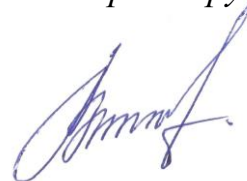


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



АВСИЕВИЧ Владимир Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ
ТЕПЛОВОЗА ПУТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЯ**

Специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д. т. н., профессор А.В. Иващенко

Самара
2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВОЗА	13
1.1 Организация рабочего цикла в дизелях тепловозов для работы на смеси дизельного топлива и природного газа.....	13
1.1.1 Способы организации рабочего цикла газодизельного двигателя силовой установки тепловоза	13
1.1.2 Системы автоматического управления топливоподачей в газодизельных двигателях силовой установки тепловоза	15
1.2 Закоксованность газодизельных двигателей силовой установки тепловоза	17
1.3 Классификация пропорционально интегрального дифференциального закона.....	18
1.4 Влияние точности регулирования частоты вращения двигателя силовой установки тепловоза на качество вырабатываемой электроэнергии..	29
1.5 Описание двухтопливного газодизельного двигателя силовой установки тепловоза	32
1.6. Выводы по главе 1	35
2 ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ГАЗОДИЗЕЛЯ. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. АНАЛИЗ ДРОБНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ	36
2.1 Постановка задачи	36
2.2 Система автоматического управления газодизельного тепловоза	38
2.2.1 Система автоматического управления топливоподачи газодизельного тепловоза.....	38

2.2.2 Расчет общей погрешности системы автоматического управления	44
2.3 Анализ передаточной функции с дробными показателями.....	46
2.3.1 Определение корней характеристического уравнения с дробными степенями	47
2.3.2 Представление дробных передаточных функций с рациональными степенями в виде композиции элементарных динамических звеньев	49
2.4 Временные и частотные свойства динамических звеньев дробного порядка	53
2.4.1 Дробно дифференцирующее звено	53
2.4.2 Дробное интегрирующее звено	58
2.4.3 Аперiodическое звено дробного порядка	60
2.4.4 Дробное звено второго порядка	64
2.5 Выводы по главе 2.....	71
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ДРОБНЫМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ИНТЕГРАЛЬНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ АЛГОРИТМОМ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ТЕПЛОВОЗА.....	72
3.1 Частотные критерии устойчивости системы автоматического управления дробного порядка	72
3.1.1 Принцип аргумента.....	72
3.1.2 Критерий устойчивости Михайлова применительно к системе автоматического управления дробного порядка	76
3.1.3 Критерий устойчивости Найквиста применительно к системы автоматического управления дробного порядка	79

3.2 Анализ динамических характеристик дробных пропорционально интегрального дифференциального законов управления	82
3.2.1 Анализ динамических характеристик дробного интегрального закона управления	84
3.2.2 Анализ динамических характеристик дробного пропорционально интегрального закона управления.	87
3.2.3 Анализ динамических характеристик дробного пропорционально дифференциального закона управления	90
3.2.4 Анализ динамических характеристик дробного пропорционально интегрального дифференциального закона управления.	94
3.3 Приближенные методы вычисления дробного интеграла	98
3.4 Разработка алгоритма регулирования на основе дробного пропорционально интегрального дифференциального закона управления ...	102
3.5 Выводы по главе 3	107
4 УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОКСОВАННОСТИ ВЫПУСКНЫХ ОКОН В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА	108
4.1 Выводы по главе 4	113
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОБНОГО ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО АЛГОРИТМА НА ГАЗОДИЗЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ	114
5.1 Описание газодизельной установки	114
5.1.1 Характеристики газодизельной установки	114
5.1.2 Настройки системы автоматического управления газодизельной установки	117

5.2 Исследование газодизельной установки с дробным пропорционально интегральным дифференциальным регулятором	122
5.2.1 Методика экспериментальных исследований.....	122
5.2.2 Исследование экспериментальных данных	123
5.2.3 Получение передаточной функции газодизельной установки.....	131
5.2.4 Исследование модели газодизельной установки с дробным ПИД регулятором	137
5.2.5 Использование дробного пропорционального интегрального дифференциального регулятора на газодизельной установке	143
5.3 Выводы по главе 5.....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	149
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ А	169

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы и степень ее разработанности. В современных условиях эксплуатации к силовым установкам автономных локомотивов предъявляются повышенные требования. В составе силовых установок тепловозов в России и за рубежом широко используются дизельные двигатели внутреннего сгорания. Для улучшения их технико-эксплуатационных характеристик производится переоборудование для работы на газе, при этом модернизация силовой установки требует существенных изменений штатной системы питания.

Основная сложность перехода дизельного двигателя на газ связана со способом воспламенения горючего в камере сгорания. Этот процесс в дизельных двигателях происходит за счет высокого давления топливно-воздушной смеси, однако, сильное сжатие газа не создает условия для его горения. В связи с этим, воспламенение топливной смеси производится с помощью небольшой запальной дозы дизельного топлива.

Проблемами управления подачи топлива в двигатели, работающие на смеси дизельного топлива и природного газа, занимаются научные коллективы ВНИИЖТ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, ОмГУПС, РУДН, МАДИ, ТГУ, СамГУПС. В частности, эти вопросы нашли отражение в трудах Е.Е. Коссова, В.В. Фурмана, В.А. Маркова, И.К. Андрончева, А.И. Володина, А.Н. Головаша, А.В. Грищенко, Е.Б. Демченко, В.Н. Игина, В.П. Казанцева, В.В. Кручека, Л.А. Мугинштейна, В.М. Овчинникова, А.Т. Осяева, С.А. Пожидаева, А.Э. Симсона, А.П. Третьякова, Г.А. Фофанова, А.З. Хомича, Н.Г. Швеца, С.М. Овчаренко, В.А. Четвергова, Е.С. Павловича, В. Д. Кузьмич, В. И. Киселева, А.М. Евстафьева, Е.И. Сковородникова, А.П. Шайкина, В.А. Шишкова, Д.Я. Носырева, А.Д. Рослякова, Ю.И. Булыгина, Andreassi L., Dietrich W.R., Golub A.

Подача газообразного топлива в камеру сгорания осуществляется дозировано, для чего дополнительно устанавливается электрогазовый клапан. Расчет дозы газообразного топлива производится в электронном блоке

управления на базе микроконтроллера и датчиков, контролирующих работу двигателя. Существующие автоматические системы управления подачей топлива основаны на реализации пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора.

Недостатком реализации ПИД регулятора является невозможность сокращения времени переходного процесса без перерегулирования при переходе от одного нагрузочно-скоростного режима к другому. Для решения этой проблемы в диссертации предлагается применять дробный $PI_{\alpha}D_{\beta}$ алгоритм управления частотой вращения коленчатого вала, который в отличие от классического ПИД регулятора, при определении текущего воздействия позволяет оценивать разный вклад составляющих с учетом предыстории. Кроме этого, существующие системы управления не учитывают закоксованность выпускных окон, что также приводит к повышенному расходу топлива. Указанный недостаток связан с отсутствием технологий прямой диагностики этого параметра. Предлагается реализовать методику косвенной диагностики закоксованности выпускных окон с помощью контроля и анализа нескольких параметров таких как: расхода топлива, поступления воздуха и колебания температуры выхлопных газов для корректировки параметров системы управления. Максимальное снижение расходов на топливо достигается при высоком проценте замещения дизельного топлива газом, который, в свою очередь определяется системой управления подачей газа и высокоточным ограничением запальной дозы дизельного топлива. Таким образом, актуальной является задача повышения экономичности силовой установки тепловоза путем совершенствования системы управления газодизеля.

Диссертационная работа выполнялась в рамках проекта СамГТУ и госбюджетной НИР СамГУПС: проект СамГТУ по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 075-15-2019-1364 «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных

автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления». Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57718X0286; госбюджетная НИР СамГУПС на тему «Нормативно-правовое регулирование и технические основы применения газомоторного топлива на транспорте» Регистрационный номер 121031700033-5 от 17 марта 2021 г.. Получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2008634227 на разработку «Блок дробного ПИД регулирования» // А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич. – Москва: опубл. 4.09.2008.

Целью диссертационной работы является снижение расхода топлива газодизеля силовой установки тепловоза при сокращении времени переходного процесса путем совершенствования цифровой системы автоматизации управления с помощью реализации дробного $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ управления частотой вращения коленчатого вала и разработка алгоритма диагностики закоксованности выпускных окон.

Для достижения цели работы были решены следующие задачи:

1. Анализ и исследование особенностей реализации систем управления газодизельных двигателей силовых установок тепловозов.
2. Разработка цифрового алгоритма дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза.
3. Совершенствование системы автоматизации управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза за счет реализации устройства диагностики закоксованности выпускных окон.
4. Разработка структуры системы автоматизации управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза.
5. Проведение исследования цифровой системы автоматизации управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза.

Объектом исследования является силовая установка тепловоза, оснащенная газодизельным двигателем.

Предметом исследования является система автоматизации управления газодизельным двигателем тепловоза.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработан цифровой рекуррентный алгоритм дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза, отличающийся дополнительными настроечными коэффициентами, реализация которого позволяет, в отличие от классических ПИД регуляторов, не допустить увеличения выброса частоты вращения коленчатого вала над целевым значением (перерегулирования) при сокращении времени переходного процесса.

2. Для системы автоматизации управления двигателем силовой установки тепловоза адаптированы частотные критерии устойчивости Михайлова и Найквиста, в результате чего впервые получена возможность производить анализ устойчивости дробных систем управления без определения корней характеристических уравнений.

3. Разработана структура системы автоматизации управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза, что позволило реализовать управление подачей топлива на основе дробного $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ алгоритма управления и результатов диагностики закоксованности выпускных окон, и обеспечить тем самым преимущество по технико-эксплуатационным показателям надежности и экономичности.

4. Разработана имитационная модель управления газодизельного двигателя силовой установки тепловоза, позволяющая осуществлять моделирование переходных процессов поддержания частоты вращения коленчатого вала газодизельного двигателя. Отличие модели от существующей заключается в возможности проведения исследований с различными ПИД алгоритмами управления, что позволяет проводить анализ данных с разными алгоритмами управления.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в обосновании дробного ПИ_αД_β регулятора газодизельной генераторной установки тепловоза, позволяющей снизить расход топлива при повышении маневренности и надежности за счет сокращения времени переходного процесса. Реализация цифровой системы автоматизированного управления газодизельным двигателем тепловоза, а также устройства корректировки ее параметров на основе диагностики закоксованности выпускных окон позволило усовершенствовать систему автоматического управления подачей смесового топлива газодизельных двигателей тепловозов.

Методы исследования. Поставленная в работе цель достигается с использованием методов современной теории управления, дифференциального и интегрального исчислений, цифровой обработки сигналов, математического и имитационного моделирования.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Цифровой рекуррентный алгоритм дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления, обеспечивающий, в отличие от классических ПИД регуляторов, сниженный выброс частоты вращения коленчатого вала над целевым значением при сокращении времени переходного процесса.

2. Устройство корректировки параметров системы управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза с учетом закоксованности выпускных окон, позволяющее, в отличие от аналогов, производить диагностику закоксованности по косвенным признакам (расход топлива, воздуха, температура выхлопных газов).

3. Структура цифровой системы автоматизации управления газодизельным двигателем тепловоза, позволяющая реализовать управление подачей топлива на основе дробного ПИ_αД_β алгоритма управления и результатов диагностики закоксованности выпускных окон.

4. Результаты исследования цифровой системы управления газодизельным двигателем тепловоза, реализующей дробный $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ регулятор, в ходе имитационного моделирования и на базе лабораторного стенда, показавшего преимущество по расходу топлива при повышении маневренности и надежности.

Соответствие паспорту специальности. Результаты исследования соответствуют пункту 9 «Аппаратура и системы автоматизации управления локомотивами» паспорта специальности 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация.

Достоверность научных положений работы подтверждена сравнением результатов моделирования и экспериментальных исследований. Исследования в реальных эксплуатационных условиях проводились для газодизеля модели Д50 (6 ЧН 31,8/33) маневрового тепловоза.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: на 13 международной конференции «Математика. Экономика. Образование» (Дубна, 2006); на 63 научно-технической конференции «Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука» (Самара, 2006); на 3 и 4 международных конференциях по проблемам управления (Москва, 2006, 2009); на 4 международной конференции «Идентификация систем и задач управления SICPRO '07» (Москва, 2007), 34 научной конференции студентов и аспирантов «Дни студенческой науки» (Самара, 2007), 3 Всероссийской научно-практической конференции «Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте» (Самара, 2020).

Реализация результатов исследования. Полученные результаты используются в ООО «ППП Дизельавтоматика», в научно-исследовательской межотраслевой лаборатории «Газомоторное и водородное топливо» кафедры «Локомотивы» Самарского государственного университета путей сообщения в виде действующей лабораторной установки, а также внедрены в учебный процесс

Самарского государственного технического университета и Самарского государственного университета путей сообщения.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 научных работ, из них: 3 публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 публикации в издании Scopus, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты, определяющие научную новизну и выносимые на защиту, получены лично автором.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 169 наименований и 1 приложения. Объем работы: 169 страниц основного текста, включающего 32 рисунка, 14 таблиц и 27 страниц приложения.

1 РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ТЕПЛОВОЗА

1.1 Организация рабочего цикла газодизельного двигателя силовой установки тепловоза

Проблемами перевода тепловозов на природный газ российские ученые занимаются с конца 80-х годов прошлого столетия. На сегодняшний день достаточно подробно проработаны схемы маневровых и магистральных газотепловозов для использования как сжатого, так и сжиженного газа [54, 59, 60, 127, 154, 160, 165, 166, 164, 147]. Необходимо отметить большой вклад в эти работы ученых ВНИИЖТа, также решение проблем по переводу тепловозов на природный газ отражены в трудах Е.Е. Коссова [80, 127], В.А. Маркова [93, 92, 68], Р.З. Кавтарадзе [70], Андрончева, А.И. Володина, Н.Н. Патрахальцева [129], А.С. Хачияна [154], В.Г. Камалтдинова [73], А.Э. Симсона, А.П. Третьякова, Е.А. Лазарева [126], Е.И. А.П. Шайкина [164, 163], В.В. Фурмана [153, 151], В.А. Шишкова [165, 166], Д.Я. Носырева [98, 95, 108-113], А.Д. Рослякова [137], Ю.И. Булыгина [48, 14] и др., а также зарубежных ученых, таких как Andreassi L. [1], Dietrich W.R. [7, 139], Golub A. [11] и др.

1.1.1 Способы организации рабочего цикла газодизельного двигателя силовой установки тепловоза

Для применения природного газа в качестве моторного топлива в тепловозных двигателях выделяют следующие циклы организации рабочего процесса:

1) организация рабочего процесса осуществляется на природном газе без добавления дизельного топлива в камеру сгорания цилиндра тепловозного двигателя силовой установки;

2) организация работы двигателя осуществляется с воспламенением газозвушной смеси с помощью запальной дозы дизельного топлива..

Второй способ организации рабочего процесса принято называть газодизельным режимом.

Смесеобразование в газодизельном процессе смешанное: внутреннее – для дизельного топлива; внешнее – для природного газа. В газодизельном режиме в переоборудованных для работы дизельных двигателях основная часть газозвушной смеси в общем цикловом заряде сгорает практически без детонации, мощность двигателя остается на том же уровне что и при дизельном режиме.

В диссертационной работе рассматривается газодизельный режим, так как имеет явное преимущество по простоте переоборудования и эксплуатационной надежности. Конструктивные изменения двигателя минимальные, что влечет за собой быструю модернизацию дизельного двигателя на газодизельный с наименьшими затратами на доработку. Для модернизации двигателя требуется добавить газовую магистраль и газовые форсунки, также незначительно изменяются системы газораспределения и регулирования. При этом в дизель поступает не воздух, а газозвушная смесь [79, 86, 93, 98, 18, 9]. КПД газодизельного режима составляет более 42 %, а запальная порция дизельного топлива составляет 15 % от общего расхода газодизельного топлива [128, 130, 150, 16, 10, 20, 67,66, 168].

При переводе на газодизельный режим и регулировании мощности необходимо учитывать номинальную мощность на процессах, как в дизельном режиме, так и в газодизельном режиме. В газодизельном режиме схема управления намного сложнее, чем в режиме работы в дизельном режиме, это связано с тем, что в газодизельном режиме основным топливом является газ, и динамическая мощность зависит от газозвушной смеси [107, 141,142].

Существуют различные схемы управления подачи топливной смеси [136], применяющиеся при различных эксплуатационных условиях.

1. *Количественное регулирование с газовоздушной заслонкой, управляемой регулятором частоты вращения.* Достоинством данной схемы является ее простота, в качестве недостатков необходимо отметить потребность в специальном редукторе газа, большие перестановочные усилия заслонки и отсутствие возможности управления во всем диапазоне нагрузок при работе в режиме холостого хода

2. *Качественное регулирование с газовой заслонкой, управляемой регулятором частоты вращения.* Основной недостаток данной схемы – меньшая экономичность на частичных режимах. В качестве преимуществ можно выделить возможность применения серийных регуляторов давления газа и меньшие перестановочные усилия заслонки.

3. *Смешанное регулирование с использованием газовоздушных и газовых заслонок.* Достоинство схемы: в процессе работы обеспечивается оптимальный состав смеси во всем диапазоне нагрузок и частот вращения; недостаток – возрастание перестановочных усилий заслонок [107, 69].

1.1.2 Системы автоматического управления топливоподачей в газодизельных двигателях силовой установки тепловоза

Для работы в газодизельном режиме необходимо усовершенствовать систему топливоподачи, так как она является основной при обеспечении требуемых характеристик протекания процессов впрыскивания и распыления топлива. Для смешанной подачи топлива необходимы повышенные требования по управлению и поддержанию заданной частоты вращения в газодизеле силовой установки тепловоза. Чтобы обеспечить повышенные требования к управлению используются электронные системы управления, которые в автоматическом режиме осуществляют процесс регулирования топливоподачи в газодизельный

двигатель. Универсальность таких систем достигается за счет цифровых программных способов их реализации.

Применяемые и разрабатываемые электронные системы автоматического управления частоты вращения коленчатого вала, можно поделить на несколько классов – это аппаратные и микропроцессорные. Аппаратные системы автоматического управления частоты вращения коленчатого вала реализуются через электронные схемы и выполняются по жестко заложенной схеме, что не дает им достаточной гибкости при настройке.

В отличие от аппаратных систем автоматического управления, микропроцессорные системы управления (МСУ) частоты вращения коленчатого газодизельных двигателей силовых установок тепловоза позволяют менять параметры системы автоматического управления за счет развитого программного обеспечения при изменении внешних и внутренних условий, отражаемых различными дополнительными датчиками. МСУ позволили решать принципиально новые задачи:

- точное цифровое задание наклона регуляторной характеристики систем автоматического управления частоты;
- формирование минимальной запальной дозы дизельного топлива на каждом из режимов работы. Данный подход обеспечивает высокое замещение дизельного топлива на газ и достигает 78–85 %, это возможно из-за высоких динамических характеристик системы автоматического управления частоты вращения коленчатого вала
- учет и коррекция внешних воздействий на двигатель внутреннего сгорания, таким воздействием является окружающая среда, которая вносит в систему управления большую ошибку, которую в свою очередь можно учесть и скорректировать и тем самым обеспечить удовлетворительные экологические показатели.

Проведенный анализ аппаратных систем и микропроцессорных систем автоматического управления питанием газодизельных двигателей силовых установок тепловоза показал, что по техническим, экономическим и

экологическим соображениям микропроцессорные системы автоматического управления частоты дают наибольшую эффективность [107, 140, 152, 72, 99-102], в дальнейшей работе будет рассматриваться система автоматического управления с применением микропроцессоров.

1.2 Закоксованность газодизельных двигателей силовой установки тепловоза

Особый вред экологии наносят газодизельные двигатели силовых установок тепловозов, поскольку с течением времени в процессе эксплуатации параметры их работы отклоняются от оптимальных режимов. С целью снижения негативного воздействия на окружающую среду осуществляется контроль технических и эксплуатационных характеристик тепловозных дизелей и своевременное устранение технических неисправностей. Важным фактором, влияющим на коэффициент наполнения цилиндра в двигателе, является закоксованность выпускных окон. При закоксованности более чем на 15 % отмечается снижение давления в цилиндрах в конце наполнения, увеличение количества остаточных газов, возрастание температуры выхлопных газов, наблюдаются нарушения при смазке и охлаждении цилиндров, неудовлетворительная работа маслосъемных и уплотнительных колец, ухудшение сгорания топлива [50,125]. Таким образом, необходимо контролировать закоксованность выпускных окон. Однако на сегодняшний день проверка закоксованности в газодизельных двигателях тепловозов не входит в перечень контролируемых параметров при проведении всех видов технического обслуживания. Это связано с тем, что для проверки необходим частичный разбор двигателя, что очень затратно и нерационально при проведении технического обслуживания.

Предложенные отечественными учеными в конце прошлого столетия технические решения на устранения этой проблемы широкого практического применения не получили ввиду того, что влекли за собой серьезные конструктивные изменения выхлопной системы двигателя [125].

Современные системы контроля и диагностики позволяют в реальном режиме времени регистрировать и обрабатывать большое количество данных/параметров, что дает возможность по косвенным признакам без замеров в труднодоступных местах определять величину всех необходимых параметров. Широкие возможности современных САУ делают возможным измерение и контроль всех необходимых параметров газодизельных двигателей силовых установок тепловозов, в том числе в недоступных для прямого измерения местах.

1.3 Классификация пропорционально интегрального дифференциального закона

В системах автоматического регулирования частотой вращения коленчатого вала двигателя силовых установок тепловозов, работающих на дизельном топливе и газе, в подавляющем большинстве используются регуляторы, реализующие классический пропорционально интегрально-дифференциальный ПИД закон управления. Способность ПИД закона управления работать с объектами, отличающимися по физической природе, свойствам и назначению, говорит об их универсальности.

На основаниях того, что ПИД закон управления универсален по своим качествам, стало возможно серийное производство регуляторов промышленного применения. Универсальность типового регулятора обусловлена способностью формирования управляющего воздействия. При всех достоинствах ПИД закона управления есть и недостаток, недостаток выражается в том, что качество регулирования в ПИД регуляторах ниже, чем у регуляторов другого типа. Размеры потери качества регулирования выясняются путем прямого сравнения качества ПИД закона управления с реально достижимым качеством оптимального управления.

В результате проведенного исследования выявлено, что при проведении настройки ПИД регулятора по всем имеющимся методикам плата за универсальность оказывается весьма весомой и очень сильно зависит от объекта

управления. На основании данного факта разработчиками типовых регуляторов предпринимаются попытки разработки новые модификации ПИД законов управления с учетом конкретных требований промышленного сектора. Также разработаны методы автоматической адаптации настроек ПИД законов управления. Отсюда видно естественное стремление разработчиков приборов улучшить работу ПИД законов управления и при этом сохранить их главное достоинство – универсальность.

Рассмотрим классический ПИД закон управления, который описывается уравнением:

$$u(t) = K_{\text{П}}e(t) + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t e(t)dt + T_{\text{Д}} \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.1)$$

где $e(t)$ – сигнал рассогласования, или ошибка регулирования, $u(t)$ – выходная величина регулирования, t – время, $K_{\text{П}}$ – пропорциональный коэффициент, $T_{\text{И}}$ – постоянная интегрирования, $T_{\text{Д}}$ – постоянная дифференцирования. Такой регулятор называют ПИД законом регулирования [65, 131, 75].

Разновидности ПИД законов управления появились благодаря тому, что типовой регулятор не мог реализовать все требования, предъявляемые к процессу управления ввиду того, что практическое применение накладывает свои ограничения на его использование, такие как техническая реализация, реальные условия применения. В некоторых системах недостаточно использовать только три регулируемые величины, в особенности в системах с большой транспортной задержкой и в системах, требующих высокого качества слежения за установкой. В связи с ростом требований рынка к качеству управления возникает необходимость совершенствования ПИД законов управления путем изменения его внутренней структуры и добавлением разного рода дополнительных элементов в конструкцию, и наложения ограничений на входные и выходные сигналы [64,66, 169].

Все разновидности ПИД законов управления, которые существуют на данный момент, можно объединить в отдельные классы. Что позволяет их классифицировать по принципу формирования сигнала управления (рисунок 1.1).

РАЗНОВИДНОСТИ ПИД ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ

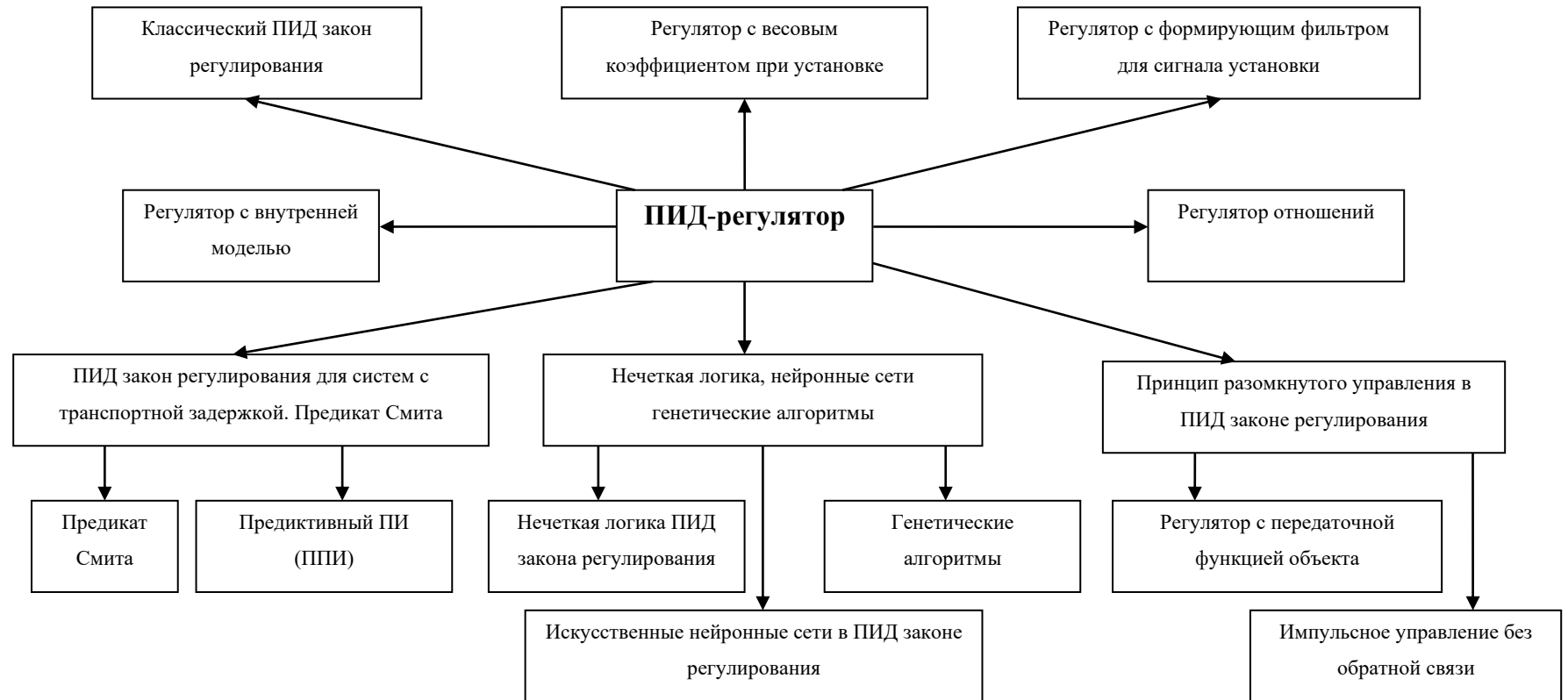


Рисунок 1.1 – Разновидности ПИД законов управления

Регулятор с весовыми коэффициентами при установке. Главное отличие данного регулятора от классического регулятора заключается в том, что в нем сигнал рассогласования вычисляется отдельно для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей:

$$e_p = br - y, \quad e_d = cr - y, \quad e_i = r - y;$$

$$u(t) = K_{II}e_p(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e_i(t)dt + T_D \frac{de_d(t)}{dt},$$

где e_p , e_i , e_d – сигнал рассогласования для пропорционального, интегрального и дифференциального звена, r – задающее воздействие, y – выходная переменная объекта, b , c – настроечные весовые коэффициенты.

Для интегральной составляющей весовые коэффициенты отсутствуют, что обеспечивает нулевую ошибку при установившемся режиме.

Настроечные весовые коэффициенты позволяют улучшить реакцию регулятора на изменения установки [56].

Достоинства: настройка весовых коэффициентов производится отдельно от основных настроечных параметров K_{II} , T_I , T_D ; реакция на шум и внешнее возмущение определяется K_{II} , T_I , T_D параметрами, что позволяет улучшить реакцию регулятора на изменение сигнала рассогласования [131, 61].

Недостатки: у регулятора с весовыми коэффициентами более сложная настройка ввиду добавления дополнительных весовых коэффициентов b , c .

Принцип разомкнутого управления в пропорциональном интегральном дифференциальном законе управления. Принцип разомкнутого управления можно использовать если известны действующие на систему возмущения и реакции на управляющие воздействие, это необходимо в связи с тем, что нет обратной реакции системы на управляющее воздействие, в этих условиях можно подобрать такие параметры ПИД закона управления, при которых на входное воздействие обеспечивается требуемая реакция системы управления.

Достоинства принципа разомкнутого управления:

– высокая скорость реагирования системы из-за отсутствия обратной связи;

– разомкнута система устойчива по причине отсутствия обратной связи, которая может раскачать систему [131, 56];

Недостатком принципа разомкнутого управления:

- нет возможности получения высокой точности из-за невозможности учета неизвестных возмущений на систему;
- невозможно компенсировать все возмущения для объектов с запаздыванием [56].

Данный вид управления имеет ряд недостатков и достоинств, которыми можно воспользоваться при управлении, довольно хороший результат управления можно получить при объединении как разомкнутого управления, так и замкнутого управления в одном регуляторе и проектировать систему по разомкнутому принципу, а обратную связь использовать для минимизации погрешности, при таком проектировании системы можно получить наилучшие характеристики системы. Данный подход можно применять не для всех типов объектов, что серьезно ограничивает возможность его применения в промышленном масштабе.

Импульсное управление без обратной связи. При формировании управляющего воздействия в данном типе управления, для начала на объект подается прямоугольный импульс большой амплитуды, реакция на импульс пропорциональна его амплитуде, в результате чего длительность переходного процесса сокращается [56, 131].

Достоинство импульсного управления:

- прямая связь с объектом намного быстрее компенсирует погрешность относительно к системам с обратной связью;
- своевременный учет внешнего возмущения, что дает преимущество при формировании управляющего воздействия так как учитывается влияния внешнего возмущения.

Недостатки импульсного управления:

- невозможность довольно точно недостатком данного метода является невозможность достаточно точно распознать внешнее возмущение и в каком месте оно влияет на объект;

– нахождения обратного оператора что также затрудняет применение данного вида управления.

Регулятор отношений. Данного типа регуляторы используются, когда необходимо поддерживать не значения параметров, а зависимость между значениями. Регуляторы такого типа можно использовать на производствах, в которых используется несколько типов материалов, которые необходимо смешать в процентном соотношении. Для этого в системе используется несколько регуляторов, первый из которых формирует выходную величину равную уставки, а второй регулятор формирует значение своей уставки пропорционально регулируемой величины первого регулятора [57, 131].

Достоинство: регулятор используется в таких видах производства, где недостаточно иметь один регулятор и где выходное значение второго регулятора зависит от выходного значения первого.

Недостатки: выходная величина первого регулятора меняется с задержкой, тем самым выходная величина второго регулятора будет запаздывать по времени от требуемого значения.

Регулятор с внутренней моделью. Регулятор данного типа имеет ряд особенностей, одна из особенностей данного регулятора является возможность настройки нечувствительности к различным отклонениям независимо от остальных параметров. Данный тип регулятора дает хорошую реакцию на изменение уставки, но при этом реакция на внешние возмущения слишком медленная, поэтому данный тип регуляторов хорошо применять в объектах, в которых минимальное влияние оказывает внешнее возмущение.

Настройка данного регулятора осуществляется в несколько этапов. На первом этапе находится и оптимизируется обратная модель. На следующем этапе определяются характеристики фильтра, от выбранного фильтра определяется быстродействие всей замкнутой системы [57, 131, 148].

Достоинство: настройка робастности производится отдельно от параметров, что позволяет улучшить реакцию регулятора на изменения.

Недостатки: реакция на внешние воздействия слишком замедлена, что может привести к неустойчивости системы.

Пропорционально интегральный дифференциальный закон управления для систем с транспортной задержкой. Предикат Смита. При управлении объектами с большой транспортной задержкой необходимо предсказывать поведение объекта в будущем, что довольно тяжело реализовать в системах автоматического управления. Для систем с транспортной задержкой был предложен ПИД закон управления с блоком прогноза поведения объекта в будущем. Данную структуру регулятора предложил Смит и поэтому получил название «Предикат Смита».

Смысл данного закона управления заключается в прогнозировании того какой сигнал будет получен на выходе объекта до того, как сигнал поступит на выход. При прогнозировании используется модель объекта управления с транспортной задержкой. В результате чего из полученной модели объекта управления можно убрать транспортную задержку и тем самым получить модель объекта без транспортной задержки, что дает возможность спрогнозировать поведение объекта управления в будущем.

При выработывании управляющего воздействия звено с транспортной задержкой не входит в контур обратной связи, транспортная задержка добавляется к результату вычисления, что довольно хорошо влияет на быстродействие системы. [131, 57, 42, 96].

Достоинство «Предикат Смита»:

- в системе управления исключена транспортная задержка, что дает возможность прогнозировать поведение объекта;
- возможность точной настройки системы, что улучшает характеристики всей системы.

Недостатки «Предикат Смита»:

- практически не ослабляют внешние возмущения, что ограничивает возможность применения данного типа управления.

Нечеткая логика, нейронные сети и генетические алгоритмы. Все приведенный модификации ПИД закона управления хорошо работают с линейными системами и несложными системами, но когда разговор идет о сложных системах, где не все параметры известны, то в этом случае ПИД закон управления имеет плохие показатели управления объектом. Для таких случаев предлагается использовать методы нечеткой логики, нейросети и генетические алгоритмы, которые позволят улучшить показатели ПИД закона управления. Основная сложность данных регуляторов заключается в сложности их настройки и обучения. Для обучения нейросети необходимо иметь данные с идеальной системой управления и объектом, на базе которого нейросеть может настроить весовые коэффициенты под управление текущим объектом управления [138, 57].

Закон управления с нечеткой логикой базируется на использовании не столько аналитических или теоретических моделей, сколько на практическом применении знаний, которые можно представить в форме баз правил, сформированной из опыта и знаний квалифицированных специалистов.

Данный закон управления дает наибольший эффект в случае неопределенности параметров объекта управления. При использовании данного закона управления возлагается большая ответственность на специалиста, который проводит настройку оборудования для управления объектом, поэтому для настройки данной системы необходим специалист с большим опытом работы или являющийся экспертом по настройке и управлению системы автоматического управления. Системы с нечеткой логикой дают возможность использовать знания специалистов по настройке и наладки оборудования для улучшения качества процесса управления [138 – 102, 149].

Достоинства систем с нечеткой логикой:

- системы с нечеткой логикой намного быстрее вырабатывают задающее воздействие на систему управления;
- применение в объектах управления, которые плохо описываются традиционной математикой или недостаточно известны;

– есть возможность синтеза адаптивных регуляторов на базе классических ПИД законов управления.

Недостатки систем с нечеткой логикой:

- отсутствие стандартных методик конструирования;
- существующими методами провести математический анализ нечетких систем затруднительно.

Нейросеть используется в ПИД законе управления для построения регулятора и для блока настроек коэффициентов регулятора. Одним из важных свойств в нейросети является ее возможность к обучению, что позволяет обучить регулятор для использования на объекте управления. Для обучения нейросети требуются данные с экспертной системы, на основании которых нейросеть получает необходимые значения. Нейросеть с обучением по презентационным данным называется «нейросеть с учителем». Данный подход позволяет максимально настроить нейросеть под объект управления [81, 96, 61].

Достоинства систем с нейросетью:

- решение задач при неизвестных закономерностях;
- устойчивость к шумам во входных данных;
- адаптация к изменениям окружающей среды;
- потенциальное сверхвысокое быстродействие;
- отказоустойчивость при аппаратной реализации нейронной сети.

Недостатки систем с нейросетью:

- процедура обучения, подбор критериев качества обучения;
- нет возможности предсказать погрешность управления, которая не входит в набор обучения;
- нет критерия оценки качества нейросети.

Закон управления с генетическим алгоритмом позволяет быстрее найти оптимальные настроечные коэффициенты, чем другие методы поиска настроечных коэффициентов.

Достоинства системы с генетическим алгоритмом:

- нет проблем со сходимостью;
- данные системы устойчивы [57, 97, 43, 21].

Недостатки системы с генетическим алгоритмом: время поиска экстремума слишком велико, что не дает возможность использовать данную систему управления в быстродействующих системах.

Общие недостатки пропорционально интегрального дифференциального законов регулирования. При большом количестве разновидностей ПИД законов управления остается много недостатков, ограничений, накладываемых технической реализацией и структурой самих ПИД законов управления. Приведем наиболее значимые из них:

- ограничение, связанное с конечным диапазоном изменения исполняющих устройств;
- знак управляющего воздействия не всегда возможно изменить на противоположный;
- ограничение точности измерения, связанное с точностью измерения датчиками сбора информации об объекте, данное ограничение приводит к тому, что операцию дифференцирования необходимо выполнять с допустимой погрешностью;
- практически во всех системах существует нелинейное насыщение, что существенно влияет на процесс управления
- реализация цифровых регуляторов, в которых приходится проводить дискретизацию аналогового сигнала, что влияет на качество управления объектом;
- повышение качества переходного процесса может привести к неустойчивости системы, по этой причине всегда приходится балансировать между качеством переходного процесса и устойчивостью системы;
- большое количество объектов управления требуют плавного переходного процесса, что накладывает ряд ограничений.

Также известны такие недостатки ПИД закона регулирования как погрешность дифференцирования, шум и интегральное насыщение. Погрешность дифференцирования заключается в том, что производная вычисляется как разность двух близких по величине переменных, в связи с этим относительная погрешность производной всегда оказывается больше, чем относительная погрешность численного представления дифференцируемой переменной. Другими словами, можно сказать, что дифференциатор увеличивает высокочастотные помехи, но также и шум, с которым в дальнейшем очень сложно бороться [55, 75, 131].

Суть интегрального насыщения состоит в том, что, если интегралу приходится бесконечно компенсировать ошибку, то в этом случае величина интегральной составляющей становится довольно большой, что приводит к перенасыщению. Данная проблема проявляется в тех объектах управления, где присутствует нелинейность, также сильно влияет на данный параметр настройка регулятора и исполнительные устройства [55].

Дробный пропорционально интегральный дифференциальный закон регулирования. В отличие от классического ПИД закона регулирования, в дробном ПИД законе регулирования интегрирующее и дифференцирующее звено с нецелой степенью. Каждое звено дробного ПИД закона управления работает в своей области частот, пропорциональное звено обеспечивает точность управления на средних частотах, интегральная составляющая закона управления хорошо работает в области низких частот, дифференциальное звено хорошо работает в области высоких частот, в результате чего обеспечивается устойчивость системы управления, высокое качество управления. Преимущество перед классическим ПИД законом управления заключается в том, что при уменьшении времени переходного процесса можно добиться того, что значение перерегулирования (изменение регулируемой величины в большем размере, чем это требуется) будут полностью отсутствовать или будет минимальным, что было невозможным в классическом ПИД законе управления [49, 62, 63, 17]. В дробном ПИД законе регулирования применяется неполное интегрирование и дифференцирование, что

дает дополнительные степени свободы для оптимальной настройки. Как показали исследования [121, 63, 49, 15, 19, 71], с помощью нецелых степеней можно управлять скоростью переходного процесса, уменьшать перерегулирование или добиваться его полного пропадания.

Недостатком дробного ПИД закона регулирования является его неполное интегрирование и дифференцирование, что приводит к сложной структуре регулятора. Сложность структуры регулятора приводит к трудности реализации данного закона регулирования [49, 6, 12, 74] и к сложности вычисления, что требует дополнительных вычислительных мощностей.

Для преодоления вышеописанного недостатка дробного ПИД закона регулирования можно реализовать дробный цифровой ПИД регулятор. Данный подход обеспечивает большую скорость работы регулятора, так как вычислительная мощность микропроцессоров довольно большая на сегодняшний день и может с излишком перекрыть требуемые мощности для работы данного регулятора.

1.4 Влияние точности регулирования частоты вращения двигателя силовой установки тепловоза на качество вырабатываемой электроэнергии

В ходе работы тепловоза постоянно вырабатывается электроэнергия для питания тягового электродвигателя. Выработка электроэнергии происходит с помощью главного тягового генератора, работающего за счет двигателя внутреннего сгорания. Тяговые электродвигатели преобразуют электроэнергию в механическую энергию и тем самым приводят в движение колесные пары локомотива. Минимальная мощность, соответствующая 1-й позиции рукоятки контроллера, составляет 150-200 кВт, что обеспечивает плавное трогание поезда с места. Для обеспечения надежной работы тягового генератора необходима достаточная равномерность вращения вала дизель-генератора тепловоза.

На качество работы электродвигателя влияет большое количество факторов, коротко рассмотрим основные из них:

- тепловой режим работы электродвигателя. На тепловой режим электродвигателя влияет отклонение напряжения, которое даже при незначительном отклонении уже приводит к перегреву изолирующих элементов и может привести к выходу из строя электродвигателя;
- несимметрия напряжения, даже при минимальной несимметрии токов в пределах одного процента, несимметрия на обмотках уже будет достигать десяти процентов;
- наложение токов обратной последовательности на токи прямой последовательности также вызывает нагрев;
- колебание напряжения и его отклонение вызывает отрицательные влияния на электродвигатель, колебание напряжения приводит к колебанию электромагнитного момента, что влияет на мощность и на устойчивость работы, как следствие на надежность [59, 60, 127, 8, 13, 77, 78].

Для регламентирования работы энергетических установок был разработан стандарт в области регулирования энергетических установок ГОСТ 55231-2012, который регламентирует класс точности системы автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала (САРЧ) (см. таблицу 1.1), а также обеспечение выполнения требований экологических норм стандарта «Евро» ГОСТ 41.49-2003.

Таблица 1.1 – Классы точности САРЧ

Наименование показателя	Классы точности САРЧ			
	1-й	2-й	3-й	4-й
Нестабильность частоты вращения, %, не более:				
- при относительной нагрузке до 25%	0,8	1,0	1,5	3,0
- при относительной нагрузке св. 25 до 100%	0,6	0,8	1,0	2,0
Заброс частоты вращения, %, не более	5,0	7,5	10,0	15,0
Длительность переходного процесса регулирования не более	2,0	3,0	5,0	10,0

На основании таблицы 1.1 видно, что для двигателей силовых установок, используемых в составе дизель-генератора, введены классы точности, ниже которых их режимы работы не могут выходить. Данное ограничение обусловлено тем, что при классе точности САРЧ меньше 4 класса, качество электроэнергии не будет соответствовать ГОСТ 4.409-85 СПКП [7], который регламентирует основные показатели качества электроэнергии, а так же как сказано выше, плохое качество вырабатываемой электроэнергии негативно влияет на электроприемники.

Качество вырабатываемой электроэнергии генератором напрямую зависит от класса точности САРЧ: чем класс точности выше, тем и качество вырабатываемой электроэнергии более высокое, что в первую очередь влияет на уменьшение негативного влияния на электроприемники, тем самым увеличивая их срок работы и уменьшение расхода топлива, потребляемого дизель-генератором.

В ходе исследования САРЧ в газодизельных двигателях тепловозов выявлено, что с повышенными требованиями по управлению и поддержанию заданной частоты вращения в газодизельных системах используются электронные системы управления. Электронные САРЧ вращения коленчатого вала тепловозного двигателя можно разделить на аппаратные и микропроцессорные. Аппаратные системы автоматического управления частоты вращения коленчатого вала выполняют свою работу по электронной схеме, в которую невозможно внести изменения во время эксплуатации и тем самым она очень схожа с механическими системами и не может обеспечить максимально эффективное потребление газового топлива. В отличие от механической системы в микропроцессорных системах управление осуществляется на основании алгоритма, который записан в микропроцессор, и параметры работы алгоритма можно менять во время работы в зависимости от изменения внешней среды.

На основании проведенного исследования выявлено, что наилучшее качество автоматического регулирования частоты обеспечивает микропроцессорная система, в которой в качестве алгоритма управления

используется классический ПИД регулятор или его модификации. Используемые системы автоматического управления обеспечивают выполнение требований для газодизельных двигателей силовых установок тепловоза по качеству регулирования частоты вращения 3–4 класса точности. Однако для успешной эксплуатации газодизельных двигателей на тепловозах требуется обеспечение точности не ниже 2 класса. Это означает, что известные регуляторы частоты вращения не позволяют достичь приемлемой динамики движения тепловоза, не нарушая стандарты.

Адекватный выбор типа управляющего и исполнительного регулирующего устройства позволяет повысить эффективность газодизеля. Для управления двигателем силовой установкой тепловоза такого типа на тепловозе актуальным является применение современных алгоритмов регулирования. В диссертации предлагается реализовать дробный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор, с помощью которого можно преодолеть наиболее существенный недостаток – противоречие между устойчивостью и качеством переходного процесса[81-85].

1.5 Описание двухтопливного газодизельного двигателя силовой установки тепловоза

Газодизельный двигатель тепловоза может работать только на дизельном топливе, но не может работать только на газе [35, 47, 51-53].

Система топливоподачи дизеля на смесевом топливе работает следующим образом (рисунок 1.2).

Двигатель запускается только на дизельном топливе, для запуска нужно выполнить все операции, предусмотренные для пуска двигателя в соответствии с эксплуатационной документацией на двигатель. При достижении коленчатым валом двигателя частоты инициализации пуска, блок управления (БУ) выдает на устройство исполнения с датчиком положения (ИУ) ШИМ сигнал, соответствующий пусковой подаче топлива. После достижения коленчатым валом

пусковой частоты вращения (ЧВ) система начинает регулирование ЧВ, и с заданным темпом выводит двигатель на минимальную ЧВ холостого хода.

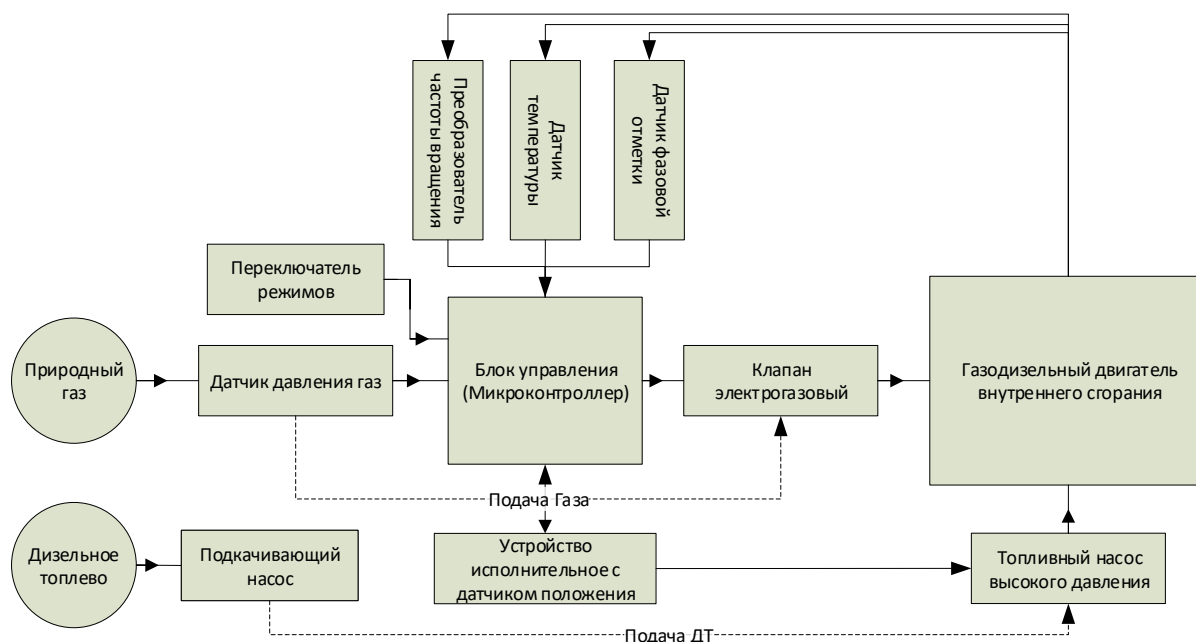


Рисунок 1.2 – Аппаратура и система автоматизации управления газодизелем силовой установки тепловоза

После запуска двигателя по каналу преобразователя частоты вращения (ПЧВ) в БУ поступает сигнал о текущей ЧВ коленчатого вала двигателя, который сравнивается с заданным, определяется задатчиком ЧВ.

При рассогласовании двух сигналов БУ выдает команду ИУ на изменения подачи топлива. Команда выдаётся БУ до тех пор, пока текущая ЧВ не сравняется с заданным сигналом [87-91].

Работа двигателя в режиме газодизеля осуществляется после пуска и прогрева двигателя. Для перехода необходимо установить тумблер «дизель/газодизель» в положение «газодизель», после этого осуществляется алгоритм автоматического перехода двигателя в газодизельный режим по алгоритму который приведен в документации к газодизельной силовой установки

тепловоза, а так же в работах Фурмана В. В. [151 - 153]. Ниже приведен алгоритм работы газодизельного двигателя:

1. Проводится проверка выполнения условий в автоматическом режиме, проверяются следующие параметры:
 - давление в газовой магистрали не ниже $2,0 \text{ кгс/см}^2$;
 - частота оборотов коленвала двигателя внутреннего сгорания не ниже 450 об/мин;
 - положение вала исполняющего устройства совпадает с положением запальной дозы;
 - подается сигнал «газодизель».
 - температура охлаждающей жидкости выше 45°C .
2. Подается сигнал на открытие газового клапана.
3. Исполняющее устройства встает в положение, которое соответствует положению запальной дозы дизельного топлива.
4. Включается управление электрогазовым клапаном (ЭГК).

Переход на газодизельный режим блокируется при наличии любого из условий:

1. Подача сигнала «дизель».
2. Давление газа в газовом коллекторе ниже $2,0 \text{ кгс/см}^2$ по истечению времени более 100 с.
3. ЧВ двигателя ниже 450 об/мин по истечению времени более 100 с;
4. Положение выходного вала ИУ ниже положения запальной дозы дизельного двигателя.
5. Температура охлаждающей жидкости ниже 45°C .

Регулирование ЧВ производится за счет изменения количества газа, поступающего в цилиндры двигателя через ЭГК.

К преимуществам газодизеля относится:

- более «мягкая работа» двигателя за счет плавного нарастания давления в цилиндрах;

- меньше вредных выбросов в атмосферу;
- увеличенный запас хода и возможность ездить на двух видах топлива.

Недостатки газодизеля:

- высокие требования к качеству используемых материалов;
- наличие специального оборудования для одновременного дозирования дизельного топлива и газа;
- сложный процесс настройки и регулировки.

1.6 Выводы по главе 1

1 Проведен анализ газодизельных двигателей силовых установок тепловозов, работающих на смеси дизельного топлива и природного газа, дана классификация, выявлены достоинства и недостатки, выделен тип газодизельных двигателей, на котором будет проводиться исследование.

2 Проведен критический обзор ПИД законов управления и предложена их классификация по принципу формирования управляющего воздействия. Изменение скоростного и нагрузочного режимов тепловоза сопровождается переходным процессом, а время переходного процесса и перерегулирование относятся к наиболее значимым динамическим характеристикам газодизельного двигателя.

3 Выявлена зависимость технико-эксплуатационных показателей газодизельных двигателей силовых установок от выбора и параметров законов управления. Продолжительность переходного процесса влияет на маневренность и надежность. От перерегулирования зависит расход топлива. В классическом ПИД регуляторе сокращение времени переходного процесса приводит к увеличению перерегулирования. Сформулирована задача сокращения расхода топлива при сохранении маневренности и надежности путем совершенствования автоматической системы управления газодизельным двигателем тепловоза.

4 Проведен анализ причин закоксованности газодизельных двигателей тепловозов и устройств определения закоксованности выпускных окон.

2 ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ГАЗОДИЗЕЛЯ. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. АНАЛИЗ ДРОБНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Постановка задачи

Для обобщения понятия и основных свойств передаточных функций и для проведения исследований временных и частотных свойств дробных ПИД законов управления, возьмем систему автоматического управления с обратной отрицательной связью, показанную на рисунке 2.1.

Система, показанная на рисунке 2.1, состоит из блоков РУ – регулирующее устройство, ОУ – объект управления, где x – управляющее воздействие, e – сигнал рассогласования, u – выходная величина регулятора, y – регулируемая величина.

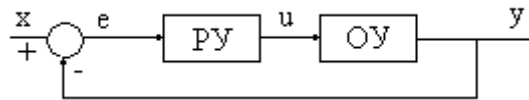


Рисунок 2.1 – Система автоматического управления с обратной отрицательной связью

Наиболее существенным недостатком является противоречие между устойчивостью и качеством переходного процесса, для преодоления которого предлагается дробный ПИД закон управления, в который входят интеграл и дифференциал дробного порядка Римана–Ливиулли [91, 46]:

$$I_{0t}^{\alpha}(e(t)) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{e(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau, \quad (2.1)$$

$$D_{0t}^{\beta}(e(t)) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{e(\tau)d\tau}{(t-\tau)^{\beta-1}}, \quad (2.2)$$

где α, β – дробные показатели интеграла и дифференциала соответственно $0 < \alpha, \beta < 1$, t – время, $\Gamma()$ – гамма функция Эйлера.

Откуда уравнение дробного ПИД закона управления

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i^\alpha} I_{0t}^\alpha(e(t)) + T_d^\beta D_{0t}^\beta(e(t)), \quad (2.3)$$

где K_p , – пропорциональный коэффициент (коэффициент усиления), T_i – постоянная интегрирования, T_d – постоянная дифференцирования.

Под дробными ПИД законом управления в данной работе будем подразумевать дробный интегральный (I_α), пропорционально-интегральный ($ПИ_\alpha$), пропорционально-дифференциальный ($ПД_\beta$), пропорционально – интегрально – дифференциальный ($ПИ_\alpha Д_\beta$) законы управления.

Целью диссертационного исследования является разработка методов и алгоритмов ПИД законов управления с улучшенными характеристиками качества регулирования на основе дробного интегро-дифференциального исчисления и применения данного алгоритма на ДВС, работающего на смеси дизельного топлива и природного газа, и разработать устройство определения закоксованности выпускных окон.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Обобщить понятия и основные свойства передаточных функций, временных и частотных характеристик систем управления, описываемых дифференциальными уравнениями дробного порядка.
2. Обобщить частотные критерии устойчивости для систем управления, основанных на дифференциальных уравнениях дробного порядка.
3. Исследовать временные и частотные свойства дробных ПИД законов управления.
4. Исследовать систему автоматического управления газодизельного двигателя тепловоза, рассчитать общую погрешность системы автоматического управления частотой вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания тепловоза, работающего на дизельном топливе и газе;
5. Разработать рекуррентный алгоритм цифрового дробного ПИД закона управления и провести исследование и сравнение моделей систем

автоматического управления на основе классического и дробного ПИД алгоритмов.

6. Провести исследование работы дробного ПИД алгоритма в составе физической системы автоматического управления на базе газодизельной лабораторной установки.

7. Разработать измерительное устройство для диагностики закоксованности выпускных окон по косвенным признакам расхода топлива, воздуха и температуры выхлопных газов и провести исследования данного устройства в составе системы автоматического управления двигателем внутреннего сгорания тепловоза, работающего на дизельном топливе и газе.

2.2 Система автоматического управления газодизельного тепловоза

Для дизелей тепловозов, работающих на смеси дизельного топлива и природного газа, на двигатель установлено дополнительно информационно-измерительное оборудование.

Система автоматического управления направлена на обеспечение возможности точного управления подачи газа в цилиндры двигателя и зависит от изменения положения педали подачи топлива [167].

2.2.1 Система автоматического управления топливоподачи газодизельного тепловоза

В работе рассматривается система автоматического управления топливоподачи газодизеля СУДМ.03. Данная система разработана компанией ООО «ППП ДИЗЕЛЬАВТОМАТИКА» и успешно используется на различных типах газодизельных двигателей Д-242, Д-243, Д-245, СМД-62, ЯМЗ-236, ЯМЗ-238, ЯМЗ-240, КамАЗ. Данная система выбрана вследствие того, что работает на двигателях меньшего объёма и мощности и проводить исследования безопаснее, система не требует большого пространства для размещения, полученные

результаты по применению алгоритмов управления двигателем можно применять и для двигателей большей мощности которые используются на тепловозах.

Состав системы СУДМ.03:

1. Оригинальные составные части:

- ограничитель запальной дозы – 1 шт;
- преобразователь заданной частоты вращения – 1 шт;
- дозатор газовый – 1 шт;
- распылитель – 1 шт.

2. Комплектующие изделия:

- блок управления БАКС-20.01 – 1 шт;
- усилитель мощности – 1 шт;
- преобразователь частоты вращения – 1 шт.

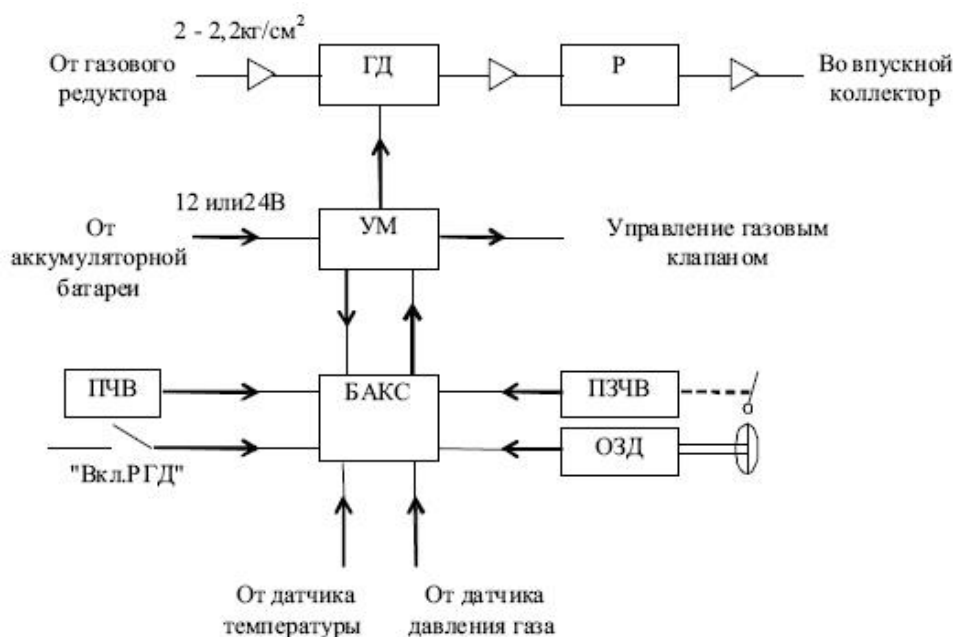


Рисунок 2.2 – Блок-схема системы топливоподачи газодизеля СУДМ.03

Выполняемые функции:

- формирование запальной дозы дизельного топлива;
- ограничение подачи газа в функции частоты вращения и давления наддува;

– оперативная цифровая индикация частоты вращения, температуры охлаждающей жидкости, давления газа на входе в газовый дозатор, расхода газа через газовый дозатор;

– автоматический переход в дизельный режим и блокировка перехода в газодизельный режим при следующих условиях: минимальная температура охлаждающей жидкости, снижение давления газа перед газовым дозатором длительностью более 100 с, отключение ограничителя запальной дозы, отсутствие сигнала о действительной частоте вращения.

В таблице 2.1 перечислено оборудование системы топливоподачи газодизеля СУДМ.03 с его описанием и погрешностями.

Таблица 2.1 – Список оборудования

№	Наименование	Описание	Погрешность
1.	Датчик температуры охлаждающей жидкости	Датчик температуры охлаждающей жидкости (ДТОЖ) – электронный датчик, предназначенный для измерения температуры охлаждающей жидкости (ОЖ) системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания. Данные, полученные с помощью датчика, используются для решения нескольких задач: • Визуальный контроль температуры силового агрегата – данные с датчика выводятся на соответствующий прибор (термометр) на приборной панели в салоне автомобиля • Корректировка работы различных систем двигателя (питания, зажигания, охлаждения, рециркуляции отработанных газов и других) в соответствии с его текущим температурным режимом — информация с ДТОЖ подается на электронный блок управления (ЭБУ), который вносит соответствующие корректировки Сопротивление терморезистора в датчике меняется от 100 кОм при низких температурах до 10 ÷ 30 Ом при температуре 130 °С.	2 %

Продолжение таблицы 2.1

2.	Преобразователь частоты вращения	Технические условия ТУ3129-040-24428398-03 Преобразователь частоты вращения индуктивного типа предназначен для работы в системах автоматического регулирования частоты вращения двигателей внутреннего сгорания, газовых и паровых турбин и преобразует частоту вращения вала силовой установки в электрический сигнал переменного тока с частотой, равной частоте следования зубьев шестерни – модулятора, установленной на вале силовой установки. Параметр гарантируется при следующих условиях: • сопротивление нагрузки 100 ± 10 кОм; • радиальный зазор с эвольвентным зубчатым венцом шестерни – модулятора $0,9 \pm 0,1$ мм; • материал зубчатого венца шестерни модулятора – сталь 45 ГОСТ 1050; • модуль зубчатого венца шестерни – модулятора – не менее 2,5 ГОСТ 13755; • частота следования зубьев 1200 ± 10 Гц при линейной скорости вершин зубьев не более 10 м/с.	0,1 %
3.	Электромеханические исполнительные устройства (Устройство исполнительное датчиком положения)	Технические условия ТУ3129-042-24428398-03 Электромагнитное исполнительное устройство предназначено для работы в системах автоматического регулирования частоты вращения двигателей внутреннего сгорания, газовых и паровых турбин и преобразует электрический сигнал электронного регулятора частоты вращения в механическое перемещение (поворот) выходного вала, воздействующего на орган топливоподачи ТНВД.	0,05%
4.	Клапан электрогазовый для подачи газа	Клапан электрогазовый 4ЭГК.03 предназначен для управляемого изменения величины подачи газа, путём изменения времени открытого состояния клапана. Технические данные клапана электрогазового 4ЭГК.03 1. Цикловая подача газа при длительности управляющего импульса 25 мс, давлении газа на входе клапана 3 кг/см^2 и противодавлении на выходе $1,3 \text{ кг/см}^2$	0,2 %

		1,55 нм³/цикл. 2. Цикловая подача газа при длительности управляющего импульса 25 мс, давлении газа на входе клапана 0,4 кг/см² и противодавлении на выходе ноль кг/см² 0,35 нм³/цикл. 3. Цикловая подача газа при длительности управляющего импульса 8 мс, давлении газа на входе клапана 0,4 кг/см² и противодавлении на выходе ноль кг/см² 0,135 нм³/цикл. 4. Напряжение питания 24±2 В.	
5.	Датчик фазовой отметки	Датчик положения распредвала регистрирует положение распредвала впускных клапанов с помощью инкрементного колеса, закрепленного на распределительном валу (колесо датчика положения распредвала). Датчик коленвала вместе с датчиком распредвала необходим для впрыска. Описание функционирования С помощью датчика распредвала система управления двигателем может распознать, находится ли 1-й цилиндр в фазе сжатия или в фазе выпуска. Датчик положения распредвала представляет собой бесконтактный датчик Холла. Колесо датчика положения распредвала имеет несколько различных расстояний между зубцами. Расстояния между зубцами определяет датчик Холла. По его информации система управления двигателем рассчитывает: • частоту вращения распредвала • скорость распредвала • точное положение распредвала	0,2 %
6.	Датчик давления газа	Датчик давления 23.3829010 Технические характеристики 1 Диапазон рабочих давлений: 0-6 кгс/см² 2 Сопротивление на выходе датчика: 290-330 Ом 3 Электрическое подключение к бортовой сети: Винт М4	0,9 %
7.	Высокопроизводительный 16-разрядный микроконтроллер	Максимальная рабочая температура +85 °С Дискретность широтно-импульсной модуляции 16 бит Разрешение АЦП 12бит Каналы ШИМ 8 Широтно-импульсная модуляция 8 х 16-разрядный Количество устройств АЦП 2	Погрешность АЦП = 0,025 % Погрешность ЦАП = 0,0015 %

	Количество каналов UART2 Структура системы команд DSP, RISC АЦП 2 (32 x 12 бит) Тип корпуса TQFP Тип монтажа Поверхностный монтаж Ширина шины данных 16бит Количество каналов PCI 0 Ширина 12мм Maximum Number of Ethernet Channels 0 Количество устройств ШИМ 1 Высота 1.05мм Количество каналов USART 0 Размеры 12 x 12 x 1.05мм Количество каналов Ethernet 0 Дискретность таймера 16бит Количество каналов LIN 0 Тип памяти программ Флэш-память Емкость памяти программ 256 kB Длина 12мм Сердечник устройства PIC Каналы АЦП 32 Минимальная рабочая температура -40 °C Наименование семейства PIC24HJ Емкость RAM 16.384 kB Таймеры 9 x 16-разрядный Количество каналов CAN 2 Число контактов 100 Количество таймеров 9 Количество каналов I2C 2 Количество каналов SPI 2 Максимальная частота 40MIPS (быстродействие) Типичное рабочее напряжение питания 3 → 3.6 V	
--	--	--

Значения абсолютной погрешности измерений величин приведены в таблице 2.2 по ГОСТу 18509-95.

Таблица 2.2 – Доступные абсолютные погрешности измерений в Д-242

№	Показатель	Значение
1.	Расположение и число цилиндров	4L
2.	Рабочий объем, л	4,75
3.	Диаметр цилиндра и ход поршня, мм	110 / 125
4.	Степень сжатия	16
5.	Удельный расход топлива, г/кВт (г/л.с.ч)	226 (166)
6.	Мощность, кВт (л.с.)	46 (62)

Продолжение таблицы 2.2

№	Показатель	Значение
7.	Частота вращения, об/мин.	1800
8.	Максимальный крутящий момент, Нм (кгм)	241 (24,6)
9.	Частота вращения при максимальном крутящем моменте, об/мин.	1400
10.	Масса, кг	430
11.	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	$\pm 0,005 n_{ном} (\pm 0,5 \%),$ но не более 10 мин ⁻¹
12.	Крутящий момент двигателя Н*м	$\pm 0,005 M_{емax} (\pm 0,5 \%)$

На основании таблицы 2.1 и 2.2 можно сделать вывод, что применяемое оборудование в системе автоматического управления топливоподачи газодизеля СУДМ.03 не превышает доступной абсолютной погрешности измерения [145,146].

2.2.2 Расчет общей погрешности системы автоматического управления

Для того чтобы формировать управляющее воздействие, необходимо учесть погрешности измерительных приборов и погрешность вычислительных приборов системы управления. Измерительные каналы системы автоматического управления топливоподачи газодизеля СУДМ.03 включают в себя средства измерения различного типа датчиков, измерительных преобразователей, модули аналогового и частотного ввода-вывода. Все измерительное оборудование системы СУДМ.03 перечислено в таблице 2.1.

Также должно выполняться условие работы системы автоматического управления для нормальной работы газодизельного двигателя. Для этого необходимо обеспечить управление подачи топлива исходя из отношения $t_{ср} < t_p$ с наименьшим временем между впрысками топлива в цилиндры газодизельного двигателя, где $t_{ср}$ – время срабатывания системы автоматического управления, t_p – минимальное время принятия решения. Минимальное время принятия решения

зависит от частоты оборотов газодизельного двигателя и скорости работы исполнительного механизма

Найдем наименьшее время между впрысками топлива в цилиндры на максимальной частоте вращения газодизельного двигателя равное 1800 об/мин

$$t_{\text{вп}} = \frac{1}{f_g} = \frac{1}{30} = 0,033 \text{ сек} \approx 33 \text{ мс},$$

где $t_{\text{вп}}$ – наименьшее время между впрысками топлива в цилиндры двигателя, $f_g = 30$ об/сек.

Таким образом, минимальное время для принятия решения будет

$$t_p = t_{\text{им}} + t_{\text{вп}} = 25 + 33 = 58 \text{ мс},$$

где $t_{\text{им}}$ – время срабатывания исполнительного устройства = 25 мс, данное время взято из технической документации.

Рассчитаем скорость срабатывания системы автоматического управления

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{ацп}} + t_{\text{по}} + t_{\text{шим}},$$

где $t_{\text{шим}}$ – скорость широтно-импульсной модуляции (ШИМ), $t_{\text{по}}$ – скорость выполнения программного обеспечения, $t_{\text{ацп}}$ – скорость работы аналого-цифрового преобразователя АЦП.

Для расчета скорости работы $t_{\text{шим}}$ и $t_{\text{ацп}}$ возьмем данные частоты работы ШИМ и АЦП из документации микроконтроллера: $t_{\text{шим}}$ – частота работы ШИМ = 937 кГц; $t_{\text{ацп}}$ – количество выборок в секунду = 500000 выб/с

Тогда $t_{\text{шим}}$ и $t_{\text{ацп}}$ будут равны

$$t_{\text{шим}} = \frac{1}{f_{\text{шим}}} = \frac{1}{937} = 1,07 * 10^{-6} \text{ с} = 1,07 \text{ мкс};$$

$$t_{\text{ацп}} = \frac{1}{f_{\text{ацп}}} = \frac{1}{500000} = 2 * 10^{-6} \text{ с} = 2 \text{ мкс}.$$

На основании полученных данных вычислим $t_{\text{ср}}$:

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{по}} + 0,00107 \text{ мс} + 0,002 \text{ мс} = t_{\text{по}} + 0,00307 \text{ мс}$$

Тогда для нормальной работы газодизельного двигателя необходимо обеспечить управление подачи топлива исходя из отношения

$$t_{\text{по}} + 0,00307 \text{ мс} < 58 \text{ мс} \quad (2.4)$$

Для выполнения отношения (2.4) необходимо, чтобы время выполнения программного обеспечения $t_{\text{по}} < 58 - 0,00307$ и не превышал 58 мс.

Исходя из документации по двигателю ДВС Д-242 (таблица 2.1) диапазон ошибки частоты вращения коленчатого вала в пределах $\pm 0,005n_{\text{ном}}$ или ± 10 об/мин, то есть при наибольших оборотах частоты вращения коленчатого вала максимальная погрешность должна составлять не больше ± 9 об/мин, что составляет 0,5 % от максимальных оборотов частоты вращения коленчатого вала ДВС, тем самым общая погрешность приборов измерения не должна превышать 0,5 %.

2.3 Анализ передаточной функции с дробными показателями

Пусть существуют одноканальные системы автоматического управления, описываемые неоднородными дифференциальными уравнениями дробного порядка с постоянными действительными коэффициентами [24, 25, 143]:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^{\alpha_n} y(t)}{dt^{\alpha_n}} + a_{n-1} \frac{d^{\alpha_{n-1}} y(t)}{dt^{\alpha_{n-1}}} + \dots + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^{\beta_m} u(t)}{dt^{\beta_m}} + b_{m-1} \frac{d^{\beta_{m-1}} u(t)}{dt^{\beta_{m-1}}} + \dots + b_0 u(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

где α, β – рациональные несократимые дроби, причем $\alpha_n > \alpha_{n-1} > \alpha_{n-2} \dots$ и $\beta_m > \beta_{m-1} > \beta_{m-2} \dots$, a, b – действительные коэффициенты, $y(t)$ – выходная переменная, $u(t)$ – входная переменная, $\frac{d^\alpha}{dt^\alpha} \varphi(t) = D_{0t}^\alpha \varphi(t)$ – оператор дробного дифференцирования (2.2).

Представим уравнение (2.5) в области изображений с нулевыми начальными условиями, для чего от левой и правой части выражения (2.5) возьмем преобразования Лапласа с учетом того, что преобразование Лапласа от дробной производной равно [134]

$$\int_0^\infty f^{(\alpha)}(t) e^{-pt} dt = p^\alpha F(p) - \sum_{k=0}^{n-1} p^k f^{(\alpha-k-1)}(0), \text{ где } f^{(\alpha)}(t) = \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} f(t).$$

В результате получим уравнение (2.1) в операторной форме

$$(a_n p^{\alpha_n} + a_{n-1} p^{\alpha_{n-1}} + \dots + a_0)Y(p) = (b_m p^{\beta_m} + b_{m-1} p^{\beta_{m-1}} + \dots + b_0)U(p).$$

Тогда передаточная функция с дробными показателями примет вид

$$W(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{b_n p^{\beta_n} + b_{n-1} p^{\beta_{n-1}} + \dots + b_0}{a_n p^{\alpha_n} + a_{n-1} p^{\alpha_{n-1}} + \dots + a_0}. \quad (2.6)$$

При исследовании САУ часто необходимо определять нули и полюса (корни характеристического уравнения) передаточной функции, где знаменатель и числитель представляют собой многочлены от p с рациональными степенями

$$A(p) = a_n p^{\alpha_n} + a_{n-1} p^{\alpha_{n-1}} + \dots + a_0, \quad (2.7)$$

$$B(p) = b_m p^{\beta_m} + b_{m-1} p^{\beta_{m-1}} + \dots + b_0.$$

Определение нулей и полюсов необходимо при исследовании САУ, например, для определения устойчивости, построения переходной характеристики, определения параметров качества и т.д.

2.3.1 Определение корней характеристического уравнения с дробными степенями

Многочлены (2.7) с рациональными степенями можно представить в виде иррационального уравнения вида

$$\sum_{i=1}^n a_i \sqrt[k_i]{p^{m_i}} + a_0 = \sum_{i=1}^n a_i p^{\frac{m_i}{k_i}} + a_0 = 0, \quad (2.8)$$

где, n – количество членов уравнения, m_i , k_i – натуральные числа и дробь $\alpha_i = m_i/k_i$ – не сократима.

Нахождение всех корней иррациональных уравнений является сложной задачей и на данный момент разработано много методов их определения. Наиболее применяемые методы следующие: возведение обеих частей уравнения в одну и ту же степень, замена переменных и сведение иррационального уравнения к смешанной алгебраической системе, умножение уравнения на сопряженное выражение, выделение полного квадрата, приведение иррационального уравнения

к уравнению, содержащему абсолютные величины, графическое решение, использование уравнения вида $f(f(x)) = x$. Все перечисленные методы мало применимы для решения поставленной задачи по причине трудоемкости их выполнения.

Одним из наиболее важных недостатков является невозможность по виду уравнения определить количество корней уравнения, удовлетворяющих решению. Это становится возможным только после нахождения всех корней и отбрасывания ложных, полученных в ходе решения. Также к недостаткам рассмотренных выше способов решения иррациональных уравнений можно отнести практически невозможную их алгоритмизацию.

Принимая во внимание все вышесказанное, в данной работе предлагается следующий способ решения иррациональных уравнений.

Так как члены иррационального уравнения (2.8) могут иметь степени m_i/k_i различного формата, например $1/2$, $3/4$, $3/2$, $2/1$ и т.д., то их требуется в начале упорядочить. Для этого необходимо привести все степени m_i/k_i к наименьшему общему делителю (НОД) k , что не противоречит свойствам радикалов, и получим равенство

$$\sum_{i=1}^n a_i p^{\frac{\overline{m}_i}{k}} + a_0 = 0, \quad (2.9)$$

где $\overline{m}_i$ – числа, полученные в результате приведения к НОД.

Корни уравнения (2.8) можно найти с помощью подстановки $\sqrt[k]{p} = p^\alpha = z$, где $\alpha = 1/k$.

В результате проведенной подстановки можно зафиксировать определенную ветвь данной комплексно многозначной функции, что соответствует выбору какой-либо области на римановской поверхности, не содержащую точек с одинаковыми аффиксами и, оставаясь, в пределах данной области, каждому оператору p^α соответствует значение z . Тогда

$$\sum_{i=1}^{\max(\overline{m}_i)} a_i z^{\overline{m}_i} + a_0 = 0. \quad (2.10)$$

Полученное уравнение (2.10) является стандартным полиномом и на основании основной теоремы алгебры [35, 58] имеет $\max(\bar{m}_i)$ корней, нахождение которых производится уже известными способами. Корни уравнения (2.9) после его решения представим следующим образом $z_i = b_i$, $i = 1, 2, \dots, \max(\bar{m}_i)$, и после обратной подстановки получим корни уравнения (2.3) относительно главных ветвей аналитических функций $p_i^\alpha = b_i$, $i = 1, 2, \dots, \max(\bar{m}_i)$.

Для дальнейшего применения вычисление всех корней не требуется, так как решение является однозначным относительно главной ветви p^α .

2.3.2 Представление дробных передаточных функций с рациональными степенями в виде композиции элементарных динамических звеньев

Передаточную функцию (2.6) после приведения показателей числителя и знаменателя к НОД можно привести к виду

$$W(p) = \frac{b_m p^{m\alpha} + \dots + b_1 p^\alpha + b_0}{a_n p^{n\alpha} + \dots + a_1 p^\alpha + a_0}, \quad (2.11)$$

где $n \geq m$, $0 \leq \alpha < 1$.

Тогда многочлены (2.6) примут вид:

$$A(p) = a_n p^{n\alpha} + a_{n-1} p^{\alpha(n-1)} + \dots + a_0,$$

$$B(p) = b_m p^{\beta m} + B_{m-1} p^{\beta(m-1)} + \dots + b_0.$$

После приведения их показателей к НОД и нахождения нулей получим:

$$A(p) = a_n (p^\alpha - p_1)(p^\alpha - p_2) \dots (p^\alpha - p_n),$$

$$B(p) = b_m (p^\alpha - p_1')(p^\alpha - p_2') \dots (p^\alpha - p_m'),$$

где p_i ($i=1, 2, \dots, n$) – нули многочлена $A(p)$, $n = \max(\bar{m}_i^a)$ – наибольшая степень после приведения к НОД, p_i' ($i=1, 2, \dots, m$) – нули многочлена $B(p)$, $m = \max(\bar{m}_i^b)$ – наибольшая степень после приведения к НОД.

Сомножители многочлена $A(p)$, которые соответствуют действительным нулям, приведем к виду

$$p^\alpha - p_k = \frac{1}{T_k}(T_k p^\alpha + 1); \quad p^\alpha - p_l' = \frac{1}{\tau_l}(\tau_l p^\alpha + 1),$$

где $T_k = -1/p_k$, $\tau_l = -1/p_l'$. Сомножители, соответствующие комплексным нулям многочлена $A(p)$, примем к виду $p_k = \alpha_k + j\beta_k$, а сопряженное к нему число $\bar{p}_k = \alpha_k - j\beta_k$. Исходя из этого, получим

$$(p^\alpha - p_k)(p^\alpha - \bar{p}_k) = p^{2\alpha} + 2\alpha_k p^\alpha + \alpha_k^2 + \beta_k^2 = \frac{1}{T_k^2}(T_k^2 p^{2\alpha} + 2\xi_k T_k p^\alpha + 1),$$

где $T_k = \frac{1}{\sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}}$, $\xi_k = -\frac{\alpha_k}{\sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}}$.

Для многочлена $B(p)$ сомножители $p_l' = \tilde{\alpha}_l + j\tilde{\beta}_l$ и $\bar{p}_l' = \tilde{\alpha}_l - j\tilde{\beta}_l$ представим

$$(p^\alpha - p_l')(p^\alpha - \bar{p}_l') = \frac{1}{\tau_l^2}(\tau_l^2 p^{2\alpha} + 2\bar{\xi}_l \tau_l p^\alpha + 1),$$

где $\tau_l = \frac{1}{\sqrt{\tilde{\alpha}_l^2 + \tilde{\beta}_l^2}}$, $\bar{\xi}_l = -\frac{\alpha_l}{\sqrt{\tilde{\alpha}_l^2 + \tilde{\beta}_l^2}}$.

Предположим, что многочлен $A(p)$ имеет ν нулевых корней, тогда передаточную функцию (2.11) представим следующим образом

$$W(p) = \frac{k \prod_{l=1}^q (\tau_l p^\alpha + 1) \prod_{l=1}^s (\tau_l^2 p^{2\alpha} + 2\bar{\xi}_l \tau_l p^\alpha + 1)}{p^{\alpha\nu} \prod_{k=1}^\mu (T_k p^\alpha + 1) \prod_{k=1}^r (T_k^2 p^{2\alpha} + 2\xi_k T_k p^\alpha + 1)}, \quad (2.12)$$

где $k = b_m / a_n$.

Многочлен $B(p)$ может тоже иметь нулевые корни, тогда в зависимости от разности числа нулевых корней многочленов $A(p)$ и $B(p)$ показатель степени ν может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Из этого следует, что в передаточную функцию (2.12) могут входить семь элементарных динамических звеньев вида

$$k, p^\alpha, \tau_1 p^\alpha + 1, \tau_l^2 p^{2\alpha} + 2\bar{\xi}_l \tau_l p^\alpha + 1, \frac{1}{p^\alpha}, \frac{1}{T_k p^\alpha + 1}, \frac{1}{T_k^2 p^{2\alpha} + 2\xi_k T_k p^\alpha + 1}.$$

Пример: предположим, что нам дано описание системы автоматического управления в виде передаточной функции вида

$$W(p) = \frac{1}{p + 5p^{1/2} + 4}.$$

Определим корни характеристического уравнения

$$p + 5p^{1/2} + 4 = 0.$$

НОД при степенях p равен 2, тогда характеристическое уравнение можно переписать в следующем виде

$$p^{2\alpha} + 5p^\alpha + 4 = 0, \alpha = 1/2. \quad (2.13)$$

Тогда корни уравнения (2.13) будут равны $p_1^\alpha = -1, p_2^\alpha = -4$

Так как корни характеристического уравнения находятся в левой полуплоскости, то САУ устойчива [32].

Найдем переходную характеристику $h(t)$ САУ, для этого воспользуемся выражением

$$h(t) = L^{-1} \left[W(p) \frac{1}{p} \right]. \quad (2.14)$$

Передаточную функцию системы автоматического управления с учетом корней характеристического уравнения представим в следующем виде

$$W(p) = \frac{1}{p + 5p^{1/2} + 4} = \frac{1}{(p^\alpha + 1)(p^\alpha + 4)}.$$

В этом случае разложение рациональной дроби на сумму простых дробей внутри преобразования Лапласа (2.14)

$$W(p) \frac{1}{p} = \frac{1}{(p^\alpha + 1)(p^\alpha + 4)p} = \frac{A}{p} + \frac{B_1}{(p^\alpha + 1)} + \frac{B_2}{(p^\alpha + 4)} \quad (2.15)$$

не приведет к желаемым результатам, так как будет невозможно найти неопределенные коэффициенты A, B_1, B_2 . Для подтверждения высказывания найдем коэффициенты, для этого запишем условие равенства числителей

$$1 = Ap^{2\alpha} + 5Ap^\alpha + (B_1 + B_2)p^{\alpha+1} + (4B_1 + B_2)p + 4A$$

Из условия равенства числителей составим систему уравнений

$$\begin{cases} 4A = 1 \\ 4B_1 + B_2 = 0 \\ B_1 + B_2 = 0 \\ 5A = 0 \\ A = 0 \end{cases},$$

решение которой невозможно по причине того, что найденные коэффициенты имеют неоднозначное значение. В результате чего можно сделать вывод, что данный метод не подходит для работы с дробными степенями.

Изменим подход, для этого разложим передаточную функцию на сумму простых дробей

$$W(p) = \frac{1}{(p^\alpha + 1)(p^\alpha + 4)} = \frac{B_1}{p^\alpha + 1} + \frac{B_2}{p^\alpha + 4}. \quad (2.16)$$

Тогда система уравнений будет следующей

$$\begin{cases} 4B_1 + B_2 = 1 \\ B_1 + B_2 = 0 \end{cases},$$

откуда $B_1 = 1/3$, $B_2 = -1/3$.

В выражение (2.14) подставим (2.16) с найденными коэффициентами и получим

$$h(t) = L^{-1} \left[\left(\frac{B_1}{p^\alpha + 1} + \frac{B_2}{p^\alpha + 4} \right) \frac{1}{p} \right] = L^{-1} \left[\frac{B_1 p^{-1}}{p^\alpha + 1} + \frac{B_2 p^{-1}}{p^\alpha + 4} \right].$$

Используя линейное свойство преобразования Лапласа и следующее выражение [34]

$$L^{-1} [t^{\beta-1} E_{\alpha, \beta}((at)^\alpha)] = \frac{p^{\alpha-\beta}}{p^\alpha - a^\alpha},$$

получим переходную характеристику

$$\begin{aligned}
h(t) &= L^{-1} \left[\frac{B_1 p^{\alpha-(\alpha+1)}}{p^\alpha + 1} + \frac{B_2 p^{\alpha-(\alpha+1)}}{p^\alpha + 4} \right] = \frac{t^\alpha}{3} E_{\alpha, \alpha+1}((-t)^\alpha) - \frac{t^\alpha}{3} E_{\alpha, \alpha+1}((-4t)^\alpha) = \\
&= \frac{t^{1/2}}{3} E_{1/2, 1/2+1}((-t)^{1/2}) - \frac{t^{1/2}}{3} E_{1/2, 1/2+1}((-4t)^{1/2})
\end{aligned}$$

Возможность представления дробных передаточных функций с рациональными степенями в виде композиции элементарных динамических звеньев дробного порядка даёт широкие возможности по исследованию систем автоматического управления на железнодорожном транспорте и других отраслях промышленности. Появляется возможность структурного анализа, построения имитационных моделей и их исследование как по отдельным частям, так и в целом. Для этих целей необходимо рассмотреть временные и частотные свойства динамических звеньев дробного порядка.

2.4 Временные и частотные свойства динамических звеньев дробного порядка

В данном разделе исследуем временные и частотные свойства некоторых динамических звеньев дробного порядка.

2.4.1 Дробно дифференцирующее звено

Дробным дифференцирующим называется звено, которое описывается дифференциальным уравнением вида:

$$y(t) = k D_{0t}^\alpha u(t),$$

где $D_{0t}^\alpha = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{f(\tau) d\tau}{(t-\tau)^{\alpha-1}}$ дробная производная с показателем $0 \leq \alpha < 1$.

Преобразование Лапласа для данного звена [144] следующее $y(p) = kp^\alpha u(p)$, а передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = kp^\alpha.$$

Переходную характеристику дифференцирующего звена определим из преобразования Лапласа, она имеет вид (рисунок 2.3):

$$h(t) = L^{-1} \left[W(p) \frac{1}{p} \right] = \frac{k}{t^\alpha \Gamma(1-\alpha)},$$

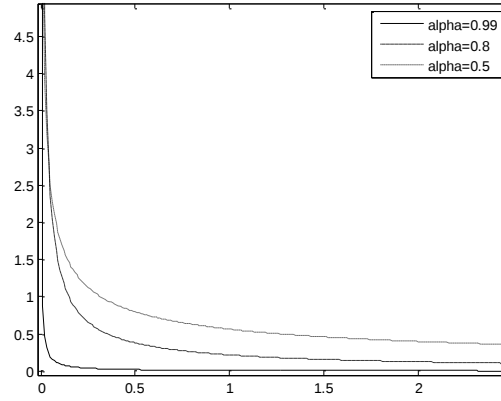


Рисунок. 2.3 – Переходная характеристика звена дробного дифференцирующего звена

Найдем частотные характеристики звена. Для этого произведем замену $p = j\omega$ в передаточной функции звена и с учетом того, что $(j\omega)^\alpha = |\omega|^\alpha e^{\frac{\alpha j\pi}{2} \text{sign} \omega}$ [92] при $\omega \geq 0$ и $\omega \in R$, получим следующее

$$(j\omega)^\alpha = \omega^\alpha e^{\frac{\alpha j\pi}{2}} = \omega^\alpha k \cos \frac{\alpha\pi}{2} + j\omega^\alpha k \sin \frac{\alpha\pi}{2}. \quad (2.17)$$

Откуда,

$$\text{АФХ: } W(j\omega) = k(j\omega)^\alpha = \omega^\alpha k \cos \frac{\alpha\pi}{2} + j\omega^\alpha k \sin \frac{\alpha\pi}{2},$$

$$\text{ВЧХ: } R(\omega) = \omega^\alpha k \cos \frac{\alpha\pi}{2},$$

$$\text{МЧХ: } I(\omega) = \omega^\alpha k \sin \frac{\alpha\pi}{2},$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = k\omega^\alpha \sqrt{\cos^2 \frac{\alpha\pi}{2} + \sin^2 \frac{\alpha\pi}{2}} = k\omega^\alpha,$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{\omega^\alpha k \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{\omega^\alpha k \cos \frac{\alpha\pi}{2}} \right) = \arctgtg \frac{\alpha\pi}{2} = \frac{\alpha\pi}{2},$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20 \lg k \omega^\alpha = 20 \lg k + 20\alpha \lg \omega.$$

Из построенных логарифмических частотных характеристик (рисунок 2.4), видно, что на всех частотах звено имеет фазовый сдвиг, не зависящий от частоты, и зависящий от порядка дифференцирования α в пределах от 0 до $\alpha\pi/2$. Также видно, что дробное дифференцирующее звено имеет наклон в пределах $(0 \div 20)$ дБ/дек в зависимости от α . Отсюда можно сделать вывод, что дробное дифференцирующее звено усиливает высокочастотные сигналы и уровень усиления зависит от α .

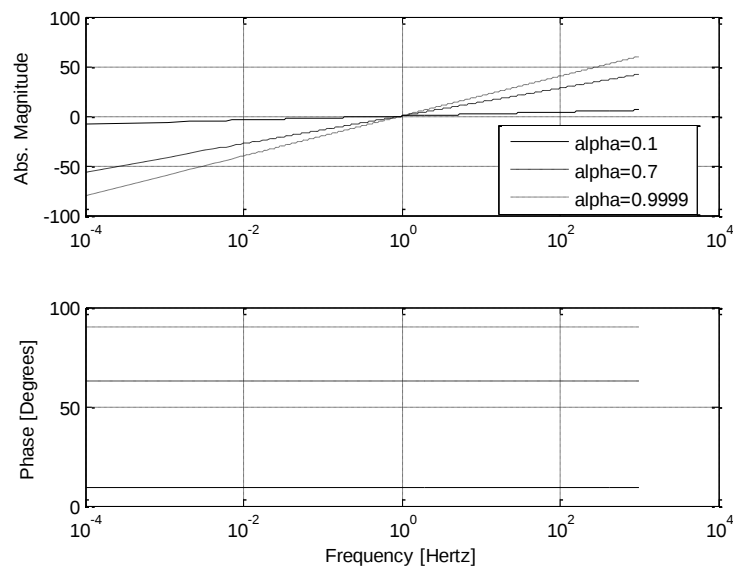


Рисунок 2.4 – ЛАЧХ дробного дифференцирующего звена при $k = 1$

Дробное пропорционально-дифференцирующее звено. Дробное пропорционально-дифференцирующее звено описывается дифференциальным уравнением вида [103, 104]

$$y(t) = k_1 D_{0t}^\alpha u(t) + k_0 u(t), \quad (2.18)$$

где k_1 и k_0 – постоянные вещественные коэффициенты.

Приведем уравнение (2.18) к операторному виду и найдем передаточную функцию. Для этого применим к левой и правой части прямое преобразование Лапласа и с учетом свойства линейности и определения передаточной функции получим [103, 161, 162]

$$W(p^\alpha) = k_1 p^\alpha + k_0 = k(Tp^\alpha + 1), \quad (2.19)$$

где $k = k_0$ – коэффициент усиления, $T = k_1/k_0$ – постоянная времени звена.

Определим переходную характеристику дробного пропорционально-дифференцирующего звена, которая будет состоять из суммы пропорционального и дифференцирующего звеньев

$$h(t) = k_0 + \frac{k_1}{t^\alpha \Gamma(1-\alpha)}.$$

Найдем частотные характеристики дробного пропорционально-дифференцирующего звена, для этого в передаточной функции (2.19) заменим $p = j\omega$ и с учетом свойства (2.17) получим:

$$\text{АФХ: } W(j\omega) = k_1(j\omega)^\alpha + k_0 = k_0 + \omega^\alpha k_1 \cos \frac{\alpha\pi}{2} + j\omega^\alpha k_1 \sin \frac{\alpha\pi}{2},$$

$$\text{ВЧХ: } \operatorname{Re}(\omega) = k_0 + \omega^\alpha k_1 \cos \frac{\alpha\pi}{2},$$

$$\text{МЧХ: } \operatorname{Im}(\omega) = \omega^\alpha k_1 \sin \frac{\alpha\pi}{2},$$

$$\begin{aligned} \text{АЧХ: } A(\omega) &= \sqrt{\left(k_0 + \omega^\alpha k_1 \cos \frac{\alpha\pi}{2}\right)^2 + \left(\omega^\alpha k_1 \sin \frac{\alpha\pi}{2}\right)^2} = \\ &= \sqrt{k_0^2 + 2\omega^\alpha k_0 k_1 \cos \frac{\alpha\pi}{2} + \omega^{2\alpha} k_1^2} \end{aligned}$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20 \lg \sqrt{k^2 (1 + T^2 \omega^{2\alpha}) + 2\omega^\alpha k_0 k_1 \cos \frac{\alpha\pi}{2}}.$$

Рассмотрим асимптотическую ЛАЧХ в области низких частот (ОНЧ) при $\omega \ll 1/T$ и в области высоких частот (ОВЧ), когда $\omega \gg 1/T$:

В ОНЧ составляющие ЛАЧХ, содержащие частоту, будут незначительными, тогда $L(\omega) = 20 \lg k$, а в ОВЧ слагаемые $2\omega^\alpha k_0 k_1 \cos \frac{\alpha\pi}{2}$ и k^2 будет намного меньше области больших частот, чем слагаемое $k^2 T^2 \omega^{2\alpha}$ и ими можно пренебречь. Отсюда следует, что ЛАЧХ в области высоких частот будет $L(\omega) = 20 \lg k + 20 \lg T \omega^\alpha$. Из этого можно сделать вывод, что асимптотическая ЛАЧХ на низких частотах пропускает сигнал без искажений и только усиливает его на коэффициент усиления k , а при высоких частотах усиливает сигнал на выходе системы и имеет наклон плюс $20\alpha \text{ дБ/дек}$.

Точная ЛАЧХ, представленная на рисунке 2.5, является подтверждением этому. Сдвиг фазы от частоты при провозждении сигнала через дробное пропорционально-дифференцирующее звено зависит от показателя α и находится в пределах от 0 до $\alpha\pi/2$.

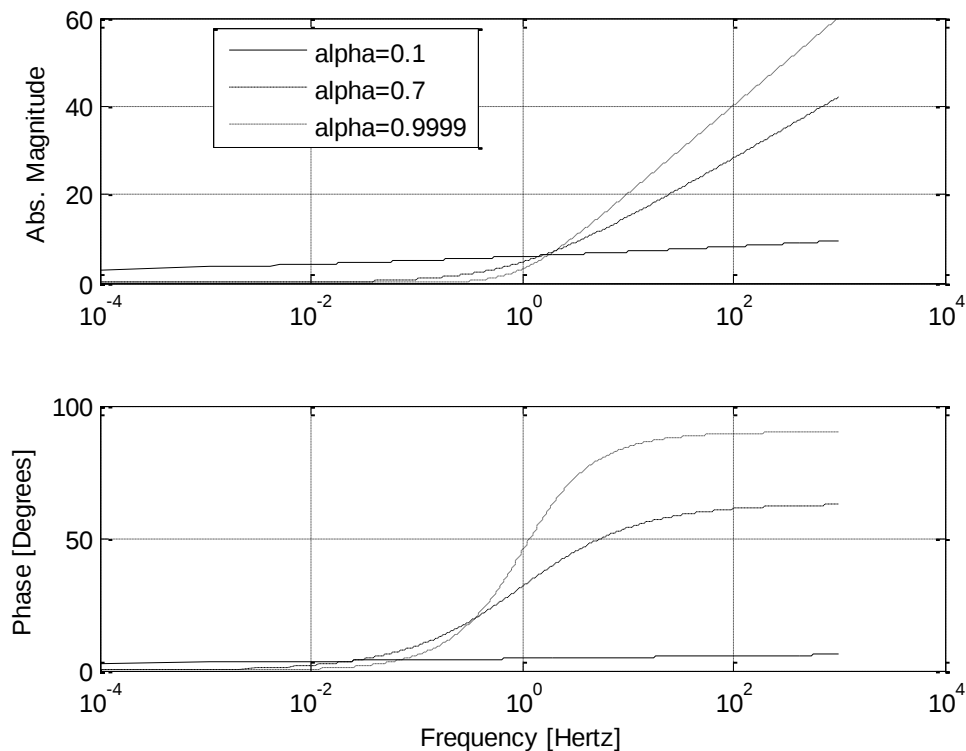


Рисунок. 2.5 – ЛАЧХ дробного пропорционально- дифференцирующего звена

2.4.2 Дробное интегрирующее звено

Это звено, уравнение которого имеет вид:

$$y(t) = kI_{0t}^{\alpha}u(t), \quad (2.20)$$

где I_{0t}^{α} – дробный интеграл с показателем $0 \leq \alpha < 1$.

Прямое преобразование Лапласа от дробного интеграла определяется по выражению [139]

$$L[f^{(-\alpha)}(t)] = \frac{F(p)}{p^{\alpha}} + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{f^{(\alpha-k-1)}(0)}{p^k}. \quad (2.21)$$

Преобразование Лапласа выражения (2.19) в соответствии с (2.20) при нулевых начальных условиях имеет вид

$$Y(p) = \frac{k}{p^{\alpha}}U(p).$$

Откуда передаточная функция звена

$$W(p^{\alpha}) = \frac{k}{p^{\alpha}}. \quad (2.22)$$

Переходная характеристика звена имеет вид (рисунок 2.6):

$$h(t) = L^{-1}\left[W(p)\frac{1}{p}\right] = \frac{kt^{\alpha}}{\Gamma(\alpha+1)}.$$

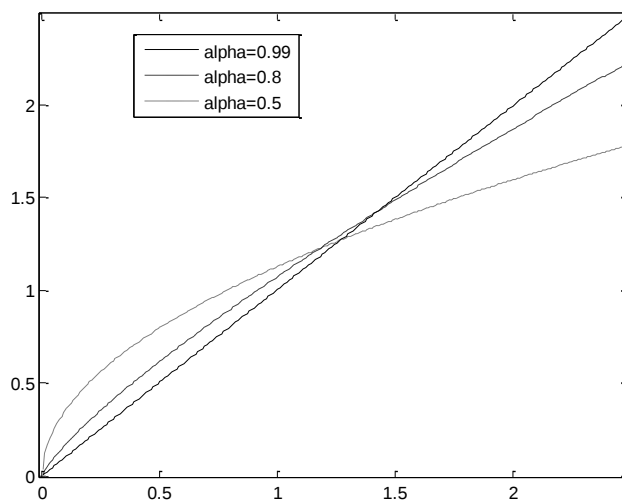


Рисунок 2.6 – Переходная характеристика дробного интегрирующего звена при $k = 1$

Как видно на рисунке 2.6, переходная характеристика дробного интегрирующего звена имеет нелинейный характер в отличие от классического интегратора и зависит от показателя α . Что позволяет на начальном этапе быстрее реагировать на изменение ошибки регулирования.

Определим частотные характеристики интегрирующего звена, для этого перейдем в частотную область с помощью подстановки в передаточную функцию (2.18) $p = j\omega$ и получим:

$$\text{АФХ: } W(j\omega) = \frac{k}{(j\omega)^\alpha} = \frac{k \cos \frac{\alpha\pi}{2}}{\omega^\alpha} - j \frac{k \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{\omega^\alpha},$$

$$\text{ВЧХ: } \text{Re}(\omega) = \frac{k \cos \frac{\alpha\pi}{2}}{\omega^\alpha},$$

$$\text{МЧХ: } \text{Im}(\omega) = -\frac{k \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{\omega^\alpha},$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = \frac{k}{\omega^\alpha},$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = -\arctg \frac{\alpha\pi}{2} = -\frac{\alpha\pi}{2}.$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20 \lg \frac{k}{\omega^\alpha} = 20 \lg k - 20\alpha \lg \omega$$

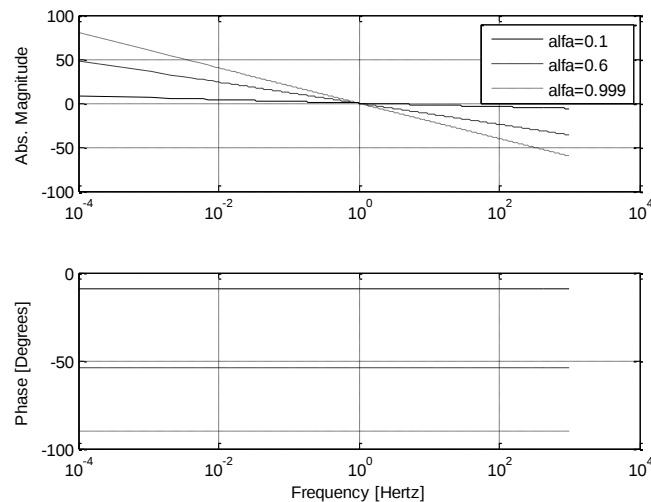


Рисунок. 2.7 – ЛАЧХ дробного интегрирующего звена

Как видно из логарифмических частотных характеристик дробного интегрального звена (рисунок 2.7), проходящий сигнал имеет постоянный фазовый сдвиг, который не зависит от частоты, но зависит от степени показателя α и варьирует в диапазоне от минус 90 до 0 градусов.

2.4.3 Аперидическое звено дробного порядка

Аперидическим называется звено, дифференциальное уравнение которого имеет вид [76]

$$a_1 D_{0t}^\alpha y(t) + a_0 y(t) = bu(t), \text{ где } 0 \leq \alpha < 1. \quad (2.23)$$

Перейдем к его стандартному описанию, для чего разделим обе части (2.23) на коэффициент a_0 ,

$$TD_{0t}^\alpha y(t) + y(t) = ku(y), \quad (2.24)$$

где $T = \frac{a_1}{a_0}$ – постоянная времени, $k = \frac{b}{a_0}$ – коэффициент передачи звена.

$$L[f^{(\alpha)}(t)] = p^\alpha F(p) - \sum_{k=0}^{n-1} p^k f^{(\alpha-k-1)}(0) \quad (2.25)$$

Перейдем в область изображений, для этого возьмем преобразование Лапласа с нулевыми начальными условиями от выражения (2.24), и с учетом свойств (2.25) и линейности преобразования получим

$$(Tp^\alpha + 1)Y(p) = kU(p).$$

Откуда передаточная функция дробного аперидического звена будет иметь вид

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{k}{Tp^\alpha + 1}. \quad (2.26)$$

Как известно, переходную характеристику можно найти двумя способами: а) через импульсную переходную функцию (ИПХ); б) как решение уравнения (2.24) при входном воздействии $u(t)=1(t)$ и начальных условиях $y(0)=0$.

Определим ПХ через ИПХ. Как известно, ИПХ это обратное преобразование Лапласа от передаточной функции

$$g(t) = L^{-1}[W(p)]. \quad (2.27)$$

$$L[t^{\beta-1} E_{\alpha,\beta}((at)^\alpha)] = \frac{p^{\alpha-\beta}}{p^\alpha - a^\alpha}, \quad \operatorname{Re} p > 1. \quad (2.28)$$

Исходя из соотношений (2.27) и (2.28), при $\alpha = \beta$ получим ИПХ апериодического звена дробного порядка вида

$$g(t) = L^{-1}\left[\frac{k}{Tp^\alpha + 1}\right] = kt^{\alpha-1} E_{\alpha,\alpha}(-t^\alpha/T). \quad (2.29)$$

Найдем ПХ. Как известно, ИПХ и ПХ связаны между собой соотношением

$$h(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau. \quad (2.30)$$

Подставим в (2.30) уравнение (2.29) и получим

$$h(t) = \int_0^t \tau^{\alpha-1} E_{\alpha,\alpha}(-(t/T)^\alpha) d\tau = kt^\alpha E_{\alpha,\alpha+1}(-t^\alpha/T).$$

Рассмотрим другой способ нахождения ПХ, основанный на произведении передаточной функции и изображения единичной ступенчатой функции

$$h(t) = L^{-1}\left[W(p) \frac{1}{p}\right]. \quad (2.31)$$

Откуда, с учетом (2.28) при $\beta = \alpha + 1$ переходная характеристика дробного апериодического звена будет (рисунок 2.8)

$$h(t) = L^{-1}\left[\frac{k}{Tp^\alpha + 1} \frac{1}{p}\right] = L^{-1}\left[\frac{kp^{-1}}{Tp^\alpha + 1}\right] = kt^\alpha E_{\alpha,\alpha+1}(-t^\alpha/T). \quad (2.32)$$

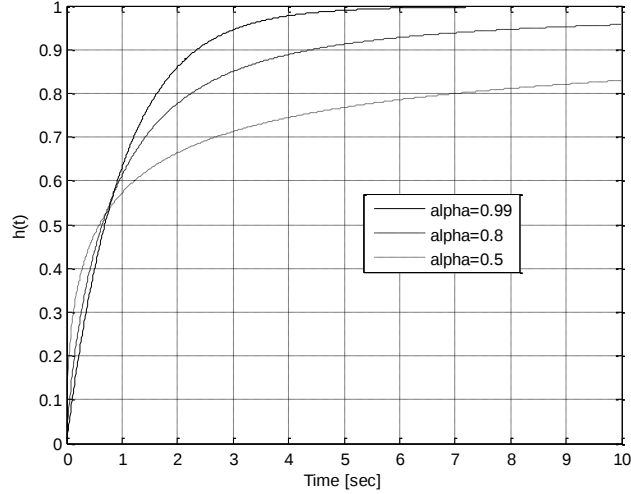


Рисунок 2.8 – Переходные характеристики дробного аperiodического звена при $K=1$ и $T=1$

Как видно, разные способы нахождения переходной характеристики привели к одинаковому результату. Проверим полученное выражение (2.32) частным случаем, для этого подставим в выражение (2.32) $\alpha=1$ и получим уравнение

$$h(t) = k(1 - e^{-t/T}),$$

которое является уравнением переходной функции аperiodического звена (2).

Определим частотные характеристики заменой в передаточной функции (2.26) p на $j\omega$.

Тогда

$$\text{АФХ: } W(j\omega) = \frac{k(T\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1)}{(T\omega^\alpha)^2 + 2T\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1} - j \frac{kT\omega^\alpha \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{(T\omega^\alpha)^2 + 2T\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1},$$

$$\text{ВЧХ: } R(\omega) = \frac{k(T\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1)}{(T\omega^\alpha)^2 + 2T\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1},$$

$$\text{МЧХ: } I(\omega) = - \frac{kT\omega^\alpha \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{(T\omega^\alpha)^2 + 2T\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1},$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(T\omega^\alpha)^2 + 2T\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1}},$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = \arctg \frac{I(\omega)}{R(\omega)} = \arctg \left(-\frac{T\omega^\alpha \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{T\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1} \right),$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20\lg A(\omega) = 20\lg k - 10\lg((T\omega^\alpha)^2 + 2T\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1).$$

Наиболее просто можно построить асимптотическую ЛАЧХ. Рассмотрим, отдельно ЛАЧХ в области высоких и низких частот и для каждой определим свою асимптоту:

$$\text{ОНЧ: } \omega \ll 1/T, \quad L(\omega) = 20\lg k,$$

$$\text{ОВЧ: } \omega \gg 1/T, \quad L(\omega) = 20\lg k - 20\alpha \lg(T\omega),$$

где частота $\omega = 1/T$ собственная частота аperiodического звена. Точная ЛАЧХ дробного аperiodического звена представлена на рисунке 2.9.

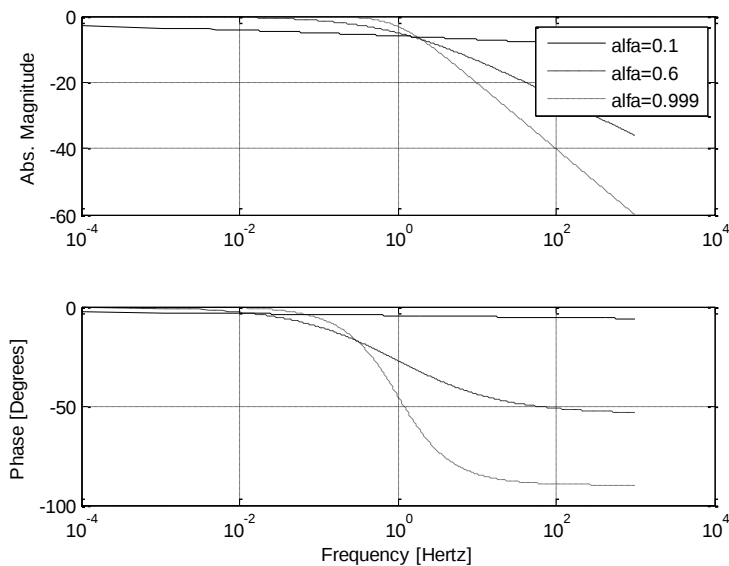


Рисунок 2.9 – ЛАЧХ и ЛФЧХ дробного аperiodического звена

Из рисунка видно, что при прохождении сигнала через дробное аperiodическое звено при низких частотах амплитуда сигнала практически не

искажается и не зависит от показателя α , а при высоких частотах наблюдается падение амплитуды с наклоном – минус $20\alpha \text{ дБ/дек}$.

Изменение фазы зависит от показателя α и частоты ω при этом сдвиг фазы лежит в пределах от 0 до $-\alpha\pi/2$.

2.4.4 Дробное звено второго порядка

Это звено, дифференциальное уравнение которого

$$a_2 D_{0t}^{2\alpha} y(t) + a_1 D_{0t}^{\alpha} y(t) + a_0 y(t) = bu(t),$$

принято записывать в стандартном виде:

$$T^2 D_{0t}^{2\alpha} y(t) + 2\xi T D_{0t}^{\alpha} y(t) + y(t) = ku(t), \quad (2.33)$$

где $T = \sqrt{a_2/a_0}$ – постоянная времени звена; ξ – коэффициент демпфирования, который определяет склонность звена к колебаниям, $2\xi T = a_1/a_0$; $k = b/a_0$ – коэффициент усиления.

Перейдем в область изображений, для этого возьмем от правой и левой части уравнения (3.33) преобразование Лапласа с нулевыми начальными условиями

$$T^2 p^{2\alpha} y(p) + 2\xi T p^{\alpha} y(p) + y(p) = ku(p).$$

Тогда передаточная функция будет иметь вид

$$W(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{k}{T^2 p^{2\alpha} + 2\xi T p^{\alpha} + 1}. \quad (2.34)$$

Определим модальные характеристики по характеристическому уравнению передаточной функции (2.34)

$$T^2 p^{2\alpha} + 2\xi T p^{\alpha} + 1 = 0. \quad (2.35)$$

Характеристическое уравнений имеет два корня относительно главного значения p^{α}

$$p_{1,2}^{\alpha} = -\frac{\xi}{T} \pm \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{T}, \quad (2.36)$$

которые в зависимости от коэффициента демпфирования ξ могут быть вещественными и комплексно-сопряженными, что приводит к различным переходным процессам в звене.

При $\xi \geq 1$ корни характеристического уравнения будут действительными, обозначим их

$$\lambda_{1,2} = -\frac{\xi}{T} \pm \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{T}, \quad (2.37)$$

а при $0 \leq \xi < 1$ корни характеристического уравнения будут комплексно-сопряженными

$$\lambda_{1,2} = \nu \pm j\nu = -\frac{\xi}{T} \pm j \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}. \quad (2.38)$$

Рассмотрим случай, когда корни уравнения (2.37) вещественные $\xi \geq 1$. Тогда передаточную функцию (2.36) можно представить в следующем виде

$$W(p) = \frac{k}{(p^\alpha - \lambda_1)(p^\alpha - \lambda_2)}.$$

Определим ИПХ

$$g(t) = L^{-1} \left[\frac{k}{(p^\alpha - \lambda_1)(p^\alpha - \lambda_2)} \right] = L^{-1} \left[\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \frac{k}{(p^\alpha - \lambda_1)} + \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{k}{(p^\alpha - \lambda_2)} \right], \quad (2.39)$$

с учетом (2.35) и свойства линейности преобразования Лапласа получим

$$g(t) = \frac{k}{\lambda_1 - \lambda_2} t^{\alpha-1} E_{\alpha,\alpha}(\lambda_1 t^\alpha) + \frac{k}{\lambda_2 - \lambda_1} t^{\alpha-1} E_{\alpha,\alpha}(\lambda_2 t^\alpha).$$

Исходя из связи между ПХ и ИПХ (2.36) переходная характеристика будет иметь следующий вид (рисунок 2.10)

$$h(t) = \frac{k}{\lambda_1 - \lambda_2} t^\alpha E_{\alpha,\alpha+1}(\lambda_1 t^\alpha) + \frac{k}{\lambda_2 - \lambda_1} t^\alpha E_{\alpha,\alpha+1}(\lambda_2 t^\alpha). \quad (2.40)$$

Как видно из рисунка 2.10, показатель α оказывает влияние на переходный процесс, увеличивая его скорость на начальном этапе и замедляя в последующем, увеличивая тем самым статическую ошибку, действие которой можно компенсировать коэффициентом усиления.

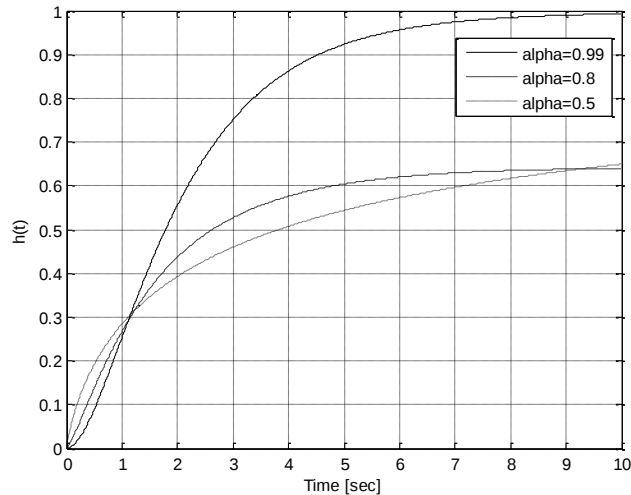


Рисунок 2.10 – Переходная характеристика звена 2-го порядка при $\xi \geq 1$, $T = 1$, $k = 1$

Рассмотрим случай, когда коэффициент демпфирования будет находиться в пределах $0 \leq \xi < 1$, корни уравнения (2.35) будут комплексно-сопряженными, то есть соответствовать выражению (2.38). В этом случае звено второго порядка называют колебательным. Его переходная характеристика в соответствии с работами [26] и [37] следующая:

$$h(t) = \frac{k}{\nu} t^{\alpha} \sin_{\alpha, \alpha+1}(\lambda t^{\alpha}),$$

где $\lambda = \nu + j\nu$ и является аналогом функции $e^{\nu} \cos \nu t$, при $\alpha = \beta = 1$.

Переходная характеристика при разных значениях α представлена на рисунке 2.11.

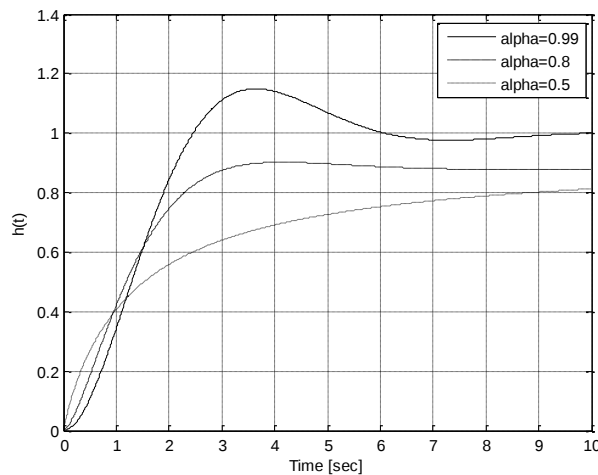


Рисунок 2.11 – Переходная характеристика звена 2-го порядка при $0 < \xi < 1$, $T = 1$, $k = 1$

Рассмотрим отдельно случай, когда коэффициент демпфирования будет равен ($\xi = 0$), то корни характеристического уравнения вырождаются в чисто мнимые $\lambda_{1,2} = \pm j\nu$.

Передаточная функция (2.34) в случае чисто мнимых корней будет

$$W(p) = \frac{k}{(p^\alpha - j\nu)(p^\alpha + j\nu)} = \frac{k}{p^{2\alpha} + \nu^2}.$$

Найдем ИПХ при условии $\alpha = \beta$ и получим

$$g(t) = L^{-1} \left[\frac{k}{p^{2\alpha} + \nu^2} \right] = \frac{k}{\nu} t^{\alpha-1} \sin_{\alpha,\alpha}(\nu t^\alpha). \quad (2.41)$$

Переходную характеристику получим, подставив выражение (2.41) в (2.29)

$$h(t) = \frac{k}{\nu} t^\alpha \sin_{\alpha,\alpha+1}(\nu t^\alpha),$$

ее графическое представление представлено на рисунке 2.12.

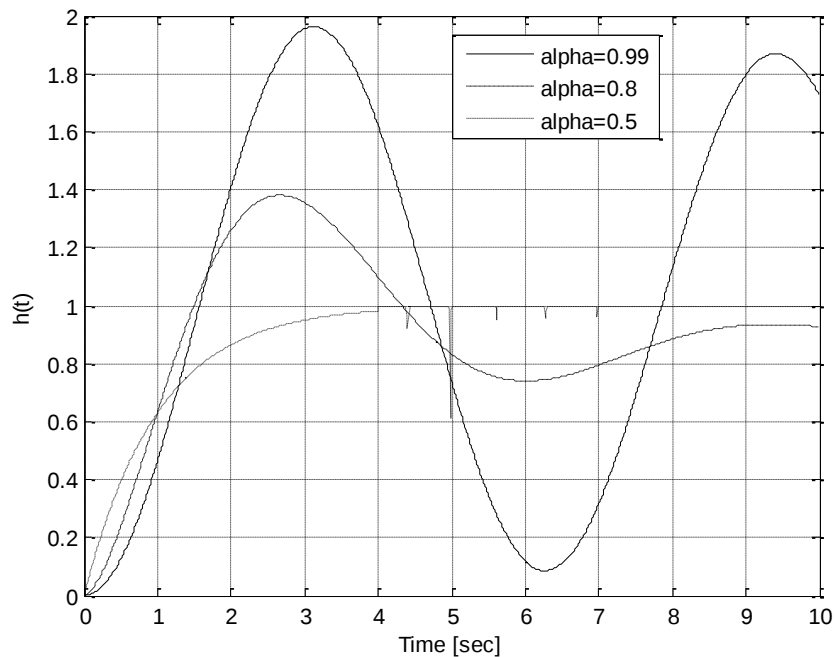


Рисунок 2.12 – Переходная характеристика звена 2-го порядка при $\xi = 0$, $T = 1$, $k = 1$

Вследствие всего вышесказанного можно сделать вывод, что колебательность переходного процесса в исследуемом звене зависит от коэффициента демпфирования ξ и показателя α : колебания будут тем больше,

чем меньше ξ , также с уменьшением α колебания будут уменьшаться, а при $\alpha \leq 0,5$ колебания вообще будут отсутствовать, так как звено станет звеном первого и ниже первого порядка.

Определим частотные характеристики звена, заменив p на $j\omega$ в передаточной функции (2.30) и с учетом свойства (2.13). Получим

$$\text{АФХ: } W(j\omega) = \frac{k \left(T^2 \omega^{2\alpha} \cos(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + 1 \right)}{A} - j \frac{k \left(T^2 \omega^{2\alpha} \sin(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \right)}{A},$$

где

$$A = \left(T^2 \omega^{2\alpha} \cos(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + 1 \right)^2 + \left(T^2 \omega^{2\alpha} \sin(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \right)^2.$$

$$\text{ВЧХ: } \operatorname{Re}(\omega) = \frac{k \left(T^2 \omega^{2\alpha} \cos(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + 1 \right)}{A},$$

$$\text{МЧХ: } \operatorname{Im}(\omega) = - \frac{k \left(T^2 \omega^{2\alpha} \sin(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \right)}{A},$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{A}},$$

$$\text{ФЧХ: } \varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \left(\frac{T^2 \omega^{2\alpha} \sin(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}{T^2 \omega^{2\alpha} \cos(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + 1} \right),$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = 20 \lg k - 10 \lg \left[\left(T^2 \omega^{2\alpha} \cos(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + 1 \right)^2 + \left(T^2 \omega^{2\alpha} \sin(\alpha\pi) + 2\xi T \omega^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \right)^2 \right].$$

Построим асимптотическую ЛАЧХ, при этом рассмотрим ее поведение, отдельно от области высоких и низких частот и для каждой определим свою асимптоту:

$$\text{ОНЧ: } \omega \ll 1/T, L(\omega) = L_1(\omega) = 20\lg k. \quad (2.42)$$

$$\text{ОВЧ: } \omega \gg 1/T, L(\omega) = L_2(\omega) = 20\lg k - 40\lg(T\omega^\alpha). \quad (2.43)$$

Частота $\omega_0 = 1/T$ называется собственной частотой колебательного звена. Причем на этой частоте для асимптотической ЛАЧХ (рисунок 2.13) справедливо соотношение $L_1(\omega_0) = L_2(\omega_0)$.

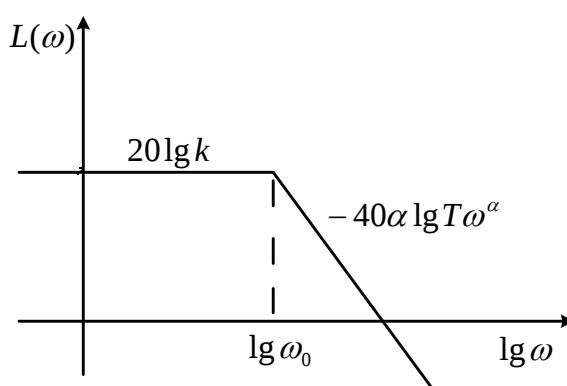


Рисунок 2.13 – Асимптотическая ЛАЧХ дробного колебательного звена

Рассмотрим ЛАЧХ дробного колебательного звена при точном ее построении при разных значениях коэффициента демпфирования ξ и показателя α (см. 2.15 – 2.17).

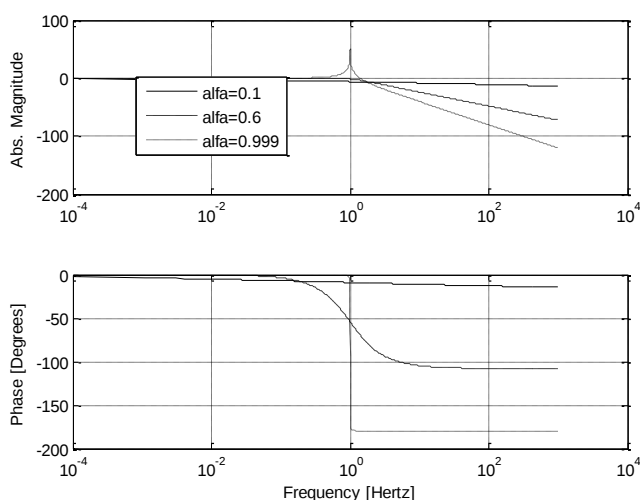
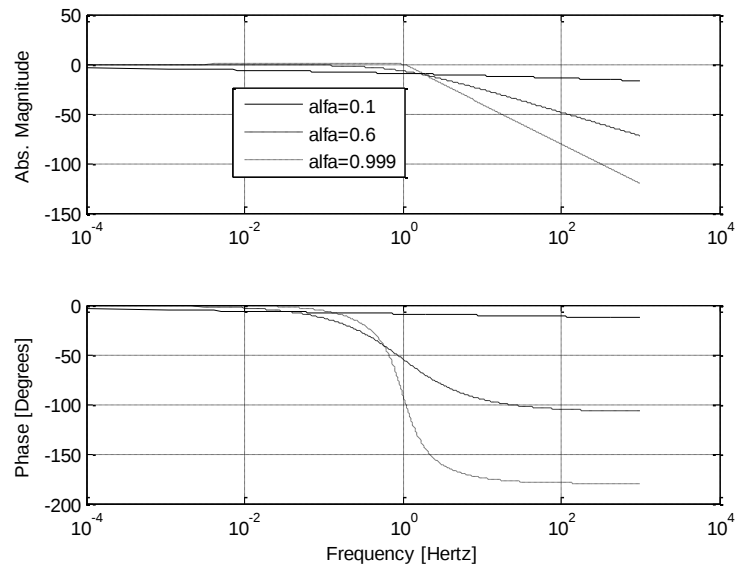
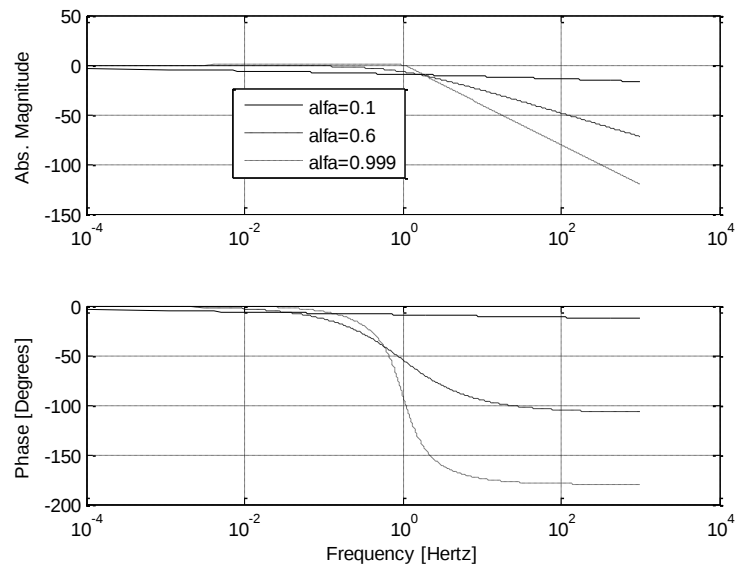


Рисунок 2.14 – ЛАЧХ при $\xi = 0$

Рисунок 2.15 – ЛАЧХ при $\xi = 0.5$ Рисунок 2.16 – ЛАЧХ при $\xi = 1$

Как видно, из приведенных логарифмических характеристик наибольшее отличие асимптотической ЛАЧХ от действительной наблюдается на собственной частоте ω_0 и зависит от коэффициента демпфирования и показателя α . При $0.5 \leq \xi \leq 1$ с достаточной точностью можно применять асимптотическую ЛАЧХ звена, а при $\xi \leq 0.5$ строится точная ЛАЧХ колебательного звена.

При $\xi > 1$ корни характеристического уравнения (2.35) будут вещественными, и передаточную функцию звена второго порядка (2.34) можно представить в виде произведения двух передаточных функций апериодических звеньев дробного порядка:

$$W(p) = \frac{k}{(p^\alpha - \lambda_1)(p^\alpha - \lambda_2)}.$$

Тогда асимптотическую ЛАЧХ дробного звена второго порядка можно строить как сумму двух асимптотических ЛАЧХ апериодического звена дробного порядка.

2.5 Выводы по главе 2

1 Описана система автоматического управления газодизельным двигателем тепловоза и предложена ее модернизация, позволяющая, в отличие от аналогов, реализовать новые алгоритмы цифрового управления и обеспечить тем самым преимущество по технико-эксплуатационным показателям маневренности, надежности и экономичности.

2 Предложено и обосновано математическое описание системы автоматического управления тепловозом на основе дробных дифференциальных уравнений и передаточных функций.

3 Приведено представление передаточных функций системы дробного порядка в виде композиции элементарных динамических звеньев. Выполнено исследование временных и частотных характеристик элементарных динамических звеньев дробного порядка во временных и частотных областях.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ДРОБНЫМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ИНТЕГРАЛЬНЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ АЛГОРИТМОМ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ТЕПЛОВОЗА

Развитие современных систем автоматики ведет к применению все более сложных алгоритмов управления с целью организации оптимального управления. В данной главе рассматриваются вопросы получения алгоритма цифрового ПИ_αД_β регулятора; построение модели системы автоматического управления газодизельным двигателем тепловоза с ПИ_αД_β алгоритмом регулирования и исследование работоспособности системы автоматического управления с ПИ_αД_β алгоритмом регулирования на газодизельном двигателе тепловоза.

3.1 Частотные критерии устойчивости системы автоматического управления дробного порядка

Частотные критерии позволяют оценить устойчивость замкнутых систем косвенным путем с помощью частотных характеристик. Доказательство частотных критериев основано на принципе аргумента. Рассмотрим его для систем автоматического управления с дробными показателями.

3.1.1 Принцип аргумента

Оценка устойчивости основана на значении корней характеристического уравнения передаточной функции системы автоматического управления (2.10). При этом характеристическое уравнение вида

$$D(p) = a_n p^{n\alpha} + a_{n-1} p^{(n-1)\alpha} + \dots + a_0 = 0, \quad (3.1)$$

можно представить в форме произведения однотипных сомножителей относительно главного значения $p^\alpha = p_i$ и приведем (3.2) в виде произведения

$$D(p^\alpha) = a_n(p^\alpha - p_1)(p^\alpha - p_2) \dots (p^\alpha - p_n). \quad (3.2)$$

Каждому корню (3.2) на комплексной плоскости соответствует определенная точка, и геометрически на этой плоскости каждый корень можно изобразить в виде вектора с модулем $|p_i|$, проведенного из начала координат.

Для перехода к частотному виду произведем замену в уравнении (3.2) $s = j\omega$ и с учетом того, что [159]

$$(j\omega)^\alpha = |\omega|^\alpha e^{\frac{\alpha j}{2} \text{sign} \omega}$$

при $\omega \geq 0$ и $\omega \in R$ можно представить в следующем виде

$$(j\omega)^\alpha = \omega^\alpha e^{\frac{\alpha j}{2}} = \omega^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) + j\omega^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right),$$

получим вектор

$$D(j\omega) = a_n(j\omega^\alpha \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) + \omega^\alpha \cos\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) - s_1) \dots (j\omega^\alpha \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) + \omega^\alpha \cos\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) - s_n).$$

Утверждение. Аргумент вектора $D(j\omega)$ равен

$$\Delta \arg D(j\omega) = (n - 2m) \frac{\pi\alpha}{2}, \quad 0 \leq \omega \leq +\infty, \quad (3.3)$$

где m корней в правой полуплоскости и $n - m$ корней в левой полуплоскости.

Доказательство. Аргумент вектора $D(j\omega)$ равен сумме аргументов элементарных векторов его сомножителей

$$\arg \vec{D}(j\omega) = \sum_{i=1}^n \arg(j\omega^\alpha \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) + \omega^\alpha \cos\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) - p_i).$$

Определим угол поворота вектора $D(j\omega)$ при изменении частоты 0 до $+\infty$. Так как $\arg \vec{D}(j\omega)$ является суммой отдельных элементарных векторов, то рассмотрим угол поворота каждого сомножителя

$$(j\omega^\alpha \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) + \omega^\alpha \cos\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) - p_i). \quad (3.4)$$

При этом направление вращения вектора (3.4) при изменении частоты от 0 до $+\infty$ против часовой стрелки будем считать положительным, а по часовой стрелке – отрицательным. Предположим, что характеристическое уравнение имеет m корней в правой полуплоскости и $n - m$ корней в левой полуплоскости.

При этом рассмотрим два случая: первый, когда корни действительные; второй – корни комплексно-сопряженные.

В первом случае корень характеристического уравнения вещественный отрицательный $s_i = -\lambda_i$, $\lambda_i > 0$.

Тогда сомножитель имеет вид, $(j\omega^\alpha \sin(\frac{\pi\alpha}{2}) + \omega^\alpha \cos(\frac{\pi\alpha}{2}) + \lambda_i)$ и в соответствии с правилом вычитания векторов получим, что конец каждого элементарного вектора совпадает с концом вектора $j\omega^\alpha \sin(\frac{\pi\alpha}{2}) + \omega^\alpha \cos(\frac{\pi\alpha}{2})$ (рисунок 3.1).

В этом случае длина вектора $j\omega^\alpha \sin(\frac{\pi\alpha}{2}) + \omega^\alpha \cos(\frac{\pi\alpha}{2})$ при изменении частоты от 0 до $+\infty$ будет равна бесконечности, при этом вектор $\vec{AB}$ будет поворачиваться вокруг точки A и в конечном итоге совпадет с вектором $\vec{OB}$, угол поворота γ которого равен $\gamma = \arctan\left(\frac{\omega^\alpha \sin(\frac{\pi\alpha}{2})}{\omega^\alpha \cos(\frac{\pi\alpha}{2})}\right) = \frac{\pi\alpha}{2}$. В результате угол поворота элементарного вектора соответствует устойчивому корню $\gamma = +\pi\alpha/2$.

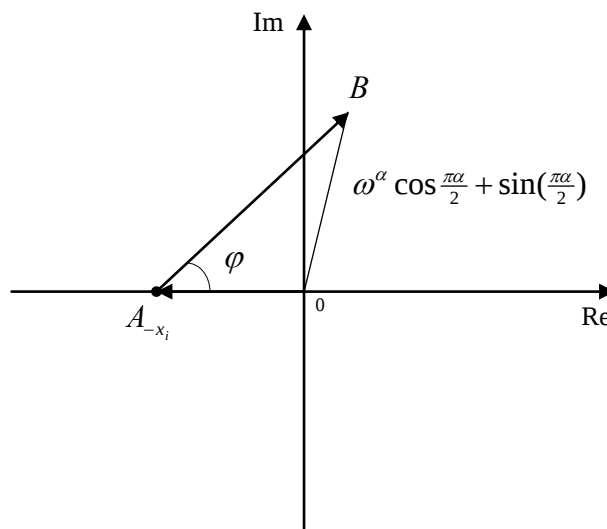


Рисунок 3.1 – График совпадения векторов

Если корень характеристического уравнения вещественный положительный $s_i = +\alpha_i$, то угол поворота элементарного вектора $(j\omega^\alpha \sin(\frac{\pi\alpha}{2}) + \omega^\alpha \cos(\frac{\pi\alpha}{2}) - \lambda_i)$ равен $-\pi\alpha/2$.

Во втором случае пара устойчивых комплексно-сопряженных корней $s_{i,i+1} = -\lambda_i \pm j\beta_i$ будет соответствовать произведение сомножителей $(j\omega^\alpha \sin(\frac{\pi\alpha}{2}) + \omega^\alpha \cos(\frac{\pi\alpha}{2}) + \lambda_i + j\beta_i)(j\omega^\alpha \sin(\frac{\pi\alpha}{2}) + \omega^\alpha \cos(\frac{\pi\alpha}{2}) + \lambda_i - j\beta_i)$, у которых начальные фазы одинаковы по модулю φ_0 (рисунок 3.2), но имеют противоположные знаки.

При изменении ω от 0 до ∞ один вектор поворачивается на угол, равный $\varphi_1 = \varphi_0 + \pi\alpha/2$, а второй – на угол $\varphi_2 = -\varphi_0 + \pi\alpha/2$. При этом суммарный угол поворота для пары устойчивых комплексно-сопряженных корней равен $+\pi\alpha$.

Если комплексно-сопряженные корни имеют положительную вещественную часть, то суммарный угол поворота равен $-\pi\alpha$.

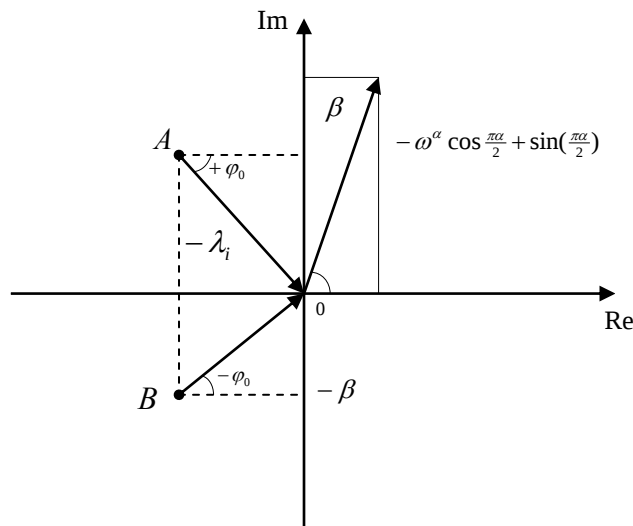


Рисунок 3.2 – График произведения сомножителей

Из всего сказанного можно сделать вывод, что при изменении частоты от 0 до $+\infty$ каждый элементарный вектор (3.4), начало которого лежит в левой полуплоскости повернется на угол $+\pi\alpha/2$, а каждый вектор, начало которого лежит в правой полуплоскости – на угол $-\pi\alpha/2$.

Изменение аргумента вектора $D(j\omega)$ при этом будет

$$\Delta \arg D(j\omega) = (n - m) \frac{\pi\alpha}{2} - m \frac{\pi\alpha}{2} = (n - 2m) \frac{\pi\alpha}{2}.$$

$0 \leq \omega \leq +\infty$

Утверждение доказано.

Выражение (3.3) определяет принцип аргумента для систем с дробным порядком, проверку которого можно выполнить подстановкой в уравнение (3.3) $\alpha=1$, и получим уравнение, определяющее принцип аргумента для систем с целым порядком [40]

$$\Delta \arg D(j\omega) = (n - 2m) \frac{\pi}{2} \quad 0 \leq \omega \leq +\infty$$

Тем самым видна связь между принципом аргумента для систем целого и дробного порядка.

3.1.2 Критерий устойчивости Михайлова применительно к системе автоматического управления дробного порядка

Частотный критерий устойчивости Михайлова позволяет определить устойчивость системы автоматического управления без нахождения корней характеристического уравнения. Простота и наглядность указанного критерия в применении способствовало его широкому распространению.

Как известно, критерий Михайлова базируется на принципе аргумента, при этом рассмотрим характеристический многочлен, полученный из характеристического полинома (3.1) подстановкой $p = j\omega$.

$$D(j\omega) = a_n (j\omega)^{n\alpha} + a_{n-1} (j\omega)^{(n-1)\alpha} + \dots + a_0 = 0,$$

Для формулировки критерия проанализируем лишь устойчивое состояние системы.

Утверждение.

Система автоматического управления устойчива, если при возрастании частоты от 0 до $+\infty$ годограф вектора $D(j\omega)$, начиная с положительной вещественной полуоси, обходит последовательно в положительном направлении $[n\alpha] + 1$ квадрантов и заканчивается в $[n\alpha] + 1$ -ом квадранте, где $[]$ -целая часть числа.

Доказательство.

Известно, что система с дробными показателями устойчива в том случае, когда все действительные части корней характеристического уравнения отрицательны и лежат в левой полуплоскости. Из этого следует, что если все корни характеристического уравнения лежат в левой полуплоскости, то исходя из принципа аргумента (3.3) при $m=0$ изменение вектора аргумента будет

$$\Delta \arg D(j\omega) = n \frac{\pi\alpha}{2} \quad (3.5)$$

$0 \leq \omega \leq +\infty$

Из выражения (3.5) следует, что система автоматического управления устойчива, если при возрастании частоты от 0 до $+\infty$ изменение аргумента вектора будет равна $n\pi/2$, где $n\alpha$ – порядок характеристического уравнения.

Приведенная формулировка не удобна в применении, так как не обладает наглядностью и постоянно требуется высчитывать угол поворота для определения устойчивого положения вектора аргумента $D(j\omega)$.

Тогда для удобства применения положение об устойчивости можно сформулировать следующим образом.

Система автоматического управления устойчива, если при возрастании частоты от 0 до $+\infty$ годограф вектора $D(j\omega)$, начиная с положительной вещественной полуоси, обходит последовательно в положительном направлении $[n\alpha] + 1$ квадрантов и заканчивается в $[n\alpha] + 1$ -ом квадранте, где $[]$ -целая часть числа.

Ввиду наглядности представленной формулировки облегчается применение критерия Михайлова.

Утверждение доказано.

Вид годографа Михайлова для устойчивых и неустойчивых систем порядка $[n\alpha] + 1 = 3$ приведен на рисунке 3.3.

Если хотя бы один квадрант пропущен, то система неустойчива. Также система может находиться на грани устойчивости, если все действительные части

корней характеристического уравнения равны нулю, при этом годограф вектора $D(j\omega)$ будет проходить через начало координат.

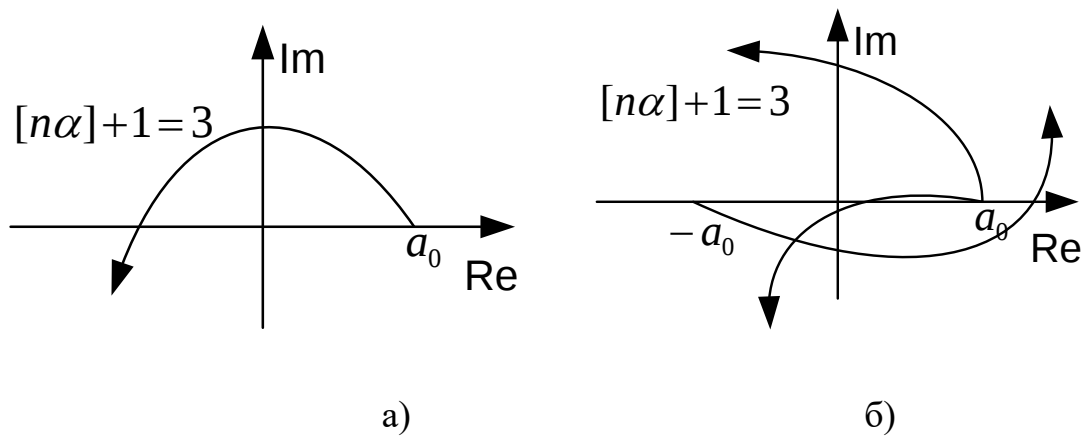


Рисунок 3.3 – Годограф Михайлова устойчивой (а) и неустойчивой (б) систем

Пример: оценить устойчивость системы по критерию Михайлова, передаточная функция которой имеет вид

$$W(p) = \frac{1}{p^{2\alpha} + 5p^\alpha + 4}.$$

Запишем характеристический полином

$$D(p) = p^{2\alpha} + 5p^\alpha + 4$$

и заменой p на $j\omega$ перейдем к выражению для годографа Михайлова

$$D(j\omega) = (j\omega)^{2\alpha} + 5(j\omega)^\alpha + 4.$$

Выразим вещественную и мнимую части

$$\operatorname{Re}(\omega) = \omega^{2\alpha} \cos \pi\alpha - 5\omega^\alpha \sin \frac{\pi\alpha}{2} + 4,$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = \omega^{2\alpha} \sin \pi\alpha + 5\omega^\alpha \cos \frac{\pi\alpha}{2}.$$

С целью построения годографа Михайлова вычислим значения вещественной и мнимой части при конкретных значениях частоты (рисунок 3.4).

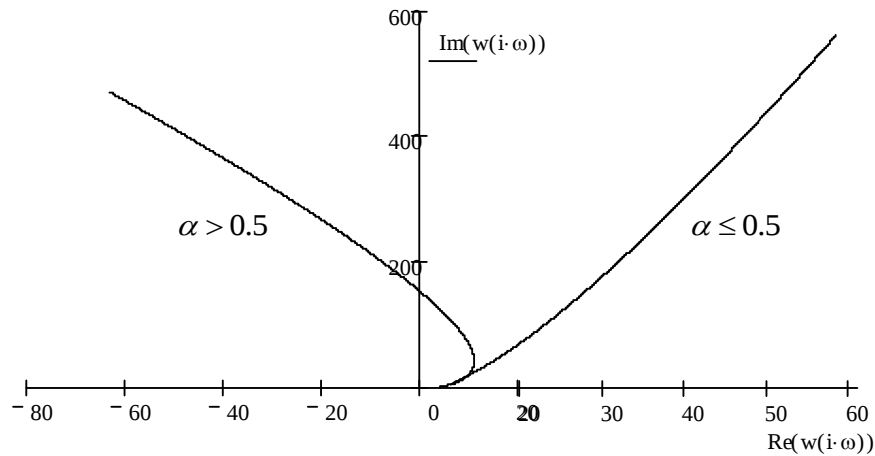


Рисунок 3.4 – Устойчивые годографы Михайлова при разных значениях α

Как видим, он проходит последовательно два квадранта при $\alpha > 0.5$, не обращаясь в ноль и стремясь к бесконечности во втором квадранте, а при $\alpha \leq 0.5$ уходит в бесконечность в первом. Следовательно, исследуемая система устойчива.

3.1.3 Критерий устойчивости Найквиста применительно к системы автоматического управления дробного порядка

Как известно, критерий Найквиста позволяет определить устойчивость замкнутой системы по экспериментально снятой или полученной аналитически передаточной функции амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы [100].

Докажем состоятельность критерия Найквиста для САУ дробного порядка.

Пусть передаточная функция разомкнутой системы

$$W_0(p^\alpha) = \frac{B_0(p)}{A_0(p)} = \frac{b_m p^{m\alpha} + \dots + b_1 p^\alpha + b_0}{a_n p^{n\alpha} + \dots + a_1 p^\alpha + a_0}.$$

Здесь $A_0(p) = a_n p^{n\alpha} + \dots + a_1 p^\alpha + a_0$ – ее характеристический полином.

Структурная схема замкнутой системы имеет вид (рисунок 3.5):

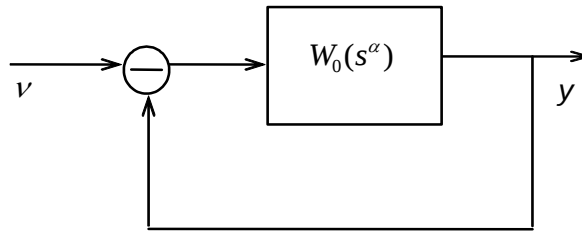


Рисунок 3.5 – Структурная схема замкнутой системы

Тогда передаточная функция замкнутой системы следующая:

$$W(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W_0(p)} = \frac{B_0(p)}{A_0(p) + B_0(p)}, \quad (3.6)$$

где $A(p) = A_0(p) + B_0(p)$ – характеристический полином замкнутой системы.

Для получения критерия устойчивости введем вспомогательную функцию:

$$\tilde{W}(p) = 1 + W_0(p) = \frac{A_0(p) + B_0(p)}{A_0(p)} = \frac{A(p)}{A_0(p)}. \quad (3.7)$$

Как видим, числитель вспомогательной передаточной функции представляет собой характеристический полином замкнутой системы, а знаменатель – характеристический полином разомкнутой системы. Так как размерность $\dim B_0(p) \leq \dim A_0(p)$, исходя из условия существования передаточной функции, то в выражении для характеристического полинома замкнутой системы $A(p)$ порядок суммы равен $\dim A_0(p) = n\alpha$. Следовательно, во вспомогательной передаточной функции $\tilde{W}(p)$ полиномы числителя и знаменателя имеют одинаковый порядок ($n\alpha$).

В выражении (3.7) заменим p на $j\omega$ и получим АФХ вспомогательной функции:

$$\tilde{W}(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{A_0(j\omega)}. \quad (3.8)$$

Рассмотрим результирующий угол поворота вектора $\tilde{W}(j\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ , исходя из принципа аргумента (3.3).

Исходя из того, что замкнутая система устойчива, общее приращение фазы числителя будет равно

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi\alpha}{2}n, \quad (3.9)$$

а при устойчивой разомкнутой системе фаза знаменателя

$$\varphi_0(\omega) = \frac{\pi\alpha}{2}n. \quad (3.10)$$

Результирующий угол поворота вектора $\tilde{W}(j\omega)$ равен разности фаз (3.9) и (3.10)

$$\tilde{\varphi}(\omega) = \varphi(\omega) - \varphi_0(\omega) = 0, \quad (3.11)$$

откуда следует, что для устойчивости замкнутой системы при устойчивой разомкнутой должно выполняться соотношение (3.11). Свойство (3.11) имеет следующую геометрическую интерпретацию: вспомогательная частотная характеристика не должна охватывать начало координат. Ввиду того, что $\tilde{W}(j\omega)$ отличается от $W_0(j\omega)$ на единицу, можно строить амплитудно-фазовую характеристику разомкнутой системы, не прибегая к построению вспомогательной АФХ, что значительно проще.

Из этого следует, что критерий Найквиста для систем с дробным порядком по своей формулировке ничем не отличается от систем с целым порядком и будет звучать следующим образом: для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая характеристика устойчивой разомкнутой системы при изменении ω от 0 до ∞ не охватывала точку с координатами $\{-1, j0\}$.

Приведем пример определения устойчивости по критерию Найквиста.

Пример. Оценить устойчивость системы по критерию Найквиста, передаточная функция которой имеет вид

$$W_0(p) = \frac{1}{p^{2\alpha} + 5p^\alpha + 3}.$$

Заменой p на $j\omega$ получим АФХ разомкнутой системы, из которой выразим вещественную и мнимую части

$$\operatorname{Re}(\omega) = \frac{A(\omega)}{A(\omega)^2 + B(\omega)^2},$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = -\frac{B(\omega)}{A(\omega)^2 + B(\omega)^2},$$

где $A(\omega) = \omega^{2\alpha} \cos \pi\alpha - 5\omega^\alpha \sin \frac{\pi\alpha}{2} + 4$,

$$B(\omega) = \omega^{2\alpha} \sin \pi\alpha + 5\omega^\alpha \cos \frac{\pi\alpha}{2}.$$

Построим годографы Найквиста при разных значениях α (рисунок 3.6).

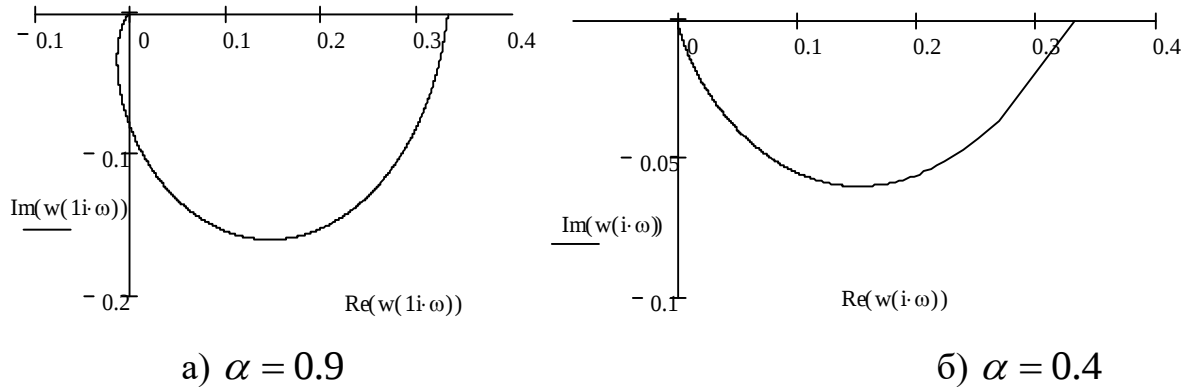


Рисунок 3.6 – Годограф Найквиста устойчивой системы при разных значениях α

Как видно из рисунок 3.6 (а,б) годографы Найквиста при разных значениях α не охватывают точку с координатами $(-1, j0)$. Что говорит об устойчивости исследуемой системы.

3.2 Анализ динамических характеристик дробных пропорционально интегрального дифференциального законов управления

Для анализа динамических характеристик дробных ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ законов управления проведем анализ переходных процессов дробных законов управления И $_{\alpha}$, ПИ $_{\alpha}$, ПД $_{\beta}$, ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ и проведем анализ частотных характеристик дробных законов управления И $_{\alpha}$, ПИ $_{\alpha}$, ПД $_{\beta}$, ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$.

Анализ переходных процессов дробных ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ законов управления.
Исследование переходных процессов является составной частью работ по проектированию автоматических систем управления. Исследуем ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ закон

управления и законы управления I_α , PI_α , PD_β , полученные путем комбинации пропорционального, дробного интегрального и дифференциального звеньев (2.3). Пропорциональный (П) закон регулирования рассматривать не будем ввиду его разносторонней изученности [44]. При $\alpha=1$ и $\beta=1$ все приведенные законы регулирования принимают вид классических ПИД законов управления (1.1) [44, 76].

Анализ частотных характеристик дробных $PI_\alpha D_\beta$ законов управления.

Для исследования частотных свойств $PI_\alpha D_\beta$ законов управления определим преобразование Фурье

$$F(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

для дробного дифференциала и интеграла.

Преобразование Фурье для дробного интеграла, согласно монографии [52] представлено следующим образом

$$F(I_{0t}^\alpha \varphi(t)) = \frac{\varphi(\omega)}{(j\omega)^\alpha}, \quad (3.12)$$

где $\operatorname{Re} \alpha \geq 0$.

Для дробного дифференциала

$$F(D_{0t}^\alpha \varphi(t)) = \varphi(\omega) (j\omega)^\alpha, \quad (3.13)$$

где $\operatorname{Re} \alpha \geq 0$.

В выражениях (3.12) и (3.13) функция $(j\omega)^\alpha$ при α вещественном понимается как $(j\omega)^\alpha = |\omega|^\alpha e^{\frac{\alpha\pi}{2} \operatorname{sign} \omega}$ [134]. При $\omega \geq 0$ ее можно представить следующим образом

$$(i\omega)^\alpha = \omega^\alpha e^{\frac{\alpha\pi}{2}} = \omega^\alpha \left(\cos \frac{\alpha\pi}{2} + j \sin \frac{\alpha\pi}{2} \right). \quad (3.14)$$

Сравнивая выражения (2.20) и (3.12), а также (2.24) и (3.13) с нулевыми начальными условиями можно заметить, что переход от преобразования Лапласа к Фурье возможен с помощью замены оператора p на $j\omega$.

Вследствие этого для исследования $PI_\alpha D_\beta$ законов управления в частотной области возьмем имеющиеся в разделе 3.2 передаточные функции исследуемых

законов регулирования и приведем к частотному виду заменой $p=j\omega$ с учетом свойства (3.14).

3.2.1 Анализ динамических характеристик дробного интегрального закона управления

Анализ переходных процессов дробных I_α законов управления.

Математическое описание I_α закона управления имеет вид:

$$u(t) = \frac{1}{T_u \Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{e(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau. \quad (3.15)$$

Применим к управлению (3.15) прямое преобразование Лапласа, тогда управляющее воздействие I_α закона управления в операторной форме будет следующим

$$u(p) = \frac{1}{T_u p^\alpha} e(p).$$

Передаточная функция

$$W(p) = \frac{u(p)}{e(p)} = \frac{1}{T_u p^\alpha}. \quad (3.16)$$

Переходную функцию найдем, применив к выражению (3.16) обратное преобразование Лапласа от произведения передаточной функции I_α закона управления и изображения единичной ступенчатой функции

$$h(t) = L^{-1} \left[w(p) \frac{1}{p} \right] = L^{-1} \left[\frac{1}{T_u p^{\alpha+1}} \right] = \frac{1}{T_u} L^{-1} \left[\frac{1}{p^{\alpha+1}} \right],$$

откуда обратное преобразование Лапласа будет

$$L^{-1} \left[\frac{1}{p^{\alpha+1}} \right] = \frac{t^\alpha}{\Gamma(\alpha+1)},$$

тогда, переходная характеристика I_α закона управления примет вид

$$h(t) = \frac{t^\alpha}{T_u \Gamma(\alpha+1)}, \quad t \geq 0.$$

Для исследования влияния степени α на переходной процесс построим временные зависимости для I_α закона управления.

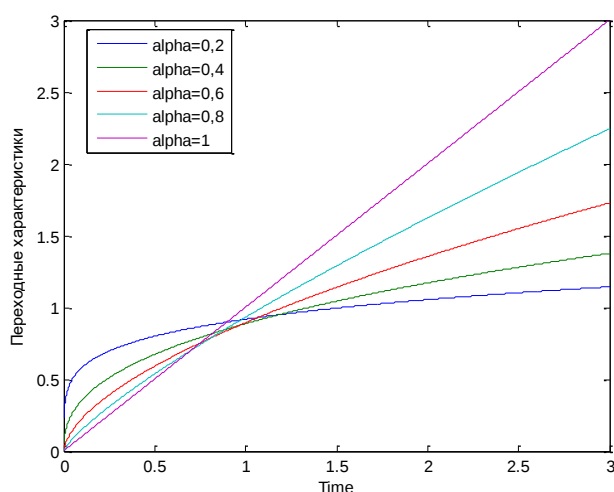


Рисунок 3.7 – Переходные характеристики I_α – закона регулирования при $T_u = 1$

Как видно из представленных переходных характеристик I_α закона управления (рисунок 3.7), управляющее воздействие $u(t)$ в зависимости от $0 < \alpha < 1$ в начале переходного процесса имеет более крутую характеристику, чем у простого интегрального закона регулирования (который приведен при $\alpha=1$) и имеет нелинейный характер.

Из этого следует, что начальная реакция сигнала управления $u(t)$ на рассогласование $e(t) \neq 0$ I_α закона управления будет быстрее на начальном участке управления, чем у классического интегрального закона управления, что увеличивает скорость регулирования на начальном этапе управления. В дальнейшем скорость сигнала управления замедляется нелинейно в зависимости от α , что приводит к гораздо более позднему наступлению интегрального насыщения. При хорошем подборе значений постоянной интегрирования T_u и степени интегрирования α , интегральное насыщение может вообще стать незначительным.

Анализ частотных характеристик дробного I_α закона управления.

Определим АФХ I_α закона управления заменой в выражении (3.16) $p=j\omega$ с учетом (3.14) и получим

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{1}{T_u(j\omega)^\alpha} = \frac{1}{T_u \omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + j T_u \omega^\alpha \sin \frac{\alpha\pi}{2}} = \\ &= \frac{T_u \omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} - j T_u \omega^\alpha \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{T_u^2 \omega^{2\alpha} \cos^2 \frac{\alpha\pi}{2} + T_u^2 \omega^\alpha \sin^2 \frac{\alpha\pi}{2}} = \\ &= \frac{T_u \omega^\alpha \left(\cos \frac{\alpha\pi}{2} - j \sin \frac{\alpha\pi}{2} \right)}{T_u^2 \omega^{2\alpha} \left(\cos^2 \frac{\alpha\pi}{2} + \sin^2 \frac{\alpha\pi}{2} \right)} = \frac{\cos \frac{\alpha\pi}{2} - j \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{T_u \omega^\alpha} = \frac{\cos \frac{\alpha\pi}{2}}{T_u \omega^\alpha} - j \frac{\sin \frac{\alpha\pi}{2}}{T_u \omega^\alpha} \end{aligned}$$

Откуда вещественная и мнимая частотные характеристики равны:

$$\operatorname{Re}(\omega) = \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2}; \quad \operatorname{Im}(\omega) = -\frac{1}{T_u \omega^\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2}.$$

АЧХ I_α закона регулирования будет

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \sqrt{\left(\frac{1}{T_u \omega^\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2} \right)^2 + \left(-\frac{1}{T_u \omega^\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} \right)^2} = \\ &= \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \sqrt{\cos^2 \frac{\alpha\pi}{2} + \sin^2 \frac{\alpha\pi}{2}} = \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \end{aligned}$$

Тогда ЛАЧХ I_α закона управления примет вид

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg \frac{1}{T_u \omega^\alpha} = 20 \lg 1 - 20 \lg T_u \omega^\alpha = -20\alpha \lg \omega. \quad (3.17)$$

Из выражения (3.17) можно сделать вывод, что наклон ЛАЧХ I_α закона управления составляет $-20\alpha \text{ дец/дек}$.

ФЧХ I_α закона управления представляет собой выражение

$$\begin{aligned}\varphi(\omega) &= \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)} = \operatorname{arctg} \frac{-\frac{1}{T_u \omega^\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2}}{\frac{1}{T_u \omega^\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2}} = \\ &= -\operatorname{arctg} \frac{\sin \frac{\alpha\pi}{2}}{\cos \frac{\alpha\pi}{2}} = -\operatorname{arctg} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha\pi}{2} = -\frac{\alpha\pi}{2}\end{aligned}$$

из чего следует, что при прохождении сигнала через данный регулятор происходит сдвиг фазы на $-\frac{\alpha\pi}{2}$.

На основании вышеизложенного можно заключить, что I_α закон управления является низкочастотным фильтром, зависимым от показателя α , причем частота сигнала не влияет на изменение фазы.

3.2.2 Анализ динамических характеристик дробного пропорционально интегрального закона управления

Анализ переходных процессов дробных ПИ $_\alpha$ законов управления.

Математическое описание ПИ $_\alpha$ закона управления имеет вид

$$u(t) = k_\pi e(t) + \frac{1}{T_u \Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{e(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau. \quad (3.18)$$

Определим передаточную функцию, для этого возьмем от левой и правой части выражения (3.18) прямое преобразование Лапласа

$$\begin{aligned}L[u(t)] &= u(p) = L\left[K_\pi e(t) + \frac{1}{T_u \Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{e(x)}{(t-x)^{1-\alpha}} dx \right] = \\ &= K_\pi L[e(t)] + \frac{1}{T_u} L\left[\frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{e(x)}{(t-x)^{1-\alpha}} dx \right],\end{aligned}$$

и с учетом (3.16) получим операторное уравнение $u(p) = K_\pi e(p) + \frac{1}{T_u p^\alpha} e(p)$.

Тогда передаточная функция ПИ $_\alpha$ закона управления примет вид

$$W(p) = \frac{u(p)}{e(p)} = k_{\pi} + \frac{1}{T_u p^{\alpha}}. \quad (3.19)$$

Определим переходную характеристику, для этого возьмем обратное преобразование Лапласа с учетом свойства линейности от выражения (3.19)

$$h(t) = L^{-1} \left[w(p) \frac{1}{p} \right] = L^{-1} \left[\frac{K_{\pi}}{p} + \frac{1}{T_u p^{\alpha+1}} \right] = K_{\pi} L^{-1} \left[\frac{1}{p} \right] + \frac{1}{T_u} \left[\frac{1}{p^{\alpha+1}} \right],$$

получим уравнение переходной характеристики ПИ_α закона управления

$$h(t) = k_{\pi} + \frac{t^{\alpha}}{T_u \Gamma(\alpha + 1)}. \quad (3.20)$$

Построим переходную характеристику (рисунок 3.8) для разных значений α.

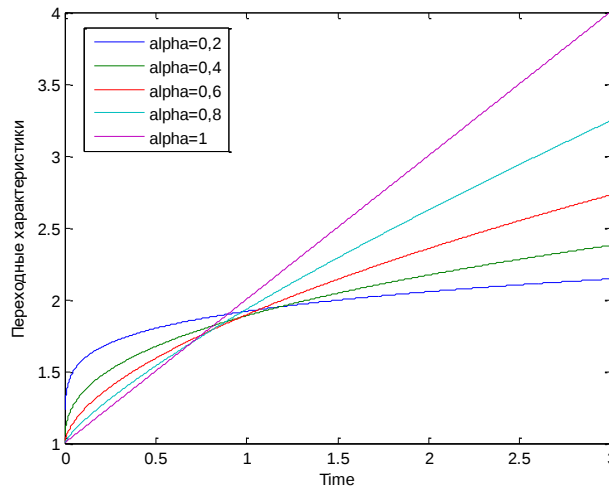


Рисунок 3.8 – Переходные характеристики ПИ_α закона управления

Свойство переходных характеристик ПИ_α закона управления (рисунок 3.8) аналогично И_α закону управления, за исключением постоянной составляющей в виде коэффициента пропорциональности K_{π} .

Анализ частотных характеристик дробного ПИ_α закона управления.

Определим АФХ ПИ_α закон управления, для этого заменим $p = j\omega$ в выражении (3.19) и с учетом (3.14) получим

$$\begin{aligned}
 W(j\omega) &= K_{\Pi} + \frac{1}{T_u(j\omega)^\alpha} = K_{\Pi} + \frac{1}{T_u \left(\omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + j\omega^\alpha \sin \frac{\alpha\pi}{2} \right)} = \\
 &= K_{\Pi} + \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2} - j \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2}
 \end{aligned}$$

В этом случае вещественная и мнимая частотные характеристики будут

$$\operatorname{Re}(\omega) = K_{\Pi} + \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2},$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = -\frac{1}{T_u \omega^\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2}.$$

Тогда АЧХ ПИ_α закона управления

$$\begin{aligned}
 A(\omega) &= \sqrt{\operatorname{Re}^2 + \operatorname{Im}^2} = \sqrt{\left(K_{\Pi} + \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2} \right)^2 + \left(-\frac{1}{T_u \omega^\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} \right)^2} = \\
 &= \frac{\sqrt{(K_{\Pi} T_u \omega^\alpha)^2 + 2K_{\Pi} T_u \omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1}}{T_u \omega^\alpha}
 \end{aligned}$$

ЛАЧХ ПИ_α закона управления примет следующий вид

$$\begin{aligned}
 L(\omega) &= 20 \lg \left(\frac{\sqrt{(K_{\Pi} T_u \omega^\alpha)^2 + 2K_{\Pi} T_u \omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1}}{T_u \omega^\alpha} \right) = \\
 &= 20 \lg \left(\sqrt{(K_{\Pi} T_u \omega^\alpha)^2 + 2K_{\Pi} T_u \omega^\alpha \cos \frac{\alpha\pi}{2} + 1} \right) - 20 \lg T_u \omega^\alpha
 \end{aligned}$$

А ФЧХ

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \frac{\alpha\pi}{2}}{K_{\Pi} T_u \omega^\alpha + \cos \frac{\alpha\pi}{2}} \right).$$

Построим логарифмические характеристики ПИ_α закона управления при разных значениях α (рисунок 3.9).

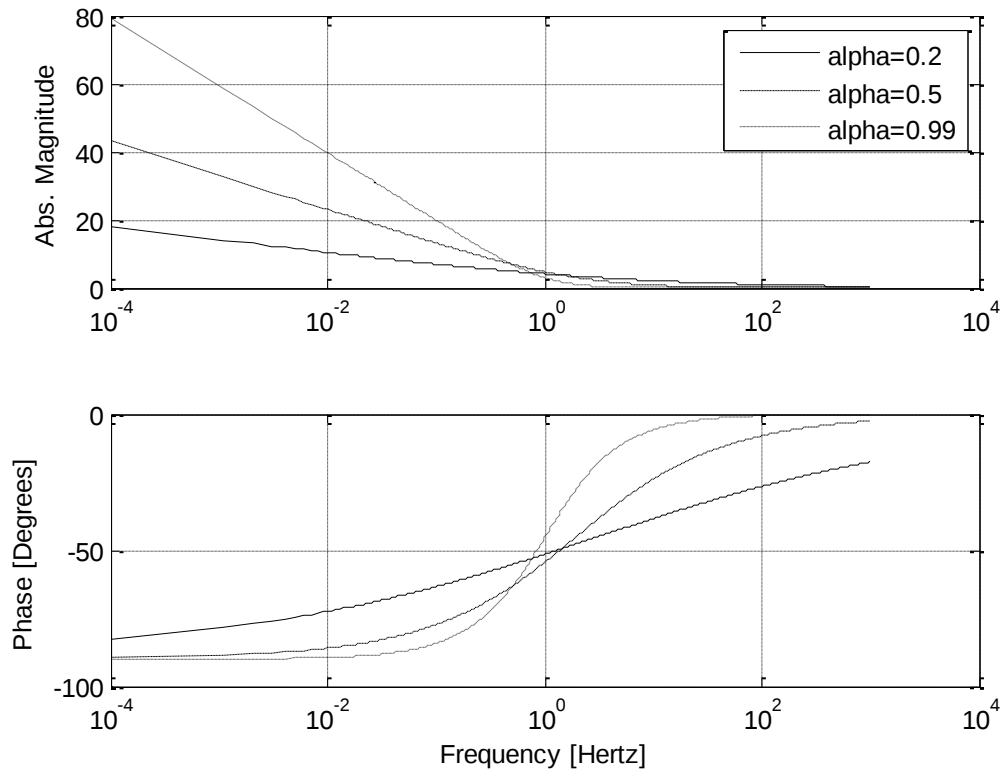


Рисунок 3.9 – ЛАЧХ и ЛФЧХ ПИ $_{\alpha}$ закона управления при $\alpha = 0.2, 0.5, 0.99$

Из построенных логарифмических характеристик видно, что при прохождении сигнала через ПИ $_{\alpha}$ закон управления фаза изменяется от $-\frac{\alpha\pi}{2}$ до 0, при $\omega \rightarrow \infty$.

3.2.3 Анализ динамических характеристик дробного пропорционально дифференциального закона управления

Анализ переходных процессов дробных ПД $_{\beta}$ законов управления.

Математическое описание ПД $_{\beta}$ закона управления имеет следующий вид

$$u(t) = k_{\pi} e(t) + \frac{T_n}{\Gamma(1-\beta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{e(\tau)}{(t-\tau)^{\beta-1}} d\tau, \quad (3.21)$$

где $0 < \beta < 1$.

Для определения передаточной функции применим преобразование Лапласа с нулевыми начальными условиями к левой и правой части равенства (3.21)

$$u(p) = L[u(t)] = L \left[K_{\pi} e(t) \frac{T_d}{\Gamma(1-\beta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{e(x)}{(t-x)^{\beta-1}} dx \right] = \\ K_{\pi} L[e(t)] + T_d L \left[\frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{e(x)}{(t-x)^{\beta-1}} dx \right],$$

где преобразование Лапласа от второго слагаемого выполнено согласно [129]

$$L \left[\frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{e(x)}{(t-x)^{\beta-1}} dx \right] = T_d p^{\beta} e(p).$$

Отсюда уравнение для ПД_β закона управления в операторной форме примет вид $u(p) = K_p e(p) + T_d p^{\beta} e(p)$.

В результате, передаточная функция ПД_β закона управления будет следующей

$$W(p) = k_{\pi} + T_d p^{\beta}. \quad (3.22)$$

Определим переходную характеристику

$$h(t) = L^{-1} \left[w(p) \frac{1}{p} \right] = L^{-1} \left[\frac{k_{\pi}}{p} + \frac{T_d}{p^{1-\beta}} \right] = k_{\pi} L^{-1} \left[\frac{1}{p} \right] + T_d L^{-1} \left[\frac{1}{p^{1-\beta}} \right],$$

и с учетом обратного преобразования Лапласа [38] первого и второго слагаемого получим

$$h(t) = k_p + \frac{T_d}{t^{\beta} \Gamma(1-\beta)}. \quad (3.23)$$

Построим переходную характеристику ПД_β закона управления (рисунок 3.10).

Как видно из рисунка 3.10 переходные характеристики ПД_β закона управления в зависимости от β изменяют свою скорость затухания и чем меньше β тем дольше продолжается воздействие дифференцирующего звена.

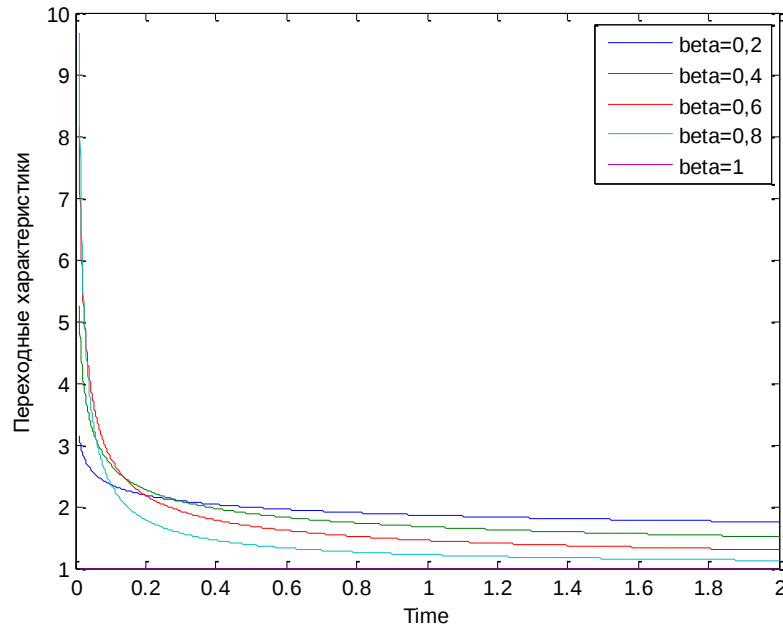


Рисунок 3.10 – Переходные характеристики ПД_β закона управления, при $T_d = 1, K_{\pi} = 1$

Анализ частотных характеристик дробного ПД_β закона управления.

Определим АФХ ПД_β закона управления, для этого заменим $p = j\omega$ в выражении (3.22) и с учетом (3.14) получим

$$W(i\omega) = k_{\pi} + T_d \omega^{\beta} \cos\left(\frac{\pi\beta}{2}\right) + jT_d \omega^{\beta} \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right),$$

откуда вещественная и мнимая характеристики имеют следующий вид

$$\operatorname{Re}(\omega) = k_{\pi} + T_d \omega^{\beta} \cos\left(\frac{\pi\beta}{2}\right),$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = T_d \omega^{\beta} \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right).$$

Найдем АЧХ ПД_β закона управления

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \sqrt{\left(k_{\pi} + T_d \omega^{\beta} \cos\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)\right)^2 + \left(T_d \omega^{\beta} \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)\right)^2} = \\ &= \sqrt{K_{\pi} + 2K_{\pi}T_d \omega^{\beta} \cos\frac{\pi\beta}{2} + (T_d \omega^{\beta})^2} \end{aligned}$$

Тогда, ЛАЧХ ПД_β закона управления примет следующий вид

$$L(\omega) = 20 \lg \left(\sqrt{K_{\pi} + 2K_{\pi}T_{\mathcal{D}}\omega^{\beta} \cos \frac{\pi\beta}{2} + (T_{\mathcal{D}}\omega^{\beta})^2} \right).$$

ФЧХ будет иметь вид

$$\varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{T_{\mathcal{D}}\omega^{\beta} \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{k_{\pi} + T_{\mathcal{D}}\omega^{\beta} \cos(\frac{\pi\beta}{2})} \right).$$

Построим ЛАЧХ и ЛФЧХ ПД_β закона управления (рисунок 3.11).

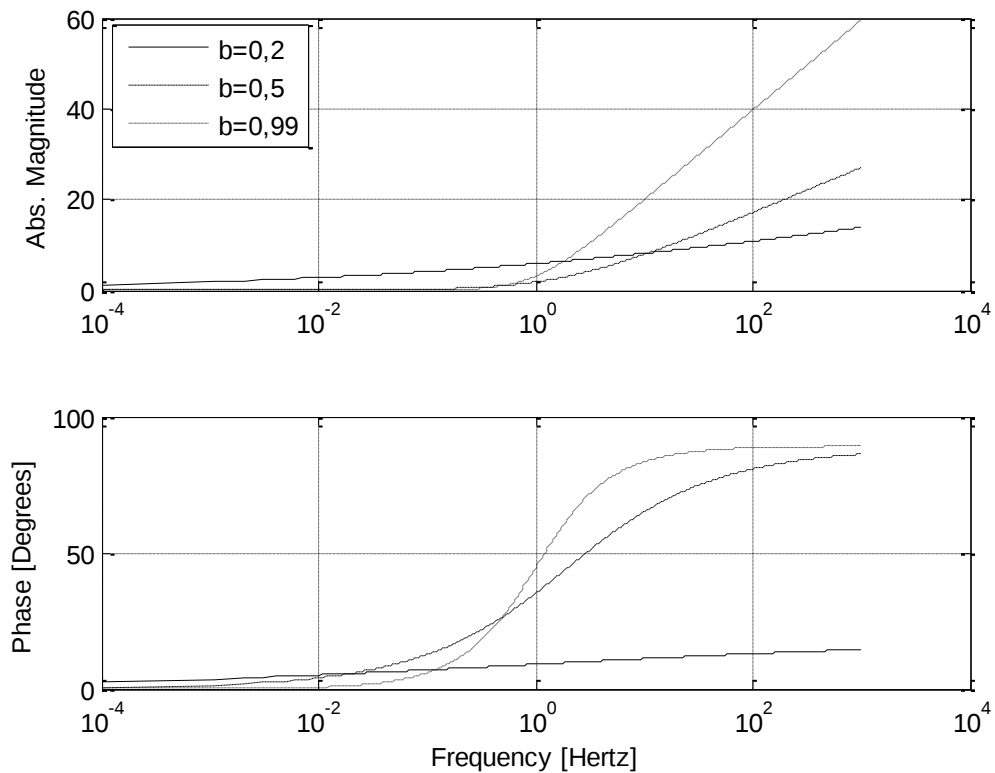


Рисунок 3.11 – ЛАЧХ и ЛФЧХ ПД_β закона регулирования при $\beta = 0.2, 0.5, 0.99$

Из рисунка 3.11 видно, что результирующий наклон ЛАЧХ равен $20\alpha \text{ дБ/дек}$, а ФЧХ при изменении частоты от 0 до ∞ изменяется от 0 до $\pi\alpha/2$. Наклон ЛАЧХ и сдвиг ФЧХ полностью зависит от показателя β в отличие от классического ПД закона управления.

3.2.4 Анализ динамических характеристик дробного пропорционально интегрального дифференциального закона управления

Анализ переходных процессов дробных ПИ_αД_β законов управления.

Математическое описание ПИ_αД_β закона управления представлено в виде

$$u(t) = K_{\pi} e(t) + \frac{1}{T_{\text{и}}^{\alpha}} I_{0t}^{\alpha}(e(t)) + T_{\text{д}}^{\beta} D_{0t}^{\beta}(e(t)). \quad (3.24)$$

Передаточную функцию ПИ_αД_β закона управления найдем по аналогии с ПД_β и ПИ_α законами управления

$$W(p) = k_{\pi} + \frac{1}{T_{\text{и}} p^{\alpha}} + T_{\text{д}} p^{\beta}. \quad (3.25)$$

Тогда переходная функция будет равна

$$h(t) = k_{\pi} + \frac{t^{\alpha}}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha + 1)} + \frac{T_{\text{д}}}{t^{\beta} \Gamma(1 - \beta)}, \quad t \geq 0. \quad (3.26)$$

Для анализа влияния показателей α и β на переходный процесс, построим переходные характеристики ПИ_αД_β закона управления, при постоянном $\alpha = 0.99$ (рисунок 3.12) и постоянном $\beta = 0.99$ (рисунок 3.13).

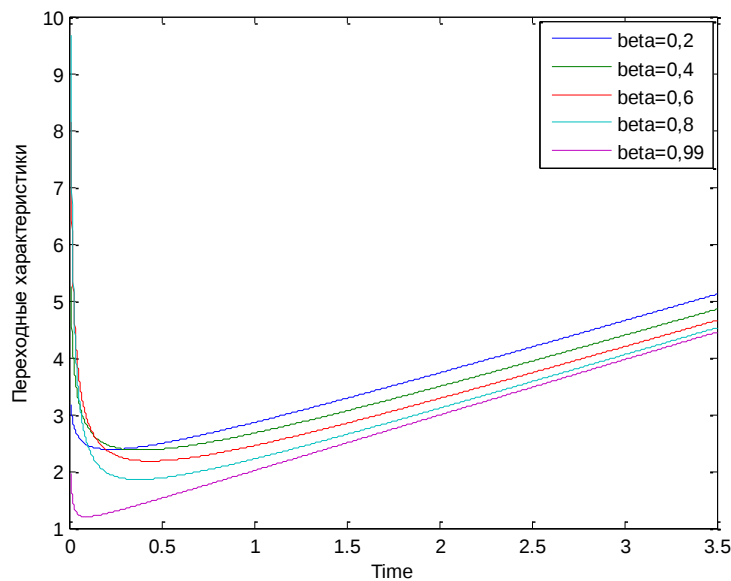


Рисунок 3.12 – Переходные характеристики ПИ_αД_β закона управления при $\beta = 0.99$

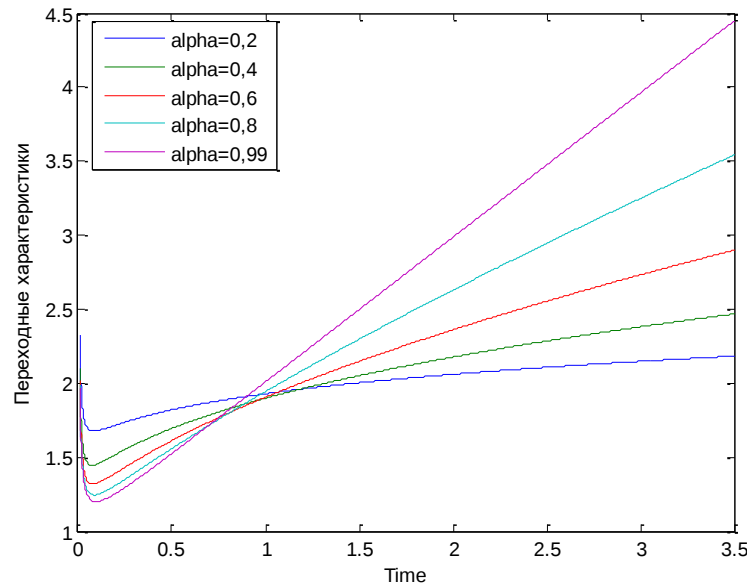


Рисунок 3.13 – Переходные характеристики $PI_{\alpha}D_{\beta}$ закона управления при $\alpha = 0.99$

Из переходных характеристик (рисунок 3.12, 3.13) видно, что в $PI_{\alpha}D_{\beta}$ законе управления проявляются смешанные свойства PI_{α} и PD_{β} законов управления в зависимости от значений показателей α и β .

Анализ частотных характеристик дробного $PI_{\alpha}D_{\beta}$ закона управления.

Определим АФХ $PI_{\alpha}D_{\beta}$ закона управления, для этого заменим $p = j\omega$ в выражении (3.25) и с учетом (3.14) получим

$$W(i\omega) = k_{\pi} + \frac{1}{T_u \omega^{\alpha}} \cos \frac{\pi\alpha}{2} + T_d \omega^{\beta} \cos \frac{\pi\beta}{2} + j \left(T_d \omega^{\beta} \sin \frac{\pi\beta}{2} - \frac{1}{T_u \omega^{\alpha}} \sin \frac{\pi\alpha}{2} \right),$$

откуда вещественная и мнимая характеристики примут следующий вид

$$\operatorname{Re}(\omega) = k_{\pi} + \frac{1}{T_u \omega^{\alpha}} \cos \frac{\pi\alpha}{2} + T_d \omega^{\beta} \cos \frac{\pi\beta}{2},$$

$$\operatorname{Im}(\omega) = T_d \omega^{\beta} \sin \frac{\pi\beta}{2} - \frac{1}{T_u \omega^{\alpha}} \sin \frac{\pi\alpha}{2}.$$

Найдем АЧХ $PI_{\alpha}D_{\beta}$ закона управления

$$A(\omega) = \sqrt{\left(k_{\pi} + \frac{1}{T_u \omega^{\alpha}} \cos \frac{\pi\alpha}{2} + T_d \omega^{\beta} \cos \frac{\pi\beta}{2} \right)^2 + \left(T_d \omega^{\beta} \sin \frac{\pi\beta}{2} - \frac{1}{T_u \omega^{\alpha}} \sin \frac{\pi\alpha}{2} \right)^2}$$

Тогда ЛАЧХ $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ закона управления

$$L(\omega) = 20 \lg \sqrt{\left(k_{\pi} + \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \cos \frac{\pi\alpha}{2} + T_d \omega^\beta \cos \frac{\pi\beta}{2} \right)^2 + \left(T_d \omega^\beta \sin \frac{\pi\beta}{2} - \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \sin \frac{\pi\alpha}{2} \right)^2}.$$

ФЧХ примет вид

$$\varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{T_d \omega^\beta \sin \frac{\pi\beta}{2} - \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \sin \frac{\pi\alpha}{2}}{k_{\pi} + \frac{1}{T_u \omega^\alpha} \cos \frac{\pi\alpha}{2} + T_d \omega^\beta \cos \frac{\pi\beta}{2}} \right).$$

Точные ЛАЧХ и ЛФЧХ приведены на рисунке 3.14 и рисунке 3.15 при разных показателях α и β соответственно.

Из на рисунка 3.14 и рисунка 3.15 видно, что в $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ законе управления можно управлять пропускной способностью звеньев и фазовыми сдвигами показателей α и β .

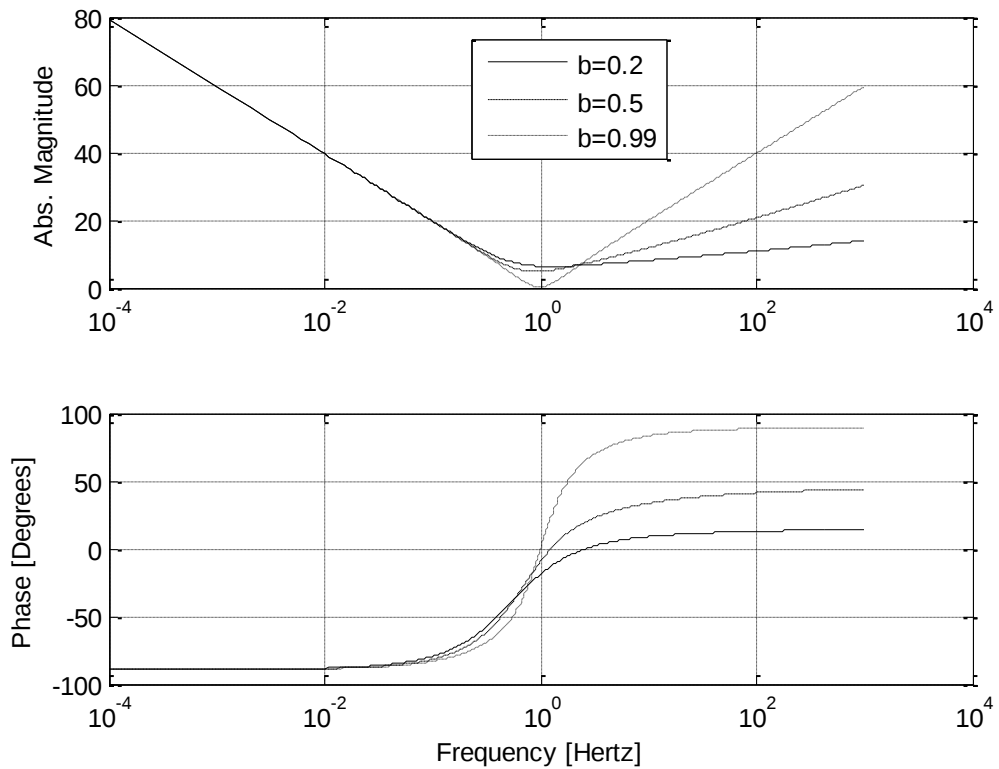


Рисунок 3.14 – ЛАЧХ и ЛФЧХ $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ закона регулирования при $\alpha = 0.99$

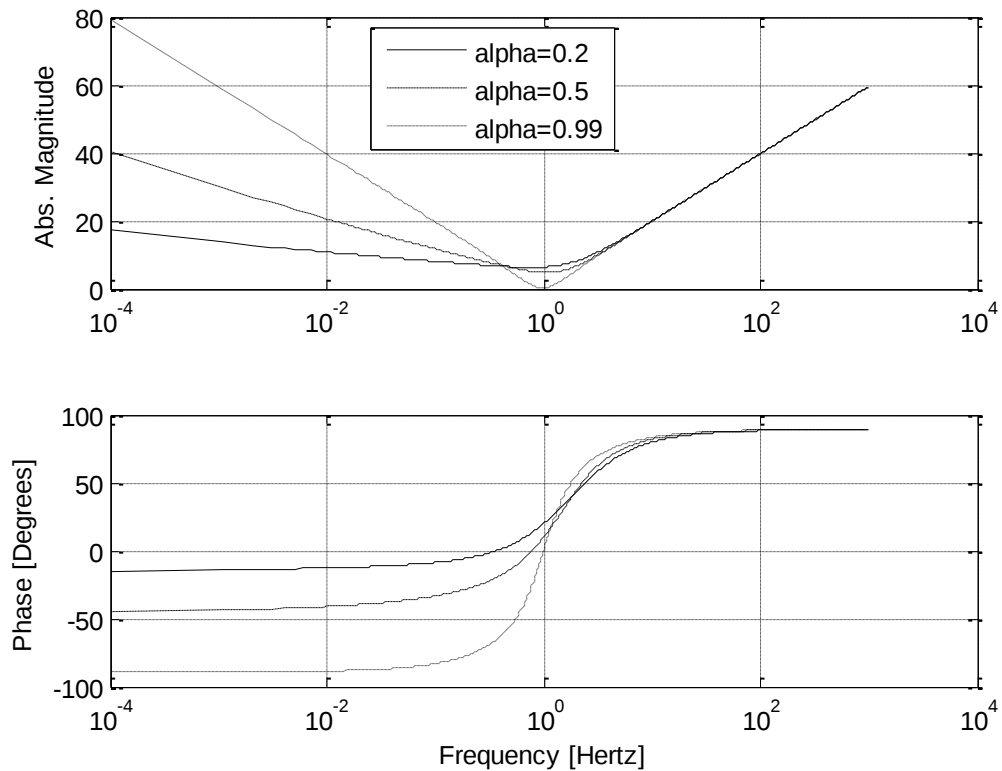


Рисунок 3.15 – ЛАЧХ и ЛФЧХ $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ закона регулирования при $\beta = 0.99$

Как видно из приведенных выше уравнений у $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ законов управления в отличие от классических ПИД законов управления, появилась зависимость в частотных характеристиках реальной части от частоты ω , постоянной интегрирования и дифференцирования. А также добавились в виде коэффициентов функции синус и косинус, зависящие от α, β .

Из графиков АЧХ видно, что с увеличением частоты падение амплитуды для И_α и ПИ_α при $\alpha < 1$ происходит быстрее, чем при $\alpha = 1$. В регуляторах ПД_β и $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ наблюдается уменьшение наклона при уменьшении степени β .

У ФЧХ аргумент принимает свои значения в следующих диапазонах:

- для И_α -постоянна для различных α ;
- ПИ_α - от $-\pi\alpha/2$ до 0;
- ПД_β - 0 до $\pi\alpha/2$;
- $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ от $-\pi\alpha/2$ до $\pi\alpha/2$ при изменении ω от 0 до ∞ .

При $\alpha \rightarrow 0$ фаза для всех законов регулирования сжимается к значению нуля, и означает, что с уменьшением α , ослабевает зависимость фазы от частоты.

3.3 Приближенные методы вычисления дробного интеграла

Техническая реализация дробных производных и интегралов может осуществляться несколькими способами: на основании аппроксимационных зависимостей Грюнвальда [30], с использованием цепных дробей [2] и путем применения преобразования Фурье [30].

Главной задачей при разработке алгоритма цифрового дробного $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ регулятора является выбор численного метода вычисления интегральной и дифференциальной составляющей. Для этого проведем анализ численных методов определения дробного интеграла.

При нахождении определенных интегралов от непрерывной функции $f(x)$ на интервале $[a, b]$ существует множество численных методов [159, 2], таких как метод прямоугольников, метод трапеций, метод парабол, квадратурные формулы Чебышева, Гаусса и т.п. Все эти методы отличаются между собой точностью и скоростью вычисления значения интеграла.

На данный момент времени в работе [45] найдено выражение для численного дробного интегрирования,

$$I_{0t}^\alpha(e(t)) \approx \frac{T_c^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \sum_{i=1}^n i^{\alpha-1} e_{n-i}, \quad (3.27)$$

где T_c^α - шаг квантования, n - число разбиений интервала.

Выражение (3.27) трудоемкое для вычисления, так как под знаком суммы находится Гамма функция, вычисление которой необходимо производить при каждом шаге.

В связи с этим в работе предложим приближенные методы вычисления дробного интеграла Римана–Ливиулли основанных на методах прямоугольников и трапеций.

Метод прямоугольников. Как известно из численных методов математического анализа, самым простым методом вычисления интеграла является метод прямоугольников, основанный на его определении:

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{n-1} f(\xi_i) \Delta x_i, \quad (3.28)$$

где $\sum_{i=0}^{n-1} f(\xi_i) \Delta x_i$ есть интегральная сумма, соответствующая некоторому разбиению отрезка $[a, b]$ на n частей и выбору точек $\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{n-1}$ на отрезках разбиения. Тогда геометрически вычисление интеграла (3.28) сводится к вычислению суммы площадей прямоугольников. При совмещении точки ξ_i с левым концом отрезка Δx_i получим приближенное значение интеграла, равное площади заштрихованной поверхности ступенчатой фигуры (рисунок 3.16) и представленное формулой левых прямоугольников: $\int_a^b f(x)dx = h \sum_{i=0}^{n-1} y_i$, где $h = (b - a)/n$.

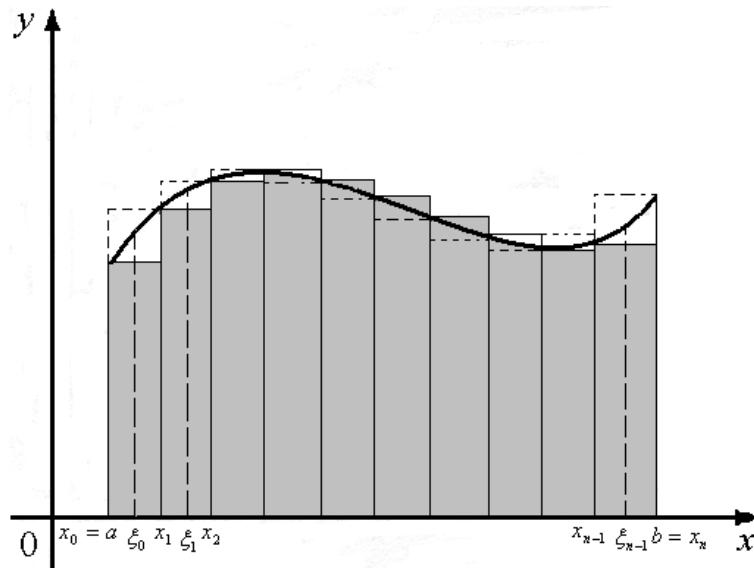


Рисунок 3.16 – Приближенное значение интеграла

Тогда по аналогии с методом прямоугольников (3.28) вычисление значения дробного интеграла (3.27) представим следующим образом

$$I_{0t}^{\alpha} f(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{f(\xi_i)}{(b - \xi_i)^{1-\alpha}} \Delta x_i, \quad (3.29)$$

где $t = b$, а $\sum_{i=0}^{n-1} \frac{f(\xi_i)}{(b - \xi_i)^{1-\alpha}} \Delta x_i$ интегральная сумма, которая отличается от (3.28) меняющимся знаменателем каждого слагаемого. В результате геометрическое вычисление интеграла сводится к вычислению суммы отношений площадей прямоугольников к длине соответствующих отрезков, возведенных в степень $1 - \alpha$. Для численного вычисления интеграла совместим точку ξ_i с левым концом отрезка Δx_i , и в результате получим

$$I_a^{\alpha} \varphi(t) \approx \frac{h}{\Gamma(\alpha)} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{y_i}{(b - x_i)^{1-\alpha}}.$$

В последнем выражении заменим $b = hn$, $x_i = hi$ и получим конечную формулу для вычисления значения дробного интеграла

$$I_a^{\alpha} \varphi(t) \approx \frac{h^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{y_i}{(n - i)^{1-\alpha}}. \quad (3.30)$$

Метод трапеций. Вычислим значение дробного интеграла другим способом. Для этого соединим концы значений функций $f(x_i)$ и $f(x_{i+1})$ прямой линией, как показано на рисунке 3.17, и получим площадь фигуры, находящейся под функциональной кривой в виде трапеции.

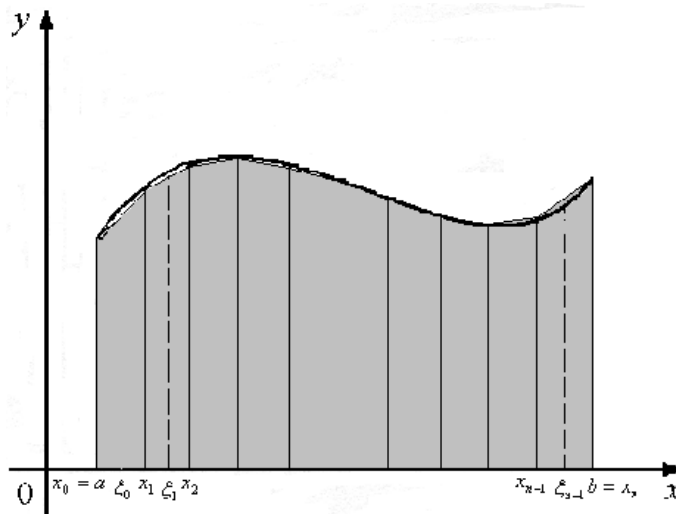


Рисунок 3.17 – Соединение концов значений функций $f(x_i)$ и $f(x_{i+1})$ прямой линией

Возьмем за основу вычисления дробного интеграла формулу нахождения простого интеграла на основе определения площадей составляющих его трапеций

$$(x_{i+1} - x_i) \sum_{i=1}^{n-1} \frac{y_i + y_{i+1}}{2},$$

где $y_i = f(x_i)$, $y_{i+1} = f(x_{i+1})$.

Тогда выражение для вычисления дробного интеграла будет выглядеть следующим образом

$$I_a^\alpha \varphi(t) = \frac{(x_{i+1} - x_i)}{2\Gamma(\alpha)} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{y_i + y_{i+1}}{(b - x_i)^{1-\alpha}}. \quad (3.31)$$

Примем шаг между отсчетами постоянным, равным $h = (x_{i+1} - x_i)$, тогда $b = hn$, $x_i = hi$ и подставим в (3.31). Получим формулу вычисления дробного интеграла

$$I_a^\alpha \varphi(t) \approx \frac{h^\alpha}{2\Gamma(\alpha)} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{y_i + y_{i+1}}{(n-i)^{1-\alpha}}. \quad (3.32)$$

Результаты исследований численных методов дробного интегрирования. Сравним полученные численные методы вычисления дробных интегралов. Сведем в таблицу 3.1 относительные погрешности вычислений при $t=10$. Точное значение интеграла вычислим из выражения $I^\alpha(\cos x) = \cos(x - 0.5\pi\alpha)$, приведенного в работе [22].

Таблица 3.1 – Таблица результатов

Шаг интегрирования h	Метод		
	Выражение (3.4) (прямоугольников)	Выражение (3.6) (трапеций)	Выражение (3.1)
	Относ. Ошибка $\sigma\%$	Относ. Ошибка $\sigma\%$	Относ. Ошибка $\sigma\%$
$\alpha = 0.7$			
0.00001	0.02	0.02	0.01
0.0001	0.10	0.10	0.9
0.001	0.55	0.50	0.44
0.01	2.88	2.37	1.36
0.1	15.64	10.4	5.52

Продолжение таблицы 3.1

$\alpha = 0.4$			
0.00001	0.74	0.74	0.6
0.0001	1.85	1.85	0.95
0.001	4.64	4.63	1.1
0.01	11.71	11.60	1.15
0.1	30.06	28.48	1.32

Из данных, приведенных в таблице 3.1, видно, что наиболее предпочтительным для вычисления дробного интеграла является выражение (3.1) так как оно имеет меньшую относительную ошибку при разных значениях показателя α .

3.4 Разработка алгоритма регулирования на основе дробного пропорционально интегрального дифференциального закона управления

Получим цифровой ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятор из непрерывного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ закона управления (2.3) заменой непрерывного интегрального звена на его цифровой аналог (3.27). Для вычисления дробной дифференциальной составляющей уравнения воспользуемся гельдеровской производной [144, 5]

$$D_{0t}^{\beta}(e(t)) \approx \frac{e_n - e_{n-1}}{T_c^{\beta}}. \quad (3.33)$$

В этом случае выражение для вычисления управляющего воздействия дробным ПИД законом управления будет следующим:

$$u_n = K_p e_n + \frac{T_c^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \sum_{i=1}^n i^{\alpha-1} e_{n-i} + \frac{T_D^{\beta}}{T_c^{\beta}} (e_n - e_{n-1}). \quad (3.34)$$

Отметим, что при достаточно малых периодах квантования цифровой ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ закон регулирования обеспечивает почти такое же качество процессов управления, что и исходный непрерывный закон (2.3). На практике вместо вычислений абсолютных значений управляющего сигнала удобней вычислять его приращения Δu_n на каждом такте. В этом случае становится возможным

использовать этот алгоритм для управления объектами, оснащенными как пропорциональным, так и интегрирующими исполнительными механизмами. В результате получаем рекуррентный алгоритм управления, полностью эквивалентный исходному.

Представим алгоритм управления в разностном виде

$$u_n = u_{n-1} + \Delta u_n \quad (3.35)$$

Найдем Δu_n , подставляя в (3.30) значения (3.31) для u_n и u_{n-1} . В результате получим

$$\begin{aligned} u_n = & \left(K_{\Pi} + \frac{T_D}{T_0^\beta} \right) e_n + \left(-K_{\Pi} - 2 \frac{T_D}{T_0^\beta} + \frac{T_0^\alpha}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha)} \right) e_{n-1} + \left(\frac{T_D}{T_0^\beta} + \frac{T_0^\alpha}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha)} (2^{\alpha-1} - 1) \right) e_{n-2} + \\ & + \frac{T_0^\alpha}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha)} \sum_{i=3}^n (i^{1-\alpha} - (i-1)^{1-\alpha}) e_{n-i}. \end{aligned}$$

Используя поправочный член Δu_n , получаем рекуррентные выражения, описывающие динамику дискретного закона управления [23]

$$u_n = u_{n-1} + q_0 e_n + q_1 e_{n-1} + q_2 e_{n-2} + \varepsilon_n, \quad (3.36)$$

где $q_0 = K_{\Pi} + \frac{T_D}{T_0^\beta}$; $q_1 = -K_{\Pi} - 2 \frac{T_D}{T_0^\beta} + \frac{T_0^\alpha}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha)}$,

$$q_2 = \frac{T_D}{T_0^\beta} + \frac{T_0^\alpha}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha)} (2^{\alpha-1} - 1),$$

$$\varepsilon_n = \frac{T_0^\alpha}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha)} \sum_{i=3}^n (i^{1-\alpha} - (i-1)^{1-\alpha}) e_{n-i}. \quad - \quad \text{уточняющий коэффициент}$$

дробной интегральной составляющей.

Как видно из полученного рекуррентного алгоритма (3.36), в уточняющем коэффициенте осталась сумма, которую требуется пересчитывать на каждом новом отсчете, но в отличие от уравнения (3.34) расчет уточняющего коэффициента можно ограничивать $|\varepsilon(n)| < \zeta$ и тем самым уменьшить количество операций, где ζ – погрешность вычисления задаваемая, исходя из точности работы системы.

Основываясь на полученном алгоритме вычисления управляющего воздействия, в пакете MATLAB в приложении SIMULINK разработана S-

функция, реализующая $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ законы управления (PidD) и составлена имитационная модель системы автоматического регулирования (рисунок 3.6). Для нахождения оптимальных настроек регулятора использован блок «Simulink response optimization» с градиентным методом оптимизации, также реализована функция нахождения интегральной оценки процесса управления [3,4]. При определении оптимальных настроек для чистоты эксперимента на систему были наложены следующие ограничения: перерегулирование не должно превышать 60 %, время переходного процесса ограничено 3 сек., погрешность регулирования должна находиться в пределах 5 %.

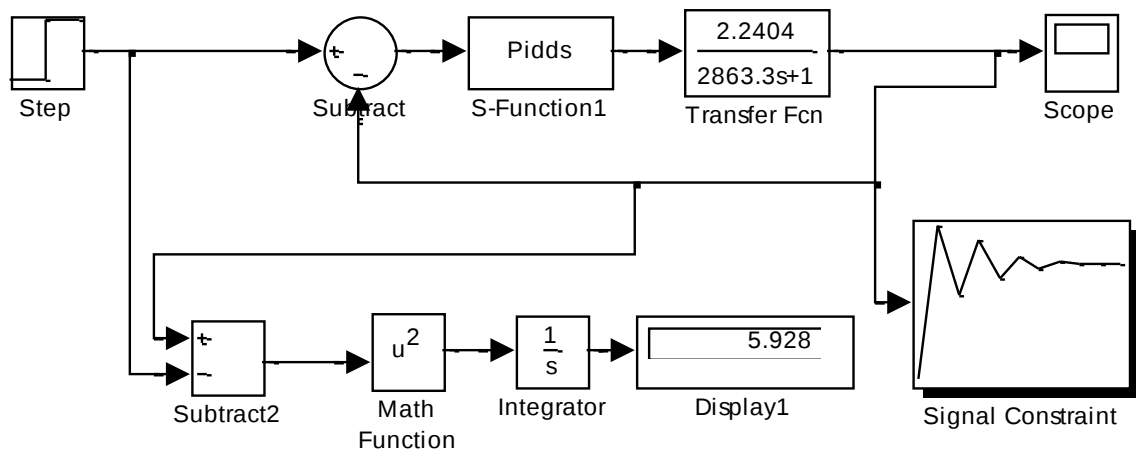


Рисунок 3.6 – Модель системы регулирования

Проведем модельные испытания полученного рекуррентного $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ регулятора в составе системы автоматического управления с передаточными функциями наиболее часто встречающихся в реальных объектах управления 1-го, 2-го и 3-го порядков (таблица 3.2).

Также проведем сравнение полученного дробного ПИД регулятора с классическим ПИД регулятором.

Таблица 3.2 – Тестовые передаточные функции

№ ПФ	Объект управления
1.	$W(p) = \frac{2.8}{3p + 1}$
2.	$W(p) = \frac{2.8}{5p^2 + 2p + 1}$
3.	$W(p) = \frac{2.8}{5p^2 + 1}$
4.	$W(p) = \frac{2.8}{0.1p^3 + 0.5p^2 + 0.3p + 1}$

В результате проведенного моделирования получены оптимальные настройки ПИД (таблица 3.3) и ПИ_αД_β регулятора (таблица 3.4). При моделировании САУ с оптимальными настройками дробного и классического ПИД регулятора получены переходные характеристики, из которых найдены следующие показатели качества переходных характеристик: выброс частоты вращения коленчатого вала над целевым значением ($\Delta\omega, \%$), время управления t_y , время переходного процесса t_p , интегральная оценка I_0 , $\Delta\epsilon$ - статическая ошибка (таблица 3.3, 3.4).

Как видно из таблицы 3.3 и таблицы 3.4, наблюдается преимущество ПИ_αД_β регулятора в среднем по перерегулированию на 21 %, времени переходного процесса на 42 %, интегральной оценке на 13 %.

Таблица 3.3 – Настройки и показатели качества дробного ПИД регулятора

№ ПФ	К _п	Т _и	Т _д	$\Delta\omega, \%$	t_y, c	t_p, c	$\Delta\epsilon$	I_0
1	6,5	7,7	2,3	15	0,83	2,7	0	0,23
2	11,8	3,8	4,8	47	0,91	3	0	0,38
3	11,8	5,6	3,2	17	0,98	2,85	0	0,37
4	1,51	0,75	0,78	13	0,89	2,79	0	0,43

Таблица 3.4 - Настройки и показатели качества ПИ_αД_β регулятора

№ ПФ	КП	ТИ	ТД	α	β	$\Delta w, \%$	t_y, c	t_p, c	$\Delta \varepsilon$	Ю
1	5	0,76	6	0,99	0	0,45	0,27	1,35	0	0,17
2	0,69	0 , 6	68,5	0,55	0	33	0,40	1,08	0	0,28
3	5,9	416	0,78	0,95	0,76	0,43	0,44	1,44	0	0,31
4	0,3	1,05	4,08	0,98	0,08	30	0,79	2,61	0	0,46

Время расчета управляющего воздействия на компьютере с процессором Pentium IV Core duo составляет 0,535 мс. Полученную скорость вычисления можно объяснить тем, что в рекуррентном алгоритме (3.36) на каждом отсчете приходится вычислять много раз гамма-функцию. Так как для систем управления используются контролеры с процессорами с частотой намного ниже, чем на экспериментальном компьютере, время вычисления управляющего воздействия может возрасти в несколько раз. Поэтому для систем управления с высоким быстродействием данный алгоритм может вырабатывать управляющее воздействие с запаздыванием и тем самым ухудшить характеристики процесса управления.

Таким образом, получены алгоритмы цифрового ПИ_αД_β регулятора, на основе которых стало возможным построение имитационной модели системы автоматического управления по отклонению. В результате исследования переходных процессов с оптимальными параметрами и настройки для классического ПИД и ПИ_αД_β регулятора можно сделать вывод о том, что предлагаемый цифровой ПИ_αД_β регулятор позволяет повысить быстродействие в среднем на 47 % по сравнению с классическим ПИД регулятором для объектов 1, 2 и 3-го порядков в заданных ограничениях на переходный процесс. Полученные в работе алгоритм управления позволяют использовать предлагаемый закон управления для контроллеров с разными видами быстродействия и в зависимости от требуемой точности.

3.5 Выводы по главе 3

1. Рассмотрены методы численного вычисления интеграла дробного порядка Римана-Ливиулли, метод прямоугольника, метод трапеций. Проведено исследование временных и частотных характеристик дробных И, ПИ, ПД, ПИД законов управления.

2. Обобщены частотные критерии устойчивости Михайлова и Найквиста для систем управления, описываемых дифференциальными уравнениями дробного порядка, в результате чего получена возможность определять устойчивость дробных систем автоматического управления без нахождения корней характеристических уравнений.

3. Предложен и обоснован рекуррентный алгоритм дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления, позволяющий, в отличие от классических ПИД регуляторов, сократить время переходного процесса без увеличения перерегулирования.

4. Разработаны имитационные модели САУ с классическим и дробным ПИД регулированием. В ходе исследований с помощью имитационного моделирования выявлено, что преимущество имеет дробный ПИД алгоритм регулирования в среднем по перерегулированию на 21 %, времени переходного процесса на 42 %, интегральной оценке 13 %.

4 УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОКСОВАННОСТИ ВЫПУСКНЫХ ОКОН В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

При большом проценте закоксованности выпускных окон происходит перелив топлива и нехватка воздуха. В результате полученная смесь догорает в выпускных окнах, что приводит к перегреву коллектора, из-за чего возрастает вероятность возгорания тепловоза. Таким образом, контроль закоксованности выпускных окон необходим для повышения технико-эксплуатационных показателей надежности и экономичности.

Для повышения безопасности и избегания перерасхода топлива в составе системы управления газодизельным двигателем тепловоза разработан дополнительный блок диагностики закоксованности выпускных окон по косвенным признакам расхода топлива, воздуха и температуры выхлопных газов.

Основываясь на исследованиях, приведённых в работе [50], где исследованы рабочие параметры тепловозного двигателя и предложена математическая модель закоксованности выпускных окон, в настоящей работе предлагается реализовать блок закоксованности выхлопных окон. Для реализации выбрана система автоматического управления топливоподачи газодизеля СУДМ.03 фирмы ООО «Дизельавтоматика» [153] по трём измеряемым параметрам – расходу топлива, расходу воздуха и температуры выпускных газов.

Для доработки системы автоматического управления топливоподачи газодизеля СУДМ.03, исходя из предложенной в работе методики, необходимо добавить измерительное устройство температуры отработанных газов, а в части программного обеспечения разработать блок диагностики закоксованности выпускных окон [50].

Схема модернизации системы автоматического управления топливоподачи газодизеля СУДМ.03 показана на рисунке 4.1.

В исходную структуру системы автоматического управления газодизеля добавлены три блока: датчик температуры выхлопных газов, блок диагностики

закоксованности выпускных окон, блок формирования корректирующего сигнала работы ДВС.

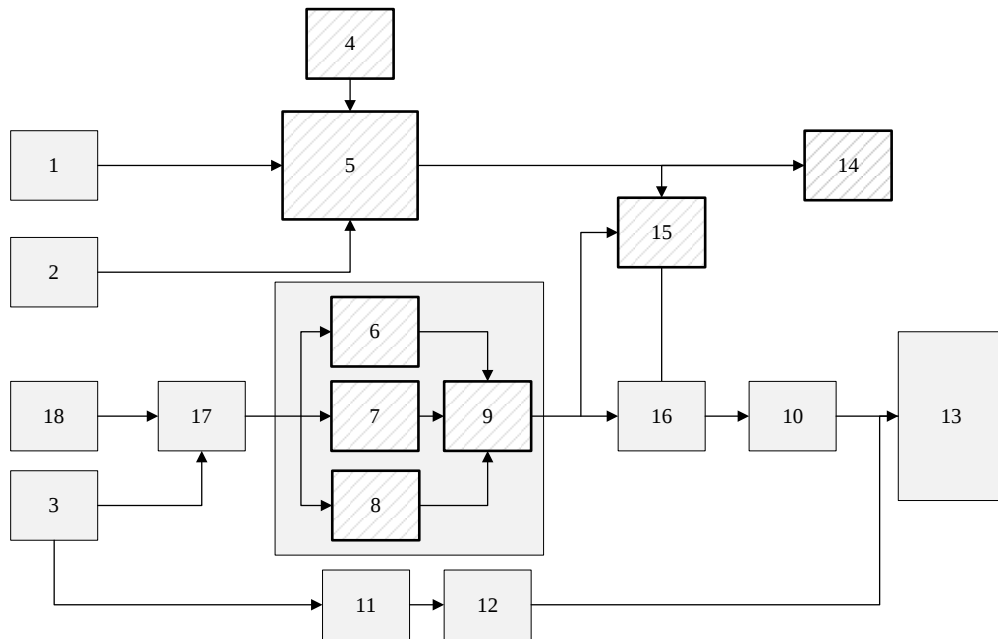


Рисунок 4.1 – Схема цифрового управления газодизеля силовой установки тепловоза:

1, 2 – датчики расхода топлива и воздуха, 3 – датчик частоты вращения, 4 – датчик температуры выпускных газов, 5 – блок диагностики закоксованности выпускных окон, 6 – блок пропорционального звена, 7 – блок дробного интегрального звена, 8 – блок дробного дифференциального звена, 9, 17 – сумматоры, 10 – электрогазовый клапан, 11 – блок формирования запальной дозы, 12 – ТНВД, 13 – двигатель внутреннего сгорания, 14 – индикатор аварийного режима, 15 – блок формирования корректирующего сигнала, 18 – уставка

Рассмотрим работу блока диагностики закоксованности выхлопных окон базирующуюся на основе оценки системы неравенств, предложенных в работе [157]

$$\begin{cases} a_1x_1 + a_2x_2 + a_4 < D_3 \\ b_1x_1 + b_3x_3 + b_4 < D_3, \\ c_2x_2 + c_3x_3 + c_4 < D_3 \end{cases} \quad (4.1)$$

где, a_1 , a_2 , a_4 , b_1 , b_3 , b_4 , c_2 , c_3 , c_4 – настроечные коэффициенты, которые необходимо подбирать в зависимости от марки двигателя, D_3 – значение закоксованности в процентах.

Реализация блока диагностики закоксированности выхлопных окон представлена в виде структурной схемы на рисунке 4.2, в где & – блок логического сравнения «И», $\otimes$ – сумматор. Остальные обозначения соответствуют переменным в неравенстве (3.39).

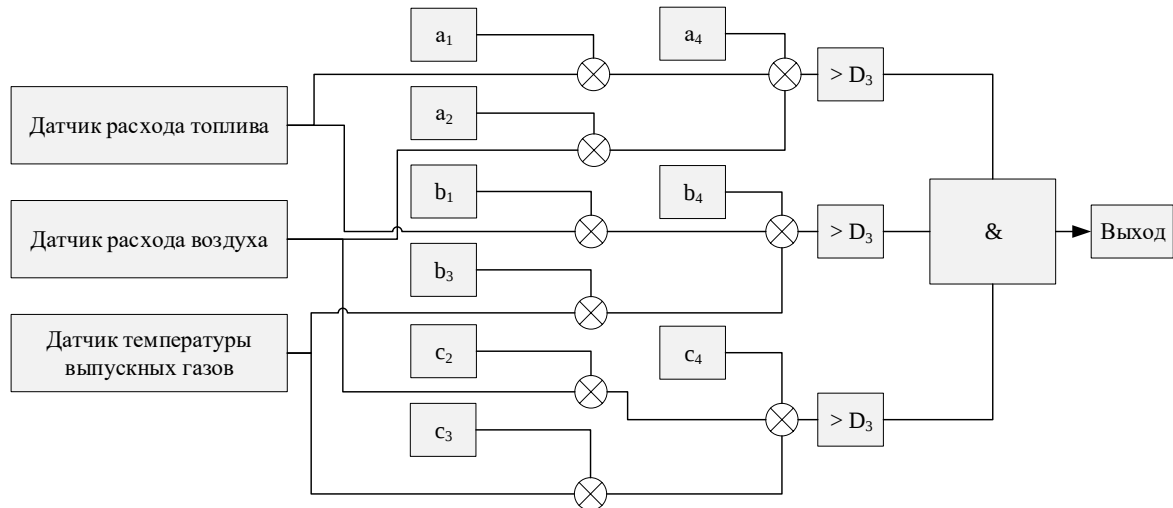


Рисунок 4.2 – Схема блока диагностики закоксованности выпускных окон

Блок диагностики закоксованности выпускных окон работает независимо от системы управления двигателем, получает данные с датчиков расхода топлива, воздуха и температуры выхлопных газов. Далее с помощью простейших математических операций реализует вычисление значений в соответствии с уравнением (4.1) (для всех трёх неравенств) и в блоках D_3 производится сравнение полученных результатов с заданным значением предельной закоксованности. После блоков сравнения информация передаётся в битовом формате (false или true) в блок логического сравнения "И" и если все три логических сигнала имеют значение "true" на выходе блока "И", означающее превышение порога закоксованности выпускных окон, подаётся сигнал на индикатор аварийного режима двигателя и в блок формирования корректирующего сигнала работы ДВС.

Сигнал корректировки работы ДВС передаётся в блок управления для формирования сигнала для занижения подачи топлива, тем самым, не давая

двигателю развивать максимальную мощность, чтобы не произошёл перегрев выпускных окон и не произошло самовозгорания двигателя.

На основании предложенной схемы (рисунок 4.1) для системы автоматического управления был реализован алгоритм для микроконтроллера и модифицирована система автоматического управления состоянием тепловозного двигателя в части добавления датчика температуры отработанных газов и доработано программное обеспечение информационно-измерительной системы контроля состояния тепловозного двигателя.

Проверка работоспособности алгоритма диагностики закоксованности выпускных окон в составе физической системы автоматического управления контролем состояния двигателя проводилось на газодизельной установке на базе двигателя Д-242 (рисунок 4.3), данная установка размещена в межотраслевой лаборатории «Газомоторное и водородное топливо» в СамГУПС на кафедре «Локомотивы». Газодизельная установка оборудована системой автоматического управления топливоподачи газодизеля от компаний ООО «ППП ДИЗЕЛЬАВТОМАТИКА» и доработана коллективом СамГУПС под необходимые задачи по проведению исследований. Как видно из таблицы 2.1 данная установка подходит для проведения исследования работы алгоритма закоксованности выпускных окон, так как установка обладает необходимыми измерительными устройствами и высокопроизводительным микроконтроллером.



Рисунок 4.3 – Блок системы автоматического управления газодизельной установкой

Для проведения исследования на установку между коллектором и выходными отверстиями (рисунок 4.4) дополнительно ставились шайбы с разным внутренним диаметром, таким образом эмитировалась закоксованность выпускных окон. При исследовании использовались шайбы четырех внутренних диаметров, которые сужают выходное окно на 5 %, 10 %, 15 %, 20 %. Исследования проводилось при одинаковых настроечных коэффициентах блока диагностики закоксованности выпускных окон и системы управления. Также для проведения исследования на стенде была переработана система автоматического управления (рисунок 4.3) в части программного обеспечения и записана в микроконтроллер.

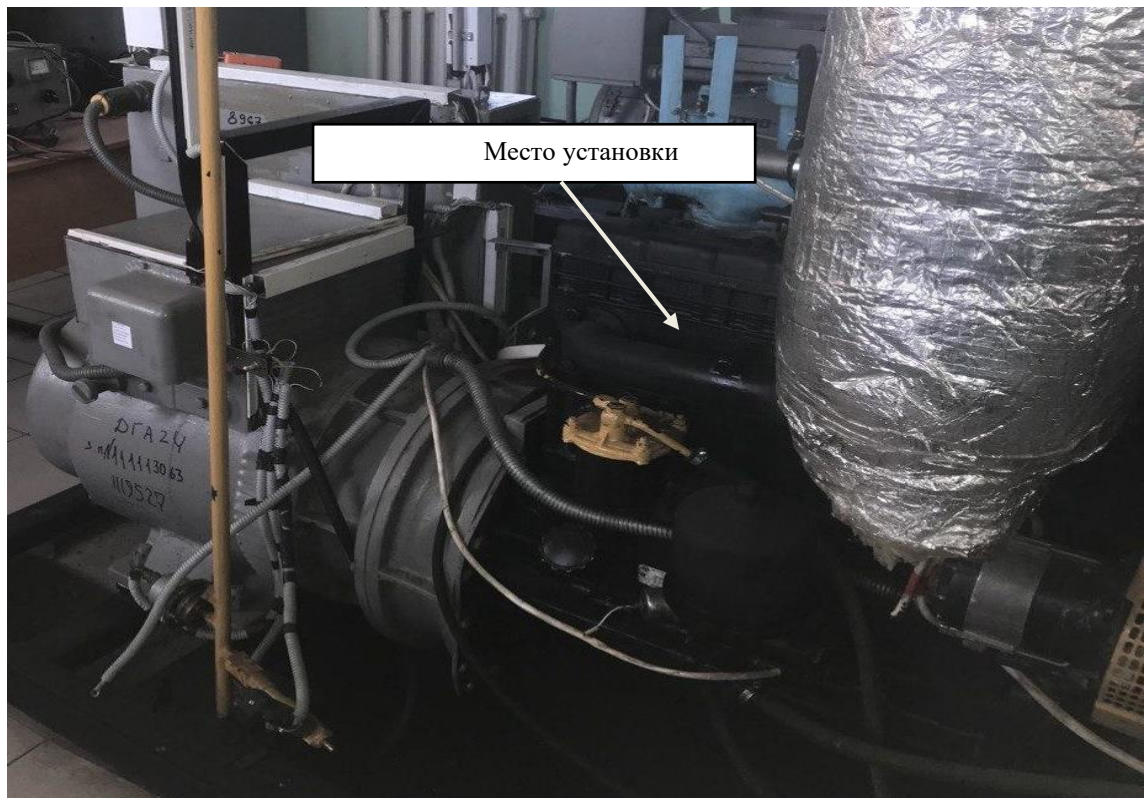


Рисунок 4.4 – Место добавление сужающих шайб между коллектором и выходными отверстиями

В ходе проведения исследования выявлено, что при установке сужающей шайбы на 5 % закоксованность окон не определяется, при установке сужающей

шайба на 10 % также блок не выдал закоксованность, в дальнейших исследованиях устанавливались шайбы на сужение на 15 % и 20 %. При 15 % блок закоксованности выпускных окон сработал на низких оборотах, а на высоких оборотах блок не мог определить закоксованность, при 20 % блок закоксованности выпускных окон определял закоксованность на всех режимах работы двигателя.

По результатам исследования можно сделать вывод, что блок диагностики закоксованности выпускных окон работает и может применяться в тепловозных двигателях при уверенном выявлении закоксованности выпускных окон от 20 % и выше в зависимости от потребностей для определённого типа двигателя.

4.1 Выводы по главе 4

1. Впервые предложен алгоритм корректировки параметров системы управления газодизельным двигателем тепловоза на основе диагностики закоксованности выпускных окон по косвенным признакам расхода топлива, воздуха и температуры выхлопных газов.

2. Блок диагностики закоксованности выпускных окон работает и может применяться в тепловозных двигателях при уверенном выявлении закоксованности выпускных окон от 20 % и выше в зависимости от потребностей для определённого типа двигателя.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОБНОГО ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО АЛГОРИТМА НА ГАЗОДИЗЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Для проведения исследования дробного ПИ_αД_β алгоритма была взята газодизельная установка на базе двигателя Д-242. Данная установка размещена в межотраслевой лаборатории «Газомоторное и водородное топливо» в СамГУПС на кафедре «Локомотивы».

5.1 Описание газодизельной установки

5.1.1 Характеристики газодизельной установки

В таблице 5.1 приведены технические характеристики газодизельной установки на базе двигателя Д-242.

Таблица 5.1 – Технические характеристики Д-242

Наименование параметра	Характеристики
Тип:	четырехтактный, без турбонаддува
Способ смесеобразования:	непосредственный впрыск топлива
Порядок работы цилиндров:	1-3-4-2
Направление вращения коленчатого вала, по ГОСТ 22836-77:	правое (по часовой стрелке)
Число и расположение цилиндров:	4, рядное, вертикальное
Рабочий объем, л:	4,75
Диаметр цилиндра и ход поршня, мм:	110/125
Степень сжатия:	16
Максимальное среднее эффективное давление, МПа:	0,640
Удельный расход топлива, г/кВт·ч (г/л.с.·ч):	226 (166)
Мощность, кВт (л.с.):	46 (62)
Частота вращения, об/мин:	1800
Максимальный крутящий момент, Нм (кгм):	241 (24,6)
Частота вращения при максимальном крутящем моменте, об/мин:	1400
Масса, кг:	430

Таблица 5.2 – Комплект системы СУДМ.03 газодизельной установки

Наименование	Количество	Описание
Блок управления (БУ)	1 шт.	БУ предназначен для приема и обработки сигналов с датчиков и преобразователей, дискретных управляющих сигналов и управляющих команд от персонального компьютера, формирование управляющих сигналов на ЭГК и ИУ.
Клапан электрогазовый (ЭГК)	4 шт.	ЭГК предназначен для дозирования количество газа, подаваемого в цилиндр, в зависимости от управляющего сигнала БУ.
Проставок подвода газа (ППГ)	1 шт.	ППГ предназначен для подачи газа от ЭГК и воздуха от впускного коллектора к головке цилиндров.
Коллектор газа (ГК)	1 шт.	ГК предназначен для распределения газа от подводящей газовой магистрали к ЭГК и для установки в нем датчиков давления газа.
Устройство исполнительное с датчиком положения (ИУ)	1 шт.	ИУ предназначено для управления рейкой ТНВД в зависимости от управляющих сигналов БУ.
Преобразователь частоты вращения (ПЧВ)	1 шт.	ПЧВ предназначен для формирования сигнала переменного тока с частотой, пропорциональной ЧВ коленчатого вала двигателя.
Датчик фазовой отметки (ДФО)	1 шт.	ДФО предназначен для формирования сигнала о положении поршня первого цилиндра в ВМТ такта сжатия. В качестве ДФО применяется автомобильный датчик фазы 36.3847 ТУ37.459.165-97
Датчик давления газа (ДДГ) - датчик давления 23.3829010 (0-6 кг/см ²)	1 шт.	Характеристики: Диапазон рабочих давлений, кгс/см ² : 0-6 Сопротивление на выходе датчика, Ом: 290-330 Посадочная резьба штуцера, К ¼ Электрическое подключение к бортовой сети: винт М4
Датчик температуры охлаждения жидкости (ДТ) – TM100B	1 шт.	Датчик температуры воды предназначен для информирования водителя о том, как сильно греется двигатель во время езды. Если температура превышает допустимые значения это свидетельствует о том что водяной насос не справляется со своей работой или шланги и радиатор засорились.
Реле 901.3747-10 (24В/10А)	1 шт.	Реле 901.3747 предназначено по сигналу от БУ для управления работой клапана газового системы подвода газа, который в свою очередь управляет подачей газа в ГК

Данная газодизельная установка оборудована системой автоматического управления топливоподачи газодизеля СУДМ.03 от компаний ООО «ППП ДИЗЕЛЬАВТОМАТИКА», описание системы автоматического управления топливоподачи газодизеля СУДМ.03 приведено в параграфе 2.1 данной диссертации, комплектность системы – в таблице 5.2.

На рисунках 5.1 и 5.2 показана газодизельная установка на базе двигателя Д-242, на которой проводились испытания дробного ПИД алгоритма.



Рисунок 5.1 – Газодизельная установка на базе двигателя Д-242



Рисунок 5.2 – Подача газа в газодизельную установку на базе двигателя Д-242

5.1.2 Настройки системы автоматического управления газодизельной установки

Исследование проводилось на установке с настройками классического ПИД регулятора и дробного ПИ_αД_β регулятора, приведенными в инструкции для системы управления двухтопливным Д-242.

Настройка системы проводится программой Tractor Inject Service показанной на рисунке 5.3 в окне «Параметры».

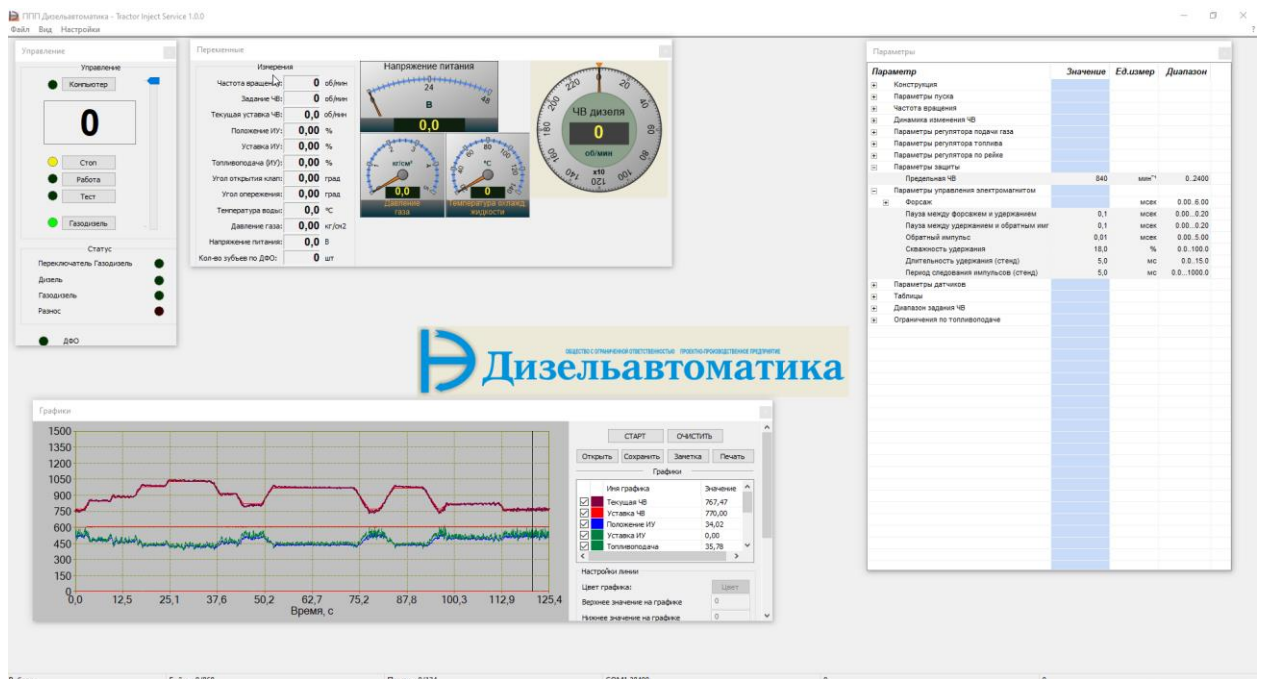


Рисунок 5.3 – Программа Tractor Inject Service

1 Настройка группы «Частота вращения»

1.1 Фильтрация:

1.1.1 Коэффициент фильтрации 1 – используется для фильтрации неравномерности ЧВ на входе в регулятор ЧВ= 0,8;

1.1.2 Коэффициент фильтрации 2 – используется для фильтрации неравномерности ЧВ, выводимой на индикацию =0,5;

1.1.3 Время измерения, мс =10.

1.2 Настройка группы «Диапазон задания ЧВ»:

1.2.1 ЧВ при 0 % задания – минимальная ЧВ холостого хода, об/мин =700;

1.2.2 ЧВ при 100 % задания – максимальная ЧВ, об/мин =2200;

1.3 Настройки группы «Динамика изменения ЧВ»

1.3.1 Темп набора – скорость изменения уставки ЧВ при ее увеличении, об/мин/с = 800;

1.3.2 Темп снижения – скорости изменения уставки ЧВ при ее уменьшении, об/мин/с = 800;

1.4 Настройка группы «Параметры регулятора подачи газа»

1.4.1 Пропорциональный коэффициент подбирается при работе двигателя, исходя из условий допустимых неустойчивости ЧВ и забросов ЧВ в переходных процессах:

– коэффициент 1 (600 об/мин).....	2,000;
– коэффициент 2 (1000 об/мин).....	2,000;
– коэффициент 3 (1400 об/мин).....	1,000;
– коэффициент 4 (1800 об/мин).....	1,600;
– коэффициент 5 (2200 об/мин).....	2,500.

1.4.2 Интегральный коэффициент подбирается при работе двигателя после настройки пропорциональных коэффициентов, исходя из условия допустимых неустойчивости ЧВ и длительности переходных процессов:

коэффициент 1 (600 об/мин).....	0,010;
коэффициент 2 (1000 об/мин).....	0,010;
коэффициент 3 (1400 об/мин).....	0,010;
коэффициент 4 (1800 об/мин).....	0,020;
– коэффициент 5 (2200 об/мин).....	0,040.

1.4.3 Дифференциальный коэффициент подбирается при работе двигателя, исходя из условий обеспечения требуемой динамики переходных процессов. Настройка дифференциального компонента необходима в случае, когда требуемых параметров регулирования ЧВ не удастся достичь с помощью пропорционального и интегрального коэффициентов:

коэффициент 1 (600 об/мин).....	0,005;
коэффициент 2 (1000 об/мин).....	0,000;
коэффициент 3 (1400 об/мин).....	0,000;
коэффициент 4 (1800 об/мин).....	0,000;
коэффициент 5 (2200 об/мин).....	0,040.

1.5 Настройка группы «Параметры регулятора топлива». Коэффициенты данной группы влияют на качество регулирования ЧВ в дизельном режиме. Настройки коэффициентов аналогичны пункту 1.4.

1.5.1 Пропорциональный коэффициент:

– коэффициент 1 (600 об/мин).....	4,000;
– коэффициент 2 (1000 об/мин).....	5,000;
– коэффициент 3 (1400 об/мин).....	3,000;
– коэффициент 4 (1800 об/мин).....	2,900;
– коэффициент 5 (2200 об/мин).....	2,900.

1.5.2 Интегральный коэффициент:

– коэффициент 1 (600 об/мин).....	0,025;
– коэффициент 2 (1000 об/мин).....	0,025;
– коэффициент 3 (1400 об/мин).....	0,030;
– коэффициент 4 (1800 об/мин).....	0,031;
– коэффициент 5 (2200 об/мин).....	0,033.

1.5.3 Дифференциальный коэффициент:

– коэффициент 1 (600 об/мин).....	0,500;
– коэффициент 2 (1000 об/мин).....	0,500;
– коэффициент 3 (1400 об/мин).....	0,500;
– коэффициент 4 (1800 об/мин).....	0,500;
– коэффициент 5 (2200 об/мин).....	0,500.

1.6 Настройка группы «Параметры регулятора по рейке». Коэффициенты данной группы влияют на точность поддержания вала ИУ в положении, соответствующем запальной дозе дизельного топлива в газодизельном режиме.

1.6.1 Пропорциональный коэффициент = 7,000

1.6.2 Интегральный коэффициент = 1,000

1.7 Настройка группы «Параметры защиты»

1.7.1 Предельная ЧВ – частота срабатывания защиты по разносу, об/мин = 2400

1.8 Настройка параметров «Параметры управления электромагнитом». Управляющий сигнал, подаваемый на катушку ЭГК

1.8.1 Форсаж, мс – длительность форсажа определяется конструкцией клапана:

для 1-го цилиндра.....	2,4;
для 2-го цилиндра	2,4;
для 3-го цилиндра	2,4;
для 4-го цилиндра	2,4.

1.8.2 Пауза между форсажем и удержанием, мс = 0,1;

1.8.3 Пауза между удержанием и обратным импульсом, мс = 0,1;

1.8.4 Обратный импульс, мс = 0,2;

1.8.5 Длительность удержания импульсов – параметр управляющего сигнала в тестовом режиме работы ЭГК, мс = 0,5;

1.8.6 Сквозное удержание, % – определяет величину тока в фазе удержания = 20;

1.8.7 Период следования импульсов – параметр управляющего сигнала в тестовом режиме работы ЭГР = 1000.

1.9 Настройка группы «Параметры датчиков».

Параметры данной группы рассчитываются блоком управления при калибровке датчиков температуры, положение ИУ, положения задатчика ЧВ, давления газа. Калибровка всех датчиков произведена на предприятии-изготовителе. В эксплуатации калибровка необходима в случае замены датчика. Методика калибровки датчиков приведена в приложении В.

Датчик напряжения представляет собой делитель напряжения в БУ и используется для корректировки сигналов других датчиков при изменении

напряжения питания. Калибровка датчика напряжения в процессе эксплуатации не требуется.

1.10 Настройка группы «Таблицы».

1.10.1 Коэффициент коррекции топливоподачи по цилиндрам используется для выравнивания подачи газа отдельно по каждому цилиндру.

По умолчанию значения коэффициентов установлены равным 1.00.

1.10.2 Угол опережения подачи газа, град. – угол начала подачи газа в цилиндр.

1.10.3 Запальная доза, % – относительное положение рейки ТНВД, соответствующее запальной дозе дизельного топлива в газодизельном режиме равным 40.

1.10.4 Положение рейки для перехода на газодизель, % – относительное положение рейки ТНВД, при котором включается управление ЭКГ равным 45.

1.10.5 Уменьшение положения рейки при переходе на газодизель, % – относительный ход рейки ТНВД в сторону уменьшения подачи дизельного топлива для компенсации минимальной подачи газа в момент включения ЭКГ (форсаж) равным 10.

1.11 Настройка группы «Ограничение по топливоподаче».

1.11.1 Максимальное относительное положение рейки ТНВД при работе по внешней скоростной характеристике двигателя в дизельном режиме:

для ЧВ2=1000об/мин.....	90;
для ЧВ2=1000об/мин.....	90;
для ЧВ3=1400об/мин.....	90;
для ЧВ4=1800об/мин.....	90.
для ЧВ5=2200об/мин.....	90;

1.11.2 Максимальный угол открытия ЭКГ при работе по внешней скоростной характеристике двигателя в газодизельном режиме, град п.к.в.:

для ЧВ2=1000об/мин.....	120;
для ЧВ2=1000об/мин.....	120;

для ЧВ3=1400об/мин.....	120;
для ЧВ4=1800об/мин.....	150;
для ЧВ5=2200об/мин.....	150.

1.11.3 Для того чтобы измененные параметры вступили в силу, необходимо передать настройки параметров в БУ и сохранить.

5.2 Исследование газодизельной установки с дробным пропорционально интегральным дифференциальным регулятором

Для исследования дробного $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ регулятора на газодизельной установке необходимо провести ряд исследований, которые включают в себя получения экспериментальных данных, исследование полученных экспериментальных данных. На основании полученных данных определить передаточные функции газодизельной установки, построить модель в Matlab Simulink и провести сравнительный анализ классического ПИД регулятора с дробным $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ регулятором, реализовать дробный $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ регулятор в газодизельной установке и проанализировать полученные результаты и результаты работы газодизельной установки с дробным $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ регулятором.[155-158]

5.2.1 Методика экспериментальных исследований

Для построения математической модели газодизельной установки на базе двигателя Д-242 необходимо получить экспериментальные данные входных и выходных параметров работы двигателя. Такими параметрами в нашем случае являются: мгновенный расход топлива (вход) и частота вращения коленчатого вала (выход). Остальные настроечные параметры двигателя на момент проведения испытания установки имеют фиксированные настройки.

Снимем переходные характеристики двигателя на разных заданных частотах (уставках) вращения коленчатого вала при одинаковой нагрузке, диапазон частот определен в таблице 5.3, что соответствует 8 экспериментам.

Таблица 5.3 – Диапазон частот для снятия экспериментальных данных

	Уставка начальная	ЧВ начальная	Уставка конечная	ЧВ конечная
1.	0	700	2	770
2.	2	770	4	794
3.	4	794	6	843
4.	6	843	8	868
5.	8	868	10	893
6.	10	893	12	917
7.	12	917	14	942
8.	14	942	16	966

В результате проведения эксперимента получено 8 зависимостей частоты вращения коленчатого вала двигателя от расхода топлива, время длительности одного измерения в среднем составляет 2,3 с. с частотой дискретизации 25 мс.

На первом этапе необходимо провести моделирование в среде Matlab, для этого необходимо получить передаточную функцию объекта управления. Передаточную функцию объекта управления получим на основании переходных процессов газодизельной установки (данные таблицы 5.3).

На втором этапе проведем испытание дробного ПИ_αД_β регулятора непосредственно на газодизельной установке.

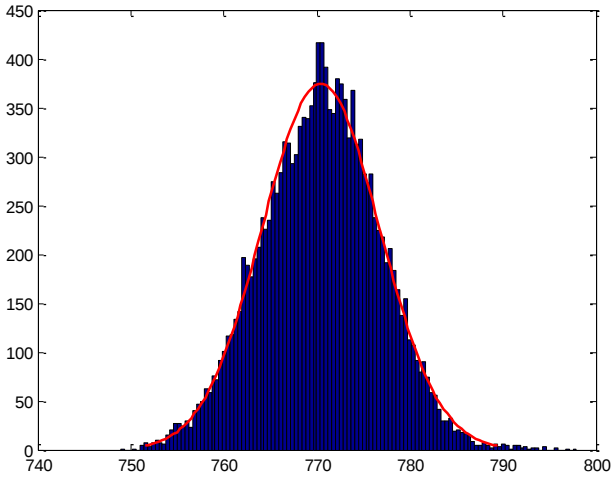
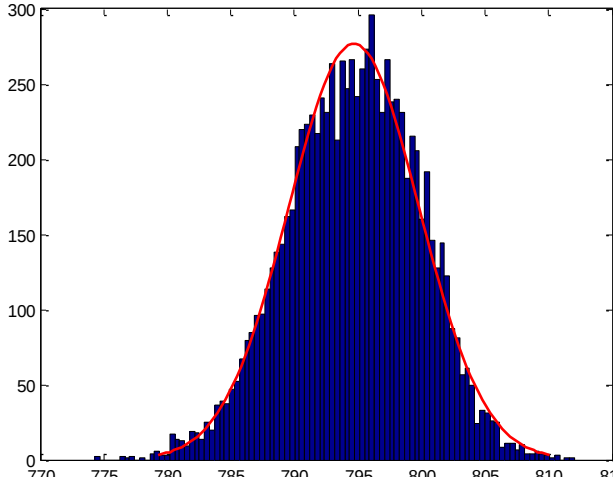
5.2.2 Исследование экспериментальных данных

Исследуем данные, полученные в ходе испытания при разных значениях уставки частоты вращения коленчатого вала двигателя, при этом определим: среднее арифметическое (mean), дисперсию (var), среднеквадратичное отклонение (std), размах выборки (range). Также для подтверждения гипотезы нормальности распределения полученных экспериментальных данных воспользуемся гистограммой с распределительной посадкой (histfit).

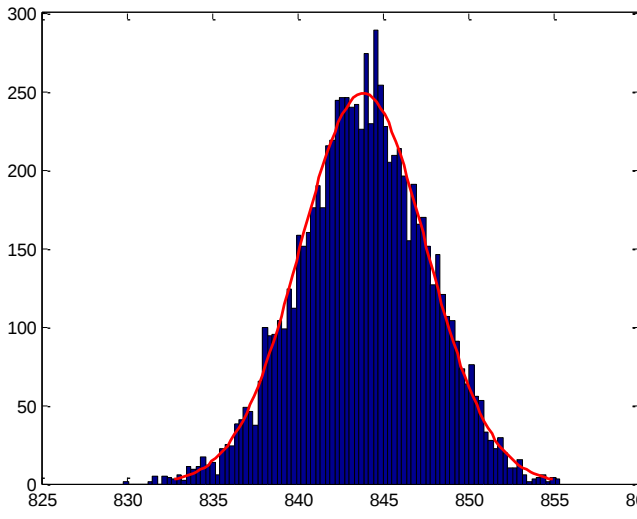
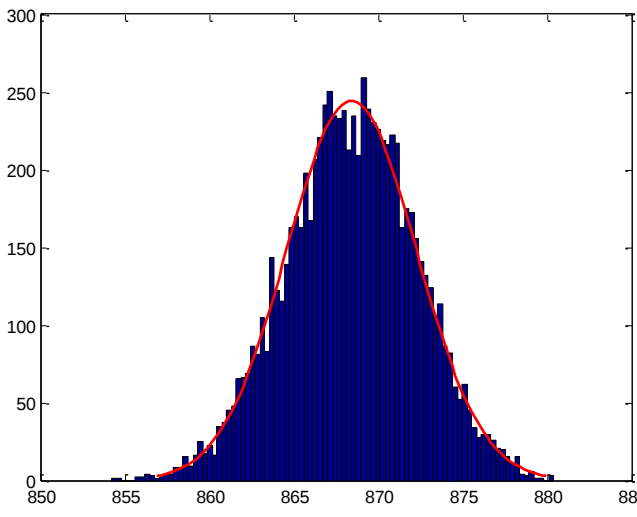
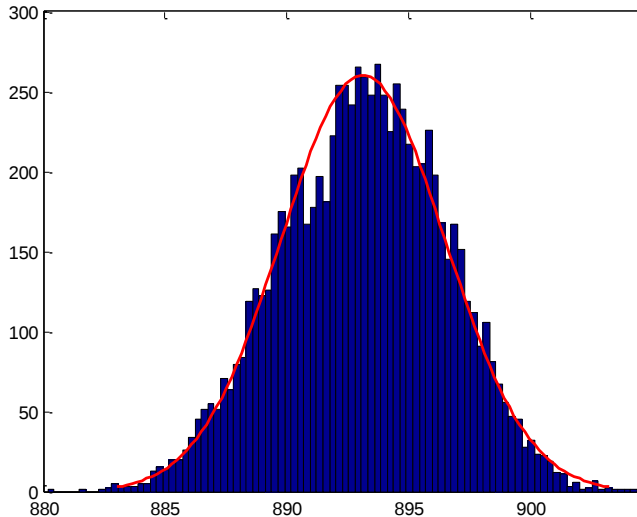
В случае больших отклонении функции плотности распределения теоретической от экспериментальной необходимо проводить дополнительные

исследования на изучение плотности распределения. Все указанные данные сведем по частоте вращения коленчатого вала и по расходу горючей смеси в таблицу 5.4 и таблицу 5.5 соответственно.

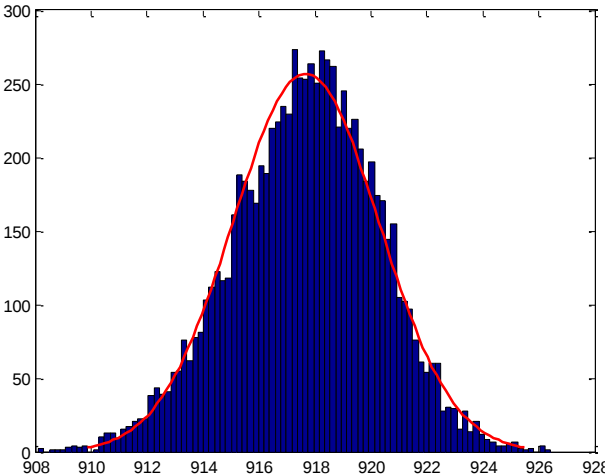
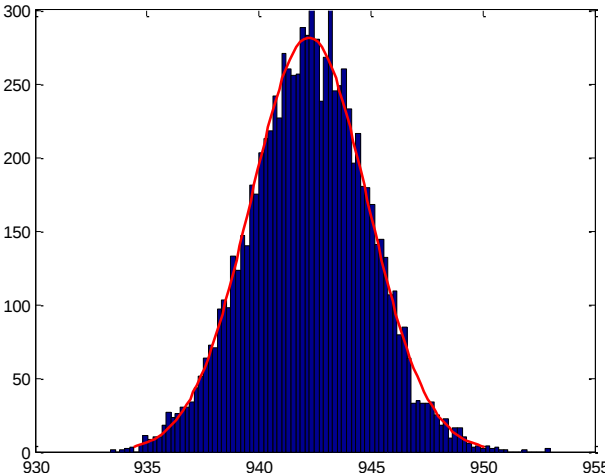
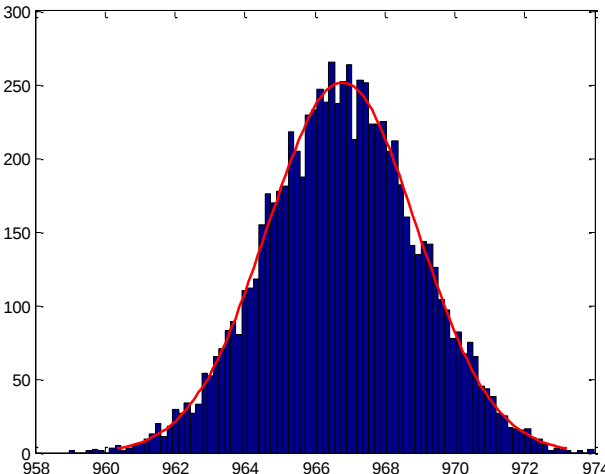
Таблица 5.4 – Данные исследования экспериментальных данных частоты вращения коленчатого вала

Уставка	mean	var	std	range	histfit
770	770,4	39,8	6,3	49	
794	794,7	26,4	5,1	37,8	

Продолжение таблицы 5.4

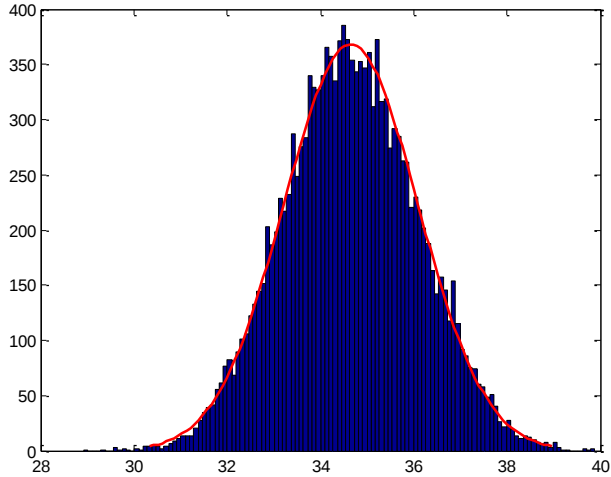
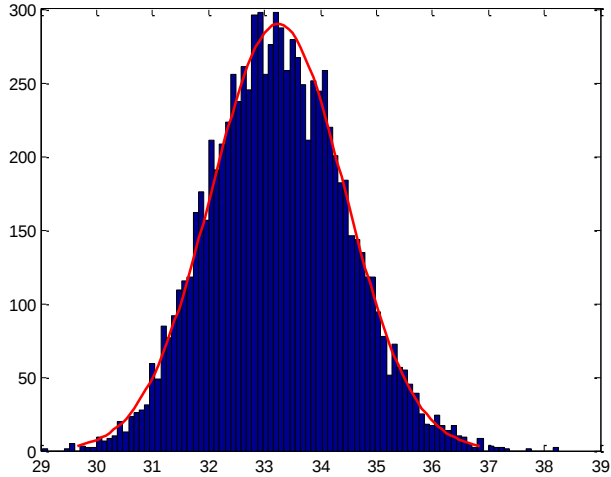
Уставка	mean	var	std	range	histfit
843	843,9	13,7	3,7	25,6	
868	868,4	14,8	3,8	26,2	
893	893,1	11,3	3,4	24,2	

Продолжение таблицы 5.4

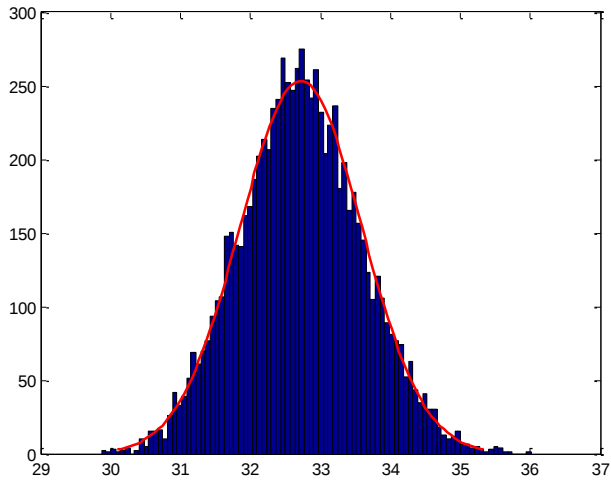
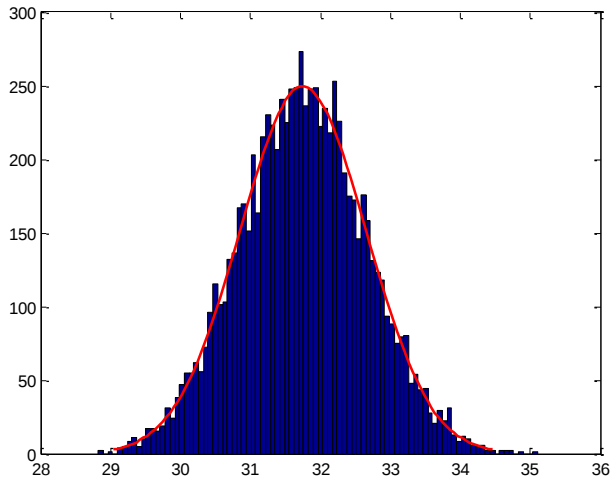
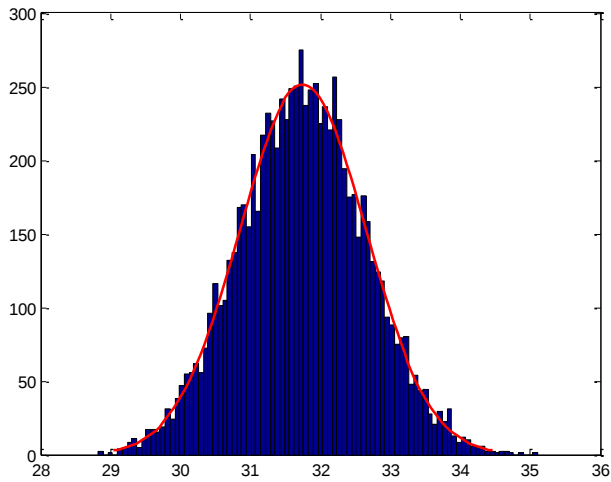
Уставка	mean	var	std	range	histfit
917	917,7	6,8	2,6	18,3	
942	942,2	6,8	2,6	19,6	
966	966,8	4,6	2,1	15,0	

Как видно из таблицы 5.4 отклонение от заданной частоты оборотов двигателя составляет 0.08 %, а величина дисперсии на максимальных оборотах меньше, чем на начальных на 88 %. Такая же тенденция сохраняется и для среднеквадратичного отклонения – 67 % и размаха выборки – 69 %. Из чего можно сделать вывод, что с ростом частоты стабильность работы двигателя возрастает [27]. Из приведенных гистограмм видно, что отклонение частоты оборотов двигателя от среднего значения подчиняется нормальному закону распределения.

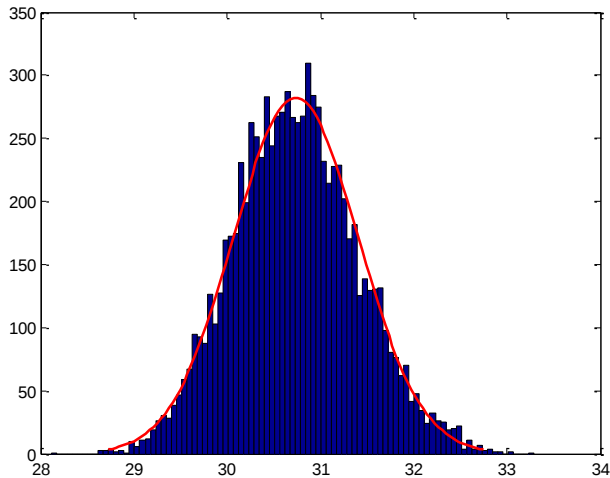
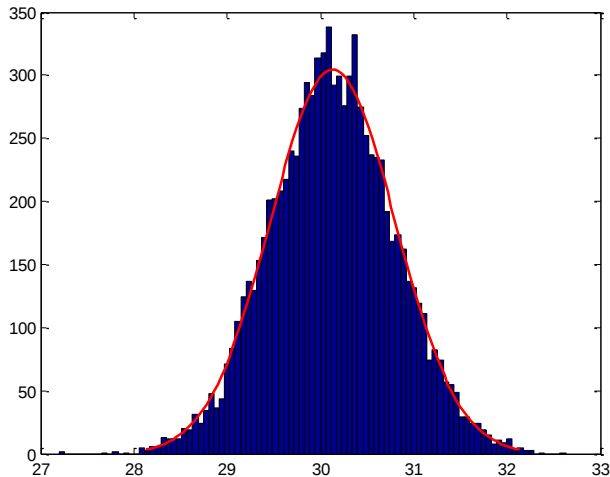
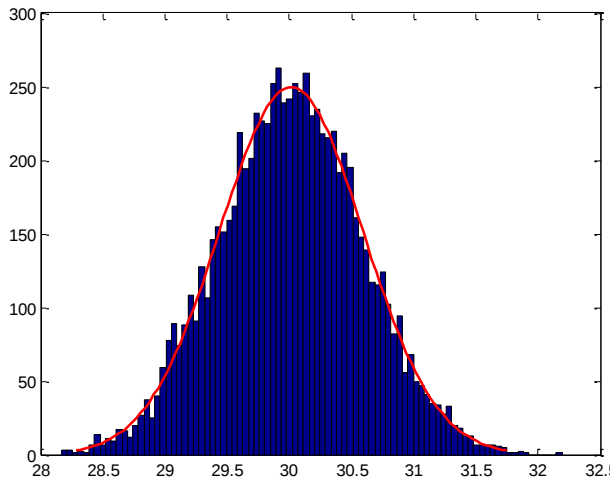
Таблица 5.5 - Данные исследования экспериментальных данных расхода топлива

Уставка	mean	var	std	range	histfit
770	34,7	2,1	1,4	10,9	
794	33,2	1,4	1,2	9,2	

Продолжение таблицы 5.5

Уставка	mean	var	std	range	histfit
843	32,7	0,8	0,9	6,1	
868	31,7	0,8	0,9	6,3	
893	31,5	0,8	0,8	6,1	

Продолжение таблицы 5.5

Уставка	mean	var	std	range	histfit
917	30,7	0,5	0,7	5,2	
942	30,1	0,4	0,6	5,4	
966	30,0	0,3	0,5	4,0	

Данные по расходу топлива имеют также тенденцию к уменьшению, что видно из таблицы 5.5, с увеличением количества оборотов двигателя. Средний расход топлива уменьшается на 16 % на высоких оборотах двигателя по сравнению с оборотами на холостом ходу. Также с повышением оборотов уменьшается диапазон колебания топливной рейки для поддержания частоты оборотов на 63 %.

На основании проведенного исследования экспериментальных данных расхода топлива и экспериментальных данных частоты вращения коленчатого вала можно сделать вывод, что полученные данные соответствуют нормальному распределению и проводить дополнительные исследования нет необходимости.

Построим зависимость потребления топлива от количества оборотов двигателя, используя для наглядности средние арифметические значения показателей расхода топлива от частоты вращения коленчатого вала (рисунок 5.4). Откуда видно, что зависимость, представленная на рисунке 5.4, не противоречит теоретическим исследованиям, и оптимальный режим работы двигателя по расходу топлива находится в пределах 1000 об/мин при заданной нагрузке двигателя.

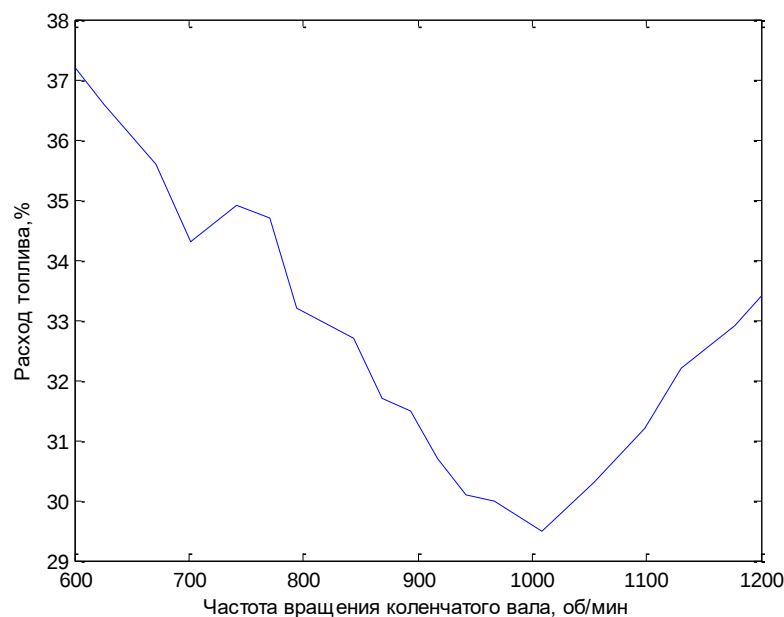


Рисунок 5.4 – Отношение потребление топлива к частоте вращения коленчатого вала

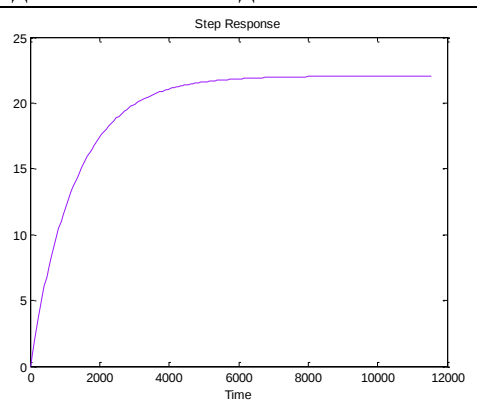
На основании проведенного исследования экспериментальных данных расхода топлива и экспериментальных данных частоты вращения коленчатого вала можно сделать вывод, что полученные данные соответствуют нормальному распределению и проводить дополнительные исследования нет необходимости.

5.2.3 Получение передаточной функции газодизельной установки

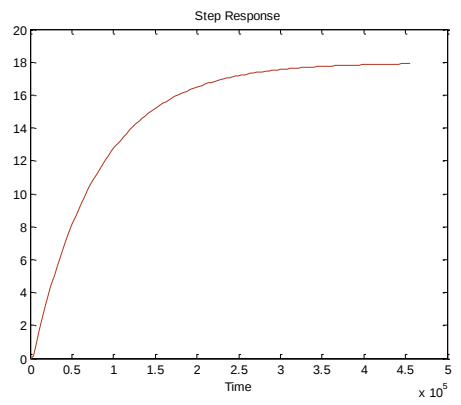
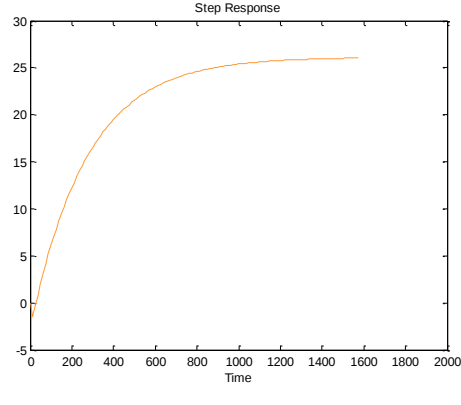
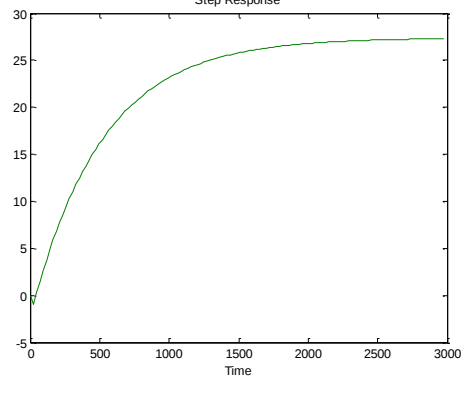
Для построения математической модели газодизельной установки по экспериментальным данным определим его передаточные функции на разных частотах работы с помощью пакета расширения System Identification ПО Matlab, методика работы которого заслуживает доверия в научной среде.

Экспериментальные данные имеют большие шумы, что мешает проведению идентификации и снижает её точность. Для сглаживания данных применим алгоритм скользящего среднего. После чего проведем идентификацию, результат которой занесем в таблицу 5.6.

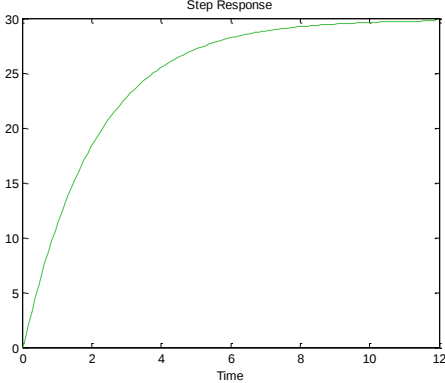
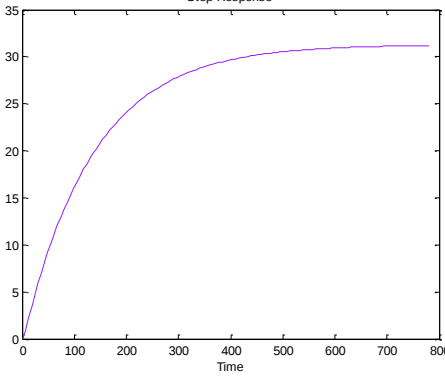
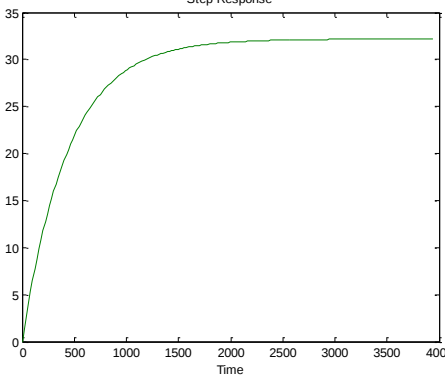
Таблица 5.6 - Передаточные функции двигателя на разных частотах

Уставка	Передаточная функция	Переходные характеристики двигателя на заданной частоте
770	$\frac{-0,1262 s + 0,2162}{s^2 + 12,61 s + 0,009805}$ Estimated using TFEST on time domain data "Dryer". Fit to estimation data: 63 % (filter focus) FPE: 20,27, MSE: 20,26	 The plot shows a step response curve that starts at the origin (0,0) and rises smoothly, reaching a steady-state value of approximately 22 after about 6000 time units. The curve is labeled 'Step Response' and the x-axis is labeled 'Time'.

Продолжение таблицы 5.6

Уставка	Передаточная функция	Переходные характеристики двигателя на заданной частоте
794	$\frac{-5,906 s + 0,001909}{s^2 + 8,356 s + 0,001063}$ Fit to estimation data: 66,04 % (filter focus) FPE: 42,25, MSE: 41,58	
843	$\frac{0,488 s + 0,316}{s^2 + 7,771 s + 0,01228}$ Fit to estimation data: 66,49 % (filter focus) FPE: 55,27, MSE: 55,21 More information in model's "Report" property.	
868	$\frac{-223,9 s + 5,128}{s^2 + 95,96 s + 0,1873}$ Estimated using TFEST on time domain data "Dryer". Fit to estimation data: 30,11% (simulation focus) FPE: 0,1453, MSE: 0,1452	

Продолжение таблицы 5.6

Уставка	Передаточная функция	Переходные характеристики двигателя на заданной частоте
917	$\frac{334,7}{s^2 + 23,5 s + 11,21}$ Estimated using TFEST on time domain data "Dryer". Fit to estimation data: 46,34 % (filter focus) FPE: 78,32, MSE: 52,56	
942	$\frac{-5,25 s + 2,316}{s^2 + 9,953 s + 0,07399}$ Estimated using TFEST on time domain data "Dryer". Fit to estimation data: 66,36 % (filter focus) FPE: 49,11, MSE: 49,06	
966	$\frac{-1,195 s + 0,8707}{s^2 + 11,87 s + 0,02706}$ Estimated using TFEST on time domain data "Dryer". Fit to estimation data: 66,66 % (filter focus) FPE: 46,67, MSE: 46,62	

На основе проведенных исследований по переходным характеристикам, приведенным в таблице 5.6 видно, что двигатель является нестационарной системой и при изменении частоты в сторону увеличения меняются и параметры системы при неизменной структуре (модель второго порядка), что показано на рисунке 5.5.

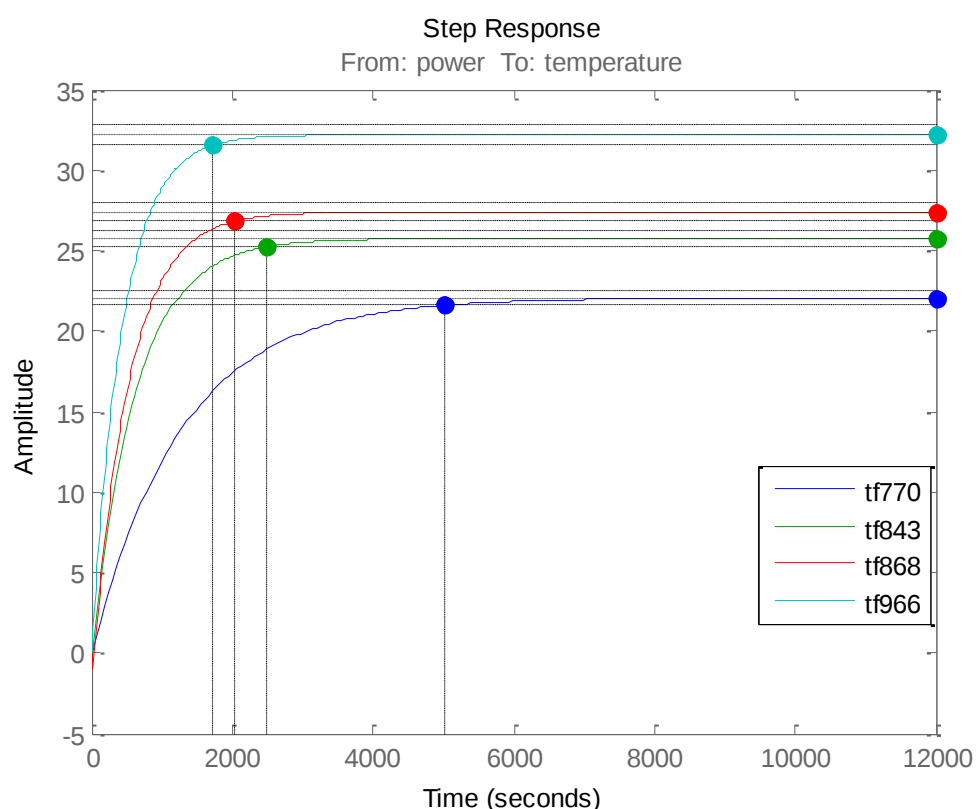


Рисунок 5.5 – Переходные характеристики Д – 242 на разных частотах

Для дальнейшего исследования необходимо проверить полученные передаточные характеристики на устойчивость. Проверку передаточных функции (таблица 5.6) проведем с помощью модифицированного критерия Найквиста, приведенного в главе 3.

В качестве регулятора для системы управления предлагается дробный ПИ_αД_β регулятор с передаточной функцией

$$W_p = \frac{T_i T_D p^{\alpha+\beta} + K T_i p^{\alpha+1}}{T_i p^{\alpha}}, \quad (5.1)$$

где K – коэффициент пропорциональности, $T_{\text{и}}$ – постоянная времени интегрирования, $T_{\text{д}}$ – постоянная времени дифференцирования, α, β – показатели интегрирования и дифференцирования соответственно.

Структура передаточных функций двигателя, представленных в таблице 5.6, имеет вид

$$W_0 = \frac{b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (5.2)$$

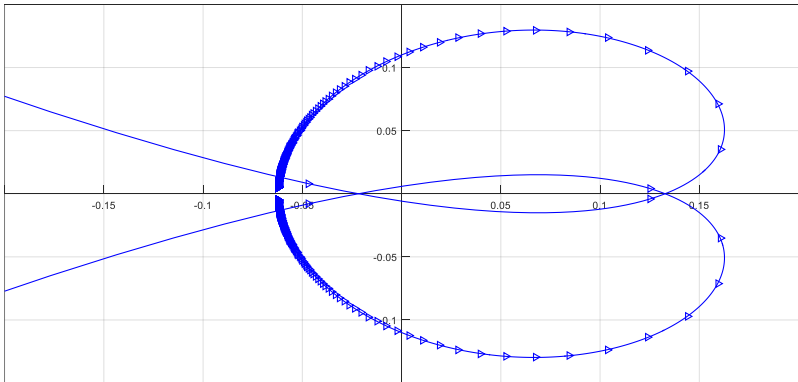
где b_1, b_0, a_2, a_1, a_0 – коэффициенты передаточной функции.

Тогда общая передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид

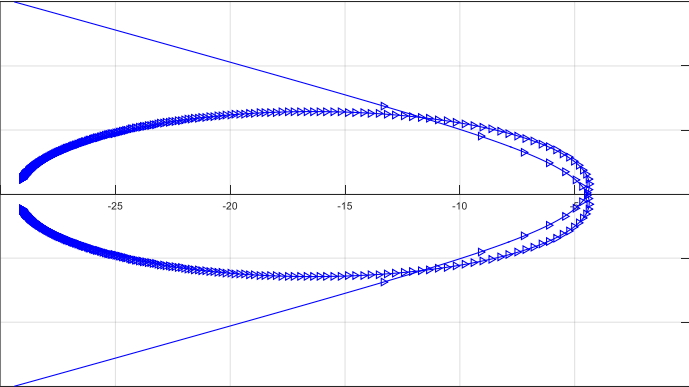
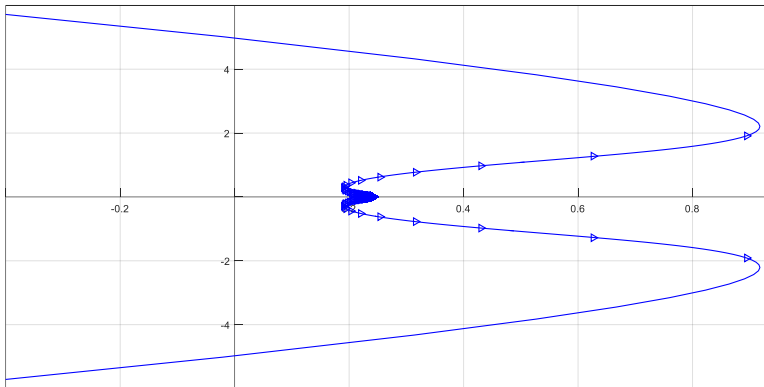
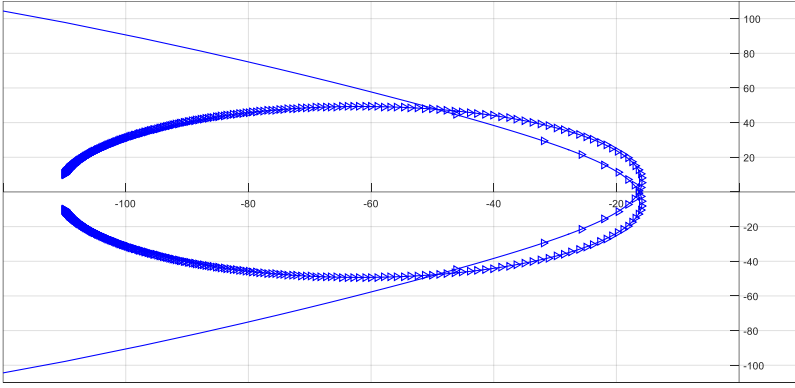
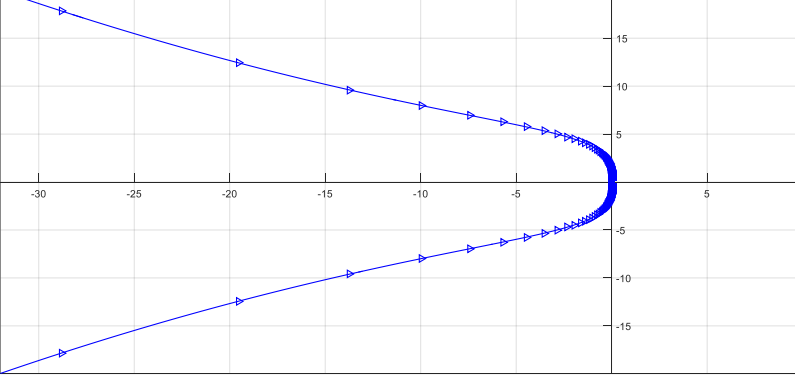
$$W_r(p) = W_p W_0 = \frac{T_{\text{и}} T_{\text{д}} b_1 p^{1+\alpha+\beta} + T_{\text{и}} T_{\text{д}} b_0 p^{\alpha+\beta} + K T_{\text{и}} b_1 p^{\alpha+1} + b_1 p + K T_{\text{и}} b_0 p^{\alpha} + b_0}{T_{\text{и}} a_2 p^{2+\alpha} + a_1 T_{\text{и}} p^{1+\alpha} + T_{\text{и}} a_0 p^{\alpha}}. \quad (5.3)$$

Используя определение модифицированного критерия Наквиста для передаточных функций и настроек регулятора при разных частотах, определим устойчивость замкнутой системы. Годографы Найквиста приведены в таблице 5.7, из которых видно, что все полученные модели систем управления дизельным двигателем – устойчивы [28, 37-41].

Таблица 5.7 – Проверка на устойчивость передаточные функции
с помощью критерия Найквиста

Уставка	График критерия Найквиста	Устойчивость
770		Устойчива

Продолжение таблицы 5.7

Уставка	График критерия Найквиста	Устойчивость
794		Устойчива
843		Устойчива
868		Устойчива
917		Устойчива

Продолжение таблицы 5.7

Уставка	График критерия Найквиста	Устойчивость
942		Устойчива
966		Устойчива

На базе полученных передаточных функций разработаем модель системы управления частотой вращения коленчатого вала двигателя от подачи топлива.

5.2.4 Исследование модели газодизельной установки с дробным ПИД регулятором

На базе полученных передаточных функций, приведенных в таблице 5.6, для проведения исследования разработана модель газодизельной установки в пакете Simulink ПО Matlab, представленная на рисунке 5.6. Модель газодизельной установки построена таким образом, что одновременно проводится моделирование сразу двух процессов, с классическим ПИД регулятором и дробным $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ регулятором.

Данный подход позволил получать и выводить на осциллограф сразу оба графика переходных процессов с оптимальными настройками дробного и классического ПИД регуляторов.

Это позволяет из полученных переходных характеристик определить качественные показатели переходных процессов, такие как: выброс частоты вращения коленчатого вала над целевым значением ($\Delta\omega, \%$), время управления t_y , время переходного процесса t_p , интегральную оценку I_0 , $\Delta\varepsilon$ - статическая ошибка, установившееся значение переходного процесса (h_∞) и провести их наглядное и численное сравнение. Также полученная модель имеет вложенный алгоритм получения интегральной оценки качества (I_0), что дает возможность оценить количество энергии, затрачиваемой за время переходного процесса классического ПИД и дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регуляторов и сравнить их количественно в процентном соотношении ($\eta, \%$) относительно интегральной оценки классического регулятора.

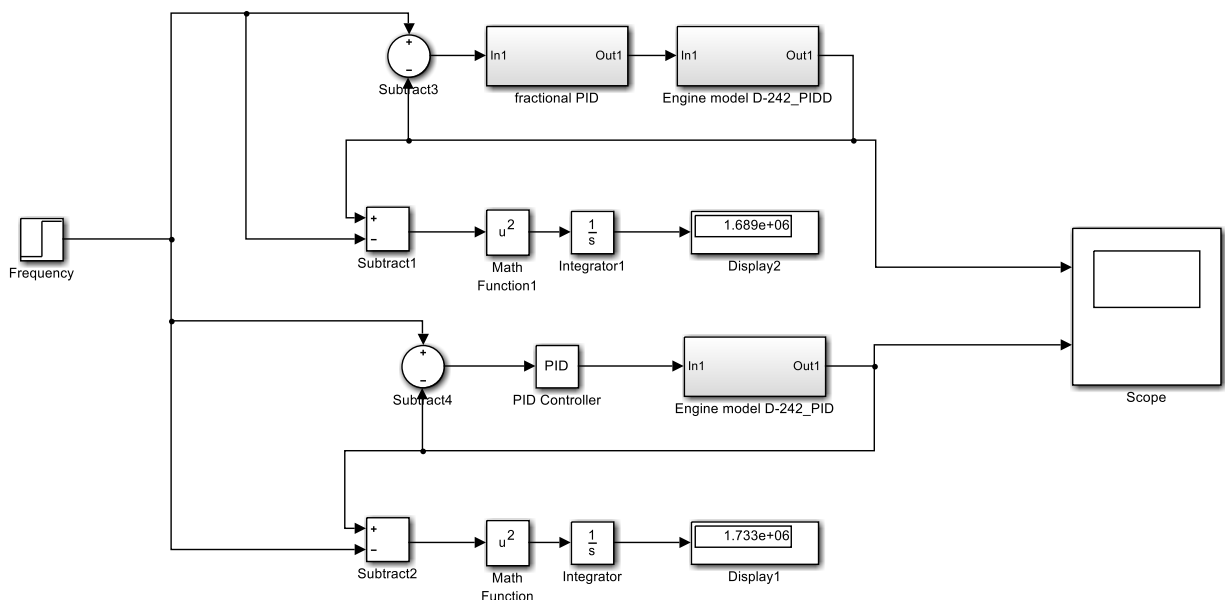
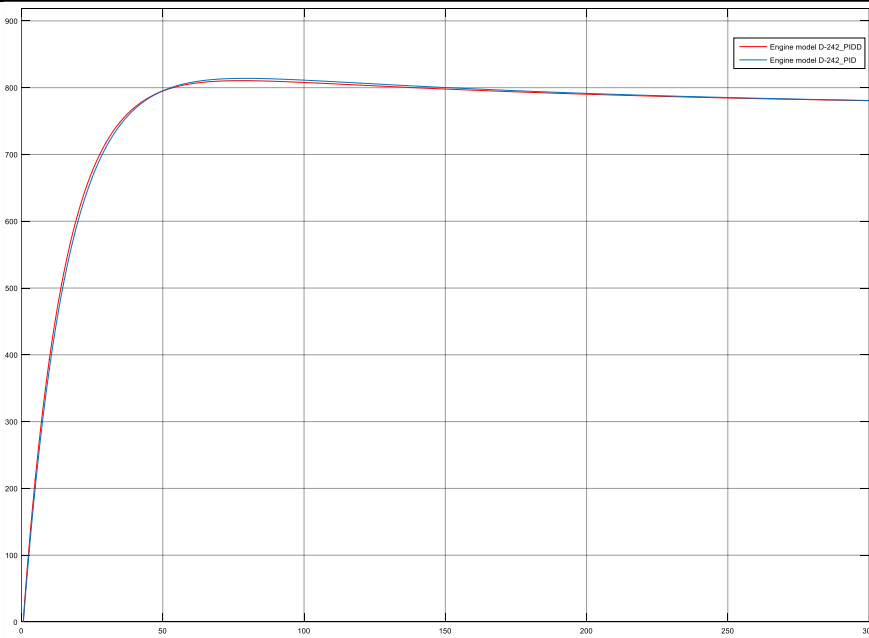


Рисунок 5.6 – Модель для исследования двигателя Д-242 с дробного и классического ПИД регулятором

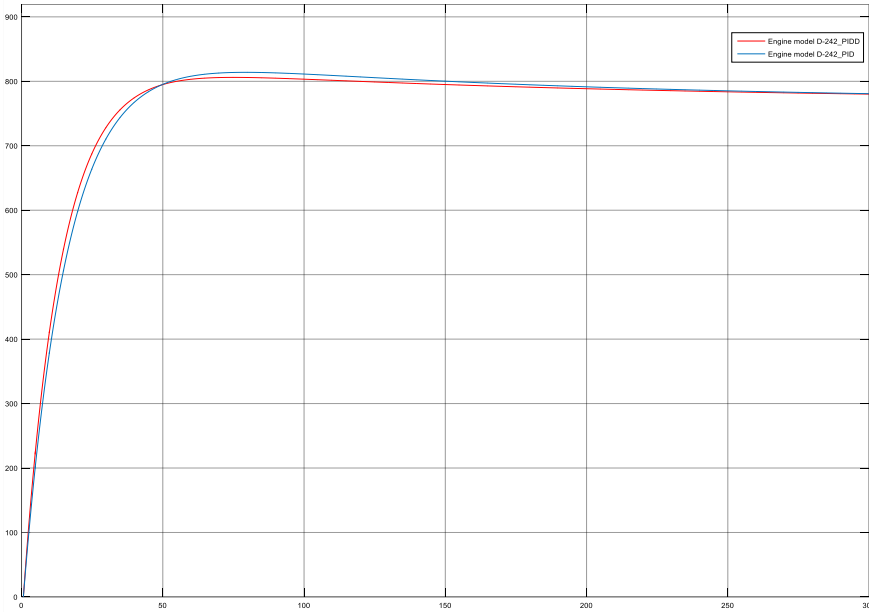
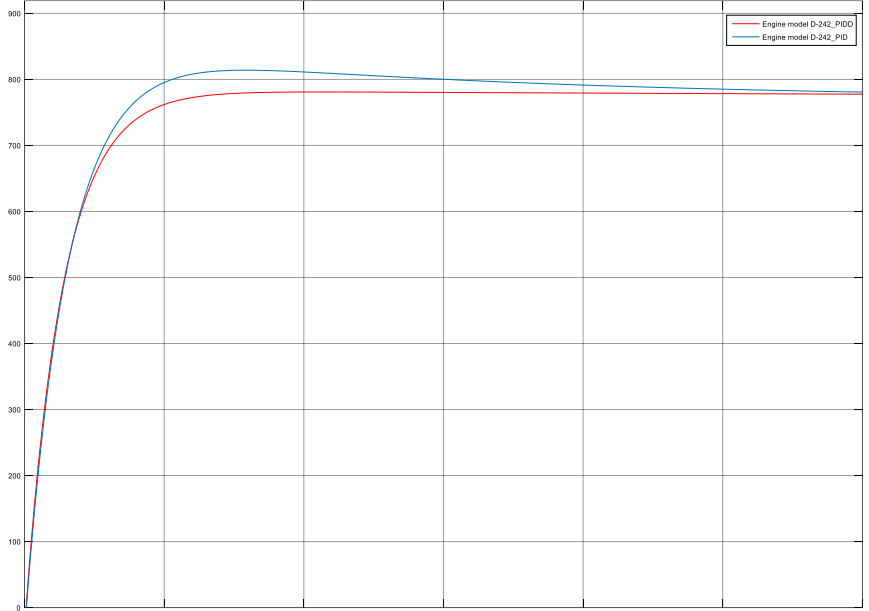
При моделировании САУ с оптимальными настройками дробного и классического ПИД регулятора получены переходные характеристики, из которых найдены следующие показатели качества переходных характеристик: выброс частоты вращения коленчатого вала над целевым значением ($\Delta w, \%$), времени управления t_y , времени переходного процесса t_p , интегральной оценке I_0 , $\Delta \varepsilon$ - статическая ошибка, установившееся значение переходного процесса (h_∞); на какой процент дробный ПИ $_{\alpha\beta}$ регулятор эффективней по сравнению с классическим ПИД регулятором на основе интегральной оценки ($\eta, \%$).

В таблице 5.8 приведены результаты исследования влияния α и β . Параметры качества переходного процесса в среднем для системы автоматического управления с дробным ПИ $_{\alpha\beta}$ регулятором $\eta, \% = 6,8$, $\sigma, \% = 3,1$, $t_p, \text{мс} = 207,5$, а для САУ с классическим ПИД регулятором $\sigma, \% = 5,6$, $t_p, \text{мс} = 310,9$, $I = 4,0002e+6$.

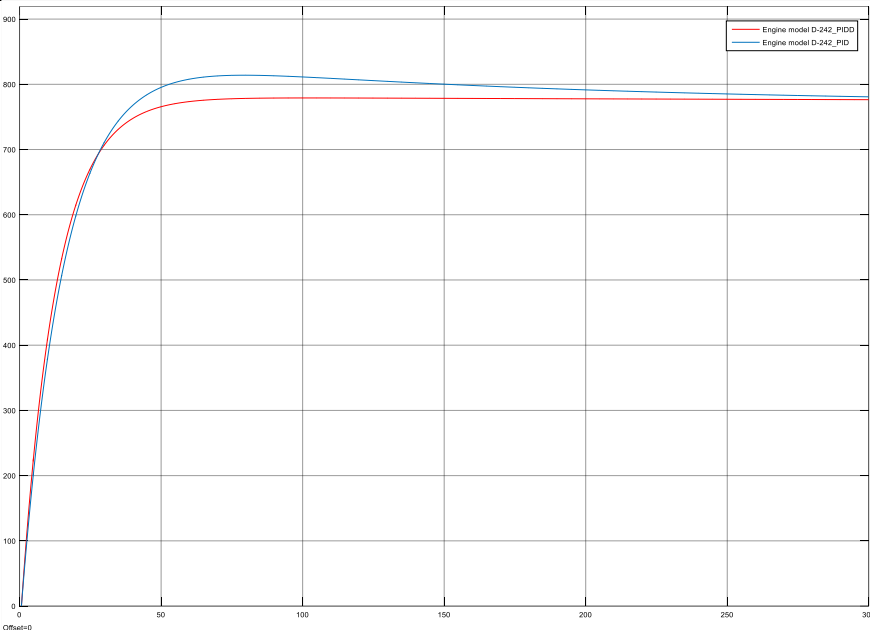
Таблица 5.8 - Исследование влияния α и β в дробном ПИ $_{\alpha\beta}$ регуляторе при частоте 770 об/мин

№	Alfa	beta	График переходных процессов						
1	0,9999	0,9999							
			ПИД	$\Delta w, \%$	h_∞	tp, мс	$\Delta \epsilon$	I0	$\eta, \%$
			ПИД	5,6	770	310,9	0	4,5277e+6	5,2
			ПиаДб	5,6	770	307	0	4,2975 e+6	

Продолжение таблицы 5.8

№	Alfa	beta	График переходных процессов						
2	0,9999	0,5							
			ПИД	$\Delta w, \%$	h_{∞}	$t_p, \text{мс}$	$\Delta \epsilon$	I0	$\eta, \%$
			ПИД	5,6	700	310,9	0	4,5277e+6	5,2
			ПИ α Д β	5,2	770	307	0	4,2975e+6	
3	0,5	0,9999							
			ПИД	$\Delta w, \%$	h_{∞}	$t_p, \text{мс}$	$\Delta \epsilon$	I0	$\eta, \%$
			ПИД	5,6	770	310,9	0	4,5277e+6	5,6
			ПИ α Д β	1,4	770,7	169,3	0,7	4,2775e+6	

Продолжение таблицы 5.8

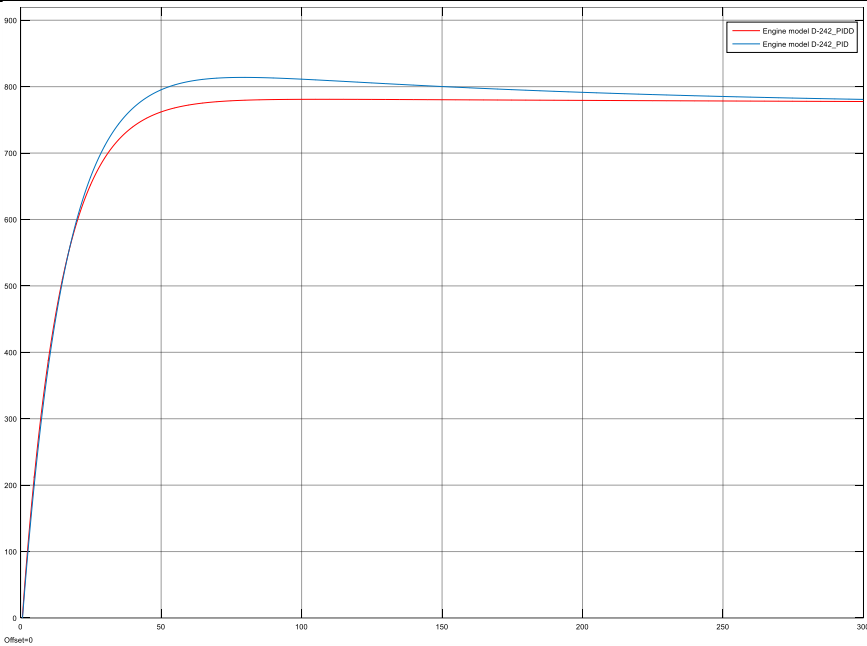
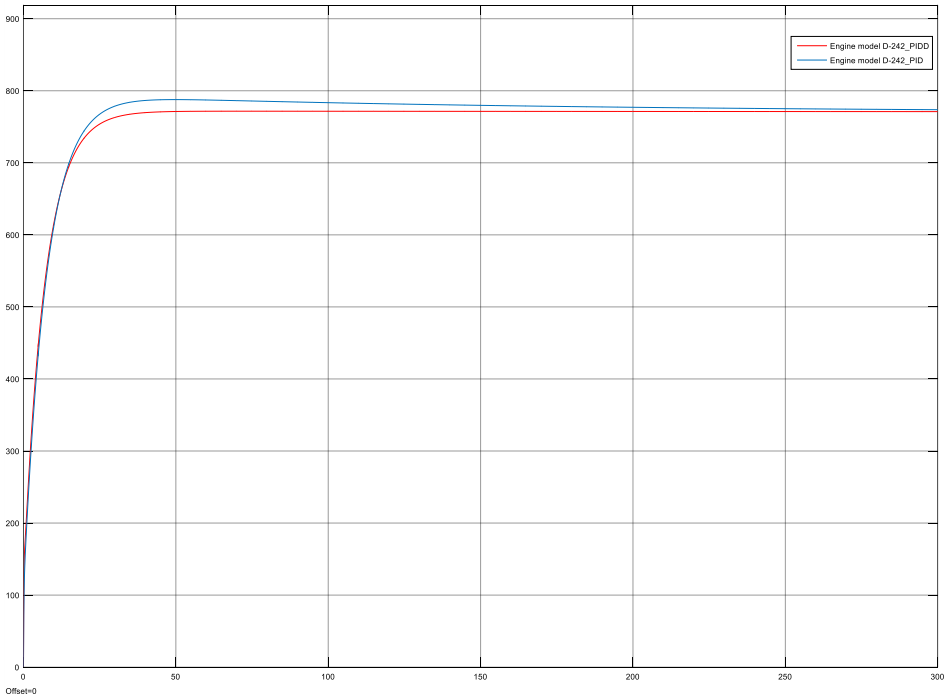
№	Alfa	beta	График переходных процессов						
4	0,001	0,001							
			ПИД	$\Delta w, \%$	h_{∞}	$t_p, \text{мс}$	$\Delta \varepsilon$	I0	$\eta, \%$
			ПИД	5,6	770	310,9	0	4,5277e+6	11,5
			ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$	0	770	45,9	0	4,0002e+6	

В результате моделирования видно очевидное преимущество модели с дробным ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятором по времени переходного процесса на 33 % и интегральной оценки качества в среднем на 11,5 % по сравнению с моделью классического ПИД регулятора [29-36].

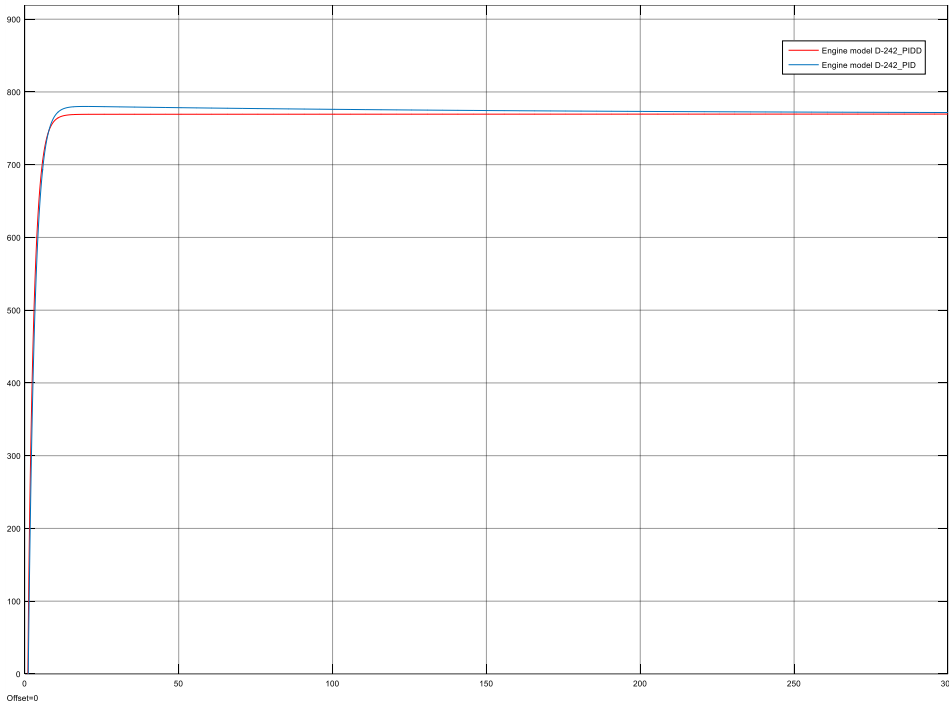
Из проведенного исследования видно – при использовании дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятора разорвана взаимосвязь между перерегулированием и скоростью регулирования.

В таблице 5.9 показаны результаты исследования дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятора на разных передаточных функциях при одинаковых коэффициентах $\alpha=0,5$ и $\beta=0,9999$ и одинаковых основных коэффициентов классического ПИД и дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятора. $K_p = 4$, $T_i = 0.0250$, $T_d = 0,5$ где K_p – пропорциональный коэффициент, T_i – постоянная интегрирования, T_d – постоянная дифференцирования.

Таблица 5.9 – Исследование дробного ПИ α Д β регулятора
на разных передаточных функциях двигателя

№	Уставка	График переходных процессов						
1	770							
		ПИД	$\Delta w, \%$	h_{∞}	$t_p, \text{мс}$	$\Delta \epsilon$	I0	$\eta, \%$
		ПИД	5,6	770	310,9	0	4,5277e+6	5,6
		ПИ α Д β	1,4	770,7	169,3	0,7	4,2775e+6	
2	843							
		ПИД	$\Delta w, \%$	h_{∞}	$t_p, \text{мс}$	$\Delta \epsilon$	I0	$\eta, \%$
		ПИД	2,3	843	159,5	0	1,7606 e+6	8,1
		ПИ α Д β	0	843	28,5	0	1,9155 e+6	

Продолжение таблицы 5.9

№	Уставка	График переходных процессов						
3	966							
		ПИД	$\Delta w, \%$	h_{∞}	$t_p, \text{мс}$	$\Delta \epsilon$	I0	$\eta, \%$
		ПИД	1,3	966	58,5	0	2,6581 e+6	2,6
		ПИ α Д β	0	966	10,1	0	2,7278 e+6	

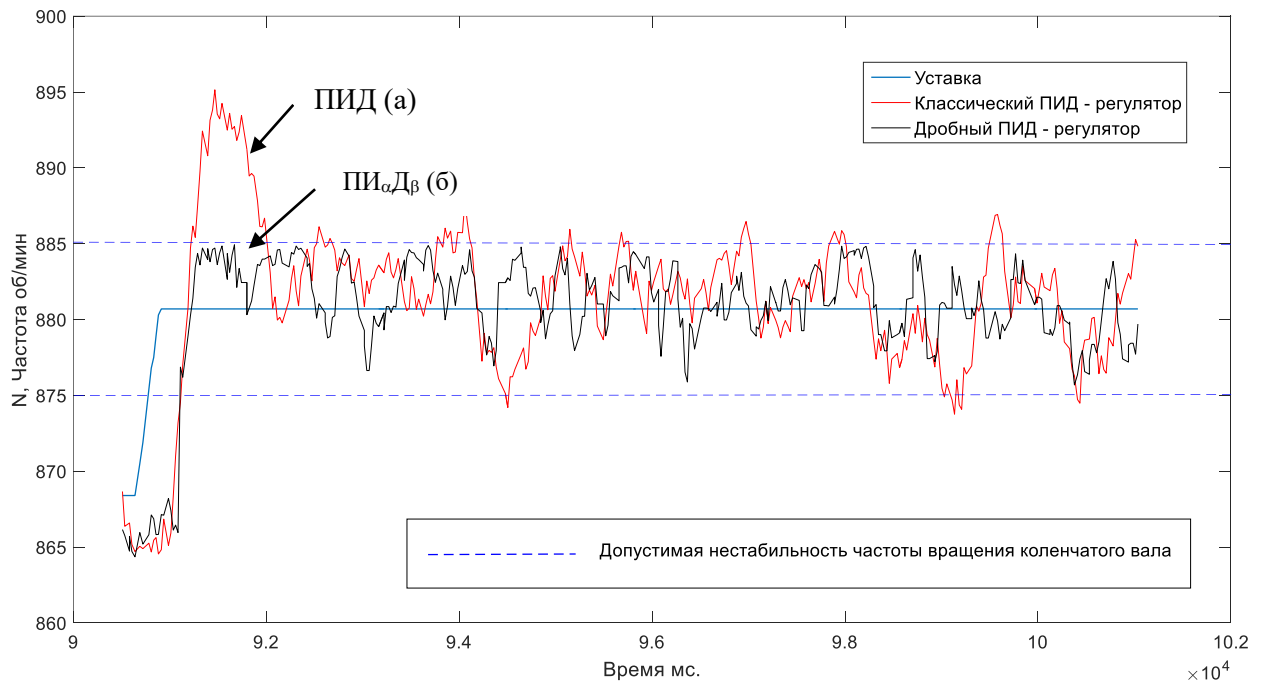
В результате проведенного исследования модели газодизельной установки с дробным ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятором и классическим ПИД регулятором выявлено, что ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятор более эффективный.

5.2.5 Использование дробного пропорционального интегрального дифференциального регулятора на газодизельной установке

Как видно из таблицы 5.10 в результате исследования определен расход топлива (Q) с классическим ПИД регулятором и дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятором, экономию по топливу составила 7,02 % при применении дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятором.

Таблица 5.10 – Результаты исследования

	K_P	T_I	T_D	α	β	$\Delta w, \%$	t_p, c	$Q, мЗ/ч$
ПИД	2	0,01	0,005	—	—	8,3	2,46	0.0057
ПИ$_{\alpha}$Д$_{\beta}$	2	0,01	0,005	0,43	0,68	3,4	2,31	0.0053

Рисунок 5.7 – Результат исследования эффективности для ПИД (а) и ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ (б) регуляторов

Таким образом, выявлено преимущество дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятора по времени переходного процесса и перерегулированию по сравнению с классическим ПИД регулятором. За счет разрыва взаимосвязи между перерегулированием и временем переходного процесса реализация алгоритма дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ управления позволяет обеспечить экономию топлива. Основываясь на полученных результатах (см. таблицу 5.10), сделан вывод о том, что применение дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятора обеспечивает 1 – 2 класс точности регулирования по частоте вращения в соответствии с ГОСТ 55231-2012.

В результате режимометрирования дизеля модели Д50 (6 ЧН 31,8/33) маневрового тепловоза типа ТЭ в реальных эксплуатационных условиях установлено, что на режимы холостого хода приходится около 32 % всего времени эксплуатации, на неустойчивые режимы 49 %, а 19 % времени

затрачивается на стоянку тепловоза с заглушенным двигателем. Это значит, что большую часть времени двигатель работает на неустановившихся режимах. Проведенные расчеты показали, что при реализации предложенной системы управления двигателями внутреннего сгорания тепловозов, работающих на смесевом топливе, годовой экономический эффект на один тепловоз, составит 25 200 рублей. Согласно инвентаризации, в парке ОАО «РЖД» содержится 536 пассажирских тепловозов, 3 750 грузовых тепловозов и 5 989 маневровых тепловозов. В результате ожидаемая экономия от предлагаемой модернизации системы управления составляет 258 930 000 рублей в год.

5.3 Выводы по главе 5

1. Приведен эксперимент на газодизельной установке на базе двигателя внутреннего сгорания Д–242, получены выходные параметры работы двигателя, мгновенный расход топлива, частота вращения коленчатого вала.

2. Проведено исследование экспериментальных данных на их адекватность, выявлено, что на основании проведенного исследования экспериментальных данных расхода топлива и экспериментальных данных частоты вращения коленчатого вала можно сделать вывод, что полученные данные соответствуют нормальному распределению и проводить дополнительные исследования нет необходимости.

3. На основании экспериментальных данных получены передаточные функции объекта управления и проведена их проверка на устойчивость с помощью модифицированного критерия Найквиста.

4. Проведено исследование модели газодизельной установки с дробным и классическим ПИД регулятором. В результате моделирования видно очевидное преимущество модели с дробным ПИ_αД_β регулятором по времени переходного процесса на 33,3 % и интегральной оценки качества в среднем на 11,5 % по сравнению с моделью классического ПИД регулятора.

5. Результаты исследования системы автоматического управления газодизельным двигателем, реализующей дробный $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ регулятор, в ходе имитационного моделирования и на базе лабораторного стенда показали преимущество по расходу топлива до 7,02 % при повышении маневренности и надежности. Интегральная оценка и значение перерегулирования при применении дробного $\text{ПИ}_{\alpha}\text{Д}_{\beta}$ регулятора дает качество регулирования по частоте вращения в соответствии с ГОСТ 55231-2012 1–2 класса точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Исследованы особенности реализации систем управления двигателями силовых установок тепловозов, работающих на смеси дизельного топлива и природного газа. Для элементов и устройств систем управления, описываемых дифференциальными уравнениями дробного порядка, адаптированы частотные критерии устойчивости Михайлова и Найквиста, в результате чего впервые получена возможность производить анализ устойчивости дробных систем управления без нахождения корней характеристических уравнений.

2. Разработан цифровой рекуррентный алгоритм дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза, отличающийся дополнительными настроечными коэффициентами, реализация которого позволяет, в отличие от классических ПИД регуляторов, не допустить увеличения выброса частоты вращения коленчатого вала над целевым значением при сокращении времени переходного процесса.

3. Впервые предложено устройство диагностики закоксованности выпускных окон более 20 % по косвенным признакам расхода топлива, поступления воздуха и колебания температуры выхлопных газов для корректировки параметров системы управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза.

4. Разработана структура системы автоматизации управления газодизельным двигателем внутреннего сгорания силовой установки тепловоза, что позволило реализовать управление подачей топлива на основе дробного $\text{ПИ}_{\alpha\text{Д}\beta}$ алгоритма управления и результатов диагностики закоксованности выпускных окон, и обеспечить тем самым преимущество по технико-эксплуатационным показателям надежности и экономичности.

5. Результаты исследования цифровой системы автоматизации управления газодизельным силовой установки тепловоза, реализующей алгоритм дробного

ПИ_αД_β управления, в ходе имитационного моделирования показали в среднем преимущество по выбросу частоты вращения коленчатого вала над целевым значением на 45,5%, времени переходного процесса на 33,3%, интегральной оценке качества на 6,8% по сравнению с классическим ПИД регулятором. Испытания на базе лабораторного стенда показали, что при использовании классического ПИД регулятора расход топлива составил 0,0057 м³/ч, а при использовании дробного ПИ_αД_β регулятора 0,0053 м³/ч, что дает экономию топлива до 7,02 % при повышении маневренности и надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andreassi, L. Analysis of combustion instability phenomena in a CNG-fueled heavy-duty turbocharged engine [Tekst] / L. Andreassi, S. Cordiner, V. Rocco // SAE Paper. Orlando. – 2001. – №2001-01-1907. – W.P.
2. Ayala, R. Introduction to the Concepts and Applications of Fractional and Variable Order Differential Calculus [Tekst] / R. Ayala, A. Tuesta. URL: <http://arxiv.org>
3. Avsievich V. Fractional controlling system of an autonomous locomotive multifuel engine / A. Ivaschenko, V. Avsievich, A. Avsievich // 2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems, Tampere 2020, pp. 425 – 428
4. Avsievich V. Fractional control system simulation to modernize a locomotive dual-fuel engine / A. Ivaschenko, V. Avsievich, A. Avsievich // Proceedings of the 34th Annual European Simulation and Modelling Conference 2020, Toulouse, France, October 21 – 23, 2020. – pp. 242 – 244
5. Baulch, D.L. Compilation of rate data for combustion modeling [Tekst] / D.L. Baulch, C.I. Cobos, A.M. Cox et al. // Supplement I.J. Phys. Chem. – 1991. – Ref. Data 22, № 847. – P. 226.
6. Control quality enhancement by fractional order controllers Acta Montanistica [Tekst] / Slovaca Rocnik, Ivo Petras, Lubomir Dorcak, Imrich Kostial. – 1998. – P. 143–148.
7. Dietrich, W.R. Pollutant Reduction on Stationary S.I. Engines from Motoren Werke Mannheim for Operation on Natural Gas Applying the Lean - Burn Principle MTZ. Motortechnische Zeitschrift [Tekst] / Dietrich W.R., Grundman W., Langeloth Gothenburg – 1986. – №47. – 5s.
8. Dietrich, W.R. Die Gemischbildung bei Gas- und Dieselmotoren sowie ihr Einfluss auf die Schadstoffemissionen Rückblick und Ausblick [Tekst] / W. R. Dietrich // MTZ. – 1999. – Teil 1. – S. 28-38 ; teil 2 – S. 126–134.
9. Edited by Roy, G.D., Combustion and Atmospheric Pollution [Tekst] / G.D. Edited by Roy, S.M. Frolov, A.M. Starik. – Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2003. – 680p.

10. Farid Hany. Discrete-Time Fractional Differentiation from Integer Derivatives [Tekst] / Farid Hany // Computer Science. – Dartmouth College, 2004. – 528 p.
11. Golub, A. Modeling NO_x Formation in a Small Bore, Lean Natural Gas, Spark Ignition Engine [Tekst] / A. Golub // SAE Paper. Toronto. – 1999. – №1999-01-3480. – W.P.
12. Jun-Yi Cao. Design of Fractional Order Controller Based on Particle Swarm Optimization [Tekst] / Jun-Yi Cao, Bing-Gang Cao // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2006. – № 4. – V. 6. – P. 775–781.
13. Kleinschmidt, W. Einfl ussparameter auf den Wirkungsgrad und auf die NO-Emission von Aufgeladenen Dieselmotoren [Tekst] / W. Kleinschmidt // 4.Aufl adetechnische Konferenz.: VDI Bericht. – Dusseldorf, 1991. – № 910. – 28 s.
14. Matlab 6.5 SP1/7+Simulink 5/6 в математике и моделировании [Текст]. Серия «Библиотека профессионала». – Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.
15. Necati Ozdemir. Fractional Controller For Fractionalpi Orderline Arsystems With Input Hysteresis [Tekst] / Necati Ozdemir, Beyza Billur Iskender . – Enoc : Saint Petersburg, 2008.
16. Oldham Keith, B. The Fractional Calculus (Theory and Applications of Differentiation and integration to Arbitrary Order) [Tekst] / B. Oldham Keith, Jerome Spanier. – London : Academic Press, 1974. – 233 p.
17. Podlubny, I. Realization of fractional order controllers [Tekst] / Igor Podlubny, Ivo Petras, Blas M. Vinagre, YangQuan Chen, Paul O’Leary and Lubomir Dorcak // Acta Montanistica Slovaca Rocnik. – 2003. – V. 4.
18. Poläsek, M. Application of advanced simulation methods and their combination with experiments to modelling of hydrogen-fueled engine emission potentials [Tekst] / M. Poläsek, J. Macek, M. Takäts // SAE Paper. Detroit. –2002. – № 2002-01-0373. – W.P.
19. Ramiro, S. Implementation of Discrete-Time Fractional-Order Controllers based on LS Approximations [Tekst] / S. Ramiro, J. A. Barbosa // Acta Polytechnica Hungarica. – 2006. – V. 4.

20. Whitehouse, H. D. Advances in British dual fuel and gas engines [Текст] / H.D. Whitehouse // Diesel Eng. and Esers Assoc. 1973. – № 353. – Р. 1–11.
21. Абдулаев, Н. Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов [Текст] / Н. Д. Абдулаев, Ю. П. Петров. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
22. Авсиевич, А.В. Применение дробного ПИД регулятора в системе автоматического управления нагревательной печи [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник транспорта Поволжья. – 2011. – № 5. – С. 47–51.
23. Авсиевич, А.В. Алгоритм численного дробного ПИД-регулирования [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Сборник трудов Четвертой международной конференция по проблемам управления (Москва, 26 – 30 января, 2009). – Москва, 2009. – С. 164–168.
24. Авсиевич, А.В. Звенья дробного порядка и их динамические характеристики [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник транспорта Поволжья. – 2010. – № 2(22). – С. 72–79.
25. Авсиевич, А.В. Звенья дробного порядка и их динамические характеристики [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник транспорта Поволжья. – 2010. – №2(22). – С. 72–79.
26. Авсиевич, А.В. Исследование одного вида однородных дифференциальных уравнений дробного порядка [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Сборник статей Третьей международной конференции по проблемам управления (Москва, 20-22 июня, 2006 г.). – Москва, 2006. – С. 84–88.
27. Авсиевич, А.В. Исследование переходных характеристик ПИД законов регулирования дробного порядка. Т. 1 [Текст] / А.В. Авсиевич, Е.Ф. Салюков, А.Л. Чернигов. – Братск : ГОУ ВПО «БрГТУ», 2004. – С. 44–47.
28. Авсиевич, А.В. Критерии устойчивости систем автоматического регулирования дробного порядка [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник транспорта Поволжья. – 2008. – № 2. – С. 66–73.
29. Авсиевич, А.В. Моделирование систем автоматического управления с дробным ПИД-регулятором [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – 2010. – 2(26). – С. 6–12.

30. Авсиевич, А.В. Моделирование систем автоматического управления с дробным ПИД-регулятором [Текст] / А.В. Авсиевич // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – 2010. – Т. 26. – С. 6–12.
31. Авсиевич, А.В. Моделирование систем автоматического управления с ПИД регуляторами дробного порядка [Текст] / А.В.Авсиевич, Е.Ф. Салюков, В.В. Авсиевич // Математика. Экономика. Образование: сборник трудов Тринадцатой международной конференции (Дубна, 23-28 января, 2006). – Дубна , 2006. – С. 110–111.
32. Авсиевич, А.В. Преобразование Лапласа функции Миттаг-Леффлера и связанных с ней функций [Текст] / А.В. Авсиевич // Вестник СамГТУ. Серия «Математические науки». – 2009. – № 2(10). – С. 15–20.
33. Авсиевич, А.В. Устойчивость апериодического звена не целого порядка [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука: материалы 63-й научно-технической конференции по итогам НИР за 2005 г. (Самара, 2006 г.). – Самара, 2006. – С. 80.
34. Авсиевич, А.В. Устойчивость одного вида однородных дифференциальных уравнений дробного порядка [Текст] /А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. – 2006. – Вып.6. – С. 49–53.
35. Авсиевич, А.В. Устойчивость одного вида однородных дифференциальных уравнений дробного порядка [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. – 2006. – Вып. 6. – С. 49–53.
36. Авсиевич, А.В. Устойчивость САР с дифференциальными уравнениями дробного порядка [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Идентификация систем и задач управления: труды VI Международной конф. SICPRO '07 (Москва, 1 февраля, 2007 г.). – С. 556–564.
37. Авсиевич, А.В. Частотные критерии Михайлова и Найквиста для моделей систем автоматического управления с дробным порядком [Текст] / А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич // Вестник транспорта Поволжья. – 2010. – № 1(21). – С. 35–41.
38. Авсиевич, А.В. Частотный критерий устойчивости Михайлова применительно к САУ дробного порядка [Текст] / А.В. Авсиевич, Е.Н. Авсиевич,

- В.В. Авсиевич // Дни студенческой науки: сборник научных трудов студентов и аспирантов. Вып. 7 (Самара, 5-6 апреля, 2006 г.). – СамГУПС, 2006. – С. 120–121.
39. Авсиевич А.В., Авсиевич В.В., Иващенко А.В. Разработка рекуррентных алгоритмов управления газодизельным двигателем силовой установки магистрального тепловоза // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 3. С. 12-21.
40. Авсиевич В. В. Разработка имитационной модели управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 4. С. 7-14
41. Авсиевич А. В., Авсиевич В. В., Иващенко А. В. Усовершенствование цифровой системы управления газодизелем силовой установки тепловоза // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 4. С. 24-31.
42. Автоматизированное управление [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/17.html> (дата обращения 16.03.2009).
43. Алиев, Р.А. Управление производством при нечеткой исходной информации [Текст] / Р.А.Алиев, А.Э. Церковный, Г.А. Мамедова. – Москва : Энергоиздат, 1991. – 234 с.
44. Бейтман, Г. Высшие трансцендентные функции. Т. 3 [Текст] / Г. Бейтман, А. Эрдейи . – Москва : Наука, 1965. – 300 с.
45. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В. А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: НАУКА, 1975. – 768 с.
46. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – 13-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1986. – 544 с.
47. Брук, М. А. Работа дизеля в нестандартных условиях [Текст] / М. А. Брук, А. С. Виксман, Г. Х. Левин. – Л.: Машиностроение, 1981. – 208 с.
48. Булыгин, Ю.И. Экспериментальное и компьютерное исследование рабочего процесса и токсичности тепловозных двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Ю.И. Булыгин. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 145 с.

49. Бурцев, Н.В. Разработка системы управления газовым двигателем внутреннего сгорания на основе алгоритмов адаптивного управления [Текст] / Н.В. Бурцев. – Рыбинск, 2010. – 182 с.
50. Бутурлин, П. Я. Анализ влияния закоксованности органов газообмена на рабочий процесс и токсичность двухтактного форсированного высокооборотного транспортного дизеля [Текст] : дис. ... – Харьков, 1995.
51. Влияние насыщения дизельного топлива метаном на эксплуатационные показатели тепловозных дизелей [Текст] / Д.Я. Носырев, А.В. Муратов, Л.С. Курманова и др. // Вестник транспорта Поволжья. –2016. –№ 6 (60). – С. 25–28.
52. Вульвет, Д. Датчики в цифровых системах [Текст] / Д. Вульвет; пер. с англ. В. В. Малова; под ред. А. С. Ярошенко. – М.: Энергоиздат, 1981. – 199 с.
53. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1984.
54. Губертус, Г. Диагностика дизельных двигателей [Текст] / Г. Губертус ; пер. с немецкого Ю.Г. Грудского. – М.: Изд-во «За рулем», 2004. – 176 с.
55. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 1 [Текст] / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 86–97.
56. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Часть 1 [Текст] / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74.
57. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Часть 2 [Текст] / В.В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 78–88.
58. Джрбашян, М.М. Интегральные преобразования и представления функций в комплексной области [Текст] / М.М. Джрбашян. – Москва : Наука, 1966. – 672 с.
59. Дизели. Справочник [Текст] / под редакцией В.А. Ваншейдта. – Л. : Машиностроение, 1977. – 480 с.

60. Еременко, Л.И. Опыт использования смесового топлива в сельскохозяйственных районах Тюменской области [Текст] / Л.И. Еременко // НТС ОАО «Газпром». – М., 2006. – С. 20–21.
61. Ефимов, Д.В. Робастное и адаптивное управление нелинейными колебаниями [Текст] / Д.В. Ефимов. – СПб.: Наука, 2005. – 314 с.
62. Жмудь, В.А. Дробно-степенные ПИД-регуляторы и пути их упрощения с повышением эффективности управления [Текст] / В.А. Жмудь, А.Н. Заворин // Автоматика и программная инженерия – 2013. № 1 (3). С. 30–36. ФБГОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
63. Жмудь, В.А. О нецелесообразности применения дробно-степенных ПИД-регуляторов [Текст] / В.А. Жмудь, А.Н. Заворин // Автоматика и программная инженерия – 2013. – №2(4).– С. 7–21.
64. Зайцев, Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования [Текст] / Г.Ф. Зайцев. – Киев: Выща школа, 1988. – 431 с.
65. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем [Текст] / Н.Н. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1973. – 606 с.
66. Изерман, Р. Цифровые системы управления [Текст] / Р. Изерман.; пер. с англ. С. П. Забродина и др.; под ред. И. М. Макарова. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
67. Инновационные энергосберегающие технологии в локомотивном хозяйстве [Текст] : монография / Д.Я Носырев., Ю.Е. Просвилов, А.В. Муратов и др. – Самара : СамГУПС, 2012. – 123 с.
68. Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях [Текст] / В.А. Марков С.Н. Девянин, С.Г. Семенов , и др.: монография. – М.: ООО НИЦ «Инженер» (Союз НИО), ООО «Онико-М», 2011. – 536 с.
69. К вопросу применения когенерационных энергетических установок на железнодорожном транспорте [Текст] / Д.Я Носырев., А.В. Муратов, Л.С. Курманова и др. // Локомотивы. Газомоторное топливо (Проблемы. Решения. Перспективы). Материалы I Международной научно-практической конференции. – Самара. – 2016. – С. 101–104.

70. Кавтарадзе, Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород [Текст] / Р.З. Кавтарадзе. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 238 с.
71. Казбеков, К.К. Дробные дифференциальные формы в евклидовом пространстве [Текст] / К.К. Казбеков // Владикавказский математический журнал. – 2005 – Вып.2. – Т. VII. – С. 41–54.
72. Камалтдинов, В.Г. Влияние состава двухкомпонентного топлива на процесс сгорания в двигателе с объемным самовоспламенением от сжатия [Текст] / В.Г. Камалтдинов, Е.В. Абелиович // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. – 2008. – № 23(123). – С.46–53.
73. Килбас, А.А. Теория и приложения дифференциальных уравнений дробного порядка [Текст] / А.А. Килбас. – Минск : Беларусский государственный университет, 2009. – 121 с.
74. Ким, Д.П. Теория автоматического управления [Текст]. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 440 с.
75. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. [Текст] / Д.П. Ким. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.
76. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Т1. Линейные системы [Текст] / Д.П. Ким. – 2-е изд., исп. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 288 с.
77. Ключев, А. С. Оптимизация автоматических систем управления по быстродействию [Текст] / А. С. Ключев, А. А. Колесников. – М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.
78. Коверда, В.П. Критическое поведение и $1/f$ –шум при пересечении двух фазовых переходов в сосредоточенных системах [Текст] / В.П. Коверда, В.Е. Скоков // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – С. 1–7.
79. Контактные и бесконтактные электрические аппараты автоматики и управления [Текст] : сб. науч. тр. / Моск. энерг. ин-т. – М.: МЭИ, 1988. – 109 с.

80. Коссов, Е.Е. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов [Текст] / Е.Е. Коссов, С.И. Сухопаров – М.: Интекст, Труды ВНИИЖТа, 1999. – 183 с.
81. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика [Текст] / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с.
82. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателях внутреннего сгорания [Текст] / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 416 с.
83. Крутов, В. И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект [Текст] / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1978. – 471 с.
84. Крутов, В. И. Сборник задач по автоматическому регулированию двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В. И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1972.
85. Курманова, Л. С. Повышение эффективности работы тепловозов путем применения газомоторного топлива [Текст] / Л. С. Курманова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – №3(31). – С. 22 – 31.
86. Курманова, Л.С., Способы организации рабочего цикла в тепловых двигателях для работы на смеси дизельного топлива и природного газа [Текст] / Л.С. Курманова // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 6(72). – С. 113–120.
87. Ланчуковский, В. И. Автоматизированные системы управления судовыми дизельными и газотурбинными установками [Текст] / В. И. Ланчуковский, А. В.
88. Лиханов В.А. Природный газ как моторное топливо для тракторных дизелей [Текст] / В.А. Лиханов. – Киров: ГИПП «Вятка», 2002. – 277 с.
89. Лукас, В.А. Теория управления техническими системами [Текст] / В.А. Лукас. – Екатеринбург : УГГГА, 2002. – 675 с.
90. Луков, Н. М. Автоматические системы управления и регулирования тепловозов [Текст] / Н. М. Луков. – М.: МИИТ, 1983. – 144 с.

91. Луков, Н. М. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры теплоносителей силовых установок локомотивов [Текст] : дис. ... д-ра. техн. наук / Н. М. Луков. – М., 1978. – 395 с.
92. Марков, В.А. Топливоподача многотопливных и газодизельных двигателей [Текст] / Марков В.А., Козлов С.И. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 296 с.
93. Марков, В.А. Токсичность отработавших газов дизелей [Текст] / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 376 с.
94. Математические основы теории автоматического регулирования. Т.2 [Текст] / Иванов В.А. [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1977. – 518с.
95. Математическое моделирование перемешивающего устройства для работы автономных локомотивов на смесевом топливе [Текст] / Д.Я. Носырев, А.Ю. Балакин, Л.С. Курманова и др. // Международная научно-техническая конференция «Двигатель-2018». Тезисы докладов / сост. В.А. Зенкин, Л.Л. Мягков – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – С. 48–49.
96. Медведев, В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 [Текст] / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – Москва : ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
97. Мелихов, А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой [Текст] / А.Н. Мелихов. – Москва : Наука, 1990. – 272 с.
98. Мероприятия по повышению экологической безопасности тепловозов [Текст] / Д.Я. Носырев и др. // Проблемы безопасности на транспорте Материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году науки: в 2 частях ; под общей редакцией Ю. И. Кулаженко. – Гомель. 2017. – С. 243–245.
99. Микропроцессорное управление и моделирование процессов на транспорте, в гибком автоматизированном производстве и в строительстве [Текст] : сб. науч. тр. / Моск. автомоб.-дорож. ин-т. – М.: МАДИ, 1987. – 120 с.

100. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы [Текст] : учеб. пособие / В. В. Солодовников, В. Г. Коньков, В. А. Суханов и др.; под ред. В. В. Солодовникова. – М.: Высш. шк., 1991. – 255 с.
101. Микропроцессорные контролеры для регулирования и управления технологическими процессами [Текст] : сб. науч. тр. / Гос. НИИ теплоэнергет. приборостроения. – М.: НИИтеплоприбор, 1989. – 63 с.
102. Михайленко, В.С. Методы настройки нечеткого адаптивного ПИД-регулятора [Текст] / В.С. Михайленко, В.Ф. Ложечников // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2009. – №2(24). – С.174–179.
103. Наладка автоматических систем и устройств управления технологическими процессами: справочное пособие [Текст] / под ред. А.С. Ключева. – Москва : МАКС Пресс, 2009. – 688 с.
104. Научные основы контроля и диагностирования тепловозных дизелей по параметрам рабочих процессов [Текст] / Д.Я. Носырев и др. – Самара: СамИИТ, 2001. – 174 с.
105. Нахушев, А.М.. Дробное исчисление и его применение [Текст] / А.М. Нахушев. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 272 с.
106. Нигматулин, Р.Р. Дробный интеграл и его физическая интерпретация [Текст] / р.Р. Нигматулин. – Москва : ТМФ, 1992. – 405 с.
107. Новичков, М. Ю., Совершенствование рабочего процесса газодизеля [Текст] : автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / М.Ю. Новичков. – Санкт-Петербург: ГОУ СПбГПУ, 2004. – 20 с.
108. Носырев Д. Я. Разработка диагностической модели оценки закоксованности выпускных окон по рабочим параметрам тепловозного дизеля [Текст] / Д. Я. Носырев, А.В. Авсиевич, А.Г. Старикова // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – №6 (60). – С. 28–36.
109. Носырев, Д.Я. Проблемы и перспективы эксплуатации газотепловозов на Куйбышевской железной дороге – филиале ОАО «РЖД» [Текст] / Д.Я. Носырев,

- А.В. Муратов, Л.С. Курманова // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – №5. – С. 20–23.
110. Носырев, Д.Я., Перспективы и проблемы применения водорода в локомотивных энергетических установках [Текст] : монография / Д.Я. Носырев, А.В. Муратов, С.А. Петухов. – Самара : СамГУПС, 2014. – 112 с.
111. Носырев, Д.Я., Экспериментальная оценка влияния природного газа на работу дизелей тепловозов [Текст] / Д.Я. Носырев, А.В. Муратов, Л.С. Курманова // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов. Материалы третьей Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Омский государственный университет путей сообщения. – 2016. – С. 124–132.
112. Носырев, Д.Я., Перспективы и проблемы применения альтернативных видов топлива в локомотивных энергетических установках [Текст] : монография / Д.Я. Носырев, А.Д. Росляков, А.В. Муратов. – Самара : СамГУПС, 2009. – 117 с.
113. Носырев, Д.Я. Теоретическая модель расчета внутрицилиндровых параметров локомотивных энергетических установок при использовании альтернативных видов топлива [Текст] / Д.Я. Носырев, А.В. Муратов, С.А. Петухов // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – № 5 (35). – С. 26–29.
114. Общие сведения о газодизельных двигателях [Электронный ресурс]/ ссылка: http://cngas.ru/gazodizel/dual_fuel/dual_fuel/
115. Огородников, Е.Н. О задаче Коши для модельных дифференциальных уравнений дробных осцилляторов [Текст] / Е.Н. Огородников // Современные проблемы вычислительной математики и математической физики: тезисы докл. Международной конф. (Москва, 16-18 июня, 2009г.). – Москва, 2009. – С. 229–231.
116. Орнатский, П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники [Текст] / П.П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1983. – 455 с.
117. Особенности конвертации дизелей автономных локомотивов на газомоторное топливо [Текст] / Д.Я. Носырев, Л.С. Курманова, С.А. Петухов и др. // Вестник КазАТК. – 2017. – №4 (103). – С. 70–77.

118. Островский, Э. С. Развитие систем автоматизации дизельных установок на базе микропроцессорной техники [Текст] / Э. С. Островский, А. Г. Плоткин // Двигателестроение. – 1990. – № 12. – С. 18–20.
119. Оценка влияния соотношения углерода к водороду на теплофизические свойства композитных топлив для работы тепловозных дизелей [Текст] / Д.Я. Носырев, А.Ю. Балакин, С.А. Петухов и др. // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 2 (56). – С. 33–38.
120. Оценка экономичности тягового автономного подвижного состава при использовании природного газа в качестве моторного топлива [Текст] / Д.Я. Носырев, А.В. Муратов, Л.С. Курманова и др. // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 2 (62). – С. 34–38.
121. Пантелеев, А.В., Параметрический синтез оптимального в среднем дробного ПИД-регулятора в задаче управления полётом [Текст] / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова, Е.А. Помазуева // Управление большими системами – 2015. – №56. – С.176–200.
122. Пат. 2015569 Российская Федерация, й 07С 5/10. Устройство для регулирования времени работы двигателя / В. Н. Тимофеев, В. Д. Мирошниченко, Е. А. Киселев и др.; опубл. 30.06.94, БИ.
123. Патент № 174710 на полезную модель Российская Федерация МПК7В01F5/00. Перемешивающее устройство [Текст] / Носырев Д.Я., Курманова Л.С. – 2017113782; Заявлено 20.04.17; опубл. 30.10.2017. Бюл. № 31.
124. Патент № 180762 на полезную модель Российская Федерация МПК7 F02В43/00. Система топливоподачи газодизеля с внутренним смесеобразованием [Текст] / Носырев Д.Я. Курманова Л.С., Муратов А.В., Петухов С.А. – 2017118141; заявл. 25.05.2017; опубл. 22.06.2018. – Бюл. № 18.
125. Патент SU1142749A1, СССР Устройство для диагностирования предельных отложений на выпускных окнах двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Бойчук В. Б., Дунаевский Л. М., Каганский О. С., Колотий В. П., Климов Г. Е., Жалкин С. Г., Бабинский И. И., Матяш В. А ; опубл. 1985.02.28 ; Подача: 1983.08.05 / SU 1 142 749 A1

126. Патент на изобретение RU 21379937 от 03.03.1998г. Способ подачи и дозирования топлива в газодизеле и устройство для подачи и дозирования топлива [Текст] / К.П. Седелев, Е.А. Лазарев, А.Н. Лаврик, А.Н. Павлов
127. Патент на полезную модель 2207441 Российская Федерация. Способ питания газодизеля [Текст] / Фурман В.В., Коссов Е.Е. ; Заявитель и патентообладатель ОАО «Проектно-производственное предприятие Дизельавтоматика» ; опубл. 27.03.2003, Бюл. № 14.
128. Патрахальцев, Н.Н. Возможности организации газодизельного процесса с внутренним смесеобразованием на базе дизеля 8Ч 13/14 [Текст] / Н.Н. Патрахальцев, С.В. Гусаков, Е.В. Медведев // Двигателестроение. – 2004. – №3. – С 10–13.
129. Патрахальцев, Н.Н., Возможности организации газодизельного процесса с внутренним смесеобразованием на базе дизеля 8Ч 13/14 [Текст] / Н.Н. Патрахальцев, С.В. Гусаков, Е.В. Медведев // Двигателестроение, 2004. – №3. – С 10–13.
130. Пехтерев, Ф.С. Об использовании магистральных газотурбовозов на полигоне Свердловской железной дороги и северном широтном ходе [Текст] / Ф.С. Пехтерев // Железнодорожный транспорт. — 2017. – № 9. – С. 39–42.
131. ПИД-регуляторы. Промышленная автоматизация [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://autprom.ru/pid-regulatory> (дата обращения 17.09.2010).
132. Применение природного газа в локомотивных энергетических установках [Текст] / Д.Я. Носырев, А.В. Муратов, Л.С. Курманова и др.// Наука и образование транспорту. – 2016. –№ 1. – С. 51–54.
133. Принципы управления. Информационные технологии – ИТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.itstan.ru/it-i-is/principyu-upravlenija.html> (дата обращения 10.04.2010).
134. Проблемы и перспективы эксплуатации газотепловозов на Куйбышевской железной дороге – филиале ОАО «РЖД » [Текст] / Д.Я. Носырев, А.В. Муратов и др. // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – №5. – С. 20-23.

135. Прудников, А.П. Интегралы и ряды [Текст] / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – Москва : Наука, 1981. – 800 с.
136. Равкинд, А.А. Унифицированные газовые дизельные двигатели [Текст] / А.А. Равкинд. – М.: Недра, 1967. – 196с.
137. Разлейцев, Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях [Текст] / Н.Ф. Разлейцев. – Харьков: Высш. школа, 1980. 169 с.
138. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
139. Самко, С.Г. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения [Текст] / С.Г. Самко, А.А. Килбас, О.И. Марычев. – Минск : Наука и техника, 1987. – 688 с.
140. Седелев К.П. Конвертирование дизеля с наддувом и полуразделённой камерой сгорания в газодизель модернизацией топливоподающей системы [Текст] : автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / К.П. Седелев. – Челябинск: ЮУГУ, 1998. – 21с.
141. Сербина, Л.И. Математическое моделирование движения влаги в средах с фрактальной структурой [Текст] / Л.И. Сербина // Естественные и точные науки. – 2004. – Т. I. – С. 212.
142. Сковородников, Е.И., Методика определения физико-химических характеристик топливных смесей различного элементарного состава [Текст] / Е.И. Сковородников, А.С. Анисимов, Ю.Б. Гришина // ИЗВЕСТИЯ Транссиба. – 2011. – №4 (8). – С. 31–41.
143. Соломенцев, Е.Д. Функции комплексного переменного и их применение [Текст] / Е.Д. Соломенцев. – Москва : Высшая школа, 1988. – 167 с.
144. Соломенцев, Е.Д. Функции комплексного переменного и их применение [Текст] : учебное пособие для студентов вузов / Е.Д. Соломенцев. – Москва : Высшая школа, 1988. –167с.
145. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC [Текст] / пер. с англ.; под ред. У. Томкинса, Д. Уэбстера. – М.: Мир, 1992. – 592 с.

146. Спектор, С. А. Электрические измерения физических величин: методы измерений [Текст] : учеб. пособие для вузов / С. А. Спектор. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.
147. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020г. и на перспективу до 2025 г. [Текст]. – М.: ОАО РЖД, 2015. – 60 с.
148. Тюкин, В.Н. Теория управления [Текст] : конспект лекций. Часть 1 / В.Н. Тюкин. – Вологда : ВоГТУ, 2000. – 200 с.
149. Тюкин, И.Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах [Текст] / И.Ю. Тюкин, В.А. Терехов. – СПб. : ЛКИ, 2006. – 384 с.
150. Фофанов, Г.А. Природный газ – моторное топливо для тепловозов [Текст] / Г.А. Фофанов // ЖДМ – 2006. – №7. – С. 43–48.
151. Фурман, В.В. Системы топливоподачи для газодизельных и газовых двигателей [Текст] / В.В. Фурман и др. // Грузовик. – 2013. – № 4. – С. 38–45.
152. Фурман, В. В. Улучшение эксплуатационно-технических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем создания и совершенствования систем электронного управления [Текст] : автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / В.В. Фурман. – Москва: Гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2016. – 34 с.
153. Фурман, В.В. Экспериментальные исследования газодизельного двигателя трактора К-700А [Текст] / В.В. Фурман и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 10. – С. 7–9.
154. Хачиян, А.С. Использование природного газа в качестве топлива для автомобильного транспорта [Текст] / А.С. Хачиян // Двигателестроение. – 2002. – №1. – С. 34–36.
155. Хорольский, В.Я., Классификация показателей качества электроэнергии и их влияние на работу электроприемников [Текст] / В.Я Хорольский., В.Н. Шемякин, С.Г. Ковалевский // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве. 74 научно-практическая конференция электроэнергетического факультета СтГАУ, 2010. – С. 340–346.

156. Хрящёв, Ю.Е. Алгоритмы управления двигателями внутреннего сгорания [Текст] : монография / Ю.Е. Хрящёв, М.В. Тихомиров, Д.А. Епанешников. — Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2014. — 204 с.
157. Цапенко, М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование [Текст] : учеб. пособие для вузов / М.П. Цапенко. — 2-е. изд. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 438 с.
158. Цветков, Э.И. Основы математической метрологии [Текст] / Э.И. Цветков. — СПб.: Политехника, 2005.
159. Чемоданова, Б.К. Математические основы теории автоматического регулирования. Т. 1. [Текст] / Б.К. Чемоданова. — Москва : Высшая школа, 1977. — 366 с.
160. Четвергов, В.А. Надежность локомотивов [Текст] / В.А. Четвергов, А.Д. Пузанков. — М: Маршрут, 2003. — 415 с.
161. Чикрий, А.А. Об аналоге формулы Коши для линейных систем дробного порядка [Текст] / А.А. Чикрий, И.И Матичин. — Киев: Дан Украины, 2007. — С.50–55.
162. Чикрий, А.А. Обобщенные матричные функции Миттаг-Леффлера в игровых задачах для эволюционных уравнений дробного порядка [Текст] / А.А. Чикрий, С.Д. Эйдельман // Кибернетика и системный анализ. — 2000. — № 3. — С. 3–32.
163. Шайкин, А.П. Влияние добавок водорода на давление на давление в камере сгорания двигателя [Текст] / А.П. Шайкин, И.Р. Галиев // Проблемы и инновационные решения в области инженерного обеспечения экологической и промышленной безопасности урбанизированных территорий. СамГТУ. — 2017. — С. 230–233
164. Шайкин, А.П. и др. Взаимосвязь концентрации несгоревших углеводородов с шириной зоны турбулентного горения при сгорании топливно-воздушной смеси с добавкой водорода [Текст] / А.П. Шайкин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2017. — Т. 19. — № 1. — С. 64–69.

165. Шишков, В.А. Подача газового топлива при наддуве цилиндров двигателя с искровым зажиганием [Текст] / В.А. Шишков // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 4 (34). – С. 66–69.
166. Шишков, В.А. Цикловые параметры газового поршневого двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием с электронной системой управления [Текст] / В.А. Шишков // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева. – 2014. – № 5–1 (47). – С. 45–53.
167. Шляндин, В.М. Цифровые электроизмерительные приборы [Текст] / В.М. Шляндин, В.В. Богданов, А.А. Богородицкий [и др.] ; под ред. В.М. Шляндина. – М.: Энергия, 1972. – 400 с.
168. Экспериментальная оценка влияния природного газа на работу энергетических установок рельсовых автобусов [Текст] / Д.Я. Носырев А.В. Муратов, Л.С. Курманова и др. // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 4 (64). – С. 38–41.
169. Ярушкина, Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем [Текст] : учеб. пособие / Н.Г. Ярушкина. – Москва : Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

№	Наименования	Обозначения	Единица измерения
1.	Целевая частота вращения коленчатого вала	ω^*	1/мин
2.	Текущая частота вращения коленчатого вала	$\omega(t)$, ω_n	1/мин
3.	Максимальная частота вращения коленчатого вала, предусмотренная производителем двигателя внутреннего сгорания	ω_{max}	1/мин
4.	Отклонение	$e(t) = \frac{\omega^* - \omega(t)}{\omega_{max}} * 100\%$, e_n	%
5.	Управляющее воздействия	$u(t)$, u_n , $\Delta u = u_n - u_{n-1}$	%
6.	Длина импульса ШИМ	$t_{ди} = \frac{\Delta u * \Delta t}{100\%}$	Секунды
7.	Объём дизельного топлива	$V^{DT} = \text{const}$	Литры
8.	Объём газового топлива	$V_n^r = K_r * t_{ди}$ $V_n^r \in [0, K_r * \Delta t]$	м3
9.	Шаг квантования	$T_c, T_c^\alpha, T_c^\beta$	Секунды
10.	Пропорциональное звено	K_p	Безразмерна
11.	Интегральное звено	K_i	Безразмерна
12.	Дифференциальное звено	K_d	Безразмерна
13.	Уточняющий коэффициент	ε_n	
14.	Коэффициент интегрирования	α	
15.	Коэффициент дифференцирования	β	
16.	Постоянная дифференцирования	T_d	Секунды
17.	Постоянная интегрирования	T_i	Секунды
18.	Коэффициент пропорциональности	$K_{п}$	Безразмерна
19.	Гамма-функция	$\Gamma(\alpha)$, $\Gamma(i)$	Безразмерна
20.	Период ШИМ	Δt	Секунды
21.	Дизельное топливо	ДТ	
22.	Компримированный природный газ	КПГ	
23.	Поворот коленчатого вала двигателя	п.к.в	
24.	Отработавшие газы	ОГ	
25.	Топливный насос высокого давления	ТНВД	
26.	Блок автоматического контроля систем	БАКС	
27.	θ – угол опережения впрыскивания топлива	УОВТ	
28.	Усилитель мощности	УМ	
29.	Дозатор газовый	ГД	

30.	распылитель	Р	
31.	Преобразователь частоты вращения	ПЧВ	
32.	Преобразователь заданной частоты вращения	ПЗЧВ	
33.	Ограничитель запальной дозы	ОЗД	
34.	Режим газодизеля	"Вкл. РГД"	
35.	Переходная характеристика	$h(t)$	
36.	Амплитудная фазовая характеристика	$W(j\omega)$	
37.	Вещественная частотная характеристика	$\text{Re}(\omega)$	
38.	Мнимая частотная характеристика	$\text{Im}(\omega)$	
39.	Амплитудная частотная характеристика	$A(\omega)$	
40.	Фазовая частотная характеристика	$\varphi(\omega)$	
41.	Логарифмическая амплитудная частотная характеристика	$L(\omega)$	
42.	Дробная передаточная функция	$W^{\alpha}(p)$	
43.	Система автоматического управления	САУ	
44.	Амплитудная фазовая характеристика	АФХ	
45.	Вещественная частотная характеристика	ВЧХ	
46.	Мнимая частотная характеристика	МЧХ	
47.	Амплитудная частотная характеристика	АЧХ	
48.	Фазовая частотная характеристика	ФЧХ	
49.	Логарифмическая амплитудная частотная характеристика	ЛАЧХ	
50.	Логарифмическая фазовая частотная характеристика	ЛФЧХ	

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2008614227

Блок дробного ПИД регулирования

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (СамГУПС) (RU)*

Автор(ы): *Авсиевич Александр Викторович, Авсиевич Владимир Викторович, Энгельгардт Владислав Викторович (RU)*

Заявка № 2008612320

Дата поступления 27 мая 2008 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
4 сентября 2008 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов