колебаний.

Учет динамики переключения позволяет моделировать такие эффекты, как задержка срабатывания и дребезг контактов, которые могут оказывать существенное влияние на поведение системы, особенно при высокочастотном управлении.

Интеграция моделей массового расхода и динамики переключения в общую математическую модель электропневматического привода осуществляется путем их включения в уравнения изменения давлений в полостях пневмоцилиндра 2.20.

В данной работе использована модель первого порядка для описания динамики переключения поскольку она обеспечивает достаточно точное описание процесса переключения и имеет простую структуру.

2.6 Адаптация математической модели к эффективному численному расчету на ЭВМ

Эффективное численное моделирование динамики электропневматического привода требует оптимизации математической модели для выполнения расчетов на ЭВМ. Данный этап критически важен для обеспечения высокой производительности вычислений при проведении многочисленных итераций в задачах оптимизации, анализа чувствительности и робастности системы управления.

Основные цели оптимизации математической модели включают:

1. Снижение вычислительной сложности уравнений;
2. Уменьшение времени выполнения расчетов;
3. Повышение численной устойчивости алгоритмов;
4. Эффективное использование параллельных вычислительных архитектур.

Для достижения этих целей будут применены следующие методы:

1. Векторизация уравнений;
2. Упрощение и линеаризация нелинейных выражений;
3. Предварительное вычисление констант и коэффициентов;

2.6.1 Векторизация уравнений

Векторизация уравнений представляет собой эффективный метод оптимизации вычислений, позволяющий использовать преимущества SIMD-инструкций

(Single Instruction, Multiple Data) современных процессоров. Данный подход особенно актуален для математической модели электропневматического привода с дискретными распределителями, где многие операции могут быть выполнены параллельно [8] над несколькими элементами данных.

Основная идея векторизации заключается в преобразовании скалярных операций в векторные, что позволяет обрабатывать несколько элементов данных одновременно [36]. В контексте рассматриваемой модели это означает переход от поэлементных вычислений к операциям над векторами и матрицами. Процесс векторизации начинается с представления состояния системы в виде единого вектора. Для электропневматического привода вектор состояния может быть записан как:

$$\mathbf{y} = [x, v, p_1, p_2, T_1, T_2, x_{v1}, x_{v2}, x_{v3}, x_{v4}]^T. \quad (2.28)$$

Система дифференциальных уравнений, описывающая динамику привода, преобразуется к векторной форме:

$$\frac{d\mathbf{y}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{y}, t),$$

где \mathbf{f} – векторная функция, компоненты которой соответствуют правым частям исходных дифференциальных уравнений.

Векторизация уравнений массового расхода через распределители является одним из ключевых элементов оптимизации. Вместо последовательного расчета расхода для каждого распределителя, формируется вектор массовых расходов:

$$\mathbf{G} = \psi(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) \odot \mathbf{u} \odot \mathbf{C}_d \odot \mathbf{F}_{др} \odot \frac{\mathbf{p}_{вх}}{\sqrt{RT_{вх}}},$$

где \odot – поэлементное умножение векторов; $\psi(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ – вектор-функция расходных характеристик; \mathbf{u} – вектор управляющих сигналов; \mathbf{C}_d – вектор коэффициентов расхода; $\mathbf{F}_{др}$ – вектор эффективных площадей проходных сечений; \mathbf{p} и \mathbf{T} – векторы давлений и температур на входе распределителей соответственно.

Уравнения изменения давления в полостях цилиндра также подвергаются векторизации:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{\gamma R}{L} \odot \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{V}} \odot \left(\mathbf{G}_{вх} - \mathbf{G}_{вых} - \frac{\mathbf{p}}{RT} \odot \frac{d\mathbf{V}}{dt} \right),$$

где $\mathbf{p} = [p_1, p_2]^T$, $\mathbf{T} = [T_1, T_2]^T$, $\mathbf{V} = [V_1/L, V_2/L]^T$ – векторы давлений, температур и нормализованных объемов полостей соответственно.

Векторизация затрагивает и уравнения изменения температуры в полостях:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{p}} \odot \frac{d\mathbf{p}}{dt} - (\gamma - 1) \frac{\mathbf{T}}{\bar{\mathbf{V}}} \odot \frac{d\bar{\mathbf{V}}}{dt}$$

Векторизация расчета расходной функции $\psi(p_1, p_2)$ осуществляется путем применения векторных операций к отношениям давлений:

$$\psi(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{\mathbf{p}_2}{\mathbf{p}_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{\mathbf{p}_2}{\mathbf{p}_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & \text{если } \frac{\mathbf{p}_2}{\mathbf{p}_1} > b, \\ \psi, & \text{если } \frac{\mathbf{p}_2}{\mathbf{p}_1} \leq b, \end{cases}$$

где операции возведения в степень и сравнения выполняются поэлементно.

Уравнения динамики золотника распределителей тоже можно векторизовать:

$$\tau \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{зад}}, \quad (2.29)$$

где \mathbf{u} – вектор управляющих сигналов золотников; $\mathbf{u}_{\text{зад}}$ – вектор заданных значений управляющих сигналов.

Применение векторизации позволяет эффективно использовать SIMD-инструкции процессора, что приводит к значительному ускорению вычислений. В зависимости от архитектуры процессора и специфики реализации, ускорение может достигать 2-4 раза [27] по сравнению с исходной скалярной версией.

2.6.2 Оптимизация нелинейных функций

Так же важным этапом оптимизации является упрощение и линеаризация нелинейных функций, которые могут оказывать существенное влияние на вычислительную сложность модели и делать ее жесткой. В контексте электропневматического привода, к нелинейным функциям относятся экспоненциальная функция в модели трения, функция sign , реакция упоров и условные операции.

Для оптимизации вычисления экспоненциальной функции в модели трения предлагается использовать аппроксимацию Паде. Данный метод обеспечивает высокую точность аппроксимации при сравнительно низкой вычислительной сложности. Аппроксимация Паде для экспоненциальной функции может быть представлена в виде:

$$e^x \approx \frac{1 + \frac{x}{2} + \frac{x^2}{10} + \frac{x^3}{120}}{1 - \frac{x}{2} + \frac{x^2}{10} - \frac{x^3}{120}}.$$

Данная аппроксимация обеспечивает высокую точность в диапазоне $x \in [-2,5; 2,5]$, что достаточно для моделирования эффекта Штрибека в рассматриваемой системе.

Функция sign , используемая в модели трения, может быть аппроксимирована гладкой функцией для улучшения численной стабильности:

$$\text{sign}(x) \approx \tanh(kx),$$

где k – параметр, определяющий крутизну перехода. Рекомендуется выбирать k в диапазоне $100 \div 1000$ для баланса между точностью аппроксимации и численной стабильностью.

Реакция упоров, обычно моделируемая с использованием условных операций, может быть оптимизирована применением непрерывной аппроксимации:

$$R_{\text{оп}} = k_{\text{оп}}(x - x_{\text{мин}}) \cdot S(x - x_{\text{мин}}) + k_{\text{оп}}(x - x_{\text{макс}}) \cdot S(x - x_{\text{макс}}),$$

где $S(x)$ – сглаживающая функция, например:

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}},$$

где α – параметр, определяющий крутизну перехода.

Для оптимизации условных операций в модели предлагается использовать непрерывные аппроксимации. Например, функция максимума может быть аппроксимирована как:

$$\max(a, b) \approx \frac{a + b + \sqrt{(a - b)^2 + \varepsilon}}{2},$$

где ε – малое положительное число, обеспечивающее гладкость функции.

Применяя предложенные оптимизации, уравнения реакции упоров и силы трения могут быть представлены в виде:

$$R_{\text{тр}} = \left[R_{\text{к}} + (R_{\text{с}} - R_{\text{к}}) \frac{1 + \frac{z}{2} + \frac{z^2}{10} + \frac{z^3}{120}}{1 - \frac{z}{2} + \frac{z^2}{10} - \frac{z^3}{120}} \right] \tanh(k\dot{x}) + R_{\text{в}}\dot{x}, \quad (2.30)$$

$$R_{\text{оп}} = k_{\text{оп}}(x - x_{\text{мин}}) \cdot \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x - x_{\text{мин}})}} + k_{\text{оп}}(x - x_{\text{макс}}) \cdot \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x - x_{\text{макс}})}},$$

2.6.3 Аналитическое вычисление якобиана для численного решения ОДУ

Так же в рамках оптимизации модели использовалось аналитическое вычисление якобиана для решателей ОДУ, что позволяет уменьшить количество вычислений и повысить численную стабильность.

Якобиан системы определяется как матрица частных производных:

$$J = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_{10}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial y_{10}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{10}}{\partial y_1} & \frac{\partial f_{10}}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_{10}}{\partial y_{10}} \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

где \mathbf{f} – вектор-функция правых частей системы дифференциальных уравнений.

Ключевые элементы якобиана включают:

1. Частные производные уравнения движения поршня:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} &= 0, & \frac{\partial \dot{x}}{\partial v} &= 1, \\ \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} &= 0, & \frac{\partial \dot{v}}{\partial v} &= \frac{1}{M}(\mathbf{p}^T \mathbf{F} - p_{\text{атм}}(\mathbf{1}^T \mathbf{F}) - R_{\text{тр}} - R_{\text{оп}} - R_{\text{вн}}), \\ \frac{\partial \dot{v}}{\partial p_1} &= 0, & \frac{\partial \dot{v}}{\partial p_2} &= 0. \end{aligned}$$

2. Частные производные уравнений изменения давления:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{p}_i}{\partial x} &= -\gamma p_i A_i / V_i, \\ \frac{\partial \dot{p}_i}{\partial v} &= -\gamma p_i A_i / V_i, \\ \frac{\partial \dot{p}_i}{\partial p_i} &= \gamma \left(R T_i \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial p_i} - A_i v \right) / V_i, \\ \frac{\partial \dot{p}_i}{\partial T_i} &= \gamma R \dot{m}_i / V_i, \\ \frac{\partial \dot{p}_i}{\partial x v_j} &= \gamma R T_i \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial x v_j} / V_i; \end{aligned}$$

3. Частные производные уравнений изменения температуры:

$$\frac{\partial \dot{T}_i}{\partial y_j} = \frac{T_i}{p_i} \frac{\partial \dot{p}_i}{\partial y_j} - (\gamma - 1) \frac{T_i}{V_i} \frac{\partial \dot{V}_i}{\partial y_j};$$

4. Частные производные уравнений динамики золотников:

$$\frac{\partial \dot{x}_{vi}}{\partial x_{vi}} = -1/\tau;$$

Запишем полный якобиан 2.31 системы:

$$J = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xv} & J_{xp} & J_{xT} & J_{xxv} \\ J_{vx} & J_{vv} & J_{vp} & J_{vT} & J_{v xv} \\ J_{px} & J_{pv} & J_{pp} & J_{pT} & J_{p xv} \\ J_{Tx} & J_{Tv} & J_{Tp} & J_{TT} & J_{T xv} \\ J_{xvx} & J_{xvv} & J_{xvp} & J_{xvT} & J_{xv xv} \end{bmatrix},$$

в данной матрице якобина каждый блок представляет собой подматрицу частных производных. Рассмотрим каждый блок подробнее:

1. J_{xx} – матрица размером 2×2

$$J_{xx} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\partial F_{\text{тп}}}{\partial x}/M & 0 \end{bmatrix};$$

2. J_{xv} – матрица размером 2×2

$$J_{xv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{\partial F_{\text{тп}}}{\partial v}/M + \frac{\partial F_{\text{он}}}{\partial v}/M \right) \end{bmatrix};$$

3. J_{xp} – матрица размером 2×2

$$J_{xp} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ F_1/M & -F_2/M \end{bmatrix}$$

;

4. J_{xT} – матрица $O_{2,2}$;

5. J_{xxv} – матрица $O_{3,3}$;

6. $J_{vx} = J_{xv}^T$;

7. $J_{vv} = J_{xv}$;

8. $J_{vp} = J_{xp}$;

9. $J_{vT} = J_{xT}$;

10. $J_{v xv} = J_{xxv}$

11. J_{px} – матрица размером 2×2

$$J_{px} = \begin{bmatrix} -\gamma p_1 F_1/V_1 & -\gamma p_1 F_1/V_1 \\ \gamma p_2 F_2/V_2 & \gamma p_2 F_2/V_2 \end{bmatrix};$$

12. $J_{pv} = J_{px}$;

13. J_{pp} – матрица размером 2×2

$$J_{pp} = \begin{bmatrix} \gamma RT_1 \frac{\partial \dot{m}_1}{\partial p_1} - F_1 v / V_1 & 0 \\ \gamma RT_2 \frac{\partial \dot{m}_2}{\partial p_2} - F_2 v / V_2 \end{bmatrix};$$

14. J_{pT} – матрица размером 2×2

$$J_{pT} = \begin{bmatrix} \gamma R \dot{m}_1 / V_1 & 0 \\ 0 & \gamma R \dot{m}_2 / V_2 \end{bmatrix};$$

15. J_{pxv} – матрица размером 4×2

$$J_{pxv} = \begin{bmatrix} \gamma RT_1 \frac{\partial \dot{m}_1}{\partial x_{v1}} / V_1 & -\gamma RT_1 \frac{\partial \dot{m}_1}{\partial x_{v2}} / V_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma RT_2 \frac{\partial \dot{m}_2}{\partial x_{v3}} / V_2 & -\gamma RT_2 \frac{\partial \dot{m}_2}{\partial x_{v4}} / V_2 \end{bmatrix};$$

16. J_{Tx} – матрица размером 2×2

$$J_{Tx} = \begin{bmatrix} T_1 J_{px,11} / p_1 & T_1 J_{px,12} / p_1 \\ T_2 J_{px,21} / p_2 & T_2 J_{px,22} / p_2 \end{bmatrix};$$

17. $J_{Tv} = J_{Tx}$;

18. J_{Tp} – матрица размером 2×2

$$J_{Tp} = \begin{bmatrix} T_1 J_{pp,11} / p_1 & 0 \\ 0 & T_2 J_{pp,22} / p_2 \end{bmatrix};$$

19. J_{TT} – матрица размером 2×2

$$J_{TT} = \begin{bmatrix} J_{pp,11} T_1 / p_1 & 0 \\ 0 & J_{pp,22} T_2 / p_2 \end{bmatrix};$$

20. J_{Txv} – матрица размером 3×2

$$J_{Txv} = \begin{bmatrix} T_1 J_{pxv,11} / p_1 & T_1 J_{pxv,12} / p_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_2 J_{pxv,23} / p_2 & T_2 J_{pxv,24} / p_2 \end{bmatrix};$$

21. $J_{xvx} = J_{xvv} = J_{xvp} = J_{xvT}$ – матрица $O_{2,4}$;

22. $J_{xv xv}$ – матрица размером 4×4

$$J_{xv xv} = \begin{bmatrix} -1/\tau & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/\tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/\tau & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau \end{bmatrix};$$

Применение якобиана для в методах численных численного интегрирования, таких как BDF (Backward Differentiation Formula) и Radau, позволяет уменьшить количество вычислений и повысить численную стабильность. В частности, использование якобиана позволяет уменьшить количество вычислений правых частей системы, что особенно важно для жестких систем.

2.7 Реализация математической модели

Сведем полученные выражения в единую систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{M}(\mathbf{p}^T \mathbf{F} - p_{\text{атм}}(\mathbf{1}^T \mathbf{F}) - R_{\text{тр}} - R_{\text{оп}} - R_{\text{вн}}) \\ \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{\gamma R}{L} \odot \frac{\mathbf{T}}{\bar{\mathbf{V}}} \odot \left(\mathbf{G}_{\text{вх}} - \mathbf{G}_{\text{вых}} - \frac{\mathbf{p}}{RT} \odot \frac{d\bar{\mathbf{V}}}{dt} \right) \\ \frac{dT}{dt} = \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{p}} \odot \frac{d\mathbf{p}}{dt} - (\gamma - 1) \frac{\mathbf{T}}{\bar{\mathbf{V}}} \odot \frac{d\bar{\mathbf{V}}}{dt} \\ \mathbf{G} = \psi(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) \odot \mathbf{u} \odot \mathbf{C}_d \odot \mathbf{F}_{\text{др}} \odot \frac{\mathbf{p}_{\text{вх}}}{\sqrt{RT_{\text{вх}}}} \\ R_{\text{тр}} = \left[R_{\text{к}} + (R_{\text{с}} - R_{\text{к}}) \frac{1 + \frac{z}{2} + \frac{z^2}{10} + \frac{z^3}{120}}{1 - \frac{z}{2} + \frac{z^2}{10} - \frac{z^3}{120}} \right] \tanh(k\dot{x}) + R_{\text{вх}} \\ R_{\text{оп}} = k_{\text{оп}}(x - x_{\text{мин}}) \cdot \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x - x_{\text{мин}})}} + k_{\text{оп}}(x - x_{\text{макс}}) \cdot \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x - x_{\text{макс}})}} \\ \mathbf{u}_{\text{зад}} = \tau \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{u} \end{array} \right. \quad (2.32)$$

где $\mathbf{p} = [p_1, p_2]^T$ – вектор давлений в полостях цилиндра; $\mathbf{F} = [F_1, -F_2]^T$ – вектор эффективных площадей поршня; $\mathbf{1} = [1, 1]^T$ – единичный вектор; $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление (скалярная величина); $(\mathbf{1}^T \mathbf{F}) = F_1 - F_2$ – результат векторного произведения, дающий разность площадей; \mathbf{u} – вектор управляющих сигналов золотников; $\mathbf{u}_{\text{зад}}$ – вектор заданных значений управляющих сигналов;

Реализация математической модели электропневматического привода осуществляется с использованием языка программирования Python и специализированных библиотек для научных вычислений. Основой реализации служит класс

`ElectroPneumaticActuator`, который инкапсулирует параметры системы и методы для моделирования ее динамики.

Структура класса включает конструктор для инициализации параметров привода, методы для расчета производных состояния системы, а также вспомогательные функции для вычисления отдельных компонентов модели, таких как массовые расходы, силы трения и реакции упоров. Ключевым элементом реализации является метод `calculate_derivatives`, который формирует систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода.

Центральным элементом модели, как было сказано выше, является метод `calculate_derivatives`, который формирует систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода. Этот метод учитывает изменение объемов полостей цилиндра, массовые расходы через распределители, силы, действующие на поршень, и термодинамические процессы в системе.

Метод `solve` обеспечивает интеграцию различных алгоритмов управления в процесс моделирования, что позволяет проводить сравнительный анализ эффективности различных стратегий управления приводом.

Полная реализация модели, включая детальные расчеты массовых расходов, сил трения и различных алгоритмов управления, представлена в приложении к диссертации [организовать приложение](#).

Управление приводом, согласно вышенанписанному, осуществляется путем задания управляющего сигнала \mathbf{u} , который представляет собой вектор состояний дискретных распределителей. Поскольку в рассматриваемой системе используется четыре распределителя, то $\mathbf{u} \in 0,1^4$, где 0 соответствует закрытому состоянию распределителя, а 1 – открытому.

Для реализации различных алгоритмов управления в модель введен абстрактный базовый класс `AbstractController`, от которого наследуются конкретные реализации контроллеров. Этот подход обеспечивает гибкость при исследовании и сравнении различных стратегий управления. Структура класса `AbstractController` определена следующим образом:

Метод `calculate_control` вычисляет управляющее воздействие на основе текущего состояния системы y , заданного значения y_{ref} и времени t . Метод `conver_to_valve_states` преобразует вычисленное управляющее воздействие в конкретные состояния распределителей.

Листинг 2.1

```

import numpy as np
from scipy.integrate import solve_ivp
from numba import njit

5 class ElectroPneumaticActuator:
    def __init__(self, params):
        self.m = params['m'] # Масса подвижных частей
        self.A1 = params['A1'] # Эффективная площадь поршня со
        стороны штока
        # Остальные параметры...

10 @njit
    def calculate_derivatives(self, t, y, u):
        x, v, p1, p2, T1, T2 = y

        V1 = self.V0 + self.A1 * x
        V2 = self.V0 + self.A2 * (self.L - x)
        # Расчет остальных состояний...
        return np.array([dx, dv, dp1, dp2, dT1, dT2])

20 @njit
    def mass_flow(self, p_up, p_down, T_up, u):
        # Реализация расчета массового расхода...
        # Реализация остальных методов...

25 def solve(self, t_span, y0, u_func):
    sol = solve_ivp(
        lambda t, y: self.calculate_derivatives(t, y, u_func(t
    )),
        t_span, y0, method='RK45', rtol=1e-6, atol=1e-9
    )
30 return sol

```

2.8 Верификация математической модели

Верификация математической модели представляет собой неотъемлемый этап разработки, направленный на подтверждение адекватности и точности по-

Листинг 2.2

```

from abc import ABC, abstractmethod

class AbstractController(ABC):
    @abstractmethod
5    def calculate_control(self, t, y, y_ref):
        pass

    @abstractmethod
10    def convert_to_valve_states(self, u):
        pass

```

лученного математического описания. Процесс верификации включает в себя комплекс методов и подходов, позволяющих оценить соответствие модели реальному объекту в рамках принятых допущений и ограничений.

Основной целью верификации является подтверждение способности модели корректно отражать физические процессы, происходящие в электропневматическом приводе, и обеспечивать достоверные результаты при решении задач анализа и синтеза систем управления. В отсутствие экспериментальных данных, предварительная верификация базируется на теоретическом анализе, численном моделировании.

Верификация данных происходила на основе следующих параметров модели, которые согласованны с характерными параметрами экспериментального стенда и представлены в таблице 2.

2.8.1 Теоретические основы верификации

Процесс верификации основывается на следующих ключевых принципах:

1. Принцип физической непротиворечивости, требующий соответствия модели фундаментальным законам механики и пневматики;
2. Принцип математической корректности, предполагающий отсутствие ошибок в формулировке уравнений и их решении;

Таблица 2 — Расширенные параметры моделирования электропневматического привода

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Масса подвижных частей	M	6.0	кг
Ход поршня	L	0.3	м
Диаметр поршня	D_{Π}	0.032	м
Диаметр штока	$d_{\text{шт}}$	0.012	м
Площадь поршня со стороны штока	$F_2 = \pi(D_{\Pi}^2 - d_{\text{шт}}^2)/4$	7.07×10^{-4}	м ²
Площадь поршня со стороны крышки	$F_1 = \pi D_{\Pi}^2/4$	8.04×10^{-4}	м ²
Давление питания	p_{Π}	6×10^5	Па
Атмосферное давление	$p_{\text{атм}}$	1×10^5	Па
Газовая постоянная воздуха	R	287	Дж/(кг·К)
Температура воздуха	$T_{\text{атм}}$	293	К
Показатель адиабаты	γ	1.4	-
Коэффициент расхода	C_d	0.7	-
Эффективная площадь клапана	A_v	1.2×10^{-6}	м ²
Параметры силы трения:			
Сила сухого трения	F_c	50	Н
Сила трения покоя	F_s	60	Н
Коэффициент вязкого трения	σ_2	100	Н·с/м
Скорость Штрибека	v_s	0.01	м/с
Показатель степени Штрибека	δ	2	-
Параметры реакции опор:			
Коэффициент жесткости опоры	$k_{\text{оп}}$	1×10^6	Н/м
Коэффициент демпфирования опоры	$b_{\text{оп}}$	1000	Н·с/м
Координата нижнего упора	$x_{\text{мин}}$	0	м
Координата верхнего упора	$x_{\text{макс}}$	0.3	м

3. Принцип консервативности, обеспечивающий выполнение законов сохранения массы и энергии в модели;
 4. Принцип устойчивости решения, гарантирующий сходимость численных методов при различных начальных условиях и параметрах системы.
- Методологический базис верификации включает:
1. Аналитический анализ структуры модели и ее соответствия физическим законам;
 2. Численное моделирование с исследованием сходимости и устойчивости решения;

3. Анализ предельных случаев и упрощенных режимов работы системы;
4. Оценку чувствительности модели к вариациям параметров.

Математически процесс верификации может быть формализован как задача минимизации функционала ошибки между результатами моделирования и теоретическими предсказаниями для известных частных случаев:

$$J = \min_{\theta} \sum_{i=1}^N |f_{\text{модель}}(x_i, \theta) - f_{\text{теория}}(x_i)|^2,$$

где $f_{\text{модель}}$ – функция, описывающая выход модели; $f_{\text{теория}}$ – теоретически предсказанное значение; x_i – входные параметры; θ – параметры модели; N – количество точек сравнения.

Выбор методов верификации обусловлен спецификой исследуемой системы и включает:

1. Проверку размерностей и единиц измерения всех величин в уравнениях модели.
2. Анализ асимптотического поведения модели при предельных значениях параметров.
3. Исследование сходимости численного решения при измельчении шага интегрирования.
4. Оценку энергетического баланса системы и соблюдения закона сохранения массы.

2.8.2 Проверка математической корректности

Проверка математической корректности модели электропневматического привода с дискретными распределителями осуществляется посредством следующих процедур:

1. Анализ размерностей и единиц измерения;
2. Верификация согласованности уравнений с законами сохранения;
3. Оценка физической непротиворечивости уравнений;
4. Проверка граничных условий и начальных значений;
5. Анализ непрерывности и дифференцируемости функций.

Каждая процедура направлена на выявление потенциальных ошибок в математическом описании системы и обеспечение соответствия модели фундаментальным физическим принципам.

Основные этапы проверки математической корректности модели подробнее:

Анализ размерностей и единиц измерения. Проверка согласованности размерностей всех величин, входящих в уравнения модели, осуществляется с использованием метода анализа размерностей. Для каждого уравнения модели выполняется проверка:

$$[LHS] = [RHS],$$

где $[LHS]$ и $[RHS]$ – размерности левой и правой частей уравнения соответственно.

Верификация согласованности уравнений с законами сохранения. Проверяется выполнение законов сохранения массы и энергии. Для закона сохранения массы в пневматической системе:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \oint_S \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = 0,$$

где ρ – плотность воздуха; V – объем системы; \mathbf{v} – скорость потока; S – поверхность контрольного объема.

Для закона сохранения энергии:

$$\frac{d}{dt} (E_k + E_p + U) = W_{\text{внеш}} - Q$$

где E_k – кинетическая энергия; E_p – потенциальная энергия; U – внутренняя энергия; $W_{\text{внеш}}$ – работа внешних сил; Q – теплота, переданная системе.

Оценка физической непротиворечивости уравнений. В рамках оценки физической непротиворечивости уравнений проводится проверка выполнения второго закона термодинамики для адиабатного процесса, в частности, принципа неубывания энтропии.

Для адиабатной системы изменение энтропии должно удовлетворять неравенству:

$$\Delta S \geq 0$$

где ΔS – изменение энтропии системы.

Проверка неубывания энтропии осуществляется следующим образом:

1. Вычисление изменения энтропии для каждой полости цилиндра на каждом шаге интегрирования:

$$\Delta S_i = m_i c_v \ln \left(\frac{T_{i,k+1}}{T_{i,k}} \right) + m_i R \ln \left(\frac{V_{i,k+1}}{V_{i,k}} \right),$$

где m_i – масса газа в i -й полости; c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме; $T_{i,k}$ и $V_{i,k}$ – температура и объем i -й полости на k -м шаге интегрирования.

2. Расчет производства энтропии за счет необратимых процессов, включая трение и дросселирование газа:

$$\Delta S_{\text{irr}} = \frac{F_{\text{тр}} \Delta x}{T_{\text{ср}}} + \sum_j G_j R \ln \left(\frac{p_{\text{вых},j}}{p_{\text{вх},j}} \right),$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения; Δx – перемещение; $T_{\text{ср}}$ – средняя температура; G_j – массовый расход через j -й распределитель; $p_{\text{вх},j}$ и $p_{\text{вых},j}$ – давления на входе и выходе j -го распределителя.

3. Проверка условия неубывания суммарной энтропии системы:

$$\Delta S_{\text{total}} = \sum_i \Delta S_i + \Delta S_{\text{irr}} \geq 0.$$

Дополнительно проверяется выполнение уравнения адиабатного процесса для каждой полости:

$$pV^\gamma = \text{const.}$$

Проверка граничных условий и начальных значений. Осуществляется верификация корректности заданных граничных условий и начальных значений. Для пневматической системы это включает проверку согласованности давлений на границах системы:

$$p_{\text{вх}} \geq p_i \geq p_{\text{вых}},$$

где $p_{\text{вх}}$ – давление источника; p_i – давление в i -й полости; $p_{\text{вых}}$ – давление на выходе (обычно атмосферное).

Анализ непрерывности и дифференцируемости функций. Проверяется непрерывность и дифференцируемость всех функций, входящих в модель, особенно в точках переключения режимов работы распределителей. Для функции

расхода через распределитель $G(p_1, p_2)$ должно выполняться условие:

$$\lim_{p_2 \rightarrow p_1^-} G(p_1, p_2) = \lim_{p_2 \rightarrow p_1^+} G(p_1, p_2)$$

2.8.3 Анализ предельных случаев

Анализ предельных случаев позволяет оценить корректность поведения модели в экстремальных условиях и проверить соответствие результатов теоретическим предсказаниям.

В рамках исследования предельных случаев рассматриваются следующие аспекты:

Поведение системы при экстремальных значениях параметров. Проводится серия численных экспериментов с использованием разработанной математической модели при предельных значениях ключевых параметров системы. К таким параметрам относятся:

- Давление питания p_s : При $p_s \rightarrow 0$ ожидается отсутствие движения поршня. При $p_s \rightarrow \infty$ следует наблюдать ограничение скорости движения поршня, обусловленное силами трения и инерцией.
- Масса подвижных частей m : При $M \rightarrow 0$ динамика системы должна определяться преимущественно силами трения. При $M \rightarrow \infty$ ожидается значительное замедление движения поршня.
- Коэффициенты трения: При стремлении коэффициентов трения к нулю система должна демонстрировать колебательное поведение с минимальным затуханием. При значительном увеличении коэффициентов трения ожидается апериодический характер движения с возможным возникновением эффекта ”прилипания-скольжения”.
- Эффективные площади проходных сечений распределителей: При $F_{др} \rightarrow 0$ должно наблюдаться существенное замедление динамики системы. При $F_{др} \rightarrow \infty$ ожидается приближение характеристик системы к случаю с идеальным источником давления.

2.8.4 Оценка физичности результатов моделирования

Проверка размерностей и единиц измерения. Рассматриваются размерности основных физических величин, используемых в модели:

- Длина: $[L] = \text{м}$;
- Время: $[T] = \text{с}$;
- Масса: $[M] = \text{кг}$;
- Сила: $[F] = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$;
- Давление: $[P] = \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$;
- Температура: $[\Theta] = \text{К}$.

Анализ размерностей для каждого уравнения системы:

- Уравнение движения поршня: $[M \cdot L/T^2] = [P \cdot L^2] + [F]$;
- Уравнение изменения давления: $[P/T] = [M/(L^2 \cdot T^2)]$;
- Уравнение изменения температуры: $[\Theta/T] = [\Theta/T]$;
- Уравнение массового расхода: $[M/T] = [L^2] \cdot [P]/[L/T] = [M/T]$;
- Уравнение силы трения: $[F] = [F] + [F \cdot T/L] \cdot [L/T] = [F]$;
- Уравнение реакции опоры: $[F] = [F/L] \cdot [L] = [F]$;
- Уравнение динамики золотников: $[1] = [1]$.

Проведенный анализ подтверждает согласованность размерностей во всех уравнениях математической модели. Это свидетельствует о корректности формулировки модели с точки зрения физических единиц измерения.

2.8.5 Заключение о достоверности модели

Глава 3. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ С ДИСКРЕТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Управление электропневматическими приводами с дискретными распределителями представляет собой комплексную задачу, обусловленную нелинейной динамикой пневматических систем и дискретным характером управляющих воздействий. Эффективное решение данной задачи требует применения специализированных алгоритмов, способных обеспечить высокую точность позиционирования и быстродействие системы при ограниченном наборе управляющих состояний. Особый интерес представляет адаптация классических методов управления к специфике дискретных пневматических систем.

В рамках настоящего исследования рассматривается широкий спектр подходов к управлению электропневматическими приводами, включающий как современные адаптивные методы, так и модифицированные классические алгоритмы. Исследуются скользящее управление, прогнозное управление, нечеткое управление, нейросетевое управление, а также применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в сочетании с классическими регуляторами, такими как ПИД-регулятор и его модификации. Выбор данных методов обусловлен необходимостью комплексного анализа возможностей оптимизации управления с учетом специфики дискретных пневматических систем. Каждый из рассматриваемых подходов обладает уникальными преимуществами и ограничениями, детальное изучение которых позволит сформировать всестороннее представление о перспективах совершенствования алгоритмов управления электропневматическими приводами с дискретными распределителями.

3.1 ШИМ управление с использование ПИД регулятора

3.1.1 Принципы реализации ШИМ в пневматических системах с дискретным управлением

Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) представляет собой метод формирования квазинепрерывного управляющего воздействия в системах с дискретными исполнительными элементами. В контексте пневматических систем с дискретными распределителями применение ШИМ позволяет преодолеть ограничения, связанные с бинарным характером управления, и обеспечить более точное регулирование положения и скорости исполнительного механизма.

Механизм формирования квазинепрерывного управляющего воздействия посредством ШИМ основан на периодическом переключении дискретных распределителей с определенной частотой и скважностью.

Математически это может быть описано следующим образом:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < \alpha T \\ 0, & \alpha T \leq t < T \end{cases}$$

где $u(t)$ – управляющий сигнал; T – период ШИМ; α – коэффициент заполнения $0 \leq \alpha \leq 1$.

На рисунке 3.1 показаны временные диаграммы ШИМ-сигнала с различными значениями коэффициента заполнения.

Среднее значение управляющего воздействия за период определяется как:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \alpha,$$

Влияние частоты ШИМ на динамику пневмопривода является критическим фактором при проектировании системы управления. С увеличением частоты ШИМ улучшается гладкость управляющего воздействия, что способствует снижению пульсаций давления и повышению точности позиционирования. Однако чрезмерно высокая частота может привести к повышенному износу распределителей и увеличению энергопотребления.

На рисунке 3.2 представлены графики изменения давления в пневмоцилиндре при различных частотах ШИМ.

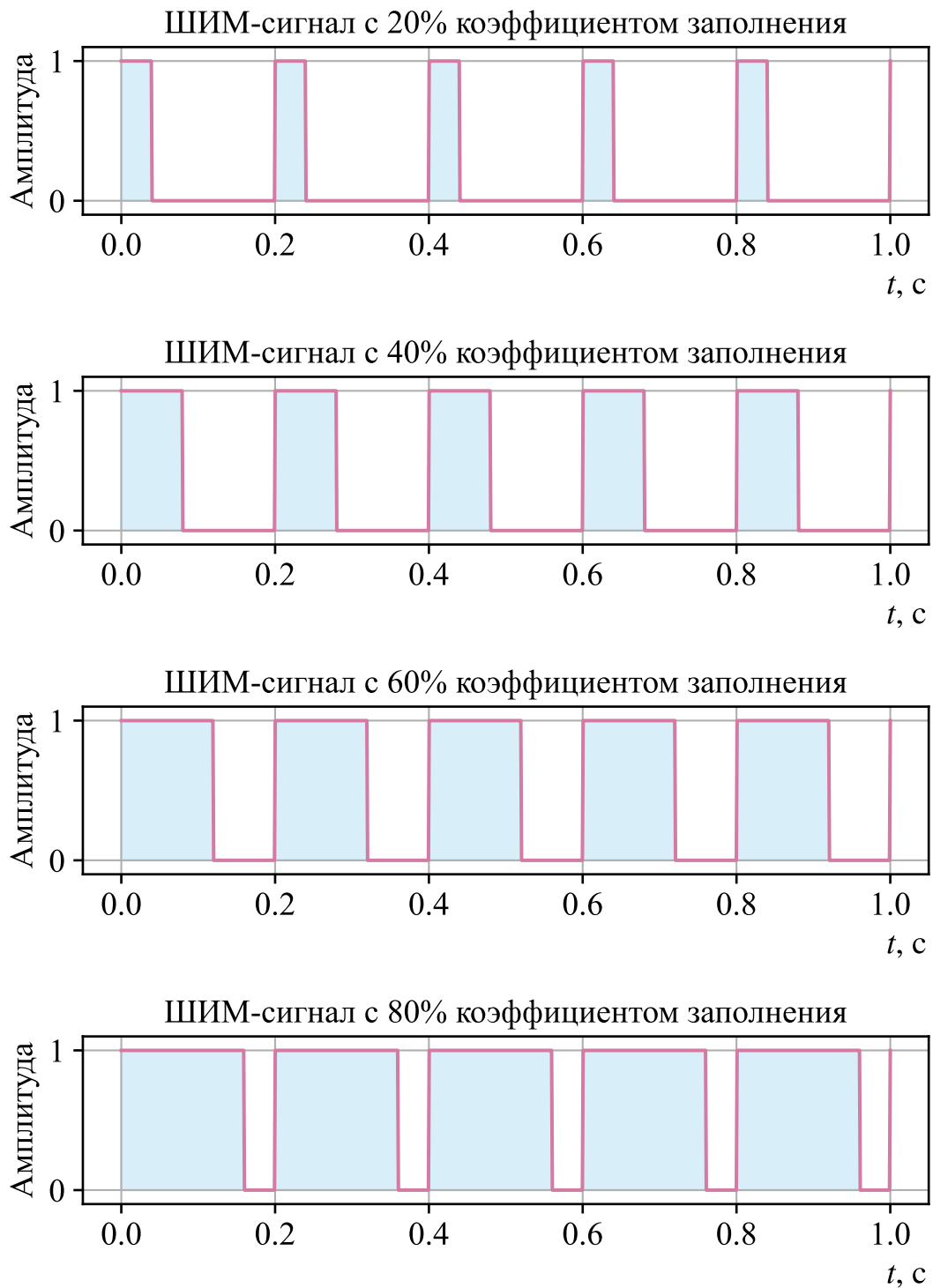


Рисунок 3.1 — Примеры ШИМ-сигнала с различными значениями коэффициента заполнения

Для анализа влияния частоты ШИМ на динамику системы может быть использована передаточная функция эквивалентного непрерывного звена:

$$W_{\text{ШИМ}}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{sT},$$

Рисунок 3.2 — Влияние частоты ШИМ на пульсации давления в пневмоцилиндре

где s — комплексная переменная преобразования Лапласа. Особенности применения ШИМ для различных типов дискретных распределителей обусловлены их конструктивными характеристиками и динамическими свойствами. На рисунке 3.3 показаны характеристики переходных процессов для распределителей с различным быстродействием.

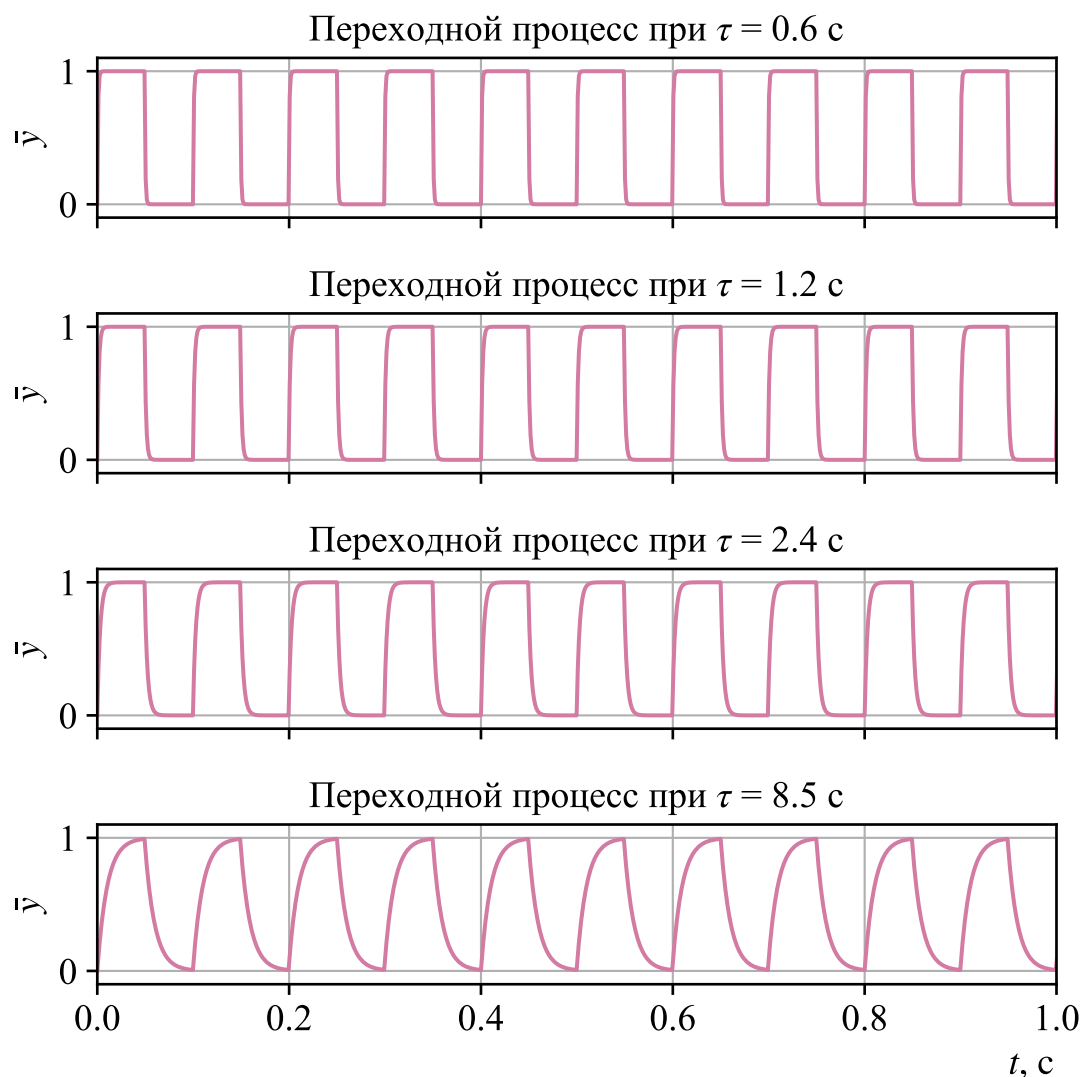


Рисунок 3.3 — Характеристики переходных процессов для различных типов дискретных распределителей

При выборе параметров ШИМ необходимо учитывать соотношение между периодом ШИМ и динамическими характеристиками распределителя:

$$T \geq k\tau_p,$$

где τ_p — время реакции распределителя; k — коэффициент запаса (обычно $k \geq 2$).

3.1.2 Реализация ПИД-регулирования для пневмоприводов с дискретными распределителями

Применение ШИМ в пневмоприводах с дискретными распределителями открывает возможность использования алгоритмов управления, изначально разработанных для непрерывных систем. Одним из наиболее эффективных и широко применяемых методов является пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) регулирование.

Структура ПИД-регулятора для пневмопривода с дискретными распределителями может быть представлена следующей схемой: В данной схеме выходной

Рисунок 3.4 — Структурная схема ПИД-регулятора с ШИМ управлением

сигнал ПИД-регулятора преобразуется в коэффициент заполнения ШИМ, который управляет дискретными распределителями пневмопривода. Этот подход позволяет достичь высокой точности управления, характерной для непрерывных систем, в условиях дискретного исполнительного механизма.

Математическая модель ПИД-регулятора в дискретной форме описывается уравнением:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s},$$

где $u[k]$ – управляющий сигнал на k -ом шаге; $e[k]$ – ошибка регулирования на k -ом шаге; K_p , K_i , K_d – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно; T_s – период дискретизации.

Выходной сигнал ПИД-регулятора преобразуется в коэффициент заполнения ШИМ согласно формуле:

$$\alpha = \frac{u[k] + u_{max}}{2u_{max}},$$

где u_{max} – максимальное значение управляющего сигнала.

3.1.3 Модифицированные структуры ПИД регулятора

3.1.4 Применение усреднителя Смита для компенсации запаздывания

3.1.5 Каскадные и комбинированные структуры ПИД регуляторов

3.1.6 Математическое описание и анализ динамических характеристик

3.2 Управление в скользящих режимах

3.3 Нечеткое управление

3.4 Прогнозное управление

Глава 4. МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОПРИВОДА

Задача многокритериальной оптимизации параметров пневмопривода заключается в нахождении оптимального набора параметров системы управления, обеспечивающего баланс между несколькими конфликтующими критериями качества работы привода. Основными критериями в данном случае выступают точность позиционирования выходного звена пневмопривода и частота переключений дискретных пневмораспределителей, которые определяют долговечность и энергопотребление системы. Оптимизация параметров управления направлена на минимизацию ошибок позиционирования при минимально возможном числе переключений, что позволяет продлить срок службы оборудования и снизить износ компонентов.

4.1 Постановка задачи многокритериальной оптимизации параметров пневмопривода

Для решения задачи применяются методы построения фронта Парето, позволяющие выделить множество неулучшаемых решений, представляющих компромисс между критериями. Оптимизационная задача формулируется как поиск таких значений параметров управления, при которых улучшается один из критериев, не ухудшая при этом другие. Это достигается путем численного моделирования системы с использованием суррогатных моделей, которые сокращают вычислительные затраты и позволяют быстро оценивать показатели качества при различных сочетаниях параметров. Результаты оптимизации используются для выбора наилучшей стратегии управления пневмоприводом в зависимости от заданных условий эксплуатации и требований к точности и ресурсам системы.

4.1.1 Концепция оптимальности по Парето

Концепция оптимальности по Парето, предложенная итальянским экономистом Вильфредо Парето [25] в конце XIX века, является фундаментальным понятием в теории многокритериальной оптимизации. Данная концепция предоставляет математический аппарат для анализа и принятия решений [22] в ситуациях, где необходимо одновременно оптимизировать несколько, зачастую противоречивых, критериев.

Рассмотрим задачу многокритериальной оптимизации с k целевыми функциями [5]:

$$\min_{x \in \Omega} F(x) = (\min f_1(x), \min f_2(x), \dots, \min f_k(x)),$$

где $x \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$ – вектор решений, принадлежащий допустимому множеству Ω ; $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^k$ – векторная целевая функция.

Решение $x^* \in \Omega$ называется оптимальным по Парето (или Парето-оптимальным), если не существует другого решения $x \in \Omega$, такого что:

$$\begin{cases} \forall i \in \{1, \dots, k\} : f_i(x) \leq f_i(x^*), \\ \exists j \in \{1, \dots, k\} : f_j(x) < f_j(x^*). \end{cases}$$

Иными словами, решение является Парето-оптимальным, если невозможно улучшить значение любого критерия без ухудшения значения хотя бы одного другого критерия.

Концепция оптимальности по Парето тесно связана с понятием доминирования. Говорят, что решение x_1 доминирует решение x_2 (обозначается как $x_1 \prec x_2$), если выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} \forall i \in \{1, \dots, k\} : f_i(x_1) \leq f_i(x_2), \\ \exists j \in \{1, \dots, k\} : f_j(x_1) < f_j(x_2). \end{cases}$$

Множество всех Парето-оптимальных решений образует множество недоминируемых решений, которое также называется множеством Парето или Парето-множеством.

Образ множества Парето в пространстве критериев называется фронтом Парето. Математически фронт Парето можно определить как:

$$PF = \{F(x) | x \in PS\},$$

где PS – множество Парето в пространстве решений.

Фронт Парето представляет собой геометрическое место точек [4] в пространстве критериев, соответствующих недоминируемым решениям. Он наглядно демонстрирует компромиссы между различными целевыми функциями и играет ключевую роль в процессе принятия решений.

На рисунке 4.1 приведен пример фронта Парето для двух критериев.

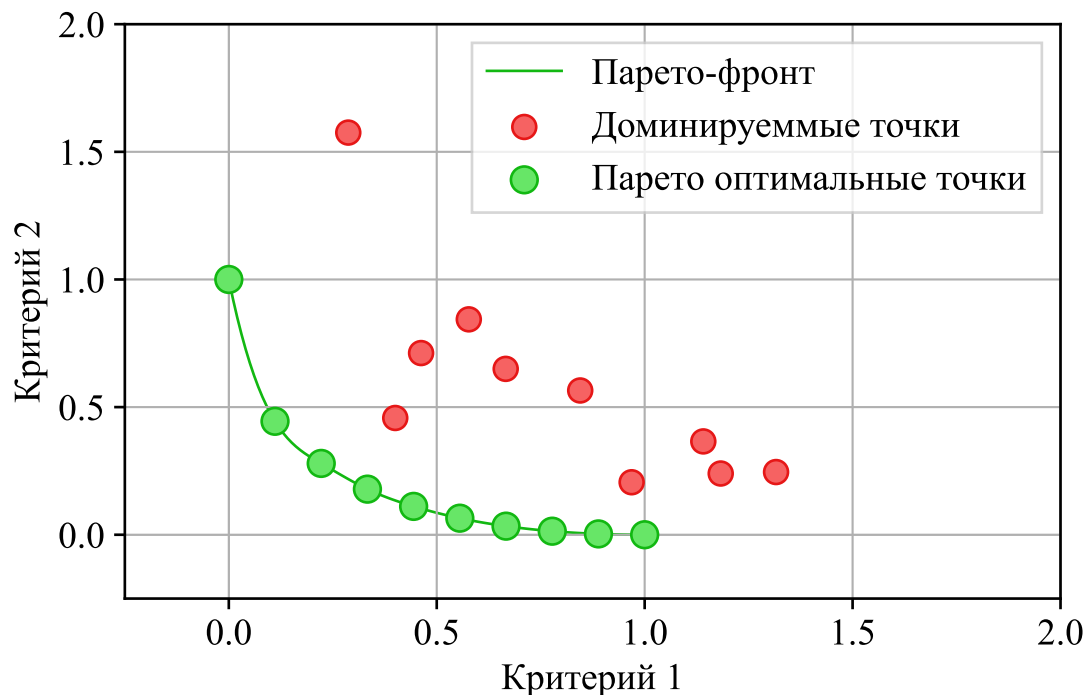


Рисунок 4.1 — Пример фронта Парето для двух критериев.

[ht] На рисунке видно, что фронт Парето представляет собой кривую, состоящую из недоминируемых решений (точек), для которых невозможно улучшить один критерий без ухудшения другого.

Основные свойства оптимальности по Парето:

1. Несравнимость: Парето-оптимальные решения несравнимы между собой в смысле доминирования.
2. Иерархическая структура: Концепция Парето-оптимальности может быть расширена на случай иерархической оптимизации, где критерии имеют различные приоритеты.
3. Инвариантность: Парето-оптимальные решения инвариантны относительно монотонных преобразований целевых функций.

4. Выпуклость: Если все целевые функции выпуклы и допустимое множество выпукло, то множество Парето также выпукло.

Для нахождения множества Парето-оптимальных решений в задачах многокритериальной оптимизации используются специальные эволюционные алгоритмы. Эти методы работают с популяциями решений и постепенно улучшают их, используя механизмы, подобные естественному отбору. Ниже описаны два из наиболее известных алгоритмов для поиска Парето-оптимальных решений.

Существует множество методов для поиска Парето-оптимальных решений, однако наиболее распространенными являются эволюционные алгоритмы, такие как NSGA-II и SPEA2.

NSGA-II — это один из самых популярных эволюционных алгоритмов для многокритериальной оптимизации. Его ключевые особенности:

1. Сортировка по доминированию: На каждом шаге алгоритм делит популяцию на несколько уровней, исходя из степени доминирования решений. Те решения, которые не доминируются другими, попадают в первый уровень, остальные сортируются в соответствии с их степенью доминирования.
2. Crowding Distance: NSGA-II использует метрику "crowding distance" для оценки плотности решений в области фронта Парето. Это помогает поддерживать разнообразие решений, предотвращая их слияние в одном месте.
3. Операторы отбора, скрещивания и мутаций: Алгоритм применяет стандартные операторы генетического алгоритма для эволюции популяции — отбор лучших решений, скрещивание и мутацию для создания нового поколения.

NSGA-II обеспечивает эффективное нахождение множества Парето-оптимальных решений, а также хорошо сохраняет разнообразие решений вдоль фронта Парето [5].

SPEA2 — это улучшенная версия алгоритма SPEA, разработанная для повышения эффективности поиска недоминируемых решений. Основные улучшения SPEA2 включают:

1. Архивирование решений: SPEA2 сохраняет архив недоминируемых решений на каждом шаге, что помогает гарантировать, что фронт Парето не будет потерян в процессе эволюции.

2. Оценка решений: Каждый элемент популяции получает оценку на основе того, сколько решений он доминирует и насколько сильно доминируется сам. Эта оценка используется для выбора кандидатов для следующего поколения.
3. Учет плотности решений: Подобно NSGA-II, SPEA2 учитывает плотность решений вблизи каждого кандидата, что помогает поддерживать разнообразие и улучшать распределение решений вдоль фронта Парето.

SPEA2 продемонстрировал высокую производительность на сложных задачах многокритериальной оптимизации и может эффективно находить множество недоминируемых решений [40].

В задаче оптимизации параметров управления пневматическим приводом концепция оптимальности по Парето позволяет учесть множественные, зачастую противоречивые, критерии качества управления. Например, минимизация времени переходного процесса и минимизация количества переключений распределителей могут находиться в конфликте друг с другом. Построение фронта Парето в этом случае позволяет выявить множество оптимальных компромиссных решений и предоставить лицу, принимающему решения, полную картину возможных вариантов.

4.2 Методы построения сурогатных моделей

Суррогатное моделирование является достаточно эффективным методом в задачах многокритериальной оптимизации, особенно при построении Парето-фронта. Как правило, оно используется для аппроксимации сложных и вычислительно затратных функций или систем, что позволяет значительно снизить временные и вычислительные затраты на решение задач, требующих многократной оценки целевых функций. Данный подход особенно полезен в тех случаях, когда каждая отдельная оценка целевой функции является дорогостоящей с точки зрения времени или ресурсов, как это часто встречается при численном моделировании физических процессов или компьютерных симуляциях сложных инженерных систем.

Для снижения вычислительных затрат используется суррогатное моделирование, при котором сложные функции аппроксимируются с

помощью более простых моделей, называемых суррогатами, которые можно быстро и эффективно вычислять. Это позволяет оптимизировать процесс поиска Парето-фронта и находить решения с меньшими затратами ресурсов.

4.2.1 Обзор методов суррогатного моделирования

Полиномиальная регрессия Полиномиальная регрессия представляет собой метод аппроксимации данных с использованием полиномов различных степеней. Этот метод является расширением линейной регрессии и позволяет моделировать зависимости между входными и выходными переменными более гибким образом, используя дополнительные нелинейные термины, такие как квадратичные, кубические члены и т.д., а также их взаимодействия [10].

Полиномиальная регрессия предполагает, что зависимость между предикторами и откликом может быть описана полиномиальной функцией вида:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i x_i + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \beta_{ij} x_i x_j + \dots,$$

где $\hat{y}(\mathbf{x})$ – предсказанное значение отклика; β_0 – свободный член (интерцепт); β_i – коэффициенты линейных членов x_i ; β_{ij} – коэффициенты взаимодействия между переменными x_i и x_j ; p – количество переменных; x_i, x_j – входные переменные.

Для случая квадратичной регрессии полиномиальная функция принимает вид:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2.$$

Здесь учитываются коэффициенты линейных β_1, β_2 и квадратичных β_3, β_4 членов, а также коэффициент взаимодействия β_5 [14].

Для определения коэффициентов β используется метод наименьших квадратов, который минимизирует сумму квадратов отклонений между наблюдаемыми значениями y_i и предсказанными \hat{y}_i . Задача оптимизации формулируется следующим образом:

$$\min_{\beta} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min_{\beta} \sum_{i=1}^n \left\{ y_i - \left(\beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} + \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^p \beta_{jk} x_{ij} x_{ik} \right) \right\}^2,$$

где n – количество наблюдений.

Для решения этой задачи вводится матричная форма:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon},$$

где \mathbf{y} – вектор наблюдаемых значений откликов размерности $n \times 1$; \mathbf{X} – матрица признаков размерности $n \times m$, где m – количество коэффициентов, включая взаимодействия и нелинейные члены; $\boldsymbol{\beta}$ – вектор коэффициентов размерности $m \times 1$; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор ошибок.

Оценка коэффициентов $\boldsymbol{\beta}$ производится с использованием псевдообратной матрицы:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}.$$

где $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T$ – псевдообратная матрица Мура-Пенроуза, которая обеспечивает минимизацию ошибки на оценке коэффициентов [21].

Преимущества полиномиальной регрессии для задачи оптимизации управления электропневматическими приводами:

1. Простота реализации и интерпретации модели.
2. Низкие вычислительные затраты на построение и использование модели.
3. Возможность аналитического вычисления градиентов, что полезно для оптимизационных алгоритмов.

Ограничения метода:

1. Ограниченная способность моделировать сложные нелинейные зависимости, характерные для пневматических систем;
2. Риск переобучения при использовании полиномов высоких степеней;
3. Чувствительность к выбросам в экспериментальных данных.

Радиальные базисные функции Преимущества метода RBF для моделирования электропневматических приводов:

1. Способность эффективно аппроксимировать сложные нелинейные зависимости.
2. Хорошая обобщающая способность при правильном выборе параметров.
3. Возможность точной интерполяции в экспериментальных точках.

Ограничения метода:

1. Чувствительность к выбору параметров (количество и расположение центров, тип базисной функции, параметр формы).

2. Потенциальные проблемы с обусловленностью матрицы интерполяции при большом количестве базисных функций.
3. Сложность интерпретации модели по сравнению с полиномиальной регрессией.

Гауссовы процессы (Кригинг)

Кригинг (Гауссовы процессы) является мощным методом интерполяции, который позволяет строить суррогатные модели для сложных функций, используя концепцию случайных процессов [13]. Он основан на предположении, что процесс $y(\mathbf{x})$ может быть представлен в виде:

$$y(\mathbf{x}) = \mu + Z(\mathbf{x}),$$

где μ – среднее значение; $Z(\mathbf{x})$ – гауссовский процесс с нулевым средним и ковариационной функцией [20]:

$$\text{Cov}(Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x}_j)) = k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j),$$

Ковариационная функция часто задается как радиальная базисная функция:

$$k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2l^2}\right),$$

. где σ^2 — дисперсия; l — параметр длины [11].

Предсказание значений в новых точках \mathbf{x}_* осуществляется через условное распределение, учитывающее известные значения. Среднее предсказание и его дисперсия определяются как:

$$\hat{y}(\mathbf{x}_*) = \mu + \mathbf{k}_*^T \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{y} - \mu \mathbf{1}_n),$$

$$\text{Var}(\hat{y}(\mathbf{x}_*)) = k(\mathbf{x}_*, \mathbf{x}_*) - \mathbf{k}_*^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{k}_*,$$

где \mathbf{k}_* — вектор ковариаций между новой точкой и обучающими точками; \mathbf{K} — ковариационная матрица [39].

Кригинг широко применяется в задачах многокритериальной оптимизации и позволяет не только предсказывать значения, но и оценивать их неопределенность, что особенно полезно при построении фронтов Парето и выборе компромиссных решений [29].

Преимущества метода кригинга для моделирования электропневматических приводов:

1. Высокая точность интерполяции и экстраполяции;
2. Возможность оценки неопределенности предсказаний;
3. Гибкость в моделировании сложных нелинейных зависимостей;
4. Эффективность при ограниченном количестве экспериментальных данных.

Ограничения метода:

1. Вычислительная сложность при большом количестве экспериментальных точек;
2. Чувствительность к выбору функции корреляции и ее параметров;
3. Сложность интерпретации модели по сравнению с детерминированными методами.

Метод опорных векторов

Метод опорных векторов (SVM) представляет собой один из наиболее эффективных методов классификации и регрессии, основанный на поиске гиперплоскости, которая максимизирует зазор между классами. Основная идея заключается в преобразовании исходных данных в более высокое измерение с целью нахождения разделяющей гиперплоскости [16].

Рассмотрим обучающую выборку:

$$\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N,$$

где $x_i \in \mathbb{R}^n$ – вектор признаков; $y_i \in \{-1, 1\}$ – метка класса.

Задача заключается в нахождении гиперплоскости, которая разделяет два класса с максимальным зазором. Гиперплоскость определяется уравнением:

$$f(x) = w^T x + b = 0,$$

где $w \in \mathbb{R}^n$ – вектор весов; $b \in \mathbb{R}$ – смещение.

Целью является минимизация следующей функции потерь с учетом ограничений:

$$\min_{w, b} \frac{1}{2} \|w\|^2,$$

при условиях:

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1, \quad i = 1, \dots, N.$$

Для решения данной задачи применяется метод множителей Лагранжа, что приводит к следующей двойственной задаче [26]:

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i^T x_j),$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N.$$

где α_i – множители Лагранжа, которые определяют вклад каждого образца в решение задачи.

Для повышения мощности метода используется преобразование исходных данных в пространство более высокой размерности с помощью ядерных функций

$$K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j),$$

где $\varphi(\cdot)$ — отображение в новое пространство признаков.

Распространенные ядра включают линейное, полиномиальное и гауссово (радиальное базисное) ядро [1]:

- Линейное: $K(x_i, x_j) = x_i^T x_j$;
- Полиномиальное: $K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + 1)^d$;
- Гауссово: $K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right)$.

Для работы с шумными данными вводится параметр регуляризации C , который контролирует баланс между шириной зазора и ошибками классификации. Оптимизационная задача в этом случае принимает вид [3]:

$$\min_{w, b, \xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i,$$

при условиях:

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1 - \xi_i, \quad \xi_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N,$$

где ξ_i – переменные, отвечающие за допущенные ошибки.

Преимущества метода опорных векторов для построения суррогатной модели электропневматического привода:

1. Высокая обобщающая способность, особенно при ограниченном наборе обучающих данных;

2. Эффективность в задачах с большим количеством входных параметров;
3. Способность моделировать сложные нелинейные зависимости.

Ограничения метода:

1. - Вычислительная сложность обучения модели для больших наборов данных;
2. Чувствительность к выбору ядерной функции и настройке гиперпараметров;
3. Сложность интерпретации модели по сравнению с более простыми методами, такими как полиномиальная регрессия.

Нейронные сети

Эволюционные алгоритмы и метаэвристики Эволюционные алгоритмы и метаэвристики представляют собой группу методов оптимизации, вдохновленных природными процессами. Они основаны на принципах биологической эволюции и предлагают подходы, такие как генетические алгоритмы, алгоритмы роя частиц, иммунные алгоритмы и др., которые позволяют эффективно искать решения в пространстве возможных параметров [38].

Основная идея эволюционных алгоритмов заключается в имитации процесса естественного отбора, где популяция решений обновляется с каждым шагом алгоритма, и только наилучшие решения сохраняются для следующего поколения. Алгоритм начинается с инициализации популяции случайных решений, где каждое решение представляет собой набор параметров управления. Далее, для каждой особи в популяции оценивается функция приспособленности, которая определяет, насколько хорошо решение выполняет поставленную задачу. На основе функции приспособленности отбираются лучшие решения, которые подвергаются мутации и скрещиванию, чтобы создать новые решения, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность или не исчерпаны вычислительные ресурсы.

Математически, решение x оптимизируется с помощью эволюционного алгоритма, следуя процедуре:

$$x^{t+1} = \text{ОТБОР} \{ \text{МУТАЦИЯ} \{ \text{СКРЕЩИВАНИЕ} \{ x^t \} \} \},$$

где x^t – текущее решение; x^{t+1} – новое решение; ОТБОР – процедура отбора лучших решений или решений с высокой приспособленностью; МУТАЦИЯ –

процедура случайного или направленного изменения решения; СКРЕЩИВАНИЕ – процедура комбинирования решений для создания новых вариантов.

Основные элементы эволюционного алгоритма можно описать следующим образом:

1. Инициализация популяции: создание случайной популяции решений $x_i, i = 1, \dots, N$;
2. Оценка приспособленности: для каждого решения рассчитывается функция приспособленности $f(x_i)$, определяющая качество решения;
3. Отбор: выбор лучших решений для создания нового решения;
4. Скрещивание и мутация: создаются новые решения путем комбинирования и изменения существующих;
5. Замена: новые решения заменяют старые в популяции и процесс повторяется до достижения критерия останова.

Основные трудности применения эволюционных алгоритмов заключается в определении параметров алгоритма, таких как размер популяции, вероятность мутации и скрещивания, а также в обеспечении достаточной вычислительной мощности для обработки большого числа итераций.

Метаэвристические подходы, такие как алгоритмы роя частиц и методы имитации отжига, дополняют эволюционные алгоритмы, предоставляя дополнительные инструменты для исследования пространства решений. Эти методы доказали свою эффективность в решении задач многокритериальной оптимизации, где необходимо сбалансировать несколько противоречивых показателей качества.

Например, алгоритмы роя частиц (PSO) имитируют поведение стаи, где каждый агент (частица) перемещается в пространстве решений с учетом своей собственной истории и информации, полученной от других агентов. Частица i обновляет свою скорость и положение следующим образом:

$$\begin{aligned} v_i^{t+1} &= \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (g^t - x_i^t), \\ x_i^{t+1} &= x_i^t + v_i^{t+1}, \end{aligned}$$

где ω – коэффициент инерции; c_1, c_2 – коэффициенты обучения; r_1, r_2 – случайные числа; p_i – лучшее положение частицы; g – лучшее положение частицы.

Данные методы позволяют эффективно находить компромиссные решения в условиях многокритериальной оптимизации, что делает их особенно полезными

при управлении пневмоприводами и другими сложными системами, где требуется балансировать между различными критериями, такими как точность и частота переключений.

Преимущества эволюционных алгоритмов и метаэвристик для моделирования электропневматических приводов:

1. Способность находить компромиссные решения в условиях многокритериальной оптимизации;
2. Эффективность в поиске глобальных оптимумов в пространстве параметров;
3. Легкость в адаптации для многокритериальной оптимизации, что позволяет учитывать различные критерии качества.

Ограничения методов:

1. Высокая вычислительная сложность при большом количестве параметров;
2. Чувствительность к выбору параметров алгоритма;
3. Нет гарантии нахождения глобального оптимума.

4.2.2 Выбор оптимального метода построения суррогатных моделей

В рамках исследования методов построения суррогатных моделей для многокритериальной оптимизации алгоритмов управления электропневматическими приводами с дискретными распределителями был применен метод морфологического анализа Фрица Цвикки. Данный метод позволяет систематически рассмотреть все возможные решения проблемы путем анализа всех комбинаций параметров, что особенно важно при выборе оптимального подхода в сложных многопараметрических задачах.

Метод Цвикки включает в себя несколько этапов. На первом этапе формулируется проблема и определяются ключевые параметры, характеризующие возможные решения. В нашем случае, ключевыми параметрами для оценки методов построения суррогатных моделей были выбраны:

А. Способность к аппроксимации нелинейных зависимостей В. Масштабируемость С. Вычислительная эффективность D. Интерпретируемость результатов

Е. Способность к обобщению F. Адаптивность к типам данных G. Оценка неопределенности

Для каждого параметра были определены возможные значения: низкое, среднее и высокое (или эквивалентные им). Это позволяет создать морфологическую матрицу, которая представляет собой многомерное пространство возможных решений.

Таблица 3 — Морфологическая матрица методов построения суррогатных моделей

Параметр	Значение 1	Значение 2	Значение 3
А. Способность к аппроксимации нелинейных зависимостей	Низкая	Средняя	Высокая
В. Масштабируемость	Плохая	Средняя	Хорошая
С. Вычислительная эффективность	Низкая	Средняя	Высокая
Д. Интерпретируемость результатов	Низкая	Средняя	Высокая
Е. Способность к обобщению	Низкая	Средняя	Высокая
F. Адаптивность к типам данных	Низкая	Средняя	Высокая
G. Оценка неопределенности	Нет	Частичная	Полная

На следующем этапе анализа каждый рассматриваемый метод построения суррогатных моделей был оценен по каждому параметру. Оценка проводилась на основе теоретических свойств методов и опыта их применения в схожих задачах. Результаты оценки представлены в следующей таблице:

Таблица 4 — Оценка методов по параметрам

Метод	A	B	C	D	E	F	G
Полиномиальная регрессия	1	1	3	3	1	1	1
Радиальные базисные функции (RBF)	2	2	2	2	2	2	1
Кригинг (Гауссовы процессы)	2	1	1	1	3	2	3
Метод опорных векторов (SVM)	2	3	2	1	3	2	1
Нейронные сети	3	3	2	1	3	3	2
Эволюционные алгоритмы	3	2	1	2	2	3	1

Здесь числовые значения соответствуют оценкам из морфологической матрицы (1 - низкая/плохая, 2 - средняя, 3 - высокая/хорошая).

Для наглядного представления результатов анализа на рисунке 4.2 была приведена лепестковая диаграмма, отражающая оценки методов по каждому из рассмотренных параметров.

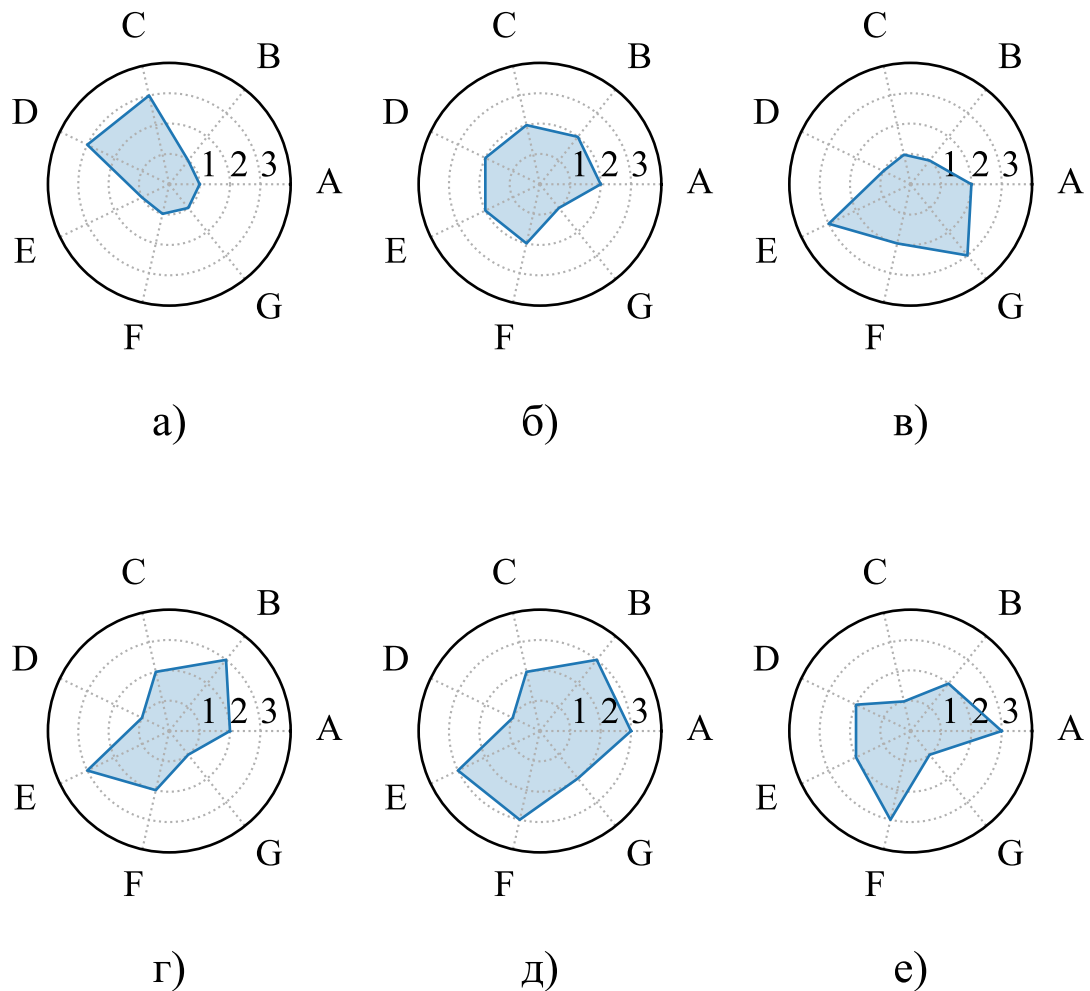


Рисунок 4.2 — а

Для выбора оптимального метода необходимо учитывать важность каждого параметра в контексте нашей конкретной задачи. Учитывая специфику многокритериальной оптимизации алгоритмов управления электропневматическими приводами с дискретными распределителями, были присвоены следующие веса параметрам:

- А: 0.25 – высокая важность из-за нелинейности системы;
- В: 0.20 – важно для работы с множеством параметров;
- С: 0.15 – важно для итеративного процесса оптимизации;
- D: 0.05 – менее важно для данной задачи;
- Е: 0.20 – важно для работы с новыми комбинациями параметров;
- F: 0.10 – важно для работы с различными типами параметров;
- G: 0.05 – менее важно для данной задачи.

Используя эти веса, была вычислена взвешенная сумма для каждого метода. Рассмотрим пример расчета взвешенной суммы для метода нейронных сетей:

$$\begin{aligned}
 S &= 0.25 \cdot 3 + 0.20 \cdot 3 + 0.15 \cdot 2 + 0.05 \cdot 1 + \\
 &+ 0.20 \cdot 3 + 0.10 \cdot 3 + 0.05 \cdot 2 = \\
 &= 0.75 + 0.60 + 0.30 + 0.05 + 0.60 + 0.30 + 0.10 = \\
 &= 2.60
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

где S – взвешенная сумма для нейронных сетей, а числовые значения соответствуют оценкам из таблицы 4.

Аналогичным образом были рассчитаны взвешенные суммы для остальных методов. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5 — Взвешенные оценки методов

Метод	Взвешенная сумма
Полиномиальная регрессия	1.60
Радиальные базисные функции (RBF)	1.95
Кригинг (Гауссовы процессы)	1.90
Метод опорных векторов (SVM)	2.25
Нейронные сети	2.60
Эволюционные алгоритмы	2.15

Как видно из результатов, нейронные сети получили наивысшую взвешенную оценку (2.60). Это объясняется тем, что они имеют высокие оценки по наиболее важным критериям: способности к аппроксимации нелинейных зависимостей (вес 0.25), масштабируемости (вес 0.20) и способности к обобщению (вес 0.20). Несмотря на относительно низкую оценку по интерпретируемости результатов (1 с весом 0.05), это не оказало значительного влияния на общий результат из-за низкого веса этого критерия для нашей задачи.

На основе проведенного морфологического анализа с использованием метода Цвикки, наиболее подходящим методом для построения суррогатной модели в контексте многокритериальной оптимизации алгоритмов управления электропневматическими приводами с дискретными распределителями являются нейронные сети. Они получили наивысшую взвешенную оценку благодаря своим сильным сторонам: высокой способности к аппроксимации сложных нелинейных

зависимостей, хорошей масштабируемости и работе с высокоразмерными данными, высокой способности к обобщению и высокой адаптивности к различным типам данных.

Несмотря на некоторые недостатки, такие как относительно низкая интерпретируемость результатов и средняя вычислительная эффективность, преимущества нейронных сетей в контексте данной задачи перевешивают их недостатки. Для минимизации этих недостатков могут быть применены методы регуляризации, техники визуализации и интерпретации нейронных сетей, а также оптимизация архитектуры сети для повышения вычислительной эффективности.

4.3 Разработка нейросетевой суррогатной модели

В рамках разработки нейросетевой суррогатной модели для многокритериальной оптимизации алгоритмов управления электропневматическими приводами была предложена архитектура, основанная на концепции остаточных блоков. Данный подход позволяет эффективно обучать глубокие сети, преодолевая проблему затухающих градиентов. Структура модели включает входной слой, принимающий вектор параметров настройки алгоритма управления, последовательность остаточных блоков и выходной линейный слой, предсказывающий значения критериев качества управления.

Для повышения обобщающей способности модели и снижения риска переобучения применяется техника регуляризации. Процесс разработки суррогатной модели включал в себя оптимизацию гиперпараметров, таких как количество остаточных блоков, размерности скрытых слоев и скорость обучения, с использованием байесовской оптимизации. Данный подход позволил создать эффективную суррогатную модель, способную точно аппроксимировать сложные нелинейные зависимости между параметрами алгоритма управления и критериями качества электропневматического привода.

4.3.1 Архитектура модели

В целях повышения эффективности и точности суррогатного моделирования была разработана нейронная сеть, основанная на архитектуре с использованием остаточных блоков (Residual Blocks). Данная архитектура была выбрана для обеспечения устойчивости обучения и возможности построения глубоких моделей, способных захватывать сложные нелинейные зависимости между входными параметрами и выходными метриками системы.

Структура нейронной сети Разработанная нейронная сеть представляет собой глубокую многослойную перцептронную модель (Multilayer Perceptron, MLP) [12], интегрированную с остаточными блоками для улучшения процесса обучения и повышения обобщающей способности модели. Архитектура сети состоит из следующих компонентов:

1. **Входной слой:** входной слой принимает вектор признаков $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, представляющий параметры инициализации системы. В данном случае – это параметры, которые изменяются в процессе оптимизации алгоритма. Количество нейронов во входном слое соответствует размерности входного вектора n ;
2. **Последовательность остаточных блоков:** основная часть сети состоит из серии остаточных блоков, каждый из которых включает в себя два линейных слоя с последующей нормализацией батча [15], функцией активации ReLU и Dropout для регуляризации. Остаточные блоки реализуются для обеспечения прямого прохождения градиентов и предотвращения проблем, связанных с обучением глубоких сетей, таких как исчезающие градиенты [6].
3. **Финальный линейный слой:** После последовательности остаточных блоков добавляется финальный линейный слой, количество нейронов которого соответствует размерности выходных метрик m . Этот слой отвечает за преобразование скрытых представлений в предсказания модели.

Рассмотрим каждый элемент архитектуры подробнее. Фундаментальным структурным элементом данной сети является остаточный блок, математическое описание которого может быть представлено следующим образом:

$$\mathbf{y} = F(\mathbf{x}, \{\mathbf{W}_i\}) + h(\mathbf{x}),$$

где $F(\mathbf{x}, \mathbf{W}_i)$ – остаточную функцию; $h(\mathbf{x})$ – функцию тождественного отображения или линейного проецирования.

Детализируя структуру остаточного блока, можно выразить $F(\mathbf{x}, \mathbf{W}_i)$ как композицию нескольких операций:

$$\mathbf{z}_1 = \sigma(\mathbf{W}_1 \mathbf{x} + \mathbf{b}_1),$$

$$\mathbf{z}_2 = D(\mathbf{z}_1, p),$$

$$\mathbf{z}_3 = \mathbf{W}_2 \mathbf{z}_2 + \mathbf{b}_2,$$

$$F(\mathbf{x}, \{\mathbf{W}_i\}) = \mathbf{z}_3.$$

где $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2 \in \mathbb{R}^{m \times n}$ – весовые матрицы; $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2 \in \mathbb{R}^m$ – векторы смещения; $\sigma(\cdot)$ – функция активации ReLU; $D(\cdot, p)$ – операция dropout с вероятностью p .

Функция активации ReLU определяется как [23]:

$$\sigma(x) = \max(0, x).$$

Механизм dropout представляет собой эффективный метод регуляризации [7], широко применяемый в глубоких нейронных сетях для предотвращения переобучения и повышения их обобщающей способности. В контексте рассматриваемой суррогатной модели, dropout играет ключевую роль в обеспечении надежности и устойчивости предсказаний.

Сущность метода dropout заключается в случайном ”выключении” определенной доли нейронов в процессе обучения. Математически этот процесс может быть описан следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{m} \odot \mathbf{z},$$

где $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^n$ – вектор активаций нейронов; $\mathbf{m} \in 0, 1^n$ – бинарная маска dropout; $\tilde{\mathbf{z}}$ – результирующий вектор после применения dropout.

Элементы маски \mathbf{m} генерируются независимо из распределения Бернулли с параметром $1 - p$:

$$m_i \sim \text{Bernoulli}(1 - p), \quad i = 1, \dots, n,$$

где p – вероятность ”выключения” нейрона, являющуюся одним из гиперпараметров модели.

Значение $1 - p$, соответственно, определяет вероятность сохранения нейрона активным.

Применение dropout приводит к тому, что математическое ожидание выходного значения каждого нейрона уменьшается в $1 - p$ раз:

$$\mathbb{E}[\tilde{z}_i] = (1 - p)z_i.$$

Для компенсации данного эффекта во время обучения, выход нейрона корректируется путем масштабирования на $1/(1 - p)$:

$$\tilde{\mathbf{z}} = \frac{1}{1 - p} \mathbf{m} \odot \mathbf{z}. \quad (4.2)$$

Важно отметить, что на этапе инференса (применения обученной модели) dropout не используется. Это эквивалентно использованию математического ожидания активаций:

$$\mathbf{z}_{\text{test}} = \mathbb{E}[\tilde{\mathbf{z}}] = \mathbf{z}. \quad (4.3)$$

Применение dropout в остаточном блоке суррогатной модели может быть выражено следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_1 &= \sigma(\mathbf{W}_1 \mathbf{x} + \mathbf{b}_1) \\ \tilde{\mathbf{z}}_1 &= \frac{1}{1 - p} \mathbf{m} \odot \mathbf{z}_1, \quad \mathbf{m}_i \sim \text{Bernoulli}(1 - p) \\ \mathbf{z}_2 &= \mathbf{W}_2 \tilde{\mathbf{z}}_1 + \mathbf{b}_2 \end{aligned}$$

где $\sigma(\cdot)$ обозначает функцию активации; \mathbf{W}_1 и \mathbf{W}_2 – весовые матрицы; \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 – векторы смещения.

Остаточные блоки объединяются в последовательность, образуя глубокую модель, способную захватывать сложные нелинейные зависимости между входными параметрами и выходными метриками качества управления электропневматическим приводом.

4.3.2 Процесс обучения

4.3.3 Оптимизация гиперпараметров

4.4 Алгоритм построения фронта Парето

4.4.1 Генерация начальной выборки методом латинского гиперкуба

4.4.2 Обучение ансамбля нейронных сетей

4.4.3 Генерация и отбор Парето-оптимальных решений

4.5 Визуализация и анализ фронта Парето

4.5.1 Методы визуализации многомерных фронтов Парето

4.5.2 Метрики сравнения фронтов Парето

4.5.3 Анализ чувствительности и робастности решений

Глава 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОПРИВОДА С ДИСКРЕТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

5.1 Описание экспериментальной установки

5.1.1 Аппаратная часть установки

5.1.2 Программное обеспечение установки

5.2 Методика проведения экспериментов

5.3 Экспериментальное исследование ШИМ управления с использованием ПИД регулятора

5.4 Экспериментальное исследование управления в скользящих режимах

5.5 Экспериментальное исследование нечеткого управления

5.6 Экспериментальное исследование прогнозного управления

5.7 Сравнительный анализ методов управления с расчетными данными

Глава 6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ С ДИСКРЕТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

6.1 Анализ эффективности алгоритмов по экспериментальным данным

6.2 Построение фронтов Парето для алгоритмов управления

6.3 Сравнительные анализ фронтов Парето

6.4 Оценка робастности алгоритмов управления

6.5 рекомендации по выбору алгоритма управления для различных условий эксплуатации

Глава 7. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Здесь представляется синтез гибридного алгоритма управления с использованием управления с предсказанием и управлением в скользящих режимах.

7.1 Концепция гибридных алгоритмов управления

7.2 Разработка гибридного алгоритма управления на основе скользящего и прогнозного управления

7.3 Экспериментально исследование гибридного алгоритма управления

7.4 Сравнение фронтов Парето для гибридного и базовых алгоритмов управления

Заключение

1. На основе анализа ...
2. Численные исследования показали, что ...
3. Математическое моделирование показало ...
4. Для выполнения поставленных задач был создан ...

Словарь терминов

TeX : Система компьютерной вёрстки, разработанная американским профессором информатики Дональдом Кнутом

панграмма : Короткий текст, использующий все или почти все буквы алфавита

Список литературы

1. *A. M. Deris A. M. Zain, R. S.* Overview of support vector machine in modeling machining performances [Text] / R. S. A. M. Deris A. M. Zain // *Procedia Engineering*. — 2011. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811054993/pdf?md5=6444d5e2c3c54c4a923cec3d51a56b07&pid=1-s2.0-S1877705811054993-main.pdf>.
2. *Ahn, K.* Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves [Text] / K. Ahn, S. Yokota // *Mechatronics*. — 2005. — Vol. 15, no. 6. — P. 683—702.
3. *Boswell, D.* Introduction to support vector machines [Text] / D. Boswell. — 2002. — URL: <http://pzs.dstu.dp.ua/DataMining/svm/bibl/IntroToSVM.pdf>.
4. *Coello Coello, C. A.* Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems [Text] / C. A. Coello Coello, G. B. Lamont, D. A. Van Veldhuizen. — Springer, 2007.
5. *Deb, K.* Multi-objective optimization using evolutionary algorithms [Text] / K. Deb. — John Wiley & Sons, 2001.
6. Deep residual learning for image recognition [Text] / K. He [et al.] // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. — 2016. — P. 770—778.
7. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting [Text] / N. Srivastava [et al.] // *Journal of machine learning research*. — 2014. — Vol. 15, no. 1. — P. 1929—1958.
8. *Eichenberger, A. E.* Vectorization for SIMD architectures with alignment constraints [Текст] / A. E. Eichenberger, P. Wu, K. O'Brien // *ACM SIGPLAN Notices*. — 2004. — Июнь. — Т. 39, № 6. — С. 82—93. — URL: <http://dx.doi.org/10.1145/996893.996853>.
9. Electro-pneumatic position tracking control system based on an intelligent phase-change PWM strategy [Text] / Z. Lin [et al.] // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. — 2018. — Vol. 40, no. 512.

10. *Fan, J.* Local polynomial modelling and its applications: monographs on statistics and applied probability 66 [Text] / J. Fan. — Taylor & Francis, 2018. — URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203748725/local-polynomial-modelling-applications-jianqing-fan>.
11. *Figueroa, A.* Gaussian processes for surrogate modeling of discharged fuel nuclide compositions [Text] / A. Figueroa, M. Götsche // Annals of Nuclear Energy. — 2021. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454920307817>.
12. *Goodfellow, I.* Deep learning [Text] / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. — MIT press, 2016.
13. *Gramacy, R. B.* Surrogates: Gaussian process modeling, design, and optimization for the applied sciences [Text] / R. B. Gramacy. — Taylor & Francis, 2020. — URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780367815493/surrogates-robert-gramacy>.
14. *Heiberger, R.* Polynomial regression [Text] / R. Heiberger, E. Neuwirth // R Through Excel: A Spreadsheet Interface for Statistics, Data Analysis, and Graphics. — Springer, 2009. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-0052-4_11.
15. *Ioffe, S.* Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift [Text] / S. Ioffe, C. Szegedy // International conference on machine learning. — PMLR. 2015. — P. 448—456.
16. *Jakkula, V.* Tutorial on support vector machine (SVM) [Text] / V. Jakkula. — 2006. — URL: <https://course.khoury.northeastern.edu/cs5100f11/resources/jakkula.pdf>.
17. *Jianbo, J.* Pneumatic Noise Study of Multi-Stage Sleeve Control Valve [Text] / J. Jianbo, S. Yan, M. Xianyu // Processes. — 2023. — Vol. 11, no. 9.
18. *Kawamura, S.* PI type hierarchical feedback control scheme for pneumatic robots [Text] / S. Kawamura, K. Miyata, H. Hanafusa // Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation. — IEEE, 1989. — P. 1853—1858.

19. *Liu, S.* An Analysis of a Pneumatic Servo System and Its Application to a Computer-Controlled Robot [Text] / S. Liu, J. E. Bobrow // Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-transactions of The Asme. — 1988. — Vol. 110. — P. 228—235.
20. *Marrel, A.* Probabilistic surrogate modeling by Gaussian process: A review on recent insights in estimation and validation [Text] / A. Marrel, B. Iooss // Reliability Engineering & System Safety. — 2024. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832024001686>.
21. *Meyer, J. F.* Defining and Evaluating Resilience: A Performability Perspective [Text] / J. F. Meyer // Proceedings of the International Workshop on Performability Modeling of Computer and Communication Systems (PMCCS). — Eger, Hungary, 09/2009.
22. *Miettinen, K.* Nonlinear multiobjective optimization [Text] / K. Miettinen. — Kluwer Academic Publishers, 1999.
23. *Nair, V.* Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines [Text] / V. Nair, G. E. Hinton // Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10). — 2010. — P. 807—814.
24. *Nguyen, T. K.* Accurate Sliding-Mode Control of Pneumatic Systems Using Low-Cost Solenoid Valves [Text] / T. K. Nguyen // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. — IEEE, 2007.
25. *Pareto, V.* Cours d'économie politique [Text] / V. Pareto. — Rouge, 1896.
26. *Patle, A.* SVM kernel functions for classification [Text] / A. Patle, D. S. Chouhan // IEEE Explore. — 2013. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6524743/>.
27. Practical SIMD Vectorization Techniques for Intel® Xeon Phi Coprocessors [Текст] / X. Tian [и др.]. — 2013. — Май. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/IPDPSW.2013.245>.
28. *Pu, J.-S.* Motion control of pneumatic drives [Text] / J.-S. Pu, R. H. Weston // Microprocess. Microsystems. — 1988. — Vol. 12. — P. 373—382.
29. *Radaideh, M. I.* Surrogate modeling of advanced computer simulations using deep Gaussian processes [Text] / M. I. Radaideh, T. Kozłowski // Reliability Engineering & System Safety. — 2020. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832019301711>.

30. *Shiee, M.* An experimental comparison of PWM schemes to improve positioning of servo pneumatic systems [Text] / M. Shiee, A. Sharifi, M. Fathi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2015. — July. — Vol. 82.
31. Simulation Study and Experimental Position Control of Pneumatic Cylinder Using Sliding Mode Control with on/off Control Valves [Text] / Y. Elsayed [et al.] // Port-Said Engineering Research Journal. — 2020. — Apr.
32. Sliding-Mode Control of Nonlinear Discrete-Input Pneumatic Actuator [Text] / S. Hodgson [et al.] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. — IEEE, 2011.
33. *Son, T. D.* A Method for Improving Position Control Performances of a Pneumatic Cylinder Using On-Off Solenoid Valves [Text] / T. D. Son, T. X. Bo // JST: Smart Systems and Devices. — 2022. — Vol. 32, no. 1. — P. 34—41.
34. *Surgenor, B. W.* Continuous Sliding Mode Control of a Pneumatic Actuator [Text] / B. W. Surgenor, N. D. Vaughan // Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-transactions of The Asme. — 1997. — Vol. 119. — P. 578—581.
35. *Utkin, V.* Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems [Текст] / V. Utkin, J. Guldner, J. Shi. — CRC Press, 2017. — (Automation and Control Engineering).
36. Vapor SIMD: Auto-vectorize once, run everywhere [Текст] / D. Nuzman [и др.] // International Symposium on Code Generation and Optimization (CGO 2011). — 2011. — C. 151—160.
37. *Varseveld, R. B. van.* Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves [Text] / R. B. van Varseveld, G. M. Bone // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Vol. 2. — IEEE, 1997. — P. 195—204.
38. *Zhang, Y.* Comparison of Sliding-Mode Control and Model-Predictive Control Algorithms for Pneumatic Actuators [Текст] : Master's Thesis / Zhang Yile. — Hamilton, Ontario, Canada : McMaster University, 2015.
39. *Zhou, Y.* An enhanced Kriging surrogate modeling technique for high-dimensional problems [Text] / Y. Zhou, Z. Lu // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2020. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088832702030073X>.

40. *Zitzler, E.* SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm [Text] : tech. rep. / E. Zitzler, M. Laumanns, L. Thiele. — 2001. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16584254>.
41. *Артболевский, И. И.* Теория механизмов и машин [Текст] / И. И. Артболевский. — М., Гостехиздат, 1953.
42. *Божкова, Л. В.* Повышение производительности промышленного робота с пневмоприводом и цикловой системой управления [Текст] / Л. В. Божкова, О. А. Дашенко // Вестник машиностроения. — 1992. — № 5. — С. 16—21.
43. *Бухарин, Н. А.* Основы проектирования механизмов автоматического управления автомобилем [Текст] / Н. А. Бухарин. — Наркомхоза, 1941.
44. *Герман, А. П.* Применение сжатого воздуха в горном деле [Текст] / А. П. Герман. — Москва : Горно-геол.-нефть. изд-во, 1933.
45. *Герц, Е. В.* Динамика группового высокоскоростного пневмопривода с механически пуском [Текст] / Е. В. Герц, Б. П. Долженков // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. — 1975. — № 3. — С. 12—21.
46. *Герц, Е. В.* выбор параметров быстродействующего привода [Текст] / Е. В. Герц, Б. П. Долженков // Станки и инструмент. — 1977. — № 3. — С. 12—17.
47. *Гинзбург, И. П.* Прикладная газодинамика [Текст] / И. П. Гинзбург. — Изд. ЛГУ, 1958.
48. *Касимов, А. М.* Развитие пневматических средств автоматизации [Текст] / А. М. Касимов // Материалы конференции с международным участием. Институт проблем управления им. Трапезникова РАН / под ред. И. проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. — 2010.
49. *Касимов, А. М.* Некоторые результаты исследований в области пневмоавтоматики [Текст] / А. М. Касимов, А. Н. Шубин // Приборы и системы управления. — 1994. — № 11. — С. 34—37.
50. *Крутиков, Г. А.* К вопросу выбора способа торможения пневмоприводов с большими присоединенными массами [Текст] / Г. А. Крутиков, А. И. Кудрявцев, Пекарь // Пневматика и гидравлика. — 1987. — № 13. — С. 60—71.
51. *Литвин, А. М.* Техническая термодинамика [Текст] / А. М. Литвин. — М., Госэнергоиздат, 1962.

52. *Мамонтов, М. А.* Вопросы термодинамики тела переменной массы [Текст] / М. А. Мамонтов. — М., Оборонгиз, 1961.
53. *Мамонтов, М. А.* Некоторые случаи течения газа [Текст] / М. А. Мамонтов. — М., Оборонгиз, 1962.
54. *Маркевич, Н. М.* Решение задачи о наполнении и опорожнении сосудов переменного объема сжимаемым газом, связанной с расчетом некоторых механизмов управления [Текст] / Н. М. Маркевич // Ученые записки ЛГУ. Сер. матем. наук. — 1949. — № 17.
55. *Парой, А. А.* Способы торможения пневмопривода промышленного робота [Текст] / А. А. Парой // Вестник машиностроения. — 1982. — № 10. — С. 16—21.
56. *Патент №1044845.* Позиционный пневмопривод [Текст] / Е. А. Рязанов (СССР). — № 3318224/23-06 ; заявл. 10.07.1981 ; опубл. 30.09.1983, Бюл. № 36. — 3 с. : ил.
57. *Патент №1642100.* Позиционный пневмопривод [Текст] / А. А. Кистиченко (СССР). — № 4678533/29 ; заявл. 14.04.1989 ; опубл. 15.04.1991, Бюл. № 14. — 3 с. : ил.
58. *Рабинович, А. Н.* Системы управления автоматических машин [Текст] / А. Н. Рабинович. — Техника, 1973. — 437 с.
59. *Страхович, К. И.* Прикладная газодинамика [Текст] / К. И. Страхович. — М., ОНТИ, 1937.
60. *Трофимов, О. Н.* Приводы автоматизированного оборудования [Текст] / О. Н. Трофимов. — Машиностроение, 1991. — 334 с.
61. *Тугенгольд, А. К.* Интеллектуальное управление мехатронными технологическими системами [Текст] / А. К. Тугенгольд. — Изд. центр ДГТУ, 2004. — 116 с.
62. *Филипов, И. Б.* Позиционно-следающий пневмопривод циклового промышленного робота [Текст] / И. Б. Филипов, Г. Н. С. // Пневматика и гидравлика. — 1981. — № 10. — С. 19—23.
63. *Филипов, И. Б.* Тормозные устройства пневмоприводов промышленных роботов [Текст] / И. Б. Филипов. — М. НИИмаш, 1984. — 64 с.

64. *Шортников, Е. Е.* К проектированию пневматических сервомеханизмов при учете теплообмена [Текст] / Е. Е. Шортников // Пневматика и гидравлика. — 1973. — № 1. — С. 170—178.
65. *Шюле, В.* Техническая термодинамика [Текст] / В. Шюле. — ОНТИ, 1928.

Список рисунков

1.1	Классификация пневмопривода	18
1.2	Типовая схема следящего пневмопривода	19
1.3	Типовая схема следящего пневмопривода	20
1.4	Типовая схема позиционного пневмопривода с дискретным управлением	21
1.5	Идеализированный закон движения РО	22
1.6	Режимы торможения	26
1.7	Эффективные схемы торможения ПП	27
1.8	Классификационная схема тормозных устройств	30
1.9	Схема дискретного пневмопозиционера	31
1.10	Схема позиционного ПП с дискретными распределителями	33
1.11	Схемы ШИМ	34
1.12	Структурная схема системы управления с МШИМ и LVQNN	37
1.13	Диаграмма переключения режимов	40
2.1	Графическое представление модели трения	53
2.2	График расходной функции $\psi(p_1, p_2)$	57
3.1	Примеры ШИМ-сигнала с различными значениями коэффициента заполнения	78
3.2	Влияние частоты ШИМ на пульсации давления в пневмоцилиндре . . .	79
3.3	Характеристики переходных процессов для различных типов дискретных распределителей	79
3.4	Структурная схема ПИД-регулятора с ШИМ управлением	80
4.1	Пример фронта Парето для двух критериев.	84
4.2	а	96

Список таблиц

1	Сравнение различных типов приводов	16
2	Расширенные параметры моделирования электропневматического привода	70
3	Морфологическая матрица методов построения суррогатных моделей .	95
4	Оценка методов по параметрам	95
5	Взвешенные оценки методов	97