

ХАРЬКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛ.-ДОР. ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

ДОЛГИХ Иван Дмитриевич

РАЗРАБОТКА
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

05.22.07

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Харьков 1993 г.

Диссертационная работа выполнена на кафедре теории механизмов и машин Харьковского политехнического института

Научный консультант - доктор технических наук,
профессор Грунауэр А.А.
доктор технических наук
Пойда А.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Долганов К.В.

доктор технических наук,
профессор Рыбальченко А.Г.

доктор технических наук
Мац С.З.

Ведущая организация - Институт проблем машиностроения АНУ

Защита состоится "27" мая 1993 г. в 13⁰⁰ часов в ауд.
на заседании специализированного совета ДИИ4.04.01 по тепловым
двигателям при Харьковском институте инженеров железнодорожного
транспорта по адресу:
310050, г. Харьков - 50, площадь Фейербаха, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского института инженеров железнодорожного транспорта имени С.М. Кирова

Автореферат разослан "26" апреля 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

В.М. Лялюк



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Вопросы улучшения экологических и экономических показателей транспортных дизелей в программах дизелестроения на Украине рассматриваются как первостепенные. Поэтому совершенствование существующих и разработка новых систем регулирования и управления транспортными силовыми установками, решение народнохозяйственной задачи — снижение эксплуатационного расхода топлива и дыма отработавших газов — и научно-технической задачи — создание непрерывно-дискретных систем автоматического регулирования (САР) частоты вращения и мощности транспортных дизелей — является актуальной проблемой, на что и направлена данная диссертационная работа.

Анализ вопросов развития непрерывных (аналоговых) и дискретных (микропроцессорных) САР частоты вращения и мощности транспортных дизелей показал явное преимущество последних (микропроцессорных), позволяющих расширить функции системы и количество регулируемых параметров. Однако автономное использование дискретных САР ограничено определенными условиями эксплуатации транспортного дизеля, отдельные модификации которого могут выпускаться даже для работы в районах с тропическим климатом.

В настоящее время концептуально верным представляется построение двухконтурных непрерывно-дискретных САР, обеспечивающих совместную параллельную работу механического и микропроцессорного контуров регулирования. Такие САР позволяют за счет рационального распределения функций, выполняемых непрерывным и дискретным контурами, обеспечить качественное регулирование при надлежащей надежности.

В работе рассмотрен следующий вариант распределения специальных функций, выполняемых непрерывно-дискретной САР: механический контур корректирует подачу топлива по давлению наддува, а микропроцессорный — реализует пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон регулирования частоты вращения и мощности.

Такое построение САР целесообразно выполнить на комбинированной элементной базе — механических элементах, микропроцессорных комплектах, устройствах пропорциональной электрогидравлики. Указанные системы позволят комплексно решить проблему обеспечения высокой эксплуатационной экономичности при выполнении требований

к приемлостости по мощности, экологическим показателям и соответствующей адаптации к внешним условиям эксплуатации транспортной силовой установки.

Кроме того, такой подход к построению САУ позволит без топливного риска и с минимальными затратами модернизировать дизели находящиеся в эксплуатации, с целью экономии топлива и снижения дымоности отработавших газов. Поэтому решение поставленной задачи является актуальным.

Таким образом, совершенствование теорий, конструкций и методов исследования непрерывно-дискретных САУ, построенных на комбинированной элементной базе, рассматривается как концепция текущего и перспективного развития вопросов регулирования и управления дизелями.

Цель работы. 1. Создание двухконтурной непрерывно-дискретной САУ частоты вращения и мощности транспортного дизеля.

2. Разработка методов экстремального и адаптивного регулирования и принципов их реализации непрерывными и непрерывно-дискретными САУ.

Научную новизну составляют:

- методика определения ограничительных характеристик, обеспечивающих адаптацию дизеля к окружающей среде;
- методы экстремального и адаптивного регулирования, позволяющие реализовать в переходном процессе максимальный крутящий момент и оптимальную по расходу топлива динамическую характеристику изменения мощности при допустимой ее приемлостости;
- математическая модель механико-электронной САУ частоты вращения и мощности позволяющая проводить широкие исследования непрерывно-дискретных систем;
- методика синтеза микропроцессорных САУ частоты вращения и мощности на основе линейных и нелинейных математических моделей дискретных систем;
- алгоритмы функционирования комбинированной САУ и мощности транспортного дизеля;
- принципы управления дизелем САУ с разделением функций между аппаратными и программными средствами.

Практическая ценность.

- инженерные методы расчета гидромеханических регуляторов САУ и мощности;

- методы согласования динамических характеристик элементов дискретной САРЧ;
- требования к программному обеспечению цифровых САРЧ;
- алгоритмы управления транспортным дизелем с цифровой САРЧ и мощностью;
- методика отладки непрерывно-дискретной САРЧ;
- регулятор частоты вращения с импульсом по давлению наддува;
- унифицированное исполнительное устройство, общее для двухконтурных непрерывно-дискретных САРЧ в мощности;
- макетный образец механико-электронного регулятора частоты вращения и мощности для непрерывно-дискретной САРЧ транспортного дизеля.

Оригинальные технические решения защищены двенадцатью авторскими свидетельствами.

Реализация. На основе научных исследований, проведенных автором совместно с Саратовским ПО "Волгадизельмаш", разработан и внедрен в серийное производство новый гидромеханический регулятор частоты вращения с корректором топливоподачи по давлению наддува 20ВРН-30 (впоследствии 21ВРН-30). Регулятор успешно эксплуатируется на автосамосвалах БелАЗ особо большой грузоподъемности (100т и выше), оборудованных дизелями семейства ЧН 21/21. Внедрение регулятора в серийное производство дало экономический эффект 2 млн. рублей (в ценах 1985 г.), за счет экономии топлива на переходных процессах и при запусках, и за счет существенно сниженного дымообразования отработавших газов. Методика проектирования и расчета САР с импульсом по давлению наддува используется также Харьковским ПО "Завод имени Малышева", Свердловским ПО "Турбомоторный завод".

Макетный образец механико-электронного регулятора частоты вращения создан совместно с ПО "Волгадизельмаш", прошел все виды испытаний на электрических и дизельных стендах, на двигателе 6ЧН 21/21.

В результате были подтверждены основные теоретические предпосылки создания непрерывно-дискретных САР частоты вращения транспортных дизелей. Методы расчета и проектирования этих систем используются ПО "Волгадизельмаш" при разработке электронных регуляторов частоты вращения.

Исполнительное устройство для микропроцессорных систем регулирования, а также теоретические результаты исследований используются Харьковским ПО "Завод имени В.А. Малышева" и Свердловским

турбомоторным заводом при разработке электронных САР транспортных и стационарных дизель-генераторов.

Часть исследований и разработок, представленных в диссертации, используются в учебном процессе Харьковского политехнического института и других вузов.

Апробация. Основные результаты исследований докладывались на следующих конференциях и семинарах: научно-технических конференциях ХПИ (1973-1992 г.г.), Всесоюзных семинарах по автоматическому регулированию тепловыделительных установок МВТУ имени Н.Э.Баумана (1975-1988 г.г.), на технических совещаниях ведущих специалистов по дизельостроению Харьковского ПО "Завод имени В.А. Малышева", Саратовского ПО "Волгадизельмаш", Свердловского ПО "Турбомоторный завод" (1976-1989 г.г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом", Харьков, январь 1979 г., На Всесоюзной научно-технической конференции "Применение МП техники при автоматизации технологических процессов производства и в САР", г.Александррия, май 1985 г., на Республиканской научно-технической конференции "Функционально ориентированные вычислительные системы", Харьков, май 1986 г., на Республиканской научно-технической конференции "Функционально ориентированные системы", Харьков-Алута, октябрь 1990 г., На Республиканской научно-технической конференции "Гидравлика и гидропривод машин, автоматов, промышленных роботов в машиностроении", г. Севастополь, сентябрь 1990 г., на Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование в энергетике", АН СССР, г.Киев, октябрь 1990 г.

Диссертационная работа выполнена в Харьковском политехническом институте, на кафедре теории механизмов и машин.

Экспериментальная часть работы выполнялась при непосредственном участии автора на Саратовском ПО "Волгадизельмаш", на Свердловском ПО "Турбомоторный завод", на Миномком заводе БелАЗ (г. Додано).

На защиту выносятся следующие вопросы:

- методика определения ограничительных характеристик, обеспечивающих требуемые динамические качества дизеля при работе транспортной установки как на уровне моря так и в условиях высокогорья;
- регуляторы частоты вращения непрямого действия, реализующие ограничительные характеристики непрерывной САР с импульсом по

давлению наддува;

- методика определения оптимальных коэффициентов ПИД-закона регулирования и принципов согласования параметров при синтезе дискретной САР частоты вращения и мощности транспортного дизеля;
- алгоритм регулирования и управления дизелем с обоснованным разделением функций, реализуемых аппаратно или программно;
- метод реализации оптимальной динамической характеристики при наборе нагрузки дизелем в переходном процессе;
- метод регулирования по максимальному крутящему моменту дискретной САР;
- унифицированное исполнительное устройство для непрерывно-дискретных САР частоты вращения и мощности;
- макетный образец механико-электронного регулятора частоты вращения и мощности для непрерывно-дискретных САР;
- методика отладки и испытаний непрерывно-дискретных САР частоты вращения транспортного дизеля.

Публикации. По теме диссертация опубликовано 49 работ (средних 12 авторских свидетельств на изобретения).

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, 6-ти разделов, заключения и приложения с материалами о внедрении в народном хозяйстве результатов разработок. Основная часть работы содержит 270 страниц текста, рисунков, 85, таблиц. 15

В первом разделе дан анализ путей совершенствования САР частоты вращения дизелей как на механической так и электронной элементной базе. Поставлены задачи комплексного решения проблемы эффективной эксплуатации транспортных дизелей в условиях переменных и установившихся режимов путем создания двухконтурной механико-электронной САР, которая работает совместно как непрерывно-дискретная система на общее исполнительное устройство.

Анализ многочисленных работ Симонова А.Э., Грунауэра А.А., Крутова В.И., Долганова К.В., Косова Е.Е., Эпштейна А.С., Рысальченко А.Г., Данилова Ф.М., Кончаковского В.А., Заславского Е.Г., Иванова П.В., Баранова Н.А., Леонова И.В., Шатрова В.И., Дяденко А.М., Кухтенко К.С., Кузнецова Т.Ф., Егорова Я.А., Стефановского Б.С. и других авторов показал, что улучшение эксплуатационных показателей дизелей, связанное с совершенствованием их систем на механической элементной базе, осуществляется по двум направлениям. Первое направление обеспечивает интенсификацию воздухообмена дизеля различными путями. Второе направление - воздействие

требуемым образом на топливоподачу путем корректирования ее по предельно допустимым параметрам дизеля. В последнее время наиболее распространенным является корректирование топливоподачи по давлению наддува.

Как показал анализ схем конструктивного исполнения регуляторов частоты вращения непрямого действия, предназначенных для транспортных дизелей (судовых, тепловозных, автопоездов), им придали столько дополнительных функций, что в результате избыточности эти функции реализуются не лучшим образом и снижается надежность регулятора.

С другой стороны, многие результаты теоретического исследования адаптивных и экстремальных систем, сложные законы регулирования не могут быть реализованы с помощью механической элементной базы, поскольку требуется программное управление дизелем.

Поэтому становится актуальным для синтеза САР дизелей применение электронной элементной базы (аналоговой или микропроцессорной); а, следовательно, создание электронных САР параметрами дизелей.

В настоящее время разработаны или находятся на стадии разработки в основном три типа электронных САР: 1. Система для дизеля с обычной (классической) топливной аппаратурой при использовании электронного регулятора частоты вращения. 2. Система для дизелей при использовании электронно-гидравлически управляемых форсунок. 3. Система для бензинового двигателя с использованием ЭВМ. Работы по созданию электронных САР ведутся рядом фирм: Вудворд (США), Ардлей (Англия), СТИ (ФРГ), Норконтрол (Норвегия), Барбер-Кольман (США), Дизель-Кияи (Япония) и другие. Опытные образцы электронных САР первого типа разработаны на заводе "Звезда" г. С-Петербург, на Коломенском тепловозостроительном заводе. Опытные образцы САР второго типа созданы в Коломенском филиалах ВЭИ и на заводе "Звезда". Вместе с тем, применительно к дизелю наземного транспорта, преимущественное распространение пока получали САР первого типа с обычной (классической) топливной аппаратурой.

Наиболее известны работы по электронным системам регулирования дизелей авторов Пянского Ф.И., Вясмана А.С., Покровского Г., Левина М.И., Мельника Г.В., Кузнецова Н.Г., Островского Е.Ю., Бендаренко В.В., Шинялевского Г.Б., Федорова П.В., Никитина Е.А., Грудина Л.Ю., Козлова А.В., Мьяльдяна Н.Х., Архангельского В.М., Шестеркина Н.Д. и других.

Одной из проблем, решаемых авторами, является разработка и

исследование исполнительных устройств (ИУ). Анализ показывает, что для мощных дизелей перспективными являются электрогидравлические исполнительные устройства, а для дизелей малой мощности — чисто электрические ИУ. Однако, проблема выбора типа устройства и его рациональной конструкции пока не решена.

Важным вопросом при создании и доводке САР первого типа для дизелей наземного транспорта является вопрос об алгоритмах их управления. Задача выбора алгоритмов управления САР, частоты вращения транспортных дизелей, научное обоснование разделения функций системы, на аппаратно и программно реализуемые, в настоящее время фактически не решены. Недостаточно внимания уделено исследованию влияния погрешности измерения и вычисления регулируемых параметров на качественные показатели САР транспортных дизелей, а также вопросам сглаживания этих погрешностей.

В работах Пинского Ф.И., Левина М.И., Островского Э.С., Девнера В.Ю. исследованы вопросы оптимизации систем управления и регулирования отдельными параметрами дизеля, например, угла опережения впрыска топлива, частоты вращения. Однако, вопросы оптимального синтеза САР частоты вращения и нагрузки, комплексно решающие многие проблемы эффективной эксплуатации транспортных дизелей не рассмотрены в настоящее время.

Не исследован также вопрос реализации новых способов регулирования, которые можно осуществить в связи с открывающимися возможностями применения электронных систем.

В разделе проведен также анализ состояния применения датчиков параметров. Для функционирования электронной САР частоты вращения необходимо, как минимум, два датчика — частоты вращения вала и перемещения рейки топливных насосов. Комплексные электронные САР по мере расширения их функций могут включать датчики нагрузки, давления наддува, температуры и давления масла в дизеле и другие.

С середины 80-х годов получают распространение цифровые системы регулирования, обладающие большими возможностями реализации сложных алгоритмов, гибкостью и приспособленностью к объектам различного назначения за счет программного обеспечения. Однако, вопросы синтеза таких систем в литературе освещены недостаточно.

Наиболее широко применяются электронные регуляторы для дизель-генераторов переменного тока так как они обеспечивают высокую точность регулирования частоты вращения. Более сложной явля-

ется задача создания электронного регулятора для транспортных дизелей. Он должен обладать большой функциональной насыщенностью с целью обеспечения требуемых динамических и статических показателей, осуществлять пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон регулирования. За счет реализации ограничений изменения параметров системы и за счет новых способов регулирования решать вопросы адаптации дизеля к окружающей среде и задачи экстремального регулирования.

Однако недостаточная надежность таких систем в сложных условиях эксплуатации дизеля, замедляет темп внедрения их в промышленное производство.

Перспективной в настоящее время является разработка двухконтурной механико-электронной САР частоты вращения и нагрузки, работающей совместно на одно исполнительное устройство. Функциональная схема двухконтурной механико-электронной САР частоты вращения транспортного дизеля показана на рис. 1. Электронный контур включает корректирующее и согласующее устройства, а механический — соответствующий чувствительный элемент. Система имеет общее задающее и исполнительное устройство, которое управляет рейкой ТНВД по сигналу и от механического и от электронного контуров регулирования. В случае аварийных обстоятельств возможна автономная работа контуров регулирования путем установки переключателей определенным образом.

Такая САР сможет перераспределить функции между механическим и электронными контурами требуемым образом, отдавая предпочтение реализации принципов адаптивного и экстремального программного управления дизелем.

Таким образом задача создания высоконадежных универсальных САР параметрами транспортных дизелей требует решения ряда проблем:

- реализация адаптивного регулирования путем ограничения топливоподачи по предельно допустимым значениям параметров, с учетом работы дизеля как на уровне моря так и в условиях высокогорья;
- реализация принципов экстремального регулирования;
- реализация ПИД-закона регулирования с оптимальными параметрами;
- обеспечение объединенного регулирования частоты вращения и мощности;
- реализация оптимальной динамической характеристики в переходном процессе;

- разработка алгоритмов регулирования и управления дизелем, обеспечивающих применение минимального количества датчиков за счет рационального распределения функций решаемых программно или аппаратно;
- реализация принципов согласования параметров САР, обеспечивающих их работоспособность и надежность в эксплуатации;
- разработка аппаратного обеспечения, позволяющего с минимальным техническим риском и затрат обеспечить требуемое количество регулируемых параметров при сохранении качественных показателей САР;
- разработка принципов реализации решаемых проблем использованием рационального сочетания аналоговых и дискретных средств автоматизации;
- разработка надежных исполнительных устройств.

Часть перечисленных задач может быть решена путем использования непрерывных (традиционных механических или других аналоговых структур), систем регулирования, а часть из них требует применения дискретных систем, построенных на основе микропроцессорных комплектов (или других цифровых элементах).

Совместное использование структур непрерывного и дискретного управления позволяет придать системе новые свойства и повысить ее надежность. Универсальность же таких систем обеспечивается за счет рационального перераспределения функций выполняемых непрерывной и дискретной частями системы. Поэтому такая САР обеспечит максимальное число выполняемых функций с требуемыми динамическими показателями при сохранении высокой надежности.

Непрерывно-дискретная САР строится по блочному принципу, с тем чтобы потребитель мог выбрать необходимый для данных условий эксплуатации дизеля соответствующий комплект поставки.

В состав блоков системы целесообразно ввести надежные стандартные элементы.

Построение непрерывно-дискретных САР в настоящее время возможно на комбинированной элементной базе - традиционных элементах автоматизации механических систем, аналоговых устройствах, микропроцессорных комплектах, элементах пропорциональной электрогидравлики.

Второй раздел посвящен разработке методики построения значительных характеристик транспортных дизелей и их реализации на основе механических систем непрерывного действия.

Методика включает:

- аналитическое исследование процесса набора нагрузки с целью определения наиболее рационального изменения параметров дизеля при условии выполнения требуемой приемистости по мощности и допустимой дымности;
- построение ограничительных характеристик по предельно допустимым значениям давления наддува в переходном процессе в случае работы дизеля на уровне моря;
- анализ изменения основных параметров дизеля при работе дизеля в высокогорных условиях;
- построение ограничительных характеристик по давлению наддува при изменении абсолютного давления окружающей среды;
- определение закона топливopодачи, обеспечивающего допустимый диапазон изменения коэффициента избытка воздуха.

На основе анализа тягово-динамических характеристик автосамосвала БелАЗ-549А с дизелем 8ЧН 21/21 сформулированы требования тяги транспортных средств к приемистости силовой установки и проведено аналитическое исследование закономерностей набора нагрузки транспортным дизелем. Такое исследование позволило построить идеализированную схему изменения основных параметров дизель-генератора по времени состоящую из трех этапов. На первом этапе цикловая подача топлива ограничивается условием допустимого уровня дымления, а частота вращения вала и полезная мощность выбираются по условию достижения наибольшей приемистости дизеля по мощности. На втором этапе мощность транспортной установки увеличивается с заданным темпом при постоянной частоте вращения вала дизеля, а цикловая подача увеличивается с темпом, обеспечивающим заданный рост эффективной мощности. На третьем этапе процесс набора нагрузки продолжается при условии роста частоты вращения ротора турбокомпрессора и давления наддува. С одной стороны, было показано, что при достигнутом уровне форсирования дизелей типа ЧН 21/21 она может удовлетворять требованиям тяги, но с другой стороны анализ переходных процессов, соответствующих резкому набору нагрузки, сопровождается значительным дымлением. Так дымность (рис. 2, кривая I) по шкале Хатриджа оставляет более 80% в течение 3-4 секунд и более 40% - в течение всего времени переходного процесса. Все это служит основанием необходимости согласования характеристик топливopодачи и воздуxоснабжения.

В результате система регулирования должна обеспечить изменения

требуемым образом подачу топлива и нагрузку с целью реализации допустимой приемистости по мощности и дымности отходящих газов, но с минимально возможным эксплуатационным расходом топлива.

Такие условия могут иметь место, если организовать протекание переходного процесса с рациональным коэффициентом избытка воздуха α_p , изменяющимся в пределах $\alpha_{p_2} \leq \alpha_p \leq \alpha_{p_1}$, α_{c_2} и α_{c_1} — коэффициенты избытка воздуха соответствующие предельным значениям сгорания и дымления дизеля.

В процессе решения задачи была разработана методика определения закона топливоподачи, обозначающего область изменения цикловых подач в случае обеспечения выше указанного неравенства. Реализация же требуемого закона изменения цикловых подач топлива будет диктоваться условиями эксплуатации, которые учитываются соответствующими ограничительными характеристиками.

Для реализации ограничительных характеристик разработаны специальные корректоры, воплотившие в себе ряд оригинальных решений связанных с конструкцией чувствительного элемента, нелинейностью характера изменения давления наддува и других. В случае необходимости корректирования нагрузки в процессе реализации ограничительных характеристик возникает потребность в объединенном регулировании частоты вращения и мощности.

В работе освещены вопросы разработки объединенного регулятора частоты вращения и мощности для дизелей типа ЧН 21/21. Представлена инженерная методика выбора его параметров.

На рис. 3 показана схема объединенного регулятора частоты вращения (РЧВ) и мощности (РМ) с корректором топливоподачи по давлению наддува. Для его разработки в качестве базовой модели использован регулятор частоты вращения типа ЭРН-30 Саратовского ПО "Волгадизельмаш".

Корректор состоит из усилителя "У", рычажной передачи 24, 30, подвижного упора 21 на струне 20 связанной с золотником 4 регулятора скорости. Усилитель служит для преобразования давления наддувочного воздуха P_B в перемещение поршня 13 и усиления сигнала на его штоке 11. Усилитель устанавливается на верхнем корпусе регулятора и состоит из корпуса 12, пружин 15 и 17, золотника 14, поршня 13. Имеет два штуцера для подвода наддувочного воздуха от дизеля и масла от масляной системы регулятора. Принципиально корректор представляет собой следующее устройство, которое обеспечивает в зависимости от изменения давления наддува P_B соответствующий

щую величину зазора А между рычагом 24 и упором 21. Зазором "А" диктуется величина ограниченного смешения золотника 4 чувствительного элемента регулятора при его работе, а соответственно и скорость перемещения поршня 33 сервомотора исполнительного устройства.

Корректор топливоподачи внедрен в серийное производство, а регулятор с таким корректором получил название 20ВРН-30.

При создании регулятора 20ВРН-30 проверка всех теоретических предпосылок и получения основных параметров системы регулирования проводилось моделированием САР на ЭЦМ.

Регулятор прошел все виды испытаний на дизелях типа ЧН 21/21, (стендовые, реостатные, эксплуатационные). Анализ кривых переходных процессов показал значительное снижение дымности отходящих газов (рис. 1, кривая 3), при этом коэффициент избытка воздуха не опускался ниже 1,2 ... 1,25, а расход топлива на переходный процесс уменьшился на 8 - 10%, значительная экономия топлива на 10-12% наблюдается и при запусках дизеля.

Объединенный регулятор частоты вращения и мощности с корректором топливоподачи был положен в основу непрерывного (механического) контура двухконтурной САР.

В третьем разделе рассмотрены вопросы оптимального синтеза микропроцессорной САР частоты вращения и мощности (МП САРЧ и М) транспортного дизеля, являющейся дискретным контуром регулирования двухконтурной непрерывно-дискретной системы. В общем случае дискретный контур включает микропроцессорный вычислительный блок и исполнительное устройство. Управляющий сигнал формируется в соответствии с принятым законом регулирования в микропроцессорном блоке на основе информации от датчиков параметров дизеля. Эффективность применения МП САР зависит от выбора параметров закона регулирования. Поэтому особо важным вопросом является оптимизация законов регулирования частоты вращения и нагрузки, а также разработка принципов согласования параметров, для обеспечения работоспособности контура. Изложена методика. Изложена методика оптимизации ПИД-закона регулирования, приведены результаты расчетных исследований влияния на динамические показатели САР линейного и нелинейного ПИД-закона, погрешностей измерения частоты вращения вала двигателя и методов их сглаживания, исследованы способы гашения нежелательных частот. Рассмотрены вопросы оптимального синтеза МП САР частоты вращения и нагрузки.

Методика синтеза включает оптимизацию управления дизелем путем определения оптимальных значений таких параметров как время

($\Delta \zeta$) формирования управляющего сигнала, коэффициента (K_0) усиления обратной связи исполнительного устройства регулятора и коэффициентов K_1 , K_2 и K_3 в принятом ПИД-законе регулирования:

$$z = -K_1 \varphi - K_2 \dot{\varphi} - K_3 \int_0^t \varphi dt \quad (1)$$

где φ - безразмерное отклонение частоты вращения от заданного значения, z - сигнал управления от микропроцессорного вычислительного блока на исполнительное устройство регулятора. Методика позволяет оценить точность реализации ПИД-закона регулирования с учетом различных методов измерения регулируемого параметра, определить принципы согласования основных параметров САР.

Синтез системы основан на применении дискретной модели непрерывного объекта (дизеля) при импульсном его управлении.

Вначале рассматривается МП САР вращения дизеля без турбонаддува, которая описывается аналитической линейной системой разностных уравнений в матричной форме:

$$X[k+1] = AX[k] + WZ[k] \quad (2)$$

где $X[k]$ - вектор параметров состояния дизеля, A - квадратная матрица состояния 3-го порядка, элементы a_{ik} которой зависят от параметров системы в том числе, от коэффициентов самовыравнивания K_d и обратной связи K_0 дизеля, коэффициентов K_1 , K_2 , K_3 и от $\Delta \zeta$; $W[k]$ - вектор нагрузки, компоненты которого зависят от указанных параметров системы.

В качестве целевой функции принимаем время переходного процесса $T_{\text{п}} = T_{\text{п}}(K_0, K_1, K_2, K_3, \Delta \zeta)$. Минимум функции $T_{\text{п}}$ ищется при ограничениях, вытекающих из требований к качеству переходного процесса и устойчивости системы.

Для поиска минимума функция цели с учетом указанных ограничений применен стохастический метод решения одноэкстремальной задачи дискретного программирования с использованием малого пробного шага для выбора направления движения. Перемещение к одной из ближайших точек дискретной сетки производится с одновременным изменением нескольких координат. Расчетные исследования проводились на персональной ЭВМ типа I BM PC.

В результате для заданных значений постоянной времени дизеля T_d , коэффициента самовыравнивания K_d и постоянной времени исполнительного устройства $T_{\text{п.у}}$ были определены наборы параметров K_0 , K_1 , K_2 , K_3 и $\Delta \zeta$, удовлетворяющие техническим требованиям ГОСТ 10511-83 к показателям САРЧ дизелей для различных классов регуляторов (от первого до четвертого).

В ходе дальнейших исследований проводилось совершенствование математической модели и метода оптимизации для линейной модели САР n -го порядка:

$$\dot{X}_j = \sum_{k=1}^n b_{jk} \cdot X_k, \quad j=1, 2, \dots, n-2, \quad (3)$$

$$\dot{X}_{n-1} = \sum_{k=1}^n b_{n-1k} X_k + Z, \quad (4)$$

$$\dot{X}_n = \sum_{k=1}^n b_{nk} X_k + f(t). \quad (5)$$

где X_1, X_2, \dots, X_n - переменные состояния системы, b_{jk} ($k=1, 2, \dots, n$) - постоянные коэффициенты, $f(t)$ - внешнее воздействие, Z - регулирующее воздействие, которое является постоянным в течение периода квантования Δt .

Уравнение (5) описывает двигатель как объект регулирования, (4) - исполнительное устройство. Различная степень детализации САР дизеля с турбонаддувом выражается уравнениями (3).

Для представления уравнений (3 - 5) в матричной форме (2) потребовалось разработать специальный алгоритм преобразования рассматриваемой системы в систему разностных уравнений. В этом случае матрица состояния A имеет $n+1$ порядок.

Указанная процедура и все расчеты были проведены для системы уравнений описывающих динамику МП САРЧ дизеля с турбонаддувом:

$$T_g \dot{\varphi} = -K_g \varphi + K_{g\varrho} \varrho + K_{g\xi} \xi - f(t), \quad (6)$$

$$T_T \dot{\varphi}_T = -K_T \varphi_T + K_{T\xi} \xi, \quad (7)$$

$$\xi = K_{\xi\varphi} \varphi + K_{\xi T} \varphi_T, \quad (8)$$

$$T_{u.c.} \dot{\varrho} + K_0 \varrho = Z. \quad (9)$$

где регулирующее воздействие Z формируется согласно ПИД-закону регулирования (1), T_T - постоянная времени турбокомпрессора, $\varphi, \varrho, \xi, \varphi_T$ - обобщенные координаты, K_i с соответствующими индексами - коэффициенты усиления системы.

Оптимизация параметров системы (8 - 9) производилась по той же методике, что и для дизеля без турбонаддува. Однако,

величины K_0 и $\Delta\tilde{c}$ принимались заданными. При нахождении коэффициентов системы применен квазистатический подход с использованием экспериментальных характеристик дизелей типа ЧН 2I/2I.

На рис. 4 показаны расчетные кривые переходных процессов в МП САРЧ вращения дизеля типа ЧН 2I/2I. Кривые изображают переходные процессы, отвечающие требованиям к показателям качества САРЧ дизеля соответственно I - IV классов по ГОСТ 10511-83, при найденных оптимальных значениях K_1 , K_2 , K_3 .

Реальная система отличается тем, что существует некоторая погрешность непосредственного вычисления ПИД-закона в макропроцессоре, по сравнению с определением его в процессе аналитического решения уравнений (6 - 9). Как показали сравнительные расчетные исследования, основные показатели переходного процесса при этом отличаются не более, чем на 10%. Это говорит о том, что аналитический путь определения коэффициентов в законе регулирования (I) допустим.

Исследования переходных процессов в МП САРЧ вращения дизеля имеет ряд особенностей. Из работ Каца А.М., вытекает, что для большинства типов ДВС выполняются условия, при которых их можно рассматривать как непрерывное звено - не учитывать дискретность обусловленной циклическим характером рабочего процесса. Поэтому при $\Delta\tilde{c} = \Delta\tilde{c}_{\text{всп.}}$, т.е. при равенстве времени формирования управляющего сигнала и времени между вспышками в цилиндре дизеля, МП можно рассматривать как непрерывное звено. В силу изложенного МП САРЧ дизелей находятся в области параметров граничных для применения методов исследования дискретных и непрерывных систем. В этих условиях синтез таких систем можно проводить с помощью дискретных, так и непрерывных моделей.

Исследования амплитудно-частотных характеристик МП САРЧ как непрерывной системы позволяет получать простую наглядную зависимость влияния основных параметров системы коэффициентов в ПИД-заcone (I) на АЧХ. Анализ АЧХ системы и последующие расчеты показали целесообразность применения нелинейных коэффициентов в законе регулирования.

С другой стороны при исследовании МП САРЧ надо учитывать влияние на динамические показатели системы погрешностей измерения регулируемого параметра, обеспечить гашение нежелательных частот. Уравнения движения САРЧ представлены при таких исследованиях в нелинейном виде.

Погрешность измерения частоты вращения, обусловлена тремя причинами – методом измерения, конструктивным исполнением датчика, неравномерностью вращения вала двигателя.

Получена зависимость, отражающая взаимосвязь между погрешностью измерения частоты вращения ($\Delta \varepsilon$), временем $- / \Delta \tilde{\varepsilon} /$ формирования (квантования) управляющего сигнала ε , текущем значением частоты вращения ω_g вала и числом зубьев Z_1 шестерни индукционного датчика частоты вращения. На основе этой зависимости определяются параметры Z_1 и $\Delta \tilde{\varepsilon}$ для определенного класса регуляторов частоты вращения при заданных параметрах ω_g , K_1 , K_2 , K_3 .

Поскольку частоты ω_z формирования управляющего сигнала от микропроцессора намного больше частоты вращения вала двигателя ω_g , то неравномерность вращения вала будет сказываться на величине погрешности $\Delta \varepsilon$, поэтому необходимо предусмотреть гашение колебаний, обусловленных неравномерностью вращения.

Исследование влияния погрешности $\Delta \varepsilon$ на качественные показатели переходных процессов проводилось путем моделирования на ЭВМ МП АРЧ дизеля 6ЧН 21/21 при скачкообразном изменении нагрузки. Погрешность измерения задавалась в виде $\Delta \varphi = \Delta \varepsilon \sin \omega \varphi \tilde{\varepsilon}$

Результаты расчетов показали, что при нарушении условия $\Delta \tilde{\varepsilon} = K \cdot \Delta \tilde{\varepsilon}$ всл., где "K" целое число, в САР возбуждаются нежелательные низкочастотные колебания. Для гашения этих колебаний период квантования управляющего сигнала ε должен изменяться пропорционально изменению частоты вращения вала дизеля, и тогда в результате решения новой задачи оптимизация (при варьируемом $\Delta \tilde{\varepsilon}$), переходим к нелинейной САР в которой коэффициенты ПИД-закона являются известными непрерывными функциями от регулируемого параметра φ . При использовании разрывных зависимостей для коэффициентов $K_i = f(\varphi, \dot{\varphi})$ получаем дополнительное улучшение качественных показателей переходных процессов, в частности, существенное снижение заброса регулируемого параметра при резком сбросе нагрузки.

Однако, введение только лишь нелинейностей в закон формирования управляющего сигнала недостаточно, так как погрешность формирования сигнала еще проявляется вследствие численного дифференцирования в микропроцессоре. Поэтому исследованы различные методы сглаживания погрешностей: за счет фильтра в виде апериодического звена, за счет аппроксимации измеренного значения частоты враще-

ния методом наименьших квадратов, путем осреднения производной. Последний способ дает наилучшие результаты.

Представлены результаты расчетного исследования МП САРЧ вращения дизеля 8 ЧН 21/21, при рационально найденных параметрах системы, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 10511-83. Таким образом, описанные принципы обгласования параметров путем расчетного исследования позволяют для определенного класса дизелей выбирать рациональным образом соотношения между параметрами дизеля, микропроцессора, датчика частоты вращения и исполнительного устройства электронного регулятора.

В заключительной части третьего раздела решается задача оптимального управления транспортным дизель-генератором (ДГ) на переходных режимах за счет синтеза микропроцессорной (МП) САР частоты вращения и мощности. Как показал анализ, оптимальное управление может быть реализовано путем незначительного усложнения программного обеспечения разработанной МП САРЧ вращения, поскольку для транспортного ДГ заранее определена функция цели (оптимальная динамическая характеристика $N_e = f(\omega, X, t)$ X - вектор обобщенных координат системы и статическая $N_e = f(\omega)$ задан.), а также известны ограничения на dN_e/dt - приемистость по мощности. Задача решалась методом динамического программирования с использованием нелинейной математической модели МП САРЧ к М. Получены наиболее рациональные виды законов управления частотой вращения и нагрузкой соответственно:

$$\dot{I}_{MP} = -\bar{K}_1 \Delta\omega - \bar{K}_2 \Delta\dot{\omega} - K_3 \int \Delta\omega dt, \quad (I0)$$

$$\dot{I}_B = -\bar{K}_4 \Delta N - \bar{K}_5 \Delta \dot{N} - K_6 \int \Delta N dt, \quad (II)$$

$$K_i = f(\Delta\omega; \Delta\dot{\omega}; \Delta N; \Delta \dot{N}).$$

I_{MP} - управляющий сигнал от микропроцессора; I_B - ток возбуждения генератора; $\Delta\omega$, ΔN - изменения частоты вращения и нагрузки, K_i - коэффициенты усиления.

Четвертый раздел посвящен синтезу схемы механико-электронного регулятора на основе рассмотрения двухконтурной непрерывно-дискретной САР частоты вращения и нагрузка транспортного дизеля.

Приведено описание элементов и принцип действия двухконтурной САР как на установившихся режимах, так и при изменениях нагрузки. Это позволило выработать требования к механико-электронному регулятору частоты вращения и нагрузки при его работе в двухконтурной САР.

При разработке механико-электронного регулятора прежде всего необходимо синтезировать исполнительное устройство, как общее для механического и электронного контуров САР. Исходя из этого ИУ должно превращать как маломощный электрический управляющий сигнал от электронного вычислительного блока, так и сигнал от механического чувствительного элемента в требуемое перемещение рейки топливных насосов.

Анализ показал целесообразность создания электрогидравлического исполнительного устройства на базе серийного гидравлического усилителя (сервомотора) гидромеханического регулятора частоты вращения с применением пропорционального электрогидравлического преобразователя. Такой подход к решению проблемы позволяет с минимумом технического риска, трудоемкости расчетных и конструкторских работ синтезировать надежное ИУ пригодное для эксплуатации и отвечающее требованиям работы в САР частоты вращения транспортного вала.

В качестве элемента преобразовывающего электрический сигнал управления в требуемое перемещение штока сервомотора (рейки топливного насоса) применен модернизированный нами пропорциональный электрогидравлический преобразователь УЭ85, серийно выпускаемый Санкт-Петербургским заводом "Гидроавтоматика". Схема электрогидравлического ИУ на базе сервомотора регулятора типа ВРН-20 показана на рис. 5. Исполнительное устройство состоит из электрогидро-распределителя I, дифференциального сервомотора II и источника гидравлической энергии III (масляный насос II и пружинный аккумулятор IO). При подаче электрического сигнала на вход клеммы "К" электрогидравлического преобразователя заслонка 4 отклоняется и в торцевых камерах $\angle 1$ и $\angle 2$ золотника I образуется перепад давления. Золотник I, перемещаясь, изменяет гидравлическую проводимость дросселей 7 таким образом, что силы, действующие на него уравновесятся и он остановится в новом положении, соответствующем данному уровню электрического сигнала. В результате этого масло под давлением из напорного канала "P" поступает в каналы "A" и "B". Расход масла в каналах A и B пропорционален уровню электрического сигнала. В зависимости от его полярности либо канал "B" соединяется с напорным каналом "P", а канал "A" со сливным "T", либо, наоборот, канал "A" соединяется с "P", а канал "B" - с каналом "T". В результате скорость перемещения поршня сервомотора также будет пропорциональна уровню электрического управляющего сигнала.

При синтезе ИУ основное внимание уделено получению его характеристик, обеспечивающих качественное и устойчивое протекание переходного процесса при заданных видах ограничений и управляющих воздействиях, а также обеспечения заданного положения выходного звена ИУ на установившихся режимах работы дизеля.

Такие исследования проведены путем моделирования переходных процессов в электронной САР частоты вращения дизель-генератора 8ЧН 21/21 на ЭЦВМ. В результате проведено сравнительное исследование САР с различными видами электрогидравлического ИУ - без обратной связи, с обратной связью (с позиционированием), релейного типа. При этом закон регулирования (изменение управляющего сигнала $U_{упр}$) принимался для каждой конкретной схемы САР в следующем виде соответственно:

$$U_{упрj} = -K_1 \varphi - K_2 \dot{\varphi} - K_3 \Sigma \varphi_j \quad (I2)$$

$$U_{упрj} = U_{упрj-1} - K_1 \varphi - K_2 \dot{\varphi} - K_3 \Sigma \varphi_j \quad (I3)$$

$$U_{i1} = \text{sign } U_{упрj} \quad (I4)$$

Коэффициенты K_1 и K_2 в выражениях (I2), (I3), (I4) задавались в нелинейном виде.

Анализ полученных результатов моделирования показал, что наилучшие динамические качества обеспечивает ИУ с пропорциональным электрогидравлическим преобразователем и позиционированием его выходного звена. Кроме того, введение позиционирования позволяет упростить процесс отладки САР, так как в этом случае легко локализовать неисправности в отдельных его элементах.

Значение постоянной времени ИУ находилось на основе экспериментальных исследований ИУ на специальном электростенде. Результаты исследования ИУ приведены в шестом разделе.

Функциональная схема объединенного механико-электронного регулятора частоты вращения и мощности с корректором топливopодачи показана на рис. 6.

Регулятор выполнен на базе гидромеханического регулятора частоты вращения и мощности 20ВРН-30.

Дискретная часть регулятора включает: вычислительный блок, состоящий из блока питания, задающего устройства (стабилизированный источник питания), микро-ЭВМ, задачки ограничений параметров и задающее устройство (клавишное устройство ввода информации в микро-ЭВМ), блока сопряжения. Исполнительное устройство включает пропорциональный электрогидропреобразователь типа УЭБ5,

блок управления, выполненный на основе серийно-выпускаемых блоков БУТ-02-М-1 и предназначенных для работы с ЭПГ типа УЭ85, датчик обратной связи перемещения поршня силового сервомотора связанного с рейкой топливных насосов.

Непрерывная часть включает элементы регулятора 20ВРН: сервомотор, чувствительный элемент, регулятор мощности, корректор топливоподачи.

На корпус регулятора установлен пропорциональный электрогидравлический преобразователь, который подключен к гидравлической системе регулятора.

В случае необходимости работы регулятора в режиме механического регулирования переключатель устанавливается таким образом, что масло под давлением от масляного насоса поступает по каналу открываемому золотником чувствительного элемента к силовому сервомотору. При работе в режиме электронного регулирования этот переключатель устанавливается так, что силовой сервомотор будет подключен для управления со стороны распределительного золотника электромагнитного преобразователя. При реализации совместного электронно-механического регулирования переключатель устанавливается так, что сервомотор может управляться любым из золотников.

Принцип действия в режиме электронного регулирования заключается в следующем. При изменении нагрузки на дизель изменяется частота вращения его вала. В результате появляется рассогласование между электрическими сигналами соответствующими текущему значению частоты вращения (от датчика частоты) и заданному значению (от задающего устройства регулятора). На основании этого рассогласования в микро-ЭВМ по заложенному алгоритму ПИД-закона вычисляется величина и знак (полярность) сигнала U_{Δ} , который поступает в блок управления, туда же поступает сигнал $U_{\text{нп}}$, соответствующий текущему положению поршня сервомотора (рейки топливного насоса). В результате суммирования указанных сигналов появляется управляющий сигнал $U_{\text{упр}}$ определенной полярности на клеммах обмоток поляризованного электромагнита электрогидравлического преобразователя. Масло под давлением $P_{\text{упр}}$ поступает к силовому сервомотору. При этом расход масла пропорционален уровню электрического сигнала $U_{\text{упр}}$. Поршень сервомотора (рейка топливных насосов) смещается на величину пропорциональную $U_{\text{упр}}$ и в сторону (уменьшения или увеличения подачи топлива); действуемую полярностью сигнала $U_{\text{упр}}$ управления.

В результате начинает изменяться текущий уровень сигнала U_{hp} от датчика обратной связи. Так как произошло изменение подачи топлива, то изменяется и частота вращения, n , соответственно и сигнал U_{wr} . Будет меняться и уровень сигнала U_{Δ} от вычислительного блока. Как только сигналы U_{hp} и U_{Δ} (а соответственно U_{wz} и U_{wr}) сравняются, управляющий сигнал $U_{уп}$ станет равным нулю. Поршень силового сервомотора (рейка топливных насосов) остановится в положении, соответствующем измененной нагрузке на дизель.

Одновременно процесс управления происходит и по каналу регулирования оптимального значения нагрузки. В вычислительном блоке регулятора на основании информации от главного генератора в виде текущих значений тока I_r и напряжений U_r , формируется согласно алгоритма, реализующего ПИД-закон управления нагрузкой, сигнал текущего изменения тока возбуждения i_a и соответствующее значение нагрузки в данный момент переходного процесса. С другой стороны от задатчика ограничений задаются коэффициенты, при помощи которых согласно алгоритма определяется оптимальное значение нагрузки (сигнала $i_{в\text{ опт}}$) по оптимальной динамической характеристике $N_{\text{опт}} = f(\omega, t)$.

При изменении текущего значения нагрузки (сигнала $i_{в}$) появляется сигнал рассогласования $\Delta i_{в}$ и изменяется возбуждение генератора. Срабатывает регулятор скорости (изменяется сигнал U_{Δ}) и изменяет подачу топлива (изменяется сигнал U_{hp}) и так до тех пор, пока обе сигнала U_{Δ} и U_{hp} не сравняются и установится на данном установившемся режиме оптимальное значение $i_{в\text{ опт}}$ (нагрузки). Таким образом, по окончании переходного процесса установится прежнее значение частоты вращения (так как сигналы U_{wz} и U_{wr} сравнялись) и постоянное оптимальное для данного режима значение нагрузки (так как сигналы U_{Δ} и U_{hp} также сравнялись). ^{При} совместной параллельной работы контуров регулирования при изменении нагрузки срабатывает тот контур, который имеет меньшую постоянную времени, а сигнал на выходе этого контура будет упреждающим, по сравнению с выходным сигналом второго контура, что значительно улучшает качество регулирования. Установившийся режим при этом будет определяться дискретным контуром регулирования.

В пятом разделе дано описание аппаратных средств и программного обеспечения непрерывно-дискретной САР частоты вращения и

мощности.

Проведен анализ возможностей применения вычислительных электронных блоков управления и обоснование выбора ЭВМ для использования ее в качестве бортового компьютера транспортного средства. На основе сравнительного анализа цифровых и аналоговых блоков управления при применении в электронных САР транспортных дизелей предложено использование комбинированного аналого-цифрового блока управления. Цифровой канал, которого служит для компенсации сигнала по нагрузке, а аналоговый — для стабилизации процесса по положению рейки. Кроме того, введение двух каналов может быть использовано для повышения надежности контура регулирования.

Макетный образец дискретного контура регулирования включает: программируемый универсальный контроллер "Электроника MC2702", блок сопряжения контроллера с датчиками и другими устройствами, блок управления пропорциональным электрогидропреобразователем, блок питания. Приведено описание элементов макетного образца и их основных характеристик, которые уточнялись при автономной отладке вычислительного блока на электрическом и дизельном стендах.

Эффективность дискретных систем в значительной мере зависит от структуры алгоритмов регулирования и управления дизелем, а также от того, какими средствами (программными или аппаратными) решается задача регулирования. Алгоритмы управления дизелем являются неотъемлемой частью САР, включаемой в программное обеспечение системы и реализуется в вычислительном блоке контура регулирования. Поэтому значительное внимание в рассматриваемой главе уделено разработке алгоритмического обеспечения САР.

Предложены рационально составленные алгоритмы регулирования частотой вращения и нагрузкой дизеля, позволяющие решать задачу регулирования при минимальном количестве датчиков, минимальном времени формирования управляющего сигнала, без потери качественных показателей регулирования. Расширение же функций САР частоты вращения дизель-генератора производится последовательным дополнением базового алгоритма соответствующими алгоритмическими блоками (рис. 7, оптимизация Б.ОПТ, ограниченной Б.ОПР, управления нагрузкой БУН). В разделе представлены и указаны их особенности и принципы построения.

Разработаны алгоритмические методы реализации в переходном процессе максимального крутящего момента и оптимальной динамической характеристики изменения мощности. Суть способа регулирования

по максимальному крутящему моменту заключается в том, что положение рейки (рис. 7) ($h_{p \text{ опт}}$, или управляющий сигнал $Z \text{ опт}$) топливного насоса, соответствующее $M_{кр \text{ max}}$ в каждой точке переходного процесса, находится с учетом ограничительных характеристик по предельно-допустимым значениям параметров дизеля. Вычисления $h_{p \text{ опт}}$ производится по отдельной подпрограмме (блок положения рейки - Б.ПР). В результате протекание переходного процесса обеспечивается при максимально возможных значениях крутящего момента, соответствующих качественному рабочему процессу. Такой способ регулирования исключает применение других громоздких и дорогостоящих в исполнении методов корректирования параметров дизеля.

Известно, что в настоящее время задача оптимального управления мощностью в переходном процессе не решена. В работе предложен метод реализации оптимальной по расходу топлива и быстродействию динамической характеристики изменения мощности дизеля в переходном процессе при известной допустимой ее приемистости. Очевидно, что время переходного процесса будет минимальным, если в каждой точке переходного процесса скорость изменения нагрузки будет соответствовать максимально допустимой $[dne/dt]$. Следовательно, задача оптимального управления дизель-генератором на переходных режимах сводится к заданию допустимой скорости приема нагрузки, а в канале управления скоростью - к заданию скоростного режима в соответствии с экономической (оптимальной) статической характеристикой в зависимости от действительной нагрузки.

Описаны полные алгоритмы управления транспортным дизелем (запуск, остановка, автоматическое регулирование) в различных вариантах по рациональному сочетанию их состояний аппаратных и программных подходов решения задач управления.

Разработаны требования к программному обеспечению САУ параметрами транспортного дизеля, вытекающие из особенностей алгоритмов и их реализации в условиях эксплуатации транспортного средства. Представлена управляющая программа для микропроцессорной САУ.

Программное обеспечение САУ включает в себя системное программное обеспечение, предназначенное для организации вычислительного процесса и автоматизация разработки программ, а также прикладное программное обеспечение для реализации конкретных алгоритмов управления и регулирования. Интерфейсное программное обеспечение (ИПО) выделено в отдельный класс, что позволяет пользователю составлять объективно независимые программы, а связь с объектом

осуществлять при помощи вызовов процедур ИПО. Использование для проектирования ИПО объектно ориентированного языка позволяет сократить время проектирования и повысить надежность программного обеспечения.

В полной мере реализовать приведенные в разделе требования к программному обеспечению САУ транспортного дизеля на одном микропроцессоре (из выпускаемых промышленностью в настоящее время) практически невозможно. В связи с этим для реализации задач управления дизелем может быть принята многопроцессорная МАУ (например, двухпроцессорная). Описаны особенности реализации программного обеспечения многопроцессорных САУ.

В шестой раздел включены экспериментальные исследования двухконтурной механико-электронной САР частоты вращения транспортного дизеля. Анализируются исследования статических и динамических характеристик при работе под управлением механического, электронного контуров регулирования и при совместном параллельном их функционировании как непрерывно-дискретная САР.

Экспериментальные исследования проводились на протяжении 1978-1991 г.г. совместно со следующими организациями: Саратовским ПО "Волгадизельмаш", Свердловским ПО "Турбомоторный завод", Минским ПО "БелАЗ", Киевским институтом энергосбережений АН Украины, на электрических, дизельных стендах, реостатных комплексах и на стендах с развернутой машиной, как дизель-генераторных так и оборудованных гидравлическим тормозом. Объектом испытаний были серийно выпускаемые Свердловским турбомоторным заводом дизели 6ЧН 21/21 и 8ЧН 21/21, мощностью 772 и 955 кВт соответственно с регуляторами частоты вращения типа ВРН-30 Саратовского ПО "Волгадизельмаш". Такие дизели эксплуатируются на многих транспортных установках, в том числе и на автосамосвалах и автопоездах особо большой грузоподъемности.

Дистанционное управление дизелем с многоканальной регистрацией параметров осуществлялось комплектом оборудования "Шенк". Система автоматизации L116-68 на базе микропроцессорной техники обеспечивала проведение испытаний по заданной программе с автоматической регистрацией параметров. Для записи параметров переходных процессов был применен цифровой анализатор А-652 фирмы AVL (Австрия) с отображением динамических процессов в цифровой и графической форме.

При экспериментальных исследованиях механического контура

САР, построенного на базе регулятора частоты вращения 20ВРН-30 определялись статические характеристики дизелей, работа их на переходных режимах при заданных ограничительных характеристиках корректирования топливopодачи и различной степени коррекции, а также параметры дизеля при запуске. Результаты анализировались по расходу топлива на переходный режим и на запуск, по дымности отработавших газов, приемистости по мощности.

На рис. 8 показаны кривые изменения параметров системы (k_p ; n и расхода топлива V_p) при запуске дизелей оборудованных регуляторами 9ВРН-30 и 20ВРН-30 с различными степенями ограничений, что, как показали исследования и длительная эксплуатационная проверка двигателей, оборудованных двухимпульсными регуляторами, приводит к существенному повышению надежности поршневой группы дизеля.

Основные результаты, вытекающие из анализа, следующие: интенсивность роста давления наддува более благоприятна с регулятором 20ВРН-30, что объясняется улучшением рабочего процесса дизеля в переходном режиме за счет эффективной реализации корректирования топливopодачи по давлению наддува, коэффициент избытка воздуха α для системы с регулятором 9ВРН-30 снижается ниже единицы, а с регулятором 20ВРН-30 минимальное значение α составляет 1,2 - 1,25. Это привело к значительному уменьшению дымности отработавших газов (рис. 1, кривая 3). Расход топлива на переходный процесс для дизелей, оборудованных регулятором 20ВРН-30, на 10-12% меньше, такое же уменьшение расхода топлива наблюдается и при запусках.

Проведенные экспериментальные исследования позволили разработать дополнительные требования, предъявляемые к САР частоты вращения с импульсом по давлению наддува, разработать исходные требования к двухконтурной системе, а регулятор 20ВРН-30 положить в основу разработки двухконтурных САР.

Далее представлены результаты отладки и доводки исполнительного устройства, вычислительного блока и экспериментальные исследования макетного образца механико-электронного регулятора частоты вращения и мощности для непрерывно-дискретных САР. Даны сравнительные результаты исследований механического и электронного контуров двухконтурной САР дизеля.

Динамические характеристики ИУ исследовались на специальном стенде для обкатки регуляторов скорости, оборудованным необходимой измерительной аппаратурой.

Программа испытаний включала всесторонние исследования работы ИУ как без позиционирования, так и с позиционированием выходного звена при различных уровнях управляющего электрического сигнала, различных давлениях масла, конструктивного исполнения отдельных элементов, с различными по расходу характеристикам электрогидравлических преобразователей (ЭП), а также с учетом других факторов.

Исследования показали, что постоянная времени ИУ мало зависит от конструктивного исполнения сервомотора, но существенно зависят от расходных характеристик ЭП и величины давления масла в напорном канале. В результате исследований были определены рациональные параметры влияющие на динамические показатели ИУ, а исследование ИУ с позиционированием выходного звена позволило получить его статическую характеристику $U_3 = f(h_{ш})$. U_3 - заданный управляющий сигнал, $h_{ш}$ - перемещение выходного штока, связанного с рейкой ТНВД. При исследовании влияния параметров ИУ на протекание статической характеристики, было выяснено, что давление масла и коэффициенты усиления в блоке управления по линии обратной связи не влияют на ее характер. Статическая характеристика - монотонная гладкая функция и практически на всем рабочем диапазоне изменения управляющего сигнала - линейка.

Автономная отладка вычислительного блока производилась как на электрическом, так и на дизельном стендах. При отладке на электрическом стенде сигнал, соответствующий заданной частоте вращения U_{ω_3} , подавался от источника стабилизированного напряжения, а сигнал, соответствующий текущей частоте вращения U_{ω_7} - от генератора импульсов звуковой частоты.

В случае отладки на дизельном стенде этот сигнал поступал непосредственно от датчика частоты вращения вала дизеля.

По той же методике производилась экспериментальная комплексная отладка макетного образца электронного регулятора частоты вращения в целом. Заданный скоростной режим имитировался тем же источником постоянного напряжения. Сигналы управления через блок сопряжения выдавались на вход блока управления (БУГ) - гидрореобразователем и далее на исполнительное устройство.

Для дальнейших исследований системы на моделирующем дизельном стенде и на развернутой машине была разработана управляющая программа для регулятора.

Автономная отладка макетного образца микропроцессорного регулятора частоты вращения позволила согласовать характеристики его элементов и обеспечить первую проверку его работоспособности в замкнутом контуре САР частоты вращения на моделирующем дизельном стенде. Регулятор обеспечивал устойчивую работу дизеля на всех скоростных режимах, совпадение статических характеристик дизеля под управлением механического и электронного контуров, протекание переходных процессов без перерегулирования.

Основные результаты испытаний макетного образца дискретного контура САР дизеля 8ЧН 21/21, оборудованного тормозным устройством следующие. Регулятор обеспечивает устойчивое поддержание частоты вращения как на холостом ходу, так и под нагрузкой на всех скоростных режимах от 700 мин^{-1} до 1500 мин^{-1} , согласно заданному управляющему сигналу $U_z = f(n)$.

На рис. 9 приведены осциллограммы переходных процессов по управляющему воздействию в дискретной и непрерывной САР для дизеля 8ЧН 21/21. Анализ приведенных графиков показывает, что процесс разгона в дискретной САР выгодно отличается по расходу топлива и по времени разгона.

На рис. 10 приведены осциллограммы изменения параметров в переходном процессе наброса 75% нагрузки дизеля 8ЧН 21/21, оборудованного непрерывно-дискретной САР частоты вращения. Механический контур обеспечивал корректирование топливopодачи по давлению наддува, а микропроцессорный - ПИД-закон регулирования. Анализ кривых показывает, что САР обеспечивала качественные переходные процессы по уровню дымности в соответствии с настройкой ограничительной характеристики на слабую или сильную коррекцию и высокие показатели по нестабильности частоты вращения. Нестабильность частоты вращения на всех скоростных режимах холостого хода составляет $\nu = 0\% - 0,5\%$, а под нагрузкой $\nu = 0,6\%$. Причем минимальная устойчивая частота вращения наблюдалась при $n = 250 \text{ м}^{\text{ч}}^{-1}$.

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность непрерывно-дискретной САР частоты вращения для транспортных дизелей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

Основным содержанием диссертации является разработка способов снижения эксплуатационного расхода топлива и дымности транспортными дизелями, на основа создания непрерывно-дискретных САР частоты вращения и мощности.

Решение указанной актуальной проблемы опирается на следующие научные и практические результаты полученные в процессе исследовательских работ:

1. Разработана методика построения ограничительных характеристик, обеспечивающих работу транспортного дизеля с максимальной приемистостью по мощности и допустимой дымностью при его эксплуатации как на уровне моря, так и в условиях высокогорья. Реализация ограничительных характеристик рассмотрена как на основе средств непрерывного действия, так и дискретного.

В результате разработан и внедрен в серийное производство новый регулятор частоты вращения 20ВРН-30 с импульсом по давлению наддува. Установка регуляторов на дизелях типа ЧН 21/21 позволила снизить расход топлива на переходных режимах и запусках на 10-12%, а также значительно улучшить экологические показатели; максимальная дымность в переходном процессе снизилась с 97% до 60%, а в течение 70% времени переходного процесса не превышает 40%. Одновременно повышена надежность поршневой группы дизеля.

Годовой экономический эффект от внедрения регулятора в народное хозяйство превысил 2 млн. рублей (в ценах 1985 г.).

2. Проведенные исследования процессов регулирования транспортных дизелей послужили научной предпосылкой для разработки непрерывно-дискретных систем регулирования частоты вращения и мощности на механико-электронной элементной базе. При разработке САР оригинальные технические решения защищены двенадцатью авторскими свидетельствами. Модернизированный, на основе указанных решений, регулятор 20ВРН-30 послужил базовым для разработки механико-электронного регулятора частоты вращения транспортных дизелей.

3. Разработана и внедрена в исследовательскую практику завод-изготовителей методика оптимального синтеза и принципов согласования основных параметров дискретных систем регулирования частоты вращения транспортных дизелей. Решена задача оптимального управления транспортным дизель-генератором (ДГ) на переходных режимах за счет синтеза микропроцессорной САР частоты вращения и

мощности. Представлены линейные и нелинейные математические модели микропроцессорной САР, позволяющие проводить широкие динамические исследования транспортного дизеля. Установлено, что определяющим фактором влияющим на динамические показатели, является введение нелинейных ПИД-законов регулирования и сглаживания погрешностей формирования управляющего сигнала путем осреднения производной.

4. Предложены и разработаны алгоритмы регулирования и управления транспортным дизелем, обеспечивающие применение минимального количества датчиков при полноте реализации задач управления за счет рационального сочетания программных и аппаратных средств.

5. Предложены методы экстремального и адаптивного регулирования для дискретных САР, позволяющие реализовать в переходном процессе максимальный крутящий момент дизеля и оптимальную динамическую характеристику изменения мощности при допустимой ее приемистости.

6. Разработана математическая модель непрерывно-дискретной САР частоты вращения и нагрузки, позволяющая проводить широкие исследования по рациональному распределению функций между непрерывным и дискретным контурами регулирования.

7. На базе элементов пропорциональной электрогидравлики разработано унифицированное исполнительное устройство для непрерывно-дискретных САР частоты вращения транспортного дизеля.

8. Разработан на комбинированной элементной базе механико-электронный регулятор частоты вращения и нагрузки и передан для внедрения заказчику.

9. Разработан макетный образец непрерывно-дискретной САР с различными корректирующими устройствами — механическими, аналоговыми, микропроцессорными. Экспериментальные исследования САР на транспортных дизелях типа ЧН 21/21 показали:

9.1. Работоспособность системы с четким разделением выполняемых функций, в частности, механическим контуром — корректирование топливоподачи по давлению наддува, микропроцессорным — реализация ПИД-закона регулирования.

9.2. САР обеспечила качественные переходные процессы по уровню дымности в соответствии с настройкой ограничительной характеристики.

9.3. Нестабильность частоты вращения на режимах холостого хода и под нагрузкой составила $\delta = 0...0,5\%$ (для серийных систем — 3% и более).

9.4. Минимальная устойчивая частота вращения вала дизеля наблюдалась 250 мин^{-1} , что говорит о значительном запасе устойчивости системы при большой неравномерности подачи топлива по цилиндрам, которая характерна для низких частот вращения вала.

10. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили основные научные предпосылки создания двухконтурных непрерывно-дискретных САР частоты вращения транспортных дизелей. Позволили разработать научные и практические рекомендации для быстрого и эффективного внедрения новой элементной базы с целью совершенствования и длительной ее проверки в эксплуатационных условиях.

Основные положения диссертации получила отражение в следующих работах:

1. Грунауэр А.А., Долгих И.Д., Канило П.М. Устойчивость коррекции топливоподачи турбопоршневых двигателей //Республ. сборник "Двигатели внутр. сгорания" Харьков 1977г., -вып.25-, с.71-77.
2. Канило П.М., Долгих И.Д. Номограмма показателей работы транспортной энергосиловой установки //Изд. Наукова думка, сборник "Проблемы машиностроения" АН УССР Харьков -1978г.- вып.6, -с.93-96.
3. Снижение токсичности и повышение эксплуатационной экономичности транспортных энергоустановок. Грунауэр А.А., Канило П.М., Долгих И.Д. и др. //Препринт -104, АН УССР, ин-т проблем машиностроения -Харьков- 1978г., -49с.
4. Грунауэр А.А., Долгих И.Д., Канило П.М. Методика проектирования, расчета и испытаний САР частоты вращения с коррекцией топливоподачи по давлению наддува турбопоршневых дизелей. Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом: Тез. докл. Всес.конф. -Харьков, 1979г., с.274.
5. Грунауэр А.А., Долгих И.Д., Тараканов С.И. Методика проектирования САР частоты вращения с импульсом по давлению наддува. //Республ.сборник "Двигатели внутр. сгорания" Харьков-, 1980г., вып.32, с.69-75.
6. Грунауэр А.А., Долгих И.Д., Тараканов С.И. Методика расчета САР частоты вращения и нагрузки с импульсом по давлению наддува. //Республ.сборник "Двигатели внутр. сгорания" -Харьков, 1980г., вып.32, с.61-67.
7. Грунауэр А.А., Долгих И.Д., Тараканов С.И. Выбор ограничительной характеристики по давлению наддува для транспортных дизелей //Республ.сборник "Двигатели внутр. сгорания", -Харьков, 1981г., вып.33, с.54-57.
8. Грунауэр А.А., Долгих И.Д., Тараканов С.И., Кофман Е.М. Корректоры топливоподачи по давлению наддува турбопоршневых двигателей //Республ.сборник "Двигатели внутр. сгорания", -Харьков, 1981г., вып.33- с.57-64.
9. Снижение токсичности повышения эксплуатационной экономичности транспортных энергоустановок. /Грунауэр А.А., Долгих И.Д., Канило П.М., Косов Е.Е. //Изд-во "Вища школа" при Харьковском Гос.университете -1981г., с.145.

10. Долгих И.Д. Методика расчета топливоподачи по давлению наддува тепловозного дизель-генератора //Республ.сборник "Двигатели внутр. сгорания" -Харьков, 1982г., вып.36, с.31-38.

11. Долгих И.Д., Тараканов С.И. Экспериментальное исследование корректирования топливоподачи транспортного дизель-генератора //Республ.сборник "Двигатели внутр.сгорания" -Харьков, 1983г., вып.37, с.29-34.

12. Кофман Е.И., Долгих И.Д., Сабазев В.В. Регулятор скорости для транспортных дизелей //Всес.межотрасл.научн.техн. журнал Двигателестроение, Ленинград, 1984г., вып.1, с.59-62.

13. Долгих И.Д. Корректирование топливоподачи и нагрузки по давлению наддува транспортного дизель-генератора //Всес.межотрс. научн.техн. журнал Двигателестроение, Ленинград, 1984г., -вып.5, с.32-36.

14. Грунауэр А.А. Долгих И.Д. Микропроцессорная система автоматического регулирования (МП САР) дизеля //Республ.сборник "Двигатели внутр.сгорания", -Харьков, 1984г., вып. с.88-92.

15. Грунауэр А.А., Долгих И.Д. Объединенный регулятор для автосамосвалов БелАЗ большой грузоподъемности //Всес.межотр. научн. техн. журнал Двигателестроение, Ленинград, 1985г., вып.3, с.69-43.

16. Кулик М.Н., Долгих И.Д., Семенович В.Н. Принципы построения МП САР частоты вращения транспортных дизелей //Применение МП техники при автоматизации технологических процессов производства и в САР: Тез.докл. Всес.конференция. -Москва-Александрия -1985г., с.49.

17. Долгих И.Д., Семенович В.Н. Микропроцессорная система автоматического регулирования вращения транспортного дизель-генератора //Моделирование 85, Теория, средства, применения, АН СССР и АН УССР г.Киев, -Тез.доклада Всесоюз.конференция, 1985г., с.14.

18. Микропроцессорный регулятор частоты вращения транспортного дизель-генератора /Грунауэр А.А., Долгих И.Д. и др. //Республ. сборник "Двигателя внутр. сгорания" -Харьков, 1986г., вып.44, с.18-26.

19. Долгих И.Д., Кулик М.Н. Микропроцессорная система автоматического регулирования дизельного двигателя // Функционально ориентированные системы. -Тез. доклада Республ. конференции, -Харьков, 1986г., ч.II, -36с.

20. Долгих И.Д., Попов Б.А. Исполнительное устройство микропроцессорных регуляторов ДВС //Республ.сборник "Двигатели внутр. сгорания" -Харьков, 1986г., вып.45, с.124-130.

21. Долгих И.Д. Исследование микропроцессорной САР частоты вращения транспортного дизеля на основе математического моделирования //Республ.сборник "Двигатели внутр. сгорания", -Харьков, 1987г., вып.46, -с.86-91.

22. Долгих И.Д., Петров П.П. Принципы согласования параметров при синтезе микропроцессорной САР частоты вращения //Республ.сборник "Двигатели внутр. сгорания", -Харьков, 1987г., вып.46, с.92-97.

23. Долгих И.Д. Вопросы синтеза микропроцессорного регулятора для транспортных дизель-генераторов //Известия Вузов. Машиностроение -Москва- вып.10, 1987г., с.78-84.

24. Грунауэр А.А., Долгих И.Д., Петров П.П. Вопросы оптимального синтеза микропроцессорной САР скорости и нагрузки //Всесоюз. межотрасл. научн.техн.журнал "Двигателестроение" -Ленинград, 1986г., вып.6, с.39-41.

25. Грунауэр А.А., Долгих И.Д. Расчет и проектирование регуляторов ДВС //УМК Минвуза Украины. Учебное пособие, -Киев-, 1988г., -87с.

26. Долгих И.Д., Петров П.П. Особенности регулирования скорости и нагрузки транспортного дизель-генератора // Республ.сборн. "Двигатели внутр. сгорания" -Харьков-, 1988г., вып.48, с.94-99.

27. Долгих И.Д., Петров П.П., Попов Б.А. Исследование исполнительного устройства микропроцессорного регулятора скорости дизеля //Республ. сборник "Двигатели внутр. сгорания" -Харьков-, 1989г., вып.49, с.102-106.

28. Долгих И.Д. Разработка алгоритмического обеспечения микропроцессорного регулирования частоты вращения дизель-генераторов //Всесоюз. межотрасл. научн.техн. журнал "Двигателестроение", -Ленинград-, 1989г., вып.10, с.26-28.

29. Долгих И.Д., Петров П.П. Влияние погрешностей измерения частоты вращения при микропроцессорном регулировании дизеля на динамические показатели системы регулирования //Известия Вузов, Машиностроение, -Москва-, 1989г., вып.4, с.63-64.

30. Грунауэр А.А., Долгих И.Д. Применение ЭВМ для изучения динамики САР ДВС //УМК Минвуза Украины. Учебное пособие -Киев, 1989г., -170с.

31. Долгих И.Д., Петров П.П. Исследование типа исполнительного устройства на динамические показатели МП САРЧ //Известия Вузov, Машиностроение, -Москва, 1990г., вып.2, с.77-82.

32. Анализ применения электронных блоков управления в САР частоты вращения дизелей /Долгих И.Д., Тюртюиков А.И., Тамаев Р.Д., и др. //Республ. сборник "Двигатели внутр. сгорания", -Харьков, 1990г., вып.51, с.

33. Долгих И.Д. Применение пропорциональных ЭГ - преобразователей с дросселирующим распределителем УЭ85 в микропроцессорных САР //Гидравлика и гидропривод машин, автоматов, промышленных роботов в машиностроении -Тез. докл. на Республ. конферен. -1990г., г.Севастополь, с.3.

34. Долгих И.Д., Тамаев Р.Д., Тюртюиков А.И. Микропроцессорная САР частоты вращения для дизель-генератора //Тезисы доклада на Республ. научн.техн.конферен. "Функционально ориентированные вычислительные системы" -Харьков -Алушта, -1990г., с.127.

35. Долгих И.Д., Тюртюиков А.И., Тамаев Р.Д. Разработка и исследование микропроцессорного регулятора частоты вращения для транспортных дизель-генераторов большой мощности //Тезисы доклада на Всесоюз. конферен. "Математическое моделирование в энергетике" АН СССР г.Киев, 1990г., с.136.

36. Долгих И.Д., Зеленский В.Б. Методика синтеза МП САРЧ вращения ДВС //Республ. сборник "Двигатели внутр. сгорания" -Харьков, 1991г., /принята к опубликованию/.

37. Грунауэр А.А., Долгих И.Д. Розрахунок і проектування систем регулювання ДВЗ. Використання мікропроцесорів //УМК Мнввуза України, Учебное пособие -Киев- 1992г., 250с.

38. А.С. 1188353, СССР, Г 02Д 23/00, I/02 Регулятор скорости дизеля с турбонаддувом //Долгих И.Д., Чекмасов А.В., Тараканов С.И. и др. Зарегистр. в Гос.реестре изобр. СССР 1 июля 1985г.

39. А.С. 1209912, СССР, Г 02Д 23/00 Ограничитель подачи топлива в дизель //Долгих И.Д., Чекмасов А.В., Тараканов С.И. Зарегистр. в Гос.реестре изобр. СССР 8 октября 1985г.

40. А.С. 1236118, СССР, Г 01М I/10 Устройство защиты дизеля от снижения давления масла //Долгих И.Д., Кофман Б.М., Кулик М.Н. и др. Зарегистр. в Гос.реестре изобр. СССР 8 февраля 1986г.

41. А.С. 1372283, СССР, С 05Д 7/01 Регулятор расхода //Долгих И.Д., Чекмасов А.В., Вобров В.И. и др. Зарегистр. в Гос.реестре изобр. СССР 8 октября 1987г.

42. А.С. I45I653, СССР, С 05Д II/02 Делитель потока //Долгих И.Д., Чекмасов А.В., Бобров В.И. Зарегистр. в Гос.реестре изобрт. СССР 8 сентября 1988г.

43. А.С. I486997, СССР, С 05Д 7/0I Регулятор расхода //Долгих И.Д., Чекмасов А.В. Зарегистр. в Гос.реестре изобр. СССР 15 февраля 1989г.

44. А.С. I508809, СССР, С 05Д 7/0I Регулятор расхода //Чекмасов А.В., Гладкий П.М., Долгих И.Д. Зарегистр. в Гос.реестре изобр. СССР 15 мая 1989г.

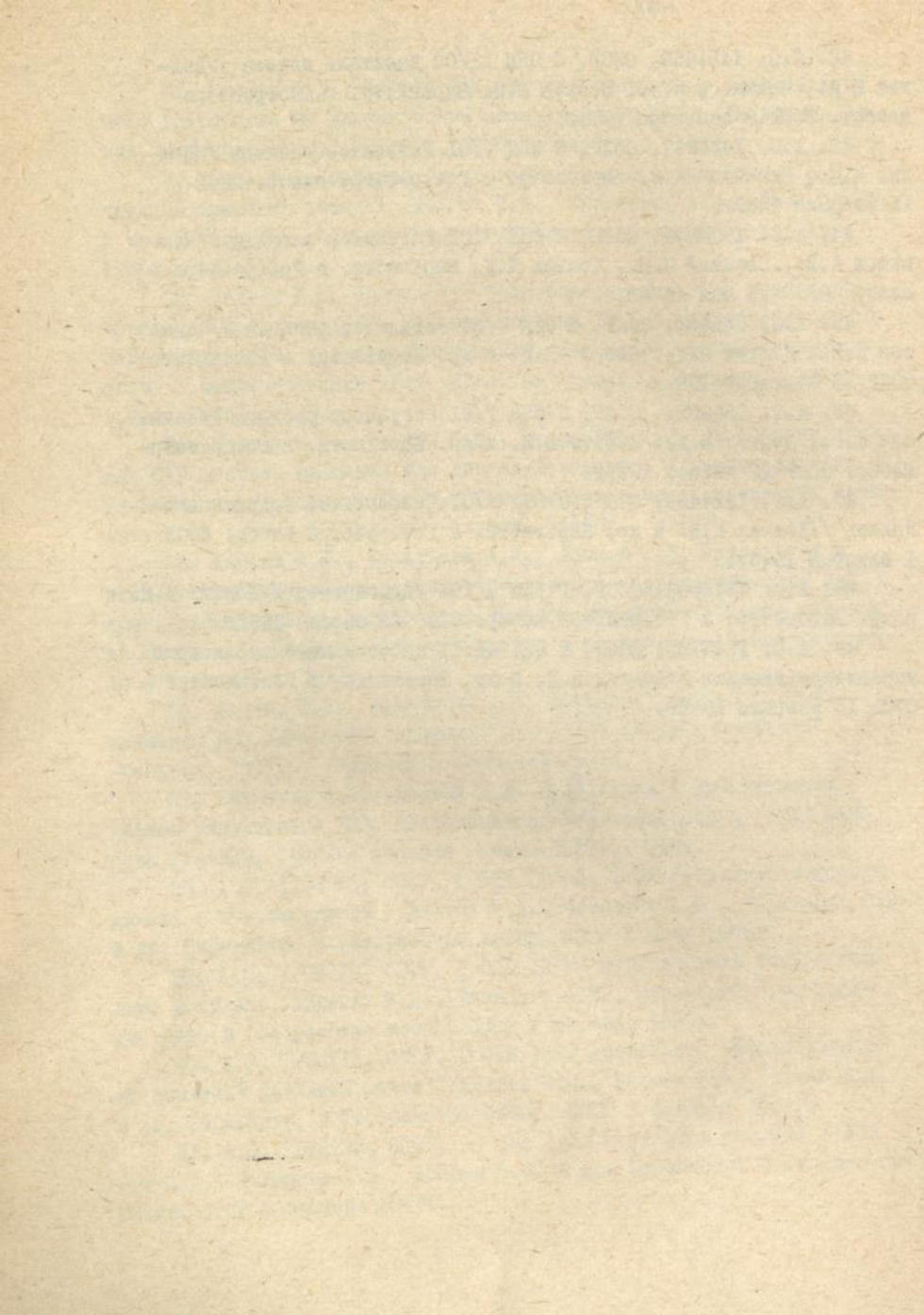
45. А.С. I58658, СССР, С 05Д 7/0I Регулятор расхода //Чекмасов А.В., Долгих И.Д., Бобров В.И. и др. Зарегистр. в Гос.реестре СССР 15 сентября 1989г.

46. А.С. I566324, СССР, С 05Д 7/0I Регулятор расхода //Чекмасов А.В., Долгих И.Д., Бобров В.И. и др. Зарегистр. в Гос.реестре изобр. СССР 22 января 1990г.

47. А.С. I624409, СССР, С 05Д 7/0I Дроссельный гидроннемопривод //Долгих И.Д. и др. Зарегистр. в Гос.реестре изобр. СССР I октября 1990г.

48. А.С. I672006, СССР, Г I5В II/04 Гидропривод //Долгих И.Д. и др. Зарегистр. в Гос.реестре изобр. СССР 22 апреля 1991г.

49. А.С. I740733, СССР, Г 02Д 4I/00 Система автоматического управления дизелем //Долгих И.Д. и др. Зарегистр. в Гос.реестре СССР 15 февраля 1992г.



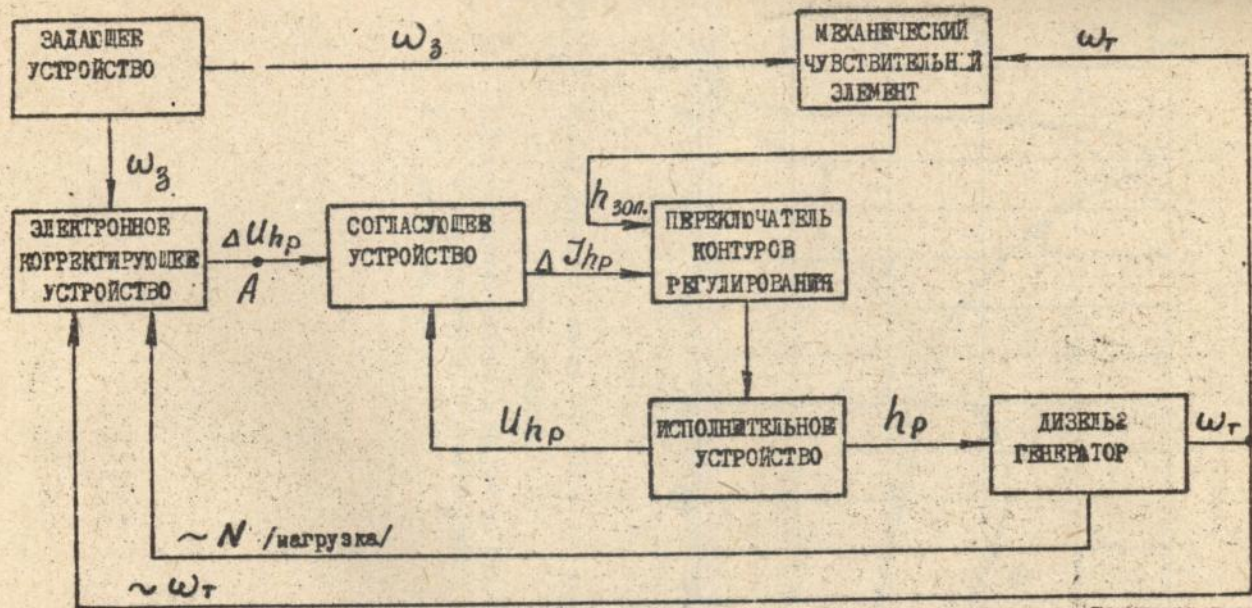


Рис. 1 Функциональная схема двухконтурной САУ частоты вращения транспортного дизель-генератора.

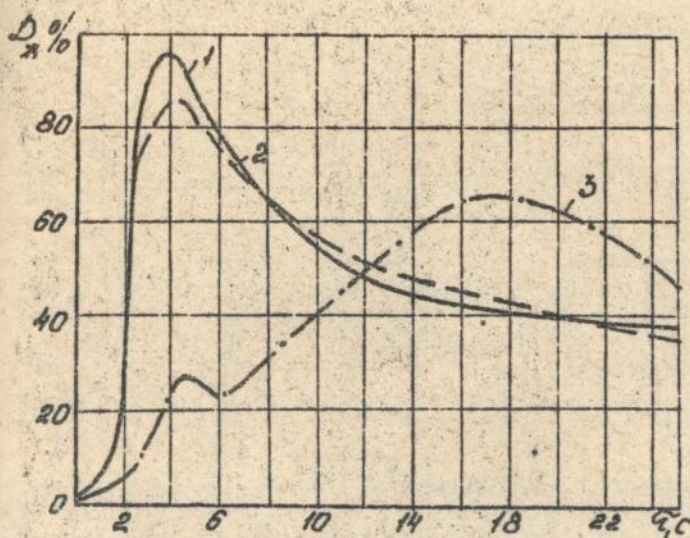


Рис. 2 Кривая дымности дизеля 8ЧН 2I/2I при набросе 100% нагрузки

1, 3 - экспериментальные (регулятор без корректора и с корректором, соответственно),
2 - расчетная кривая.

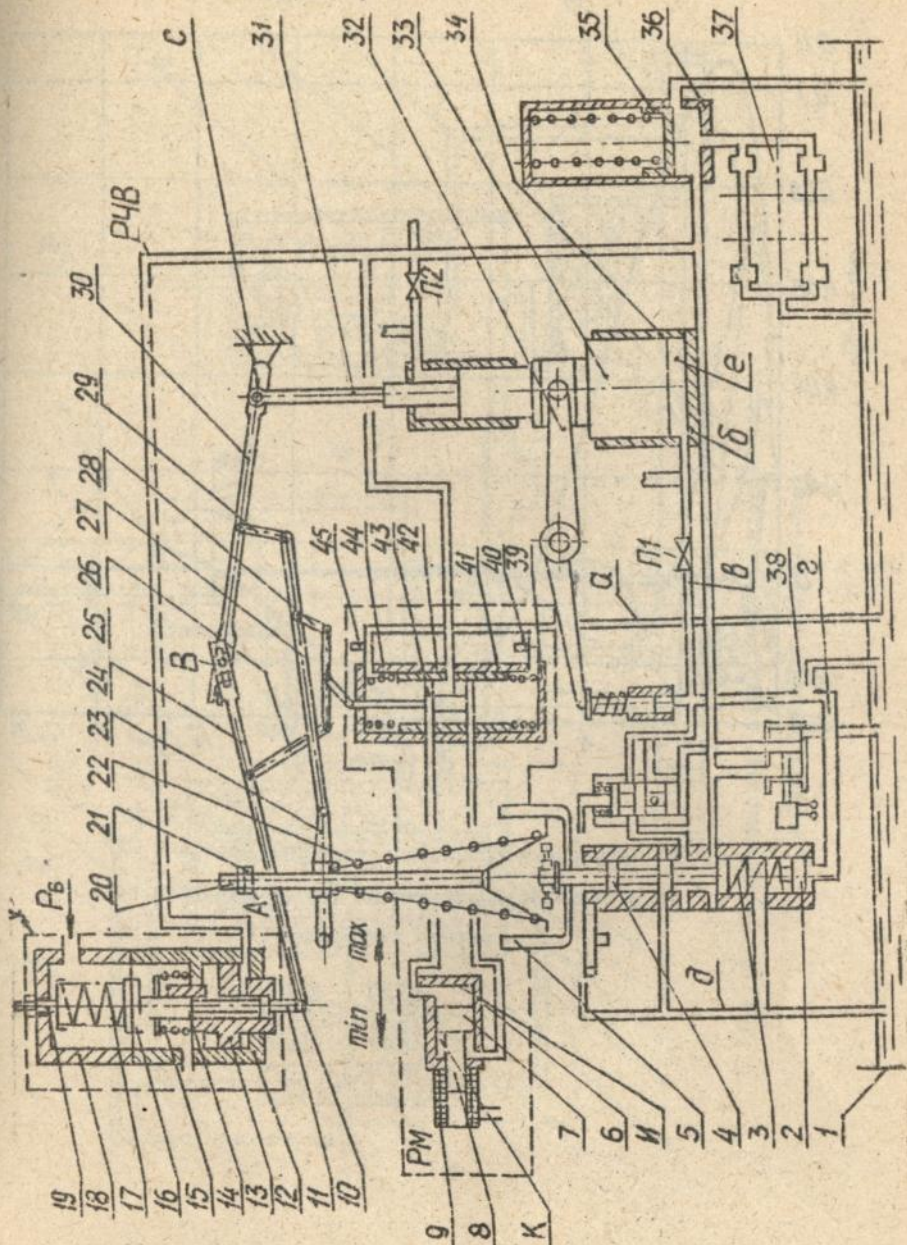


Рис. 3 Схема регулятора частоты вращения и нагрузки дизеля типа ЧН 21/21.

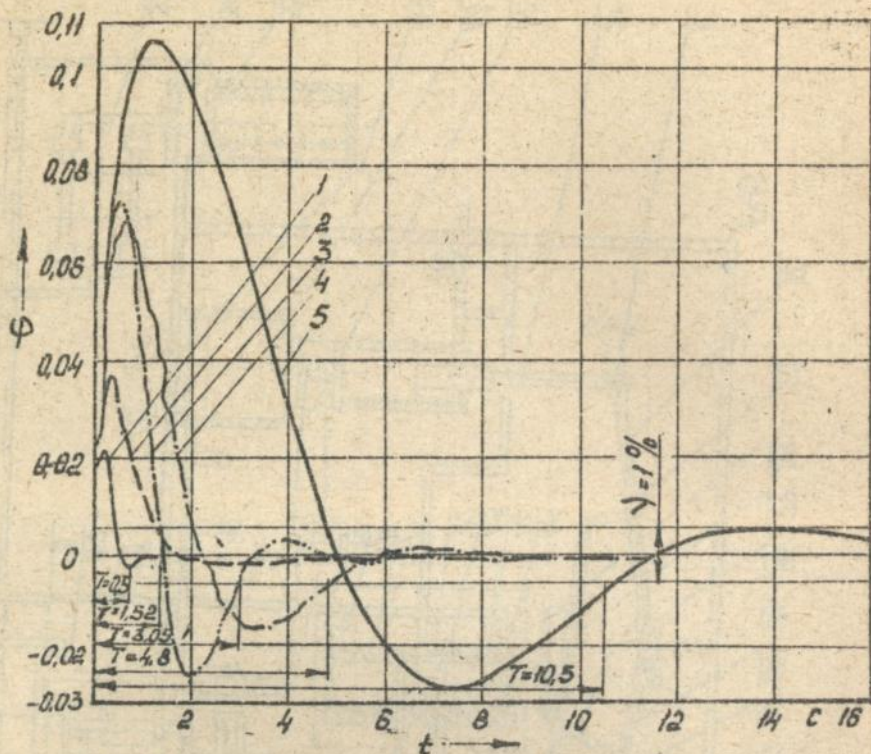


Рис. 4 Переходные процессы в микропроцессорной САР частоты вращения дизеля с турбонаддувом при сбросе нагрузки.

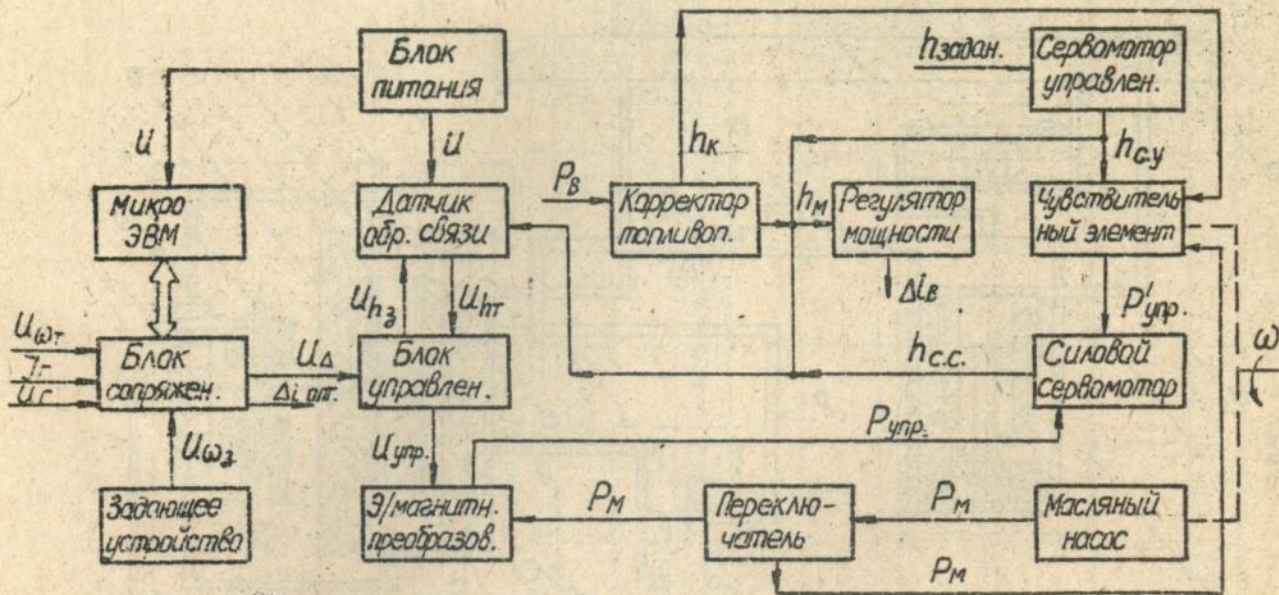


Рис. 6 Функциональная схема механико-электронного регулятора частоты вращения и мощности

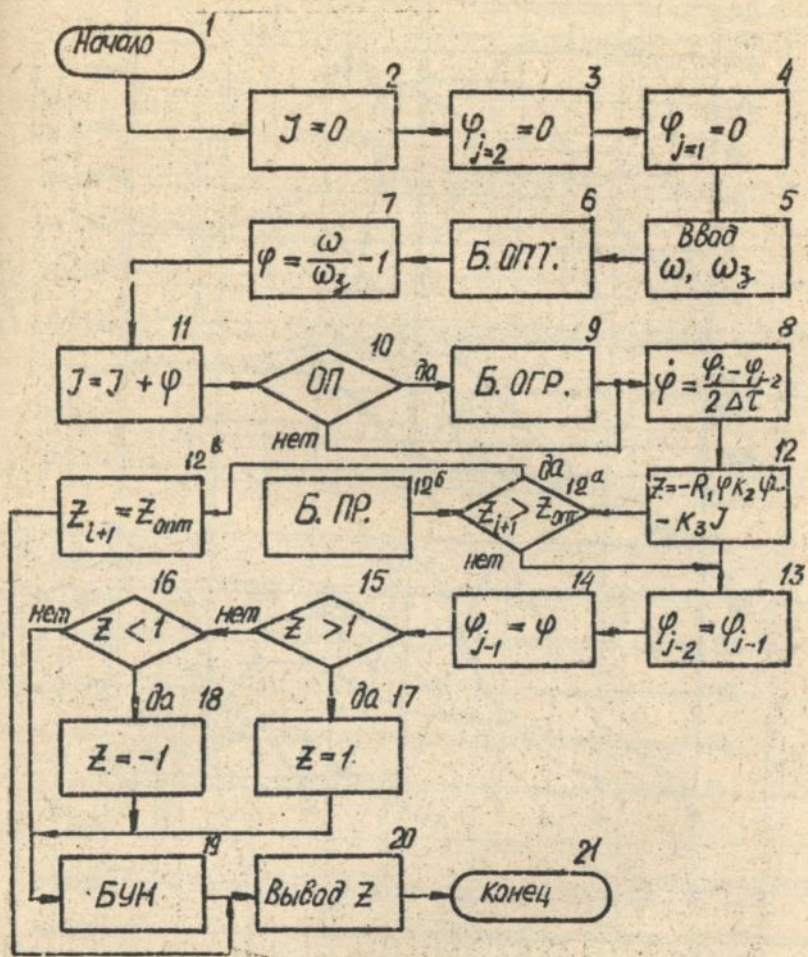


Рис. 7 Алгоритм автоматического регулирования частоты вращения транспортного дизеля.

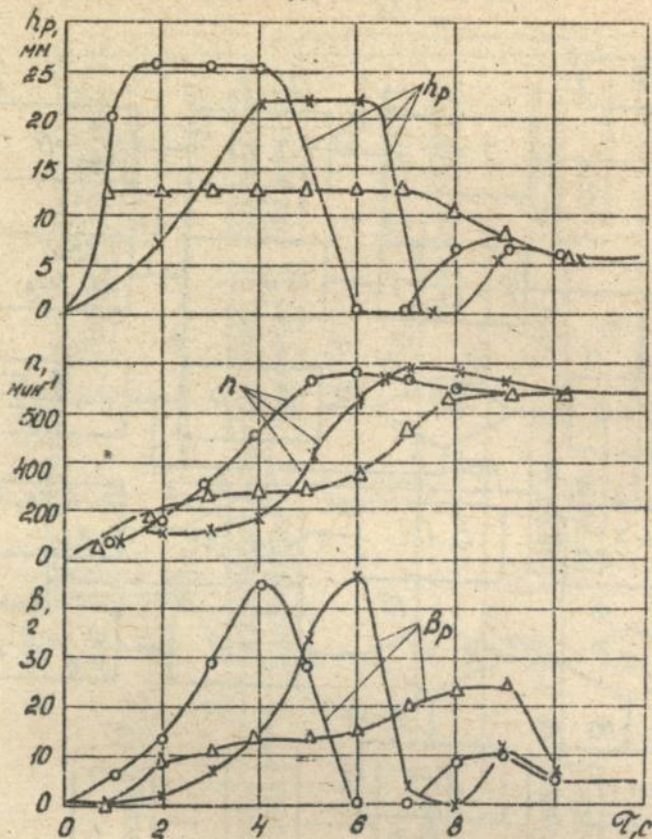
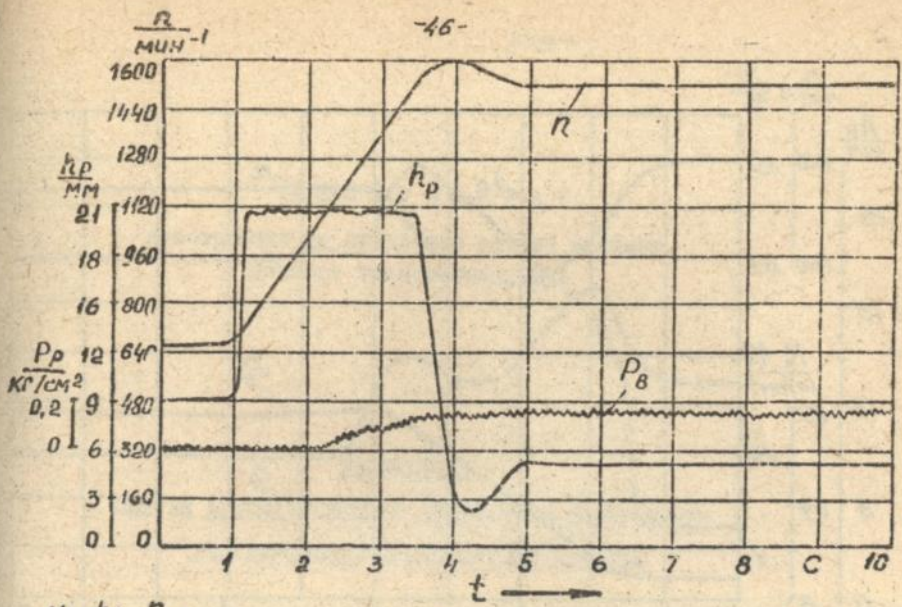
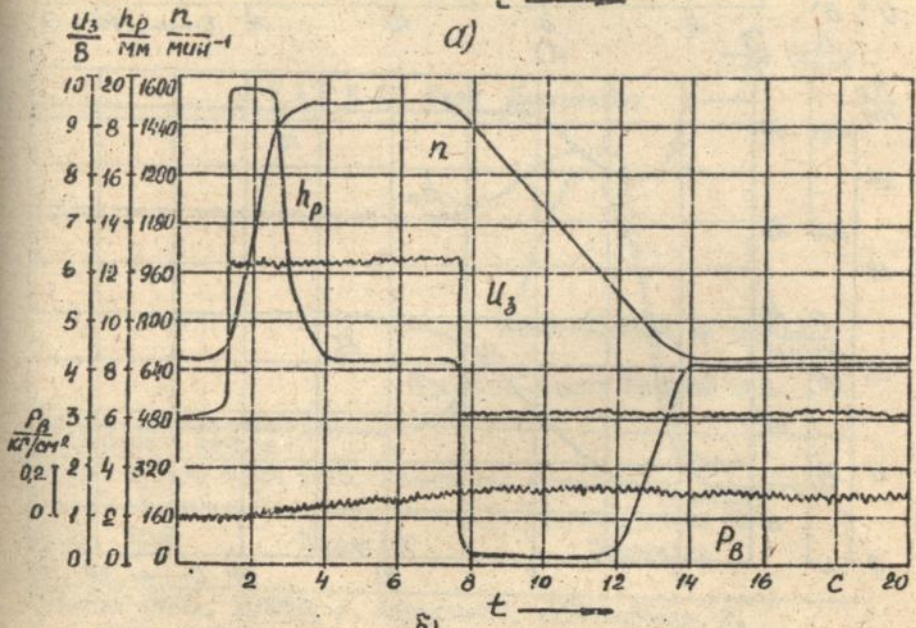


Рис. 8 Изменение параметров дизеля 64Н 21/21 при запуске

- регулятор без корректора;
- ×— регулятор с корректором и ограничением топливо-
подачи до 70% от номинальной;
- △— регулятор с корректором и ограничением топливо-
подачи до 50% от номинальной.



a)



b)

Рис. 9 Изменение параметров дизеля 84Г21/21 при резонансе. а-непрерывный контур; б-дискретный контур регулирования.

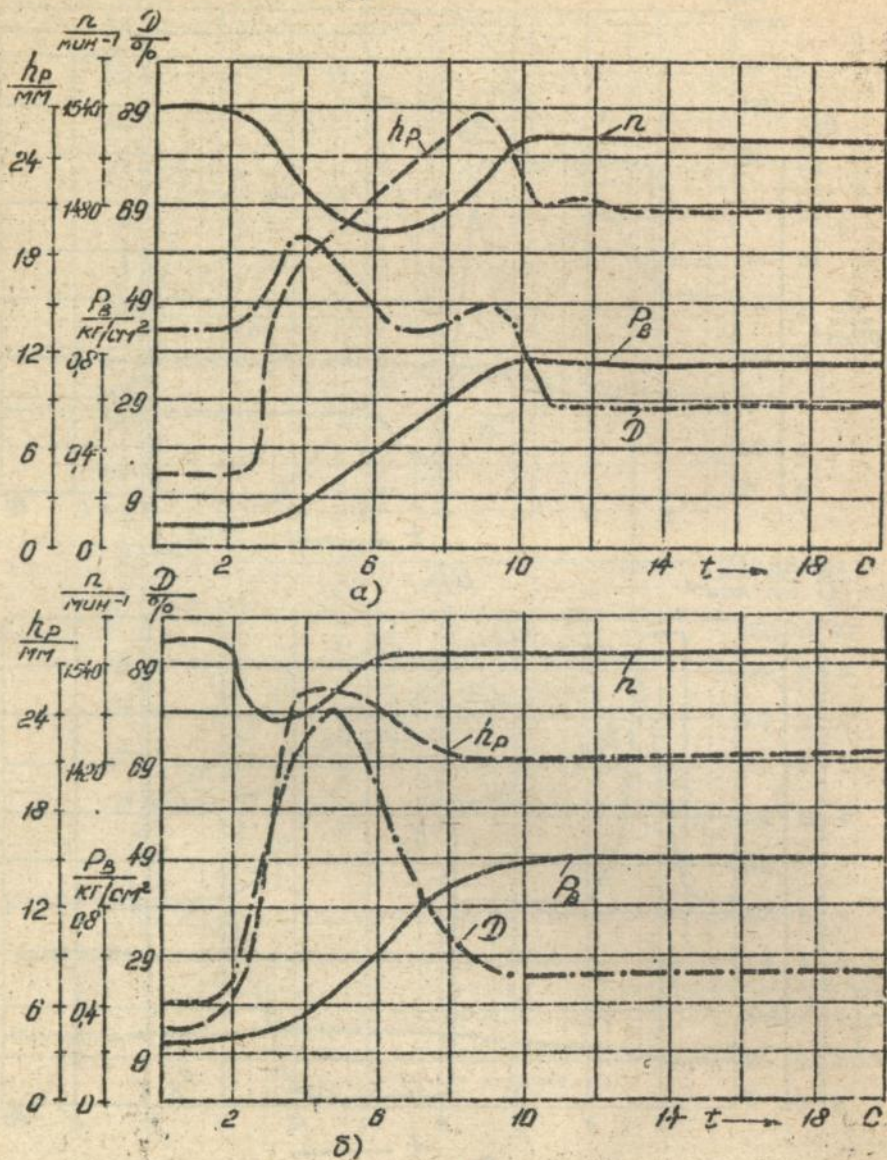


Рис. 10 Изменение параметров в непрерывно-дискретной САР частоты вращения дизеля 8 ЧН 2Г/2Г.

а - сильная коррекция; б - слабая коррекция.

А В Т О Р В Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

РАЗРАБОТКА

**СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

Д О Л Г И Х Иван Дмитриевич

Ответственный за выпуск

к.т.н. доцент **Савенко В.В.**

Подписано к печати

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Печать офсетная. Усл. поч. лист 2,9, Уч.-изд.-лист. 3,2

Заказ 306

Тираж 100

Бесплатно

Издания ХИИТа, 310050, г. Харьков-50, пл. Фейербаха, 7.

Тип. ХИИТа 310050, г. Харьков - 50, пл. Фейербаха, 7

116810

AB 27.351

AB 27.351