

На правах рукописи

Харитонов Сергей Викторович

ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ
КОМПЛЕКСНОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре теплофизики.

Научный руководитель: **Кузнецов Александр Гаврилович**
доктор технических наук, профессор кафедры теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Козлов Андрей Викторович**
доктор технических наук, заведующий отделом теории рабочих процессов и имитационного моделирования энергетических установок ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

Дунин Андрей Юрьевич
кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и автотракторных двигателей ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Ведущее предприятие: Московская государственная академия водного транспорта – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»

Защита диссертации состоится «13» февраля 2017 г. в 14 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н. Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Тумашев Р.З.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время к двигателям внутреннего сгорания предъявляются всё более строгие требования по экологическим и экономическим показателям. Одним из важнейших путей обеспечения требований к двигателям является использование комплексной системы управления, координирующей работу всех узлов двигателя. Обладая регулирующими воздействиями на системы топливоподачи, воздухообеспечения, охлаждения, рециркуляции и нейтрализации современная система управления позволяет формировать требуемые статические и динамические характеристики двигателя. Создание комплексной системы управления двигателем сопряжено с решением ряда научных и практических задач, включающих разработку математических моделей и компьютерных программ для моделирования установившихся и неустойчивых режимов работы двигателя, определение структуры и алгоритмов функционирования отдельных контуров регулирования, разработку технических и программных средств системы управления. Достаточно остро данная проблема стоит в сфере среднеоборотных дизельных двигателей. Такие двигатели используются в составе судовых, тепловозных и других энергетических установок. При наличии комплексных систем управления у зарубежных производителей отечественные двигателестроительные заводы вынуждены закупать у них интеллектуальные компоненты таких систем. Создание отечественной комплексной системы управления позволит обеспечить импортозамещение для целого ряда стратегических направлений использования дизельных двигателей.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время многие компании, такие как Bosch, Delphi, Woodward, Heinzmann, занимаются разработкой и внедрением интеллектуальных систем управления, позволяющих формировать необходимые характеристики двигателей и обеспечивать выполнение заданных требований. В России ведутся научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы в данной области в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», МАДИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЯГТУ, ООО «ППП Дизельавтоматика», ООО «АБИТ». Следует отметить, что основная часть работ проводится для высокооборотных двигателей автомобильного назначения.

Цель работы. Разработать комплексную систему управления дизельными двигателями и провести исследование возможностей формирования необходимых статических и динамических характеристик перспективного среднеоборотного дизельного двигателя.

Задачи работы. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести поиск и анализ информации в области требований, предъявляемых к современным дизельным двигателям, методов моделирования двигателей, конструктивных и программных решений различных производителей систем управления;
- разработать структуру и технические средства системы комплексного адаптивного управления дизельными двигателями;
- сформировать функции и алгоритмы системы комплексного адаптивного управления и разработать программное обеспечение электронного блока управления;

- разработать математическую модель и компьютерную программу для расчёта статических и динамических характеристик дизельного двигателя с возможностью проведения расчётов в реальном масштабе времени;
- провести расчётные исследования по определению статических и динамических характеристик перспективного дизельного двигателя;
- определить первичные калибровки системы управления;
- провести экспериментальные исследования разработанной системы управления.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель дизельного двигателя и системы управления, в которой, наряду с воздействием на топливоподачу, введено регулирующее воздействие на систему воздухообеспечения двигателя при различных вариантах управления работой агрегатов турбонаддува;
- получены результаты расчётного исследования статических и динамических характеристик перспективного дизельного двигателя Д500 (12ЧН 26,5/31), отличающиеся учётом комплексного воздействия системы управления на топливоподачу и воздухообеспечение двигателя для предложенных алгоритмов управления работой турбокомпрессоров;
- получены новые результаты экспериментального исследования статических и динамических характеристик перспективного дизельного двигателя Д500 с разработанной системой управления;
- предложен новый алгоритм управления турбокомпрессором с турбиной изменяемой геометрии, позволяющий избежать режимов работы компрессора на помпаже.

Методы исследования. В рамках диссертационной работы использованы следующие методы исследования:

- метод анализа информационных источников по направлению исследования;
- метод анализа характеристик двигателя на основе теории рабочих процессов комбинированных двигателей;
- метод расчётного исследования и моделирования статических и динамических характеристик дизельного двигателя;
- метод экспериментального исследования характеристик дизельного двигателя.

Достоверность и обоснованность научных положений. Научные положения диссертации обоснованы использованием математической модели дизельного двигателя, составленной на основе известных физических уравнений и положений теории рабочих процессов комбинированных двигателей. Достоверность научных положений обоснована сопоставлением результатов, полученных при расчётном исследовании, с данными экспериментального исследования. Экспериментальное исследование проведено на оборудовании и стендах ОАО «Коломенский завод», где они проходят регулярные метрологические проверки. Точность использованного оборудования соответствует поставленным задачам.

Теоретическая значимость работы состоит в создании математической модели дизельного двигателя и системы управления, в которой, наряду с воздействием на топливоподачу, введено регулирующее воздействие на систему воздухообеспечения двигателя при различных вариантах управления работой агрегатов турбонаддува. Математическая модель предназначена для определения первичных калибровок комплексной адаптивной системы управления, обеспечивающих фор-

мирование системой управления необходимых статических и динамических характеристик двигателя.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- разработанная компьютерная программа позволяет проводить расчёт статических и динамических характеристик дизельного двигателя при регулирующих воздействиях системы управления на топливоподачу и воздухоснабжение двигателя;
- определены первичные калибровки контуров воздействия на топливоподачу и воздухоснабжение разработанного и изготовленного электронного блока системы комплексного адаптивного управления для перспективного дизельного двигателя Д500;
- результаты испытаний показали возможность использования разработанных технических решений для импортозамещения в области систем управления дизельными двигателями.

Реализация работы. Результаты исследований использованы при разработке экспериментального образца системы комплексного адаптивного управления дизельными двигателями. Результаты расчётного исследования по формированию статических и динамических характеристик дизельного двигателя внедрены на ООО «ППП Дизельавтоматика» для использования при проведении работ по совершенствованию систем управления тепловозными дизельными двигателями.

Личный вклад автора. Проведён поиск и анализ научно-технической и нормативной информации по направлениям: требования, предъявляемые к современным дизельным двигателям; влияние регулирующих параметров на работу систем двигателя; современные методы математического моделирования и программные комплексы для реализации процесса расчёта; системы управления производства ведущих мировых компаний.

В составе рабочей группы разработаны алгоритмы функционирования, технические и программные средства системы комплексного адаптивного управления дизельными двигателями.

Разработана математическая модель и компьютерная программа для расчётного исследования и определения первичных калибровок системы управления.

Проведены расчётные исследования по формированию статических и динамических характеристик перспективного дизельного двигателя и первичных калибровок системы управления.

В составе рабочей группы проведены испытания разработанной системы комплексного адаптивного управления.

Основные положения, выносимые на защиту. Метод формирования математической модели дизельного двигателя для расчёта статических и динамических характеристик при регулирующих воздействиях на топливоподачу и воздухоснабжение двигателя.

Результаты расчётных исследований по формированию статических и динамических характеристик перспективного дизельного двигателя 12ЧН26,5/31 для различных областей применения (тепловозная и судовая энергетические установки).

Результаты испытаний разработанной системы комплексного адаптивного управления на одноцилиндровом отсеке двигателя размерностью 26,5/31.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на: заседании кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017); Всероссийской научно-технической конференции по автоматическому управлению теплоэнергетическими установками (Москва, 2014-2017 гг.); 7-х Луканинских чтениях «Решение энерго-экологических проблем в автотранспортном комплексе» (Москва, 2015 г.); IX Международной научно-производственной конференции «Перспективные направления развития автотранспортного комплекса» (Пенза, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2016 г.); 2-м международном форуме «Instrumental Engineering, Electronics and Telecommunications» (Ижевск, 2016 г.).

Публикации. Материалы исследований опубликованы в 8 статьях, из них: 3 – в российских изданиях перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ, 3 – в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus. Общий объём основных работ – 2,2 печатных листа. С участием автора получено два свидетельства на программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов и библиографического списка. Содержит 171 страницу машинописного текста, в том числе 83 рисунка, 15 таблиц. Библиографический список содержит 109 наименований, в том числе 55 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована необходимость создания отечественной системы комплексного управления для дизельных двигателей с учётом регулирующих воздействий на различные системы: топливоподачу, воздухоснабжение и др. Создание перспективной системы требует глубокой теоретической проработки вопроса, в том числе, разработки математической модели, учитывающей регулирующие воздействия на топливоподачу и воздухоснабжение, с возможностью анализа различных алгоритмов управления.

В первой главе проведён анализ работ, опубликованных по теме диссертации. В рамках анализа научно-технической и нормативной документации выявлены основные требования, предъявляемые к современным дизельным двигателям и системам управления. Двигатели транспортных средств работают в широком диапазоне изменения частоты вращения вала и нагрузки как на установившихся, так и на неустановившихся режимах. К данным двигателям применяются наиболее строгие нормативы по показателям экономичности и экологии. Одним из основных направлений обеспечения высоких требований по экологии, экономичности и динамическим показателям двигателей транспортных установок является совершенствование систем управления.

Современная система управления должна обладать регулируемыми воздействиями на различные системы дизеля: топливоподачу, воздухоснабжение, охлаждение и др. Каждая из систем комбинированного двигателя оказывает влияние на показатели экономичности и токсичности. При этом все системы двигателя связаны между собой единым рабочим процессом и влияют друг на друга. Поэтому при определении требуемых настроек отдельных систем двигателя следует учитывать

их взаимное функционирование и взаимодействие. Наибольший эффект даёт комплексное согласованное использование мероприятий по обеспечению требуемых характеристик и параметров комбинированного двигателя.

В результате анализа программ, применяемых для расчёта рабочего процесса двигателей и систем управления, таких, как AVL BOOST и FIRE, KIVA, STAR-CD, GT-Power, Дизель-ПК, ASCET, Matlab, LabView, принято решение об использовании программы Дизель-ПК для расчёта параметров рабочего процесса и универсального комплекса Matlab/Simulink для расчёта статических и динамических характеристик системы управления.

Общемировая тенденция развития методов управления двигателями направлена на создание систем комплексного управления, которые позволяют согласовать работу всех подсистем энергетической установки с целью обеспечения заданных характеристик двигателя. Полезная информация о возможных технических решениях при обосновании структуры разработанной системы комплексного управления, была получена в результате обзора систем управления таких ведущих мировых производителей, как Bosch, Heinzmann, Woodward и др.

Вторая глава посвящена разработке системы комплексного адаптивного управления (СКАУД). Ключевыми особенностями разработанной системы управления является комплексность и возможность адаптировать систему для различных областей применения дизельных двигателей и режимов их работы. В системе комплексного адаптивного управления (Рисунок 1) заложены каналы управления следующими подсистемами: топливоподдачи, воздухообеспечения, охлаждения, нейтрализации и рециркуляции.

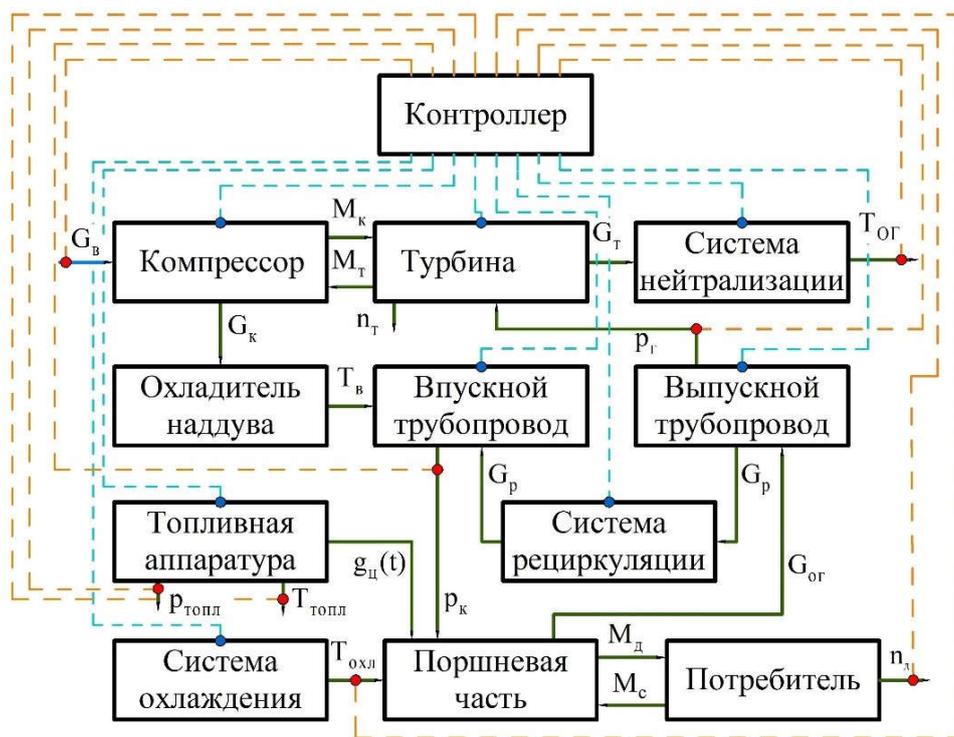


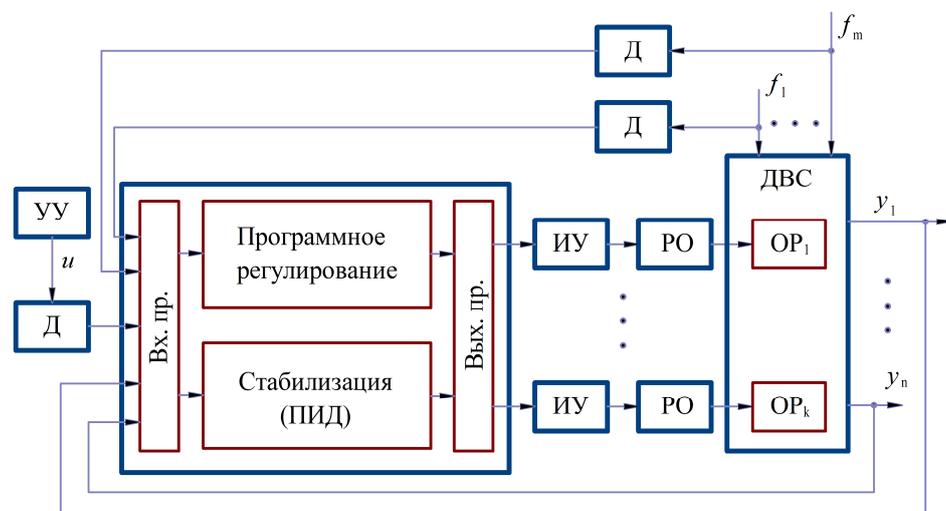
Рисунок 1. Система комплексного адаптивного управления

На Рисунке 1 красными точками обозначены основные датчики, синими — исполнительные устройства соответствующих систем двигателя.

Функциональные элементы комбинированного двигателя связаны между собой параметрами рабочего процесса: частотой вращения вала двигателя n_d , частотой вращения ротора турбокомпрессора n_t , цикловой подачей топлива $g_{ц}$, давлением наддува p_k , давлением отработавших газов p_r , давлением топлива $p_{топл}$, расходом воздуха G_v , расходом компрессора G_k , расходом отработавших газов $G_{ог}$, расходом рециркулируемых отработавших газов G_p , расходом через турбину G_t , температурой воздуха после охладителя T_v , температурой отработавших газов $T_{ог}$, температурой охлаждающей жидкости $T_{охл}$, температурой топлива $T_{топл}$, крутящим моментом двигателя M_d , моментом сопротивления M_c , моментом компрессора M_k , моментом турбины M_t .

Разработанный электронный блок системы управления предназначен для установки на двигателях различного назначения и размерности. Для обеспечения функции наибольшей адаптации оборудования к возможным вариантам использования принята концепция построения электронного блока в виде модулей. Процессорный модуль является универсальным и может устанавливаться в электронные блоки различных двигателей. Второй модуль электронного блока является специализированным и обеспечивает связь процессорного модуля с датчиками и исполнительными устройствами конкретного двигателя, для которого предназначена система управления.

Функциональная схема системы управления с указанием различных видов реализуемых алгоритмов показана на Рисунке 2.



В состав функциональной схемы входят следующие элементы:

- дизельный двигатель с турбонаддувом (ДВС) с установленными на нём датчиками (Д);
- устройство управления (УУ);
- электронный блок (ЭБ), включающий входные и выходные преобразователи сигналов (Вх. пр. и Вых. пр.) и алгоритмы управления;

Рисунок 2. Функциональная схема системы управления

преобразователи сигналов (Вх. пр. и Вых. пр.) и алгоритмы управления;

- комплект исполнительных устройств (ИУ) и регулирующих органов (РО) отдельных контуров регулирования, через которые СКАУД воздействует на регулируемые параметры y_i систем двигателя, являющихся объектами регулирования (ОР). На схеме также показаны внешние воздействия на двигатель f_i и управляющее воздействие u .

Для различных контуров управления используются алгоритмы программного управления, стабилизации параметров по ПИД-закону, а также их комбинация.

В разработанном образце ЭБ реализовано достаточное для большинства дизельных двигателей количество каналов приёма сигналов с датчиков: 3 датчика Холла, индукционный датчик, 4 потенциометрических датчика, 8 токовых датчи-

ков стандарта 4..20 мА, 5 терморезисторов типа РТ1000, 3 терморезистора типа РТ200, 4 аналоговых входа до 5 В, датчик атмосферного давления, технологический датчик температуры. Для управления исполнительными устройствами СКАУД предусмотрено: 20 каналов стабилизированных регулируемых токовых выходов для управления электромагнитными клапанами форсунок, 24 канала ШИМ-регуляторов, 4 канала аналоговых выходов по напряжению с токовой нагрузкой до 15 мА.

В электронном блоке использован цифровой сигнальный процессор с производительностью до 800 млн. операций в секунду. Для повышения быстродействия работы электронного блока выполнение математических операций распределено между процессором и программируемой логической интегральной схемой.



Рисунок 3. Электронный блок СКАУД

На Рисунке 3 показана фотография изготовленного образца электронного блока системы управления. При разработке программного обеспечения были использованы подходы объектно-ориентированного программирования. Для взаимодействия ЭБ с датчиками и исполнительными устройствами разработаны универсальные программные процедуры, многократно используемые в программе управления.

Для стабилизации частоты вращения используется пропорционально-интегральное регулирование. Продолжительность впрыска:

$$\tau(i) = k_{\text{п}} * \varepsilon + k_{\text{и}} * I(i),$$

где ε – отклонение частоты вращения, $k_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональной составляющей, $k_{\text{и}}$ – коэффициент интегральной составляющей, $I(i)$ – значение интеграла отклонения на i -м шаге работы.

При определении интеграла $I(i)$ используется адаптивный алгоритм, позволяющий изменить интенсивность регулирующего воздействия в зависимости от режима работы двигателя. Формула, реализующая расчёт интеграла:

$$I(i) = \left(I(i-1) + \varepsilon * dt * K_{\text{стаб}}(\varepsilon) * K_{\text{хх}}(n_{\text{д}}) \right),$$

где dt – шаг интегрирования, $K_{\text{стаб}}(\varepsilon)$ – коэффициент, зависящий от отклонения, $K_{\text{хх}}(n_{\text{д}})$ – коэффициент, зависящий от частоты вращения. Коэффициент $K_{\text{стаб}}$ позволяет повысить стабильность работы вблизи заданного режима работы, когда отклонение мало по величине. Коэффициент $K_{\text{хх}}$ позволяет повысить стабильность поддержания частоты вращения при режимах, близких к холостому ходу на малой частоте вращения. Накопление интеграла происходит только в случае, если значение интегральной составляющей меньше допустимого.

Для формирования статических и динамических характеристик турбокомпрессора с турбиной изменяемой геометрии предложен новый алгоритм определения управляющего сигнала контура задания положения направляющего аппарата турбины с целью уменьшения возможного времени работы компрессора на режи-

мах помпажа в переходных процессах. Регулирующее воздействие определяется следующим образом:

$$\varphi = k_{\text{п}} * [p_{\text{к}} - p_{\text{огр}}(n_{\text{т}})] + k_{\text{и}} * \int_0^t [p_{\text{к}} - p_{\text{огр}}(n_{\text{т}})] dt + P(g_{\text{цикл}}, n_{\text{д}}).$$

Базовая часть сигнала определяется по заранее созданной матрице значений $P(g_{\text{цикл}}, n_{\text{д}})$ для режимов работы двигателя в соответствии с частотой вращения $n_{\text{д}}$ и цикловой подачей $g_{\text{цикл}}$. Вывод режимов работы компрессора с линии помпажа в динамике достигается добавлением к базовой части управляющего сигнала корректирующего воздействия, определяемого в соответствии с ПИ законом регулирования по отклонению давления наддува $p_{\text{к}}$ от линии ограничения давления $p_{\text{огр}}(n_{\text{т}})$, которая обеспечивает расположение режимов работы компрессора вблизи линии помпажа с заданным запасом.

В третьей главе представлены результаты расчётного исследования.

На этапе формирования контуров и алгоритмов разработанной системы управления в качестве объекта исследования выбран перспективный дизельный двигатель типа Д500 производства ОАО «Коломенский завод». Новое семейство дизелей типоразмерного ряда Д500 мощностью до 10000 л.с. предполагает многоцелевое применение дизелей для ОАО «РЖД», Военно-Морского флота, атомной энергетики и других отраслей.

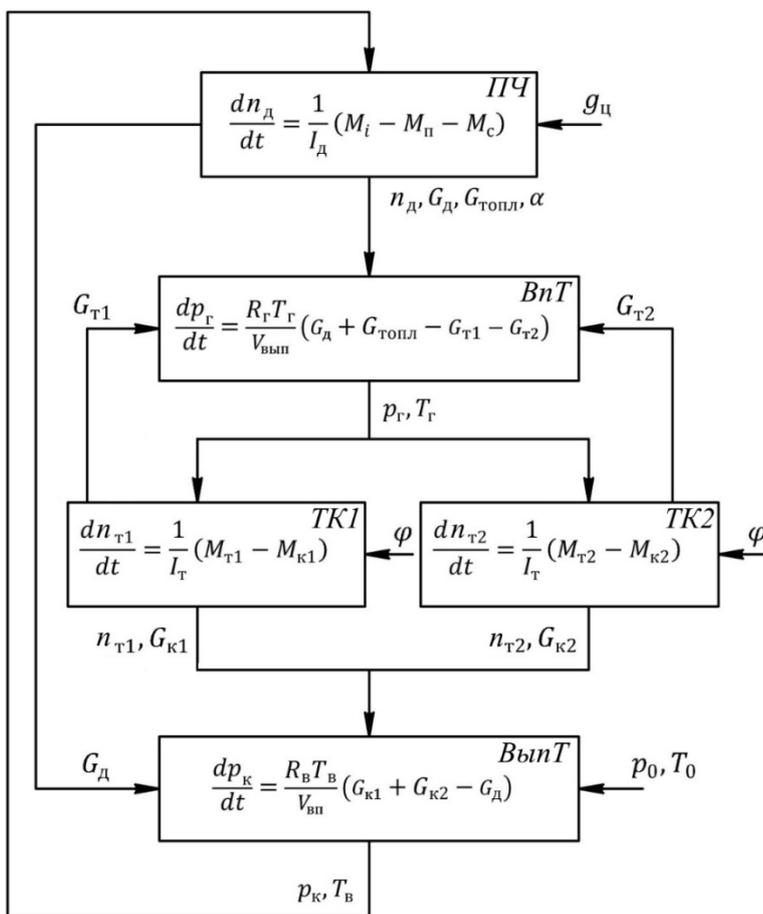


Рисунок 4. Структура математической модели

Для проведения расчётного исследования по формированию алгоритмов функционирования системы комплексного адаптивного управления была составлена математическая модель дизельного двигателя с турбонаддувом. Структура математической модели дизельного двигателя приведена на Рисунке 4.

Работа модели основана на совместном решении пяти дифференциальных уравнений: поршневой части (ПЧ), двух турбокомпрессоров (TK1 и TK2), впускного и выпускного трубопроводов (ВпТ и ВыпТ). В результате решения уравнений определяются: частоты вращения вала дизеля $n_{\text{д}}$ и роторов турбокомпрессоров $n_{\text{т1}}$ и $n_{\text{т2}}$, давления воздуха $p_{\text{к}}$ и отработавших газов $p_{\text{г}}$.

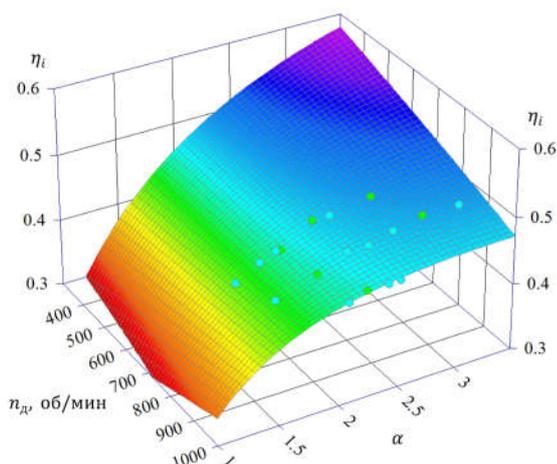
Правые части уравнений содержат моменты инерции валов ($I_{\text{д}}, I_{\text{т}}$), крутящие мо-

менты ($M_i, M_{п}, M_c, M_k, M_T$), объёмы трубопроводов ($V_{вп}, V_{вып}$), температуры (T_b, T_T), газовые постоянные (R_b, R_T) расходы газов (G_d, G_T, G_k) и расход топлива ($G_{топл}$).

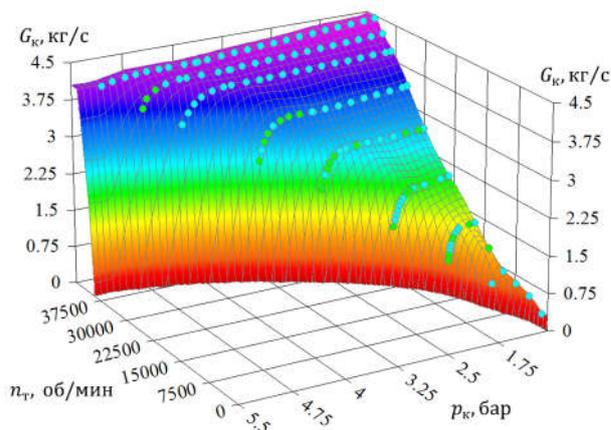
В качестве исходной информации для построения математической модели использованы экспериментальные данные работы дизеля на режимах тепловозной характеристики. Для получения характеристик дизеля во всём рабочем диапазоне частот вращения и нагрузок были проведены расчёты в программе Дизель-РК по методу реконструкции исходных данных.

Для построения функциональных зависимостей, входящих в правые части дифференциальных уравнений математической модели, наряду со степенными полиномами, применялись новые подходы, основанные на использовании ряда Фурье, логарифмических преобразований аргументов, рациональных дробей, что повысило точность определения режимных параметров поршневой части двигателя и турбокомпрессора.

Примеры полученных зависимостей проиллюстрированы на Рисунке 5 в виде поверхностей с нанесёнными экспериментальными точками, полученными по данным ОАО «Коломенский завод». Сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными показало хорошее совпадение, что обосновало использование разработанной математической модели для расчётного исследования характеристик рассматриваемого двигателя.



Индикаторный КПД



Расход через компрессор

Рисунок 5. Примеры поверхностей, используемых в модели

Программа, реализующая математическую модель, создана в комплексе Matlab/Simulink. Для удобства оперативного задания режимов работы двигателя и системы управления и наблюдения за результатами расчётов создан интерфейс взаимодействия оператора с разработанной компьютерной программой.

Целью проведения статических расчётов является формирование скоростных характеристик двигателя при различных вариантах работы системы турбонаддува: с нерегулируемыми турбокомпрессорами, регистровом наддуве, с турбинами изменяемой геометрии. Для всех рассмотренных вариантов учитывалось ограничение топливоподачи по величине коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,6$ (пневмокоррекция).

На Рисунке 6 приведены внешние скоростные характеристики дизеля для рассмотренных вариантов работы системы турбонаддува. Линия 1 проведена по

точкам, соответствующим работе двигателя с двумя нерегулируемыми турбокомпрессорами. Следует отметить характерную особенность работы двигателя с нерегулируемыми турбокомпрессорами: на частотах вращения до 650-700 об/мин наблюдается нехватка воздуха. Такое явление вызвано недостаточной раскруткой роторов турбокомпрессоров. Во многом для решения именно этой проблемы используются различные методы регулирования системы воздухообеспечения.

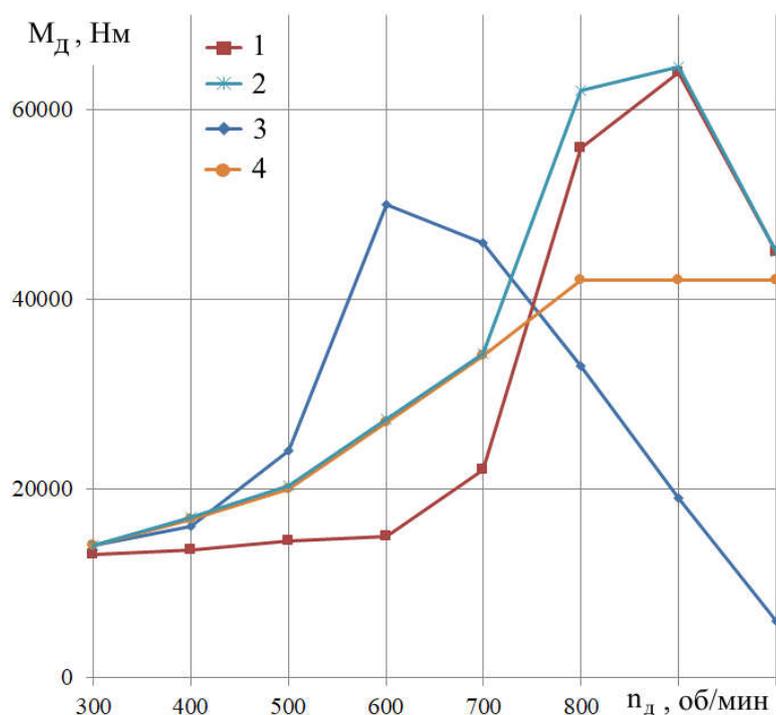


Рисунок 6. Результаты расчёта статических характеристик дизельного двигателя Д500 (12ЧН26,5/31) при различных вариантах управления турбокомпрессорами

ров. Более активная раскрутка турбокомпрессоров позволяет направить больше воздуха в цилиндры, что приводит к увеличению коэффициента избытка воздуха при фиксированной подаче топлива. С учётом алгоритма пневмокоррекции увеличивается доступная величина топливоподачи и крутящий момент двигателя.

Линия 3 на Рисунке 6 проходит через точки расчётов, проведённых с использованием одного нерегулируемого турбокомпрессора. Доступный крутящий момент при частотах вращения от 500 до 700 об/мин больше, чем в двух предыдущих вариантах. При малых нагрузках образуется недостаточное для двух турбин количество отработавших газов. В случае использования одного турбокомпрессора весь расход отработавших газов направляется на него, при этом турбина создаёт достаточный для раскрутки ротора крутящий момент. При большей частоте вращения двигателя воздуха от одного турбокомпрессора для двигателя не хватает и доступный крутящий момент значительно снижается. При этом целесообразно включение в работу второго турбокомпрессора, что соответствует регистровому наддуву. Работа с системой регистрового наддува позволяет повысить мощность на малых и средних нагрузках.

Наряду с ограничением топливоподачи по коэффициенту избытка воздуха, необходимо также учитывать ограничение по максимальному давлению в цилин-

Линия 2 соединяет точки расчётов с использованием двух регулируемых турбокомпрессоров. Регулирование производится за счёт изменения проходного сечения направляющего аппарата турбин. По сравнению с работой двигателя без регулирования турбокомпрессоров наблюдается значительное повышение крутящего момента на частотах вращения от 400 до 700 об/мин. За счёт изменения положения направляющего аппарата увеличивается давление на входе в турбинах, поток газа направляется на периферию лопаток, что увеличивает плечо действия силы давления. Это приводит к увеличению крутящего момента на роторах турбокомпрессоров.

дре. Оранжевой линией (линия 4) показано ограничение внешней скоростной характеристики для двигателя с двумя регулируемыми турбокомпрессорами с учётом максимального давления в цилиндре $p_z \leq 20$ МПа. Именно эта характеристика была принята за основу для расчёта ограничения по топливopодаче в модели регулятора.

Сравнение эффективности использования рассмотренных вариантов турбонаддува по увеличению доступного крутящего момента дизеля проведено с использованием следующего выражения:

$$\frac{M - M_0}{M_0} * 100\%,$$

где M_0 – момент при нерегулируемом турбонаддуве, M – момент для рассмотренного варианта турбонаддува. Полученные значения приведены в Таблице.

Таблица.

Сравнение вариантов турбонаддува.

n_d , об/мин	Один ТК	Два регулируемых ТК
300	7,7 %	7,7 %
400	18,5 %	25,9 %
500	65,5 %	37,9 %
600	233,3 %	80,0 %
700	109,1 %	54,5 %
800	41,1 %	10,7 %
900	-70,3 %	0,8 %
1000	-86,7%	0 %

Работа с двумя турбокомпрессорами с регулируемым направляющим аппаратом турбины позволяет повысить мощность и приёмистость двигателя и является наиболее перспективным способом регулирования системы турбонаддува из рассмотренных вариантов. Увеличение крутящего момента достигает 80%.

В результате расчётного исследования получена матрица значений удельного эффективного расхода топлива g_e рассматриваемого дизеля на режимах его работы при различных положениях направляющего аппарата турбины (Рисунок 7). Увеличение g_e соответствует переходу от зелёного цвета точек к красному. В полученной матрице синим цветом показана линия минимальных значений g_e для различных режимов работы двигателя и положения направляющего аппарата турбины.

При проведении расчётного исследования получена матрица положений направляющего аппарата турбины для различных режимов работы двигателя $P(g_{цикл}, n_d)$, которая используется в разработанном алгоритме управления турбокомпрессором (Рисунок 8).

Расчёт переходных процессов двигателя был проведён для двух основных вариантов применения рассматриваемого дизеля: в составе энергетических установок судна и тепловоза. Пример расчёта переходного процесса двигателя приведён на Рисунке 9.

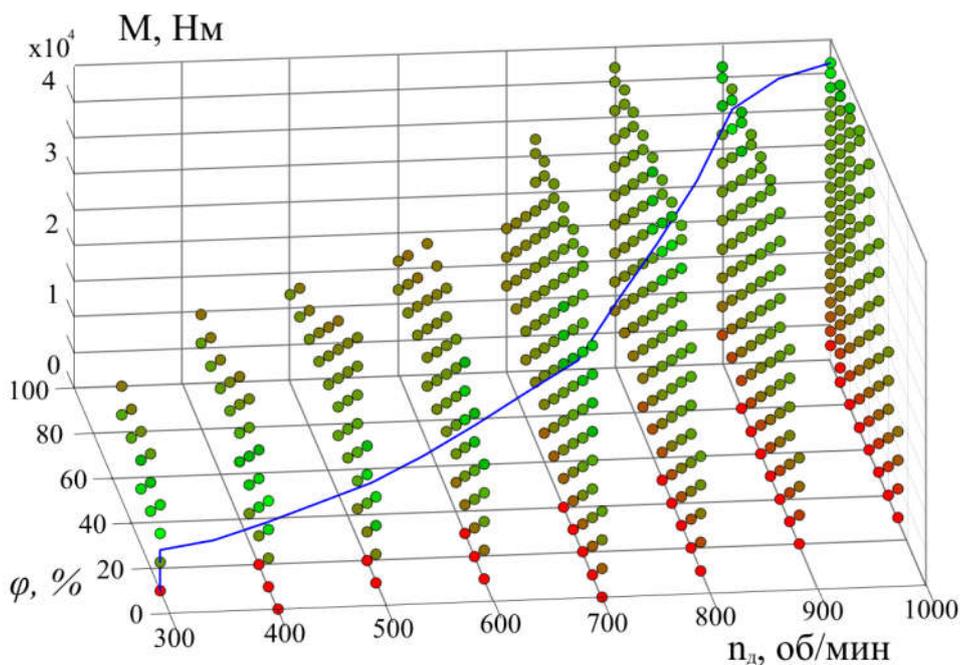


Рисунок 7. Построение экономической характеристики дизельного двигателя с учётом регулирования турбокомпрессоров

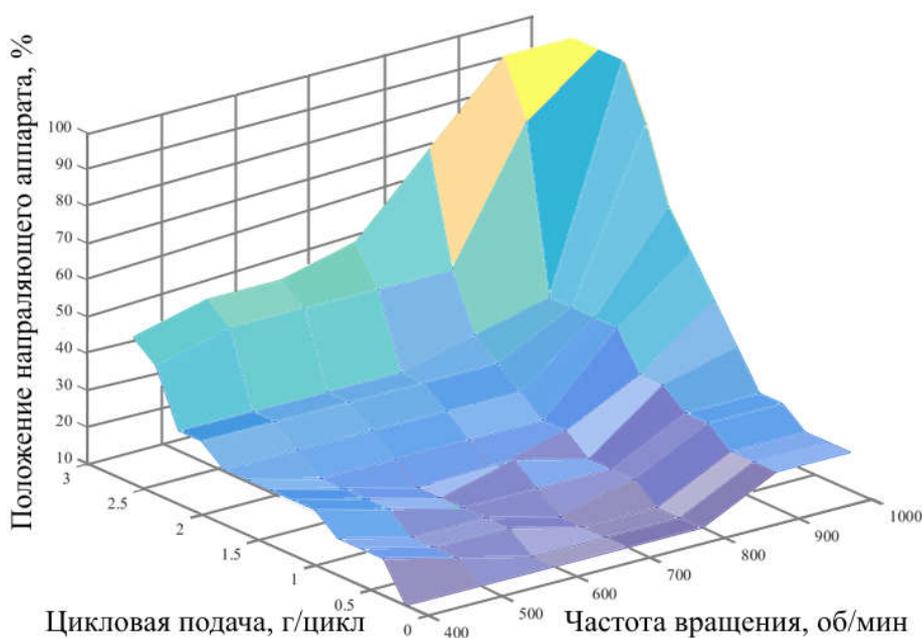


Рисунок 8. Матрица положений направляющего аппарата турбины

положение направляющего аппарата φ (красная линия); крутящий момент M_d (красная линия) и момент сопротивления M_c (зелёная линия).

Разгон проходит с постоянным темпом набора частоты вращения, время работы компрессоров на помпаже незначительно. Этот эффект достигается за счёт управления турбокомпрессорами в соответствии с разработанным алгоритмом.

При проведении расчётного исследования получены значения коэффициентов законов регулирования в контурах воздействия системы управления: для кана-

На рисунке показан результат расчёта процесса разгона двигателя при работе на винт. На Рисунке 9 показаны следующие графики: требуемое значение u (зелёная линия) и реальное значение n_d (красная линия) частоты вращения двигателя; частоты вращения турбокомпрессоров 1 и 2 n_{T1}, n_{T2} (зелёная линия); давление после компрессора p_k ; давление перед турбиной p_T ; цикловая подача топлива $g_{ц}$ (красная линия) с ограничениями по внешней скоростной характеристике $g_{всх}$ (зелёная линия) и коэффициенту избытка воздуха g_{α} (синяя линия); коэффициент избытка воздуха α ; параметры управления турбокомпрессорами: сигнал выхода на помпаж *Surge* (голубая линия), поло-

ла воздействия на топливоподачу $k_{\Pi} = 0,05$; $k_{\Pi} = 0,05$; для канала воздействия на турбокомпрессор $k_{\Pi} = 20$; $k_{\Pi} = 5$.

Расчёт статических и динамических характеристик дизеля отражает возможности созданной компьютерной программы для прогнозирования работы двигателя на возможных установившихся и неустановившихся режимах работы и настройки перспективной системы комплексного адаптивного управления.

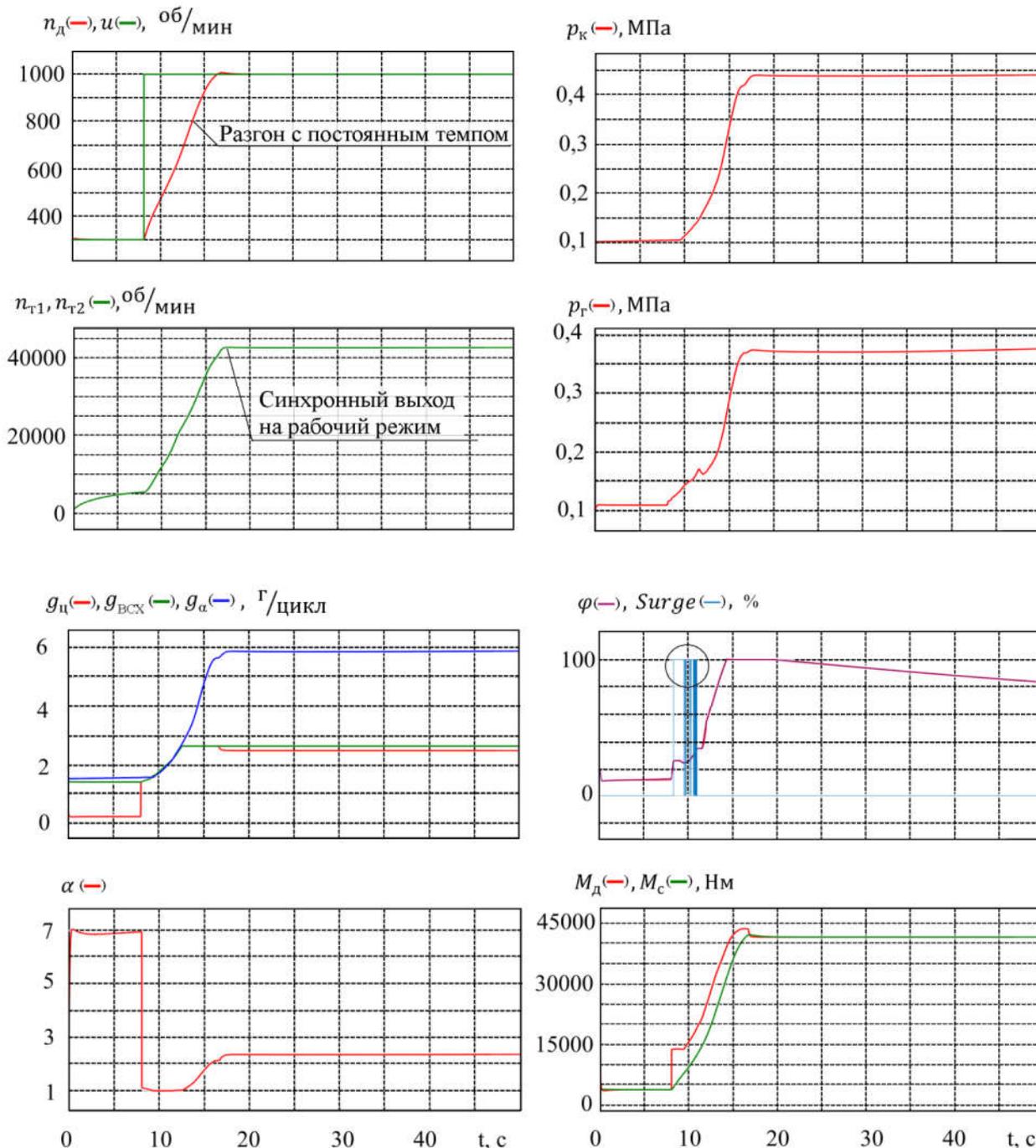


Рисунок 9. Результат расчёта динамики разгона дизельного двигателя

Четвёртая глава посвящена экспериментальным исследованиям системы комплексного адаптивного управления, которые были проведены с использованием испытательных стендов ОАО «Коломенский завод».

Проверка функционирования и первичная отладка основного канала СКАУД – регулирующего воздействия на топливоподачу проводилась на безмоторном

стенде для испытаний топливной аппаратуры. В результате испытаний достигнуто давление впрыска 1700 бар, точность задания угла опережения впрыска топлива составляет 0,1 градуса поворота коленчатого вала.

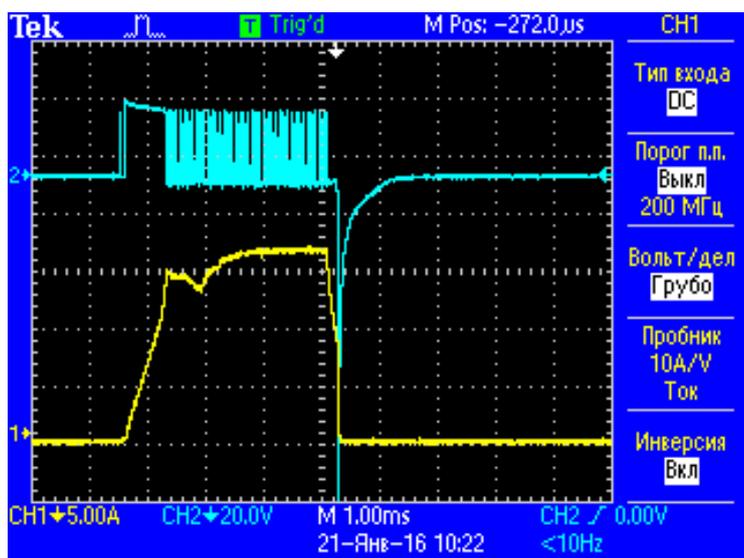


Рисунок 10. Управляющий сигнал

печения форсирования начала подачи топлива. Затем, во второй фазе происходит удержание тока на заданном уровне, что достигается регулированием продолжительности импульсов напряжения. В третьей фазе подаётся напряжение противоположного знака для быстрой разрядки обмотки электромагнита. В результате экспериментов на безмоторном стенде было определено, что увеличение тока в фазе форсирования выше 15 А не влияет на характеристику давления впрыска топлива. Поэтому в управляющем сигнале продолжительность форсирования принята 800 мкс, что соответствует времени увеличения тока до заданной величины. Необходимая величина топливоподачи достигается изменением продолжительности удерживающей фазы импульса.

На Рисунке 11 приведены результаты индицирования рабочего процесса. Верхний график – давление топлива, нижний – индикаторное давление в цилиндре (оранжевые линии). На Рисунке 11 синими линиями показаны соответствующие характеристики, полученные при испытаниях системы управления одного из ведущих мировых производителей. Сравнение приведённых характеристик показывает, что разработанная система управления соответствует передовому современному уровню техники данного направления.

Результаты испытаний установившихся режимов работы показали, что разработанная система управления обеспечивает все рабочие режимы дизеля.

Для проверки динамических свойств разработанной системы управления на одноцилиндровом отсеке сняты переходные процессы при изменении скоростного режима (Рисунок 12). В верхней части рисунка показаны процессы изменения настройки режима u (красная линия) и частоты вращения n_d (синяя линия). Был использован алгоритм изменения частоты вращения с ограничением темпа набора 25 об/мин в секунду. В нижней части рисунка показаны составляющие ПИ закона регулирования (П – фиолетовая линия, И – голубая линия) и продолжительность срабатывания клапана системы топливоподачи τ (зелёная линия).

Дальнейшие испытания системы управления проводились на одноцилиндровом отсеке дизеля Д500. При проведении испытаний фиксировались осциллограммы управляющего сигнала, подаваемого на электромагнитный клапан топливоподачи (Рисунок 10). Голубая линия на рисунке – график напряжения, жёлтая – тока. На графике напряжения видны три основные фазы управляющего сигнала. В первой фазе происходит постоянная подача напряжения на обмотки электромагнита для обеспечения форсирования начала подачи топлива. Затем, во второй фазе происходит удержание тока на заданном уровне, что достигается регулированием продолжительности импульсов напряжения. В третьей фазе подаётся напряжение противоположного знака для быстрой разрядки обмотки электромагнита. В результате экспериментов на безмоторном стенде было определено, что увеличение тока в фазе форсирования выше 15 А не влияет на характеристику давления впрыска топлива. Поэтому в управляющем сигнале продолжительность форсирования принята 800 мкс, что соответствует времени увеличения тока до заданной величины. Необходимая величина топливоподачи достигается изменением продолжительности удерживающей фазы импульса.

В результате анализа полученных результатов сделаны выводы о достаточном быстродействии и точности разработанной системы управления.

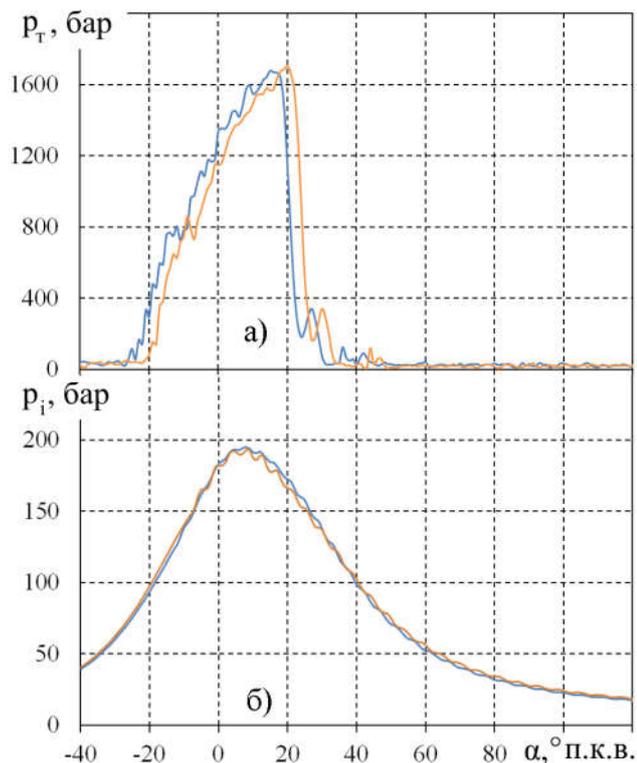


Рисунок 11. Характеристика впрыска и индикаторная диаграмма: а – давление топлива; б – индикаторная диаграмма

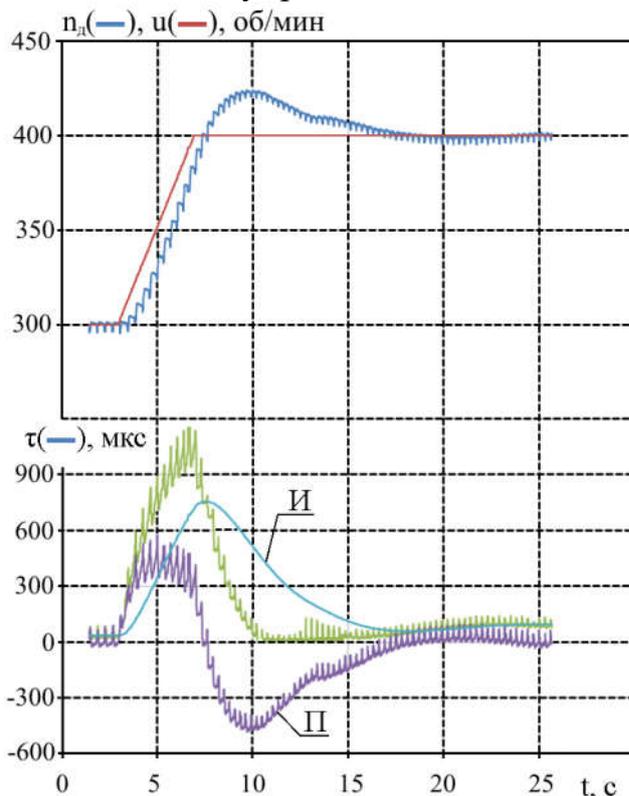


Рисунок 12. Переходные процессы

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для обеспечения комплексного воздействия на параметры рабочего процесса двигателя в разработанной системе управления заложены каналы с регулирующими воздействиями на следующие системы дизельного двигателя: топливоподачу, воздухообеспечение, охлаждение, нейтрализацию и рециркуляцию.

2. Для проведения расчётного исследования комплексной адаптивной системы управления дизельным двигателем разработана математическая модель и компьютерная программа, которые обеспечивают моделирование статических и динамических характеристик двигателя при регулирующих воздействиях на топливоподачу и воздухообеспечение.

3. Предложен новый алгоритм регулирования турбокомпрессора с изменяемой геометрией турбины с целью уменьшения времени работы компрессора на режимах помпажа в переходных процессах.

4. Анализ результатов расчётного исследования статических и динамических характеристик дизеля Д500 при различных вариантах работы системы турбонаддува показал, что при использовании двух регулируемых турбокомпрессоров увеличение крутящего момента достигает 80%, время переходных процессов снижается в 3-5 раз по сравнению с нерегулируемым турбонаддувом.

5. В результате расчётного исследования с использованием разработанной математической модели и компьютерной программы получены первичные калибровки СКАУД: матрица положений направляющего аппарата турбины для различ-

ных режимов работы двигателя и коэффициенты законов регулирования. Значения коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих законов регулирования составили: для канала воздействия на топливоподачу $k_p = 0,05$; $k_i = 0,05$; для канала воздействия на турбокомпрессор $k_p = 20$; $k_i = 5$.

6. При экспериментальных исследованиях статических и динамических характеристик дизеля Д500 с разработанной системой управления на безмоторном стенде и одноцилиндровом отсеке получены следующие результаты: давление впрыска – до 1700 бар, точность задания угла опережения впрыска топлива – 0,1 градуса поворота коленчатого вала, стабильность поддержания частоты вращения в пределах 1.8-4.7 % в зависимости от режима работы отсека, устойчивая работа системы управления во всём диапазоне рабочих режимов двигателя. Полученные при испытаниях значения параметров рабочего процесса соответствуют требуемым для дизеля Д500 показателям, что подтверждает возможность использования разработанной СКАУД для импортозамещения в области систем управления среднеоборотными дизельными двигателями.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Кузнецов А.Г., Скибо В.С., Харитонов С.В. Полунатурное моделирование как метод разработки систем управления энергетическими установками транспортных средств // Материалы XXXXI Всероссийского симпозиума по механике и процессам управления. 2011. С. 193-200. (0,6 п.л./0,25 п.л.).
2. Кузнецов А.Г., Кулешов А.С., Харитонов С.В. Метод реконструкции исходных данных для составления математических моделей дизелей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. №5. С.49-54. (0,6 п.л./0,25 п.л.).
3. Моделирование процессов управления транспортным средством с дизелем и электрической трансмиссией/ Харитонов С.В. [и др.] // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2014. №5. С. 68-77. (0,7 п.л./0,2 п.л.).
4. Кузнецов А.Г. Харитонов С.В. Латочкин А.А. Математическая модель дизеля как источника энергии транспортной установки с электрической трансмиссией // Грузовик. Машиностроение. 2014. №7. С. 11-14. (0,6 п.л./0,25 п.л.).
5. Метод имитационного моделирования при проектировании систем управления двигателями/ Харитонов С.В. [и др.] // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: сборник статей IX Всероссийской научно-производственной конференции. МНИЦ ПГСХА. Пенза: РИО ПГСХА, 2015. С. 35-38. (0,4 п.л./0,1 п.л.).
6. A mathematical model of a diesel engine for simulation modelling of the control system/ Kharitonov S.V. [et al.] // Global Journal of Pure and Applied Mathematics (GJPAM). 2016. №1. pp. 213-228. (1,5 п.л./0,5 п.л.).
7. Investigation on electromagnetic valve of fuel injector for accumulator fuel equipment system/ Kharitonov S.V. [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. №11. pp. 7431-7438. (1,6 п.л./0,4 п.л.).
8. Numerical Investigation of Diesel Engine Characteristics During Control System Development/ Kharitonov S.V. [et al.] // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. №23. pp. 11560-11565. (1 п.л./ 0,25 п.л.).