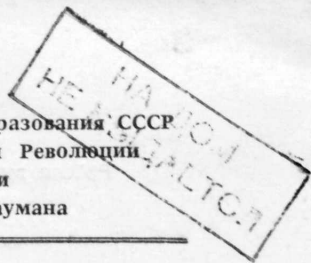


М442396

Министерство высшего и среднего специального образования СССР
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана



На правах рукописи

УДК 621.436—52:62—531.6(043.3)

БЛАЖЕННОВ Евгений Иванович

**С О В Е Р Ш Е Н Ш Т В О В А Н И Е
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

Специальность 05.04.02 — тепловые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва
1987

Работа выполнена в Ярославском политехническом институте.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Роганов С. Г.,

доктор технических наук,

ст. научный сотрудник Ханин Н. С.,

доктор технических наук, профессор Долганов К. Е.

Ведущая организация: Производственное объединение
«АвтоЗИЛ» (г. Москва).

Защита состоится **20.02.88** в 14⁰⁰

на заседании специализированного совета Д 053.15.10 в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана по адресу: каб., дом 1.

ознакомиться в библиотеке Московского
училища им. Н. Э. Баумана.

8.12.87

M472396

га

Ивашенко Н. А.

Актуальность работы. В настоящее время до 80% энергии, потребляемой в народном хозяйстве СССР, вырабатывается поршневыми двигателями внутреннего сгорания. В этом классе двигателей наиболее экономичны дизели. В современных условиях при значительном росте стоимости добычи жидкого топлива и постоянно увеличивающемся его потреблении экономичное использование топливных ресурсов становится задачей, имеющей общегосударственное значение. Именно поэтому в автомобильной промышленности СССР взят курс на полную дизелизацию автомобильного парка большегрузных автомобилей (БелАЗ, КраЗ, МАЗ, КамАЗ), ведутся интенсивные работы по дизелизации автомобилей средней грузоподъемности (ЗИЛ, КАЗ, ГАЗ), автобусов и даже легких грузовиков (УАЗ-452) и некоторых легковых автомобилей (ВАЗ, Москвич).

Рост единичных мощностей дизелей, улучшение качества дорог позволяет эксплуатировать автотранспорт с большими средними эксплуатационными скоростями, что повышает производительность труда на автотранспорте. Но в то же время это предъявляет более строгие требования к водителю и в этих условиях труд водителя должен быть облегчен рациональным проектированием систем автоматики, управления и защиты двигателя.

Одной из таких систем является система автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) дизеля, составной частью которой является регулятор частоты вращения, соединенный с топливоподающей системой. От других систем автомобильных дизелей САРЧ отличается тем, что, кроме выполнения внутренних функций (защита двигателя от разноса, формирование внешней характеристики и др.), она еще служит звеном, через которое осуществляется изменение модуля вектора скорости автомобиля, т.е. является важнейшим звеном в системе управления автомобилем (наряду с такими системами как рулевое управление, тормозная система и т.д.). Следовательно, повышение управляемости и других эксплуатационных качеств САРЧ АД приводит к повышению эффективности всего автомобиля в целом и неразрывно связано с выбором рационального сочетания параметров всей динамической системы "регулятор-двигатель-автомобиль" (РДА).

Поэтому совершенствование теории, конструкции и методов исследования систем автоматического регулирования частоты вращения автомобильных дизелей в направлении улучшения их характеристик управления, экономических и экологических показателей является актуальной проблемой.

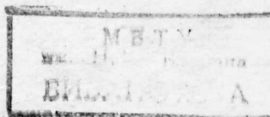
НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1472396

Блаженнов Е.И. Совершенств

I



1472396

Цель работы. Повышение технико-экономических показателей автомобильных дизелей путем совершенствования системы автоматического регулирования частоты вращения. Указанная цель достигается решением следующих задач.

1. Обоснование комплексного подхода при проектировании систем автоматического регулирования частоты вращения автомобильных дизелей с учетом взаимодействия элементов в системе "человек-машина-среда".

2. Создание математических моделей динамической системы "регулятор-двигатель-автомобиль" и её элементов, пригодных для использования на начальной стадии проектирования.

3. Разработка методов повышения управляемости автомобильных дизелей путем применения регуляторов частоты вращения с улучшенными характеристиками управления.

4. Внедрение в практику новых методов исследования регуляторов частоты вращения с учетом взаимодействия элементов в системе РДА.

5. Разработка комплекса стендовых, моторных и дорожных испытаний систем автоматического регулирования частоты вращения дизелей с улучшенными характеристиками управления.

Научная новизна работы состоит в том, что разработан комплексный подход при проектировании систем автоматического регулирования частоты вращения автомобильных дизелей с учетом взаимодействия элементов системы "человек-машина-среда". Разработаны и обоснованы математические модели динамической системы "регулятор-двигатель-автомобиль" и её элементов, предназначенные для использования на стадии проектирования и доводки. Сформулированы обоснованные требования к статическим характеристикам САУЧ АД по управляемому воздействию. Научно обоснована необходимость применения новых типов регуляторов частоты вращения автомобильных дизелей, получивших название трехрежимных и новых систем корректирования - антикорректоров и предложены их рациональные конструкции. Разработаны классификация и методы расчета указанных устройств на примере конструкций, защищенных авторскими свидетельствами.

Практическую ценность работы представляют новые методы динамического синтеза систем автоматического регулирования частоты вращения автомобильных дизелей; методы исследования системы РДА и отдельных её элементов с помощью частотных характеристик при воздействии на управляющий элемент регулятора; прогрессивные ме-

тоды исследования системы РДА с помощью электронных цифровых и аналоговых вычислительных машин; статистические методы исследования системы РДА, а также регуляторы частоты вращения автомобильных дизелей с пологими регуляторными характеристиками (трехрежимные регуляторы); регуляторы частоты вращения автомобильных двигателей, работающих в режиме торможения двигателем; регуляторы частоты вращения автомобильных дизелей с реверсивным корректированием внешней скоростной характеристики; регуляторы частоты вращения с двумя парами грузов (легкие и тяжелые) с отключением тяжелых грузов на средних скоростных режимах.

Реализация. На основе авторских свидетельств № 200949, № 559030 и др. ЯМЗ совместно с ЯЗТА разработали семейство регуляторов с реверсивным корректированием внешней скоростной характеристики, что позволило снизить дымность отработавших газов до допустимых пределов. На ЯЗТА совместно с КамАЗом и полигоном НАМИ проводится опытно-промышленная проверка как трехрежимных регуляторов, так и регуляторов с реверсивными корректорами. Методы исследования системы РДА и отдельных её элементов при воздействии на рычаг управления регулятора используются на ЯМЗ, ЯЗТА, в Ярославском политехническом институте и др. Часть исследований и разработок, описанных в диссертации, используется в учебном процессе в ЯПИ, МВТУ, МАДИ, КАДИ, ХПИ и других вузах. На основе проведенных автором исследований внедрены в серийное производство ЯЗТА корректирующие нагнетательные клапаны, что позволило применить регулятор ЯМЗ-236 для регулирования двигателей ЯМЗ-238 и ЯМЗ-240.

Апробация. Основные результаты исследований докладывались на следующих конференциях и семинарах: научно-технических конференциях ЯПИ (1968-1986 гг.), Всесоюзных семинарах по автоматическому регулированию тепловых энергетических установок, МВТУ им. Н.Э. Баумана (1969-1986 гг.), всесоюзных семинарах по комбинированным ДВС, МВТУ (1973-74 гг.), всесоюзном семинаре по проблемам прочности транспортных установок, МВТУ им. Н.Э. Баумана (1977 г.), всесоюзной межузловской и межотраслевой конференции "Рабочие процессы в ДВС", Москва, МАДИ, 1978, 1982, 1986 гг., всесоюзной межузловской и межотраслевой конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении", Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, февраль 1980 г., всесоюзной межузловской и межотраслевой конференции "Перспективы развития комбинированных ДВС и двигателей новых схем и топлив", Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, сентябрь 1980 г., совместном теоре-

тическом семинаре кафедр "Автомобильные и тракторные двигатели" и "Автомобили", МАМИ в 1981 г., научно-техническом семинаре в НИИАП Минавтопрома СССР в мае 1981 г., всесоюзном научно-техническом совещании при ВДНХ "Динамика и прочность автомобиля", Москва, 1984 г., научно-технической конференции "Современные проблемы кинематики и динамики ДВС", Волгоград, 1985 г.

Диссертационная работа выполнена на кафедре "Двигатели внутреннего сгорания" Ярославского политехнического института.

Экспериментальная часть работы выполнялась при непосредственном участии автора в лаборатории автоматики кафедры ДВС ЯПИ, а также на Ярославском моторном заводе, Ярославском заводе дизельной аппаратуры, Центральном научно-исследовательском автополигоне Минавтопрома СССР. Значительное количество экспериментов проведено на ЯМЗ в период работы автора на заводе при разработке, исследованиях и доводке САРЧ автомобильных дизелей: ЯМЗ-236, ЯМЗ-238, ЯМЗ-240, ЯМЗ-240М, ЯМЗ-740 и др.

На защиту выносятся следующие вопросы:

1. Комплексный подход при разработке систем автоматического регулирования частоты вращения автомобильных дизелей с учетом взаимодействия элементов экологической системы "человек-машина-среда".

2. Математические модели динамической системы "регулятор-дизель-автомобиль" и её элементов, пригодные для использования на начальной стадии проектирования.

3. Методы исследования системы РДА и её элементов на основе использования частотных характеристик при воздействии на настройку регулятора в степловых, моторных и дорожных условиях.

4. Новые схемы конструкций регуляторов частоты вращения с улучшенными характеристиками, применение которых улучшает управляемость дизеля, снижает дымность и токсичность выпускных газов (за счет применения реверсивных корректоров).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 86 работ (средних 18 авторских свидетельств на изобретения).

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и приложения с материалами о внедрении в народное хозяйство СССР результатов разработок. Основная часть работы состоит из 270 страниц, 78 рисунков, 11 таблиц.

В первой главе приведен краткий анализ результатов исследований по теме диссертации, опубликованных в открытой печати, формулируются актуальные проблемы теории, конструкции и методов исследования как всей динамической системы "регулятор-двигатель-автомобиль", так и отдельных её элементов и в частности, ставятся задачи проектирования перспективных конструкций регуляторов частоты вращения автомобильных дизелей.

Особенности регулирования скорости ДВС, в том числе и дизелей, посвящены работы Г.Г.Калиша, Н.Н.Настенко, М.А.Айзермана, А.М.Каца, И.И.Кринького, В.И.Крутова, Н.С.Ханина, В.И.Толшина, А.А.Грунауэра, В.К.Нечаева, К.Е.Долганова, А.Х.Морозова, А.Г.Рыбальченко, В.П.Колосова, В.А.Петрова и др.

Требования, предъявляемые к САУ ДВС конкретного назначения пока еще сформулированы недостаточно четко, а в отдельных случаях в разных работах они имеют противоречивый характер. Именно так обстоит дело в работах, затрагивающих вопросы регулирования частоты вращения автомобильных дизелей. Естественно, все находит отражение и на работе соответствующих отраслей промышленности. Известны, например, работы Г.Г.Калиша и Н.Н.Настенко, которые содержат рекомендации о необходимости применения всережимных регуляторов на автомобильных дизелях, однако промышленность продолжала выпускать двухтактные дизели ЯАЗ-204 и ЯАЗ-206 с двухрежимными регуляторами. Не является исключением и зарубежный опыт: даже в самое последнее время есть образцы автомобильных дизелей, выпускавшиеся сначала со всережимным регулятором, а потом с двухрежимным (Фольксваген - ФРГ, Перкинс - Англия).

Сравнительные испытания автомобилей МАЗ-500А с двухрежимными и всережимными регуляторами, проведенные автором, показали некоторое преимущество первого по расходу топлива (такие же результаты были получены позднее В.И.Шестухиным - в НИИАТ). Особенно интересны результаты режимометрирования при движении автомобиля по городу. В этих условиях при работе со всережимным регулятором наблюдается смещение режимов в экстремальные зоны, а также значительно большее число выходов органа дозирования подачи топлива в эти зоны, т.е. нагрузочный режим работы дизеля отличается нестационарностью, что, по-видимому, и является причиной ухудшения экономических показателей.

К несомненным преимуществам двухрежимного регулятора относится возможность регламентированного изменения подачи топлива, когда величина подачи становится пропорциональной перемещению педали акселератора. В сложных условиях движения (гололед, горные дороги) это свойство может стать релаксирующим. Основным недостатком двухрежимного регулятора остается неустойчивость промежуточных скоростных режимов, что особенно неудобно при трогании и маневрировании автомобиля на первой педальке.

По-видимому, для автомобильных дизелей наиболее пригодны регуляторы частоты вращения с пелогими регуляторными характеристиками на промежуточных режимах (трехрежимные регуляторы). Регуляторы с такими характеристиками были предложены автором в 1961 г. Аналогичные регуляторы предлагали также (часто независимо друг от друга) следующие авторы: А.Янте, К.Гофман (ГДР), В.Заурер (Швейцария), Ф.Делюс (США), Г.Гликин (Англия), К.Е.Долганов, Ю.Ф. Гутаревич, А.Г.Говорун, А.Ф.Головчук (СССР) и др. Таким образом, возникла задача проведения сравнительных экспериментов, выявляющих преимущества того или иного регулятора.

Автомобильный дизель соединен с двигателем системой валов. В ряде работ указывается (В.А.Петров, Н.С.Ханин, Е.А.Зельцер), что работа САРЧ АД в этом случае имеет специфические особенности. Учет свойств машинного агрегата, с которым работает САРЧ ДВС, содержится в работах А.Е.Кочуры. Им предложены мажорантные частотные характеристики для определения эффективной полосы пропускания САРЧ ДВС, причем коэффициент трения в уравнении регулятора принимается равным нулю, что ограничивает сферу применения полученных им результатов. Интересно в связи с этим отметить требования увеличения коэффициента трения регулятора, содержащиеся в отдельных работах. На самом же деле увеличение этого коэффициента во всех существующих конструкциях регуляторов АД приводит к ухудшению динамических характеристик САРЧ. Этот пример наглядно показывает важность определения величин коэффициентов.

Между тем использование различных методик приводит к различным результатам. Так, например, упомянутый выше коэффициент трения (фактор торможения) регулятора, определенный по методике А.А. Грунауэра в несколько раз больше, чем тот же коэффициент, определенный по фазовым частотным характеристикам, поэтому возникает вопрос о выборе надежной методики определения этого коэффициента.

Большая работа по сравнению различных методов проведена под руководством автора на кафедре ДВС НИИ С.З.Скобелкиным.

САРЧ АД в общем случае работает при возмущающих воздействиях, поступающих по двум каналам: изменение координаты рычага управления регулятора (настройка регулятора) и изменение сопротивления движению автомобиля (настройка нагрузки). Эти сигналы взаимно коррелированы, что еще более усложняет их формализацию. В этих условиях практически важные сведения для решения задач структурно-параметрического синтеза элементов системы и, в частности, регулятора можно получить при помощи методов случайных функций.

Диссертационная работа посвящена повышению технико-экономических показателей автомобильных дизелей на основе совершенствования системы автоматического регулирования частоты вращения путем развития теории, конструкции и методов исследования динамической системы "регулятор-двигатель-автомобиль" и отдельных её элементов. При этом выполнение работ производилось в направлении решения следующих задач.

1. Разработка теоретического аппарата, пригодного для анализа динамики САРЧ АД с учетом податливости валов трансмиссии и основных её элементов на этапе раннего проектирования.

2. Разработка методов исследования САРЧ АД в стендовых и дорожных условиях.

3. Синтез схем регуляторов, перспективных для автомобильных условий эксплуатации.

4. Разработка механизмов и устройств, ускоряющих и облегчающих проведение исследований регуляторов скорости автомобильных дизелей.

5. Исследование статистической динамики систем автоматического регулирования скорости автомобильных дизелей.

Глава вторая посвящена исследованию систем автоматического регулирования частоты вращения автомобильных дизелей, находящихся в производстве в автомобильной промышленности СССР в настоящее время. На основе анализа устойчивости САРЧ найдены выражения для расчета экстремальных границ различных параметров регулятора и двигателя. Разработаны методики экспериментального определения различных коэффициентов. Приведены все параметры САРЧ, необходимые для исследования с помощью ЭВМ, а также результаты таких исследований.

В динамической системе "регулятор-дизель-автомобиль" система "регулятор-дизель" является самостоятельным звеном, известным в теории как система автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ). Иногда в этой системе в отдельное звено выделяют и топливный насос высокого давления (ТНВД), однако, по нашим данным, для решения поставленных задач в этом нет необходимости, поэтому двигатель вместе с ТНВД рассматривается как один элемент - регулируемый объект. В этих условиях дифференциальное уравнение САРЧ дизеля в операторной форме имеет вид (без учета податливости в приводе грузов регулятора):

$$D_c(p) \varphi = k_h k_\psi \alpha_p - d_m(p) \alpha_n,$$

где $D_c(p) = A_3 p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0$ - собственный оператор САРЧ;

$d_m(p) = T_p^2 p^2 + T_{kp} p + \delta_2$ - оператор муфты регулятора;

k_h, k_ψ - коэффициенты эффективности изменения положения органа дозирования подачи топлива и настройки регулятора (соответственно).

Коэффициенты уравнения САРЧ определяются выражениями:

$$A_3 = T_p^2 T_g; \quad A_2 = T_g T_k + T_p^2 K_g; \quad A_1 = T_g \delta_2^2 + T_k K_g; \quad A_0 = \delta_2^2 K_g + k_h.$$

В эти выражения входят коэффициенты уравнения движения муфты регулятора (T_p^2 - время регулятора, T_k - время катаракта, δ_2^2 - местная степень неравномерности) и коэффициенты уравнения движения двигателя (T_g - время двигателя, K_g, k_h - коэффициенты уравнения движения двигателя).

Устойчивость САРЧ АД зависит от величин коэффициентов уравнений движения двигателя и регулятора и для повышения устойчивости наиболее целесообразно варьировать величинами коэффициентов уравнения регулятора (такими как T_k и δ_2^2). Экстремальные границы изменения этих коэффициентов можно определить, используя критерии устойчивости Рауса-Гурвица, например:

- для времени катаракта (следовательно и для фактора торможения):

$$\frac{L + M}{2 |K_g| \cdot T_g} > T_k > \frac{L - M}{2 |K_g| \cdot T_g},$$

$$L = \delta_2^2 T_g^2 + K_g^2 T_p^2;$$

$$M = (L - 4K_h |K_g| T_g^2 T_p^2)^{\frac{1}{2}};$$

- для местной степени неравномерности, следовательно, и для фактора устойчивости регулятора - F_p):

$$\frac{k_h}{|K_g|} > \delta_z > |K_g| \frac{T_k}{T_g} + \frac{|K_g|}{T_k} \cdot \frac{T_p^2}{T_g} \left(\frac{1}{|K_g|} - |K_g| \frac{T_k}{T_g} \right).$$

Для практики регулирования более важной является задача определения оптимальных величин параметров регулятора скорости (например T_k^* и δ_z^*), при которых САРЧ наиболее устойчива. Решение этой задачи может быть найдено с помощью нормированного дифференциального уравнения профессора И.А.Вышнеградского и нормированной степени устойчивости α_0 (рис.1). Выражение для вычисления оптимальной величины времени катаракта имеет вид:

$$T_k^* = \frac{\sqrt[3]{A_0 A_3}}{T_g} \left(\frac{1}{\sqrt{2\alpha_0 - C}} + 2\alpha_0 \right) - |K_g| \frac{T_p^2}{T_g}; \quad C = \frac{|K_g|}{T_g} \left(\frac{1}{A_0} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Величины T_k^* для дизеля ЯМЗ-238А на порядок меньше существующих в реальных конструкциях, что свидетельствует о значительных резервах улучшения динамических показателей САРЧ этого дизеля.

Этот вывод подтверждает также зависимость (рис.2) времени переходного процесса (t_n) САРЧ от параметров регулятора и двигателя, построенная по формуле:

$$t_n = \frac{6}{\frac{F_p}{z} + \frac{F_z}{y}},$$

полученной при пренебрежении влиянием массы регулятора ($M = 0$). При экспериментальном исследовании выяснилось различное протекание переходных процессов при сбросе и набросе нагрузки. Оказалось, что переходные процессы при сбросе нагрузки получаются более затянутыми (рис.3) вследствие влияния нелинейности тита "насыщения", возникающей при перемещении органа регулирования подачи топлива за положение нулевой подачи топлива. Исследование этого явления с помощью электронной вычислительной машины ЭМУ-10 позволило более обоснованно выбрать регулировочные параметры регулятора ЯМЗ-238.

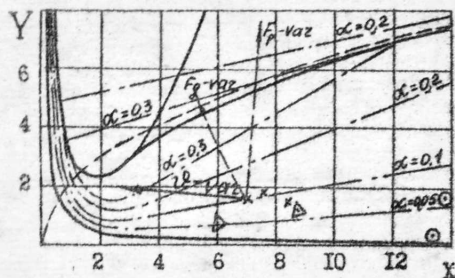


Рис.1 К определению $\nu_{\text{опт}}$. (1-парабола $\chi = \frac{Y^2}{4}$, α -степени устойчивости, изображающие точки принадлежат САРЧ АД ЯМЗ: χ - ЯМЗ-236; Δ - ЯМЗ-238; $\circ$ - ЯМЗ-240)

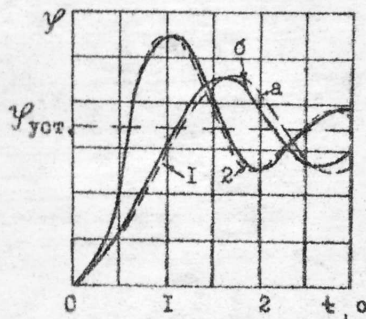


Рис.3 Переходный процесс САРЧ АД при сбросе (1) и при набросе (2) нагрузки (а-расчет, б-эксперимент)

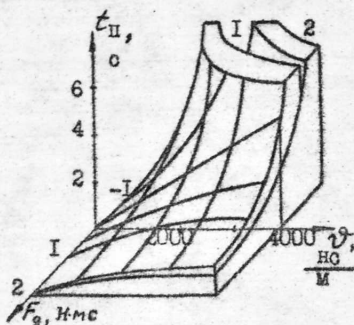


Рис.2 Диаграмма времени переходного процесса САРЧ АД (1-фактор устойчивости регулятора = 5000 н/м, 2- фактор устойчивости регулятора = 10000 н/м)

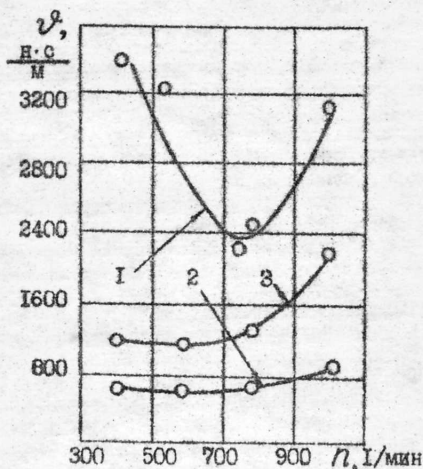


Рис.4 Величины фактора торможения регулятора ЯМЗ-236, определенные по различным методам (1-по методике А.А.Грунауэра, 2-по методике В.И.Крутова, 3-по фазовым частотным характеристикам)

Для повышения эффективности динамических расчетов САРЧ АД необходимо повышать надежность определения величин параметров регулятора и дизеля. В этом плане весьма перспективны экспериментальные методы исследования. Но и в этом случае результаты неоднозначны: применяя разные методики можно получить разные величины фактора торможения (ψ). Известны, например, методика В.И.Крутова (с присоединением маятника), методика А.А.Грунауэра (по периодическому переходному процессу) и др. На рис.4 приведены величины ψ , определенные всеми этими методами. Наиболее надежные результаты получаются при определении ψ по фазовым частотным характеристикам при вынуждающих частотах, близких по величине к частоте свободных колебаний САРЧ АД.

Внедрение полученных результатов в промышленное производство дизелей типа ЯМЗ привело к значительному улучшению динамических процессов САРЧ, вследствие чего практически одна и та же конструкция регулятора была применена для регулирования скорости дизелей ЯМЗ всех модификаций (ЯМЗ-236, 238, 240, 240Н, 238Б и др.).

Для эффективного использования математической модели с применением ЭВМ, при разработке и доводке дизельных автомобилей, необходима возможность изменения коэффициентов, входящих в уравнения. Величины этих коэффициентов зависят от многих причин (от режимов настройки регулятора, настройки нагрузки и т.п.), в том числе и от конструкции регулятора частоты вращения и ТНВД (такие коэффициенты, как фактор устойчивости регулятора, фактор торможения регулятора, фактор устойчивости двигателя, коэффициент влияния перемещения рейки ТНВД на момент двигателя и др.).

В третьей главе рассмотрены характеристики управления подачей топлива при работе автомобильного дизеля с различными регуляторами частоты вращения. Приведены результаты разработки и исследования перспективных регуляторов частоты вращения, получивших название трехрежимных, представлена также классификация этих регуляторов. Разработаны различные варианты обратных корректоров (антикорректоров) и методика их расчета. Приведены результаты стендовых и моторных испытаний дизелей с такими регуляторами.

Управление автомобилем сводится к изменению вектора скорости по направлению и по модулю. Последнее связано с характеристиками эффективного крутящего момента в зависимости от хода педали акселератора, вид и расположение которых для дизелей, в основном, определяется протеканием частичных регуляторных характеристик. По этому признаку регуляторы частоты вращения дизелей делат-

ся на всережимные и двухрежимные, последние чаще применяются на автомобильных дизелях, где важно, чтобы подача топлива изменялась пропорционально ходу педали акселератора (аналогично и для тракторных дизелей, используемых в транспортных операциях). В последнее время все большее внимание уделяется так называемым трехрежимным регуляторам.

На рис.5 показано протекание регуляторных характеристик дизеля (зависимость крутящего момента (M) от частоты вращения (Ω) для всех указанных типов регуляторов (как известно, регуляторные характеристики снимаются при постоянном положении (ψ) рычага управления). На рис.6 приведены соответствующие им характеристики управления, определяемые при постоянной частоте вращения (зависимость $M = f(\psi)$).

Трехрежимные регуляторы являются компромиссным вариантом: остаются всережимными, они по характеристикам управления (рис.6) приближаются к двухрежимным. Их регуляторные характеристики имеют три характерных режима регулирования - режимы минимальных и максимальных частот вращения, как у двухрежимного регулятора, а на промежуточных частотах вращения регуляторные характеристики имеют плавное протекание (А.с. № 191270, СССР).

Значение протекания характеристик управления возрастает в сложных условиях движения, когда максимальная сила тяги ($P_{\kappa \max}$) на ведущих колесах ограничивается силой сцепления колес с дорогой (P_{ψ}). В условиях установившегося движения сила тяги на ведущих колесах равна сумме сил сопротивления ($P_{\kappa} = \sum P_c$), следовательно, разгон автомобиля возможен лишь при условии $P_{\kappa} > \sum P_c$. Причем, если при управлении подачей топлива водитель по неосторожности допустил увеличение P_{κ} настолько, что стало возможным равенство $P_{\kappa} = P_{\psi}$, наступает буксование ведущих колес, величина P_{ψ} уменьшается и даже может стать меньше $\sum P_c$, т.е. движение становится невозможным, наступает потеря управления автомобилем. Иногда это явление происходит с заносом, т.е. возможно спонтанное изменение направления вектора скорости, что, как правило, нарушает и безопасность движения. На рис.7 показаны соотношения такого критического хода педали акселератора $\Delta \psi$ при различных регуляторах. Вполне очевидно, что при работе со всережимным регулятором, водитель должен перемещать педаль акселератора более осторожно, т.к. величина $\Delta \psi_1$ весьма незначительна ($\Delta \psi_1 \ll \Delta \psi_2$).

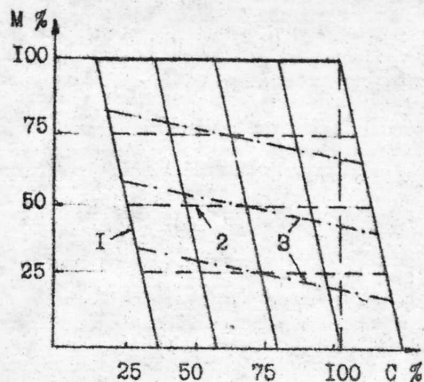


Рис.5 Регуляторные характеристики дизелей с всережимным (1), двухрежимным (2) и трехрежимным (3) регуляторами

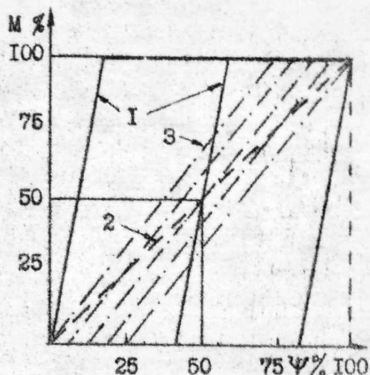


Рис.6 Характеристики управления дизелей с разными регуляторами (см. Рис.5)

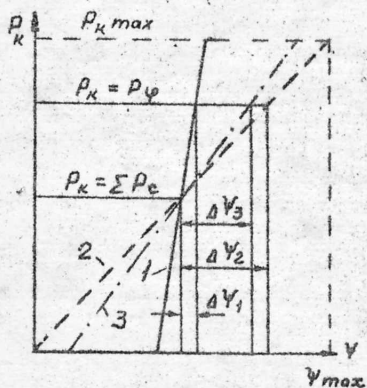


Рис.7 Зависимость тяговой силы от положения рычага управления регуляторов (см. Рис.5)

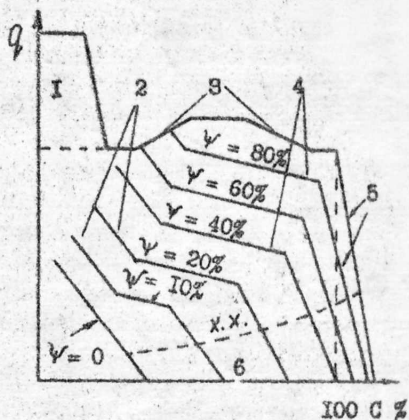


Рис.8 Характеристики цикловых подач ТНВД дизеля с трехрежимным регулятором

Такие характеристики управления подачи топлива неудобны и при трогании автомобиля с места, т.к. процесс трогания происходит при больших величинах и среднего, и максимального крутящего момента, что приводит к увеличению работы буксования сцепления. Образно говоря, такие же явления происходили бы и в карбюраторных двигателях, если бы водитель при трогании нажимал на педаль акселератора до упора (т.е. до максимальной подачи топлива).

В процессе разработки и доводки трехрежимных регуляторов выяснилось, что протекание частичных регуляторных характеристик должно быть дифференцированным (рис.8). В частности, в зоне холостого хода (х.х.) они должны иметь участки с уменьшенной местной степенью неравномерности (для обеспечения выключения подачи топлива (Q) на режимах принудительного холостого хода). Также было установлено, что применение обратных корректоров не должно оказывать влияния на протекание частичных регуляторных характеристик (в противном случае могут появляться участки с отрицательной местной степенью неравномерности). Таким образом, на всем поле рабочих режимов быстрогоходного дизеля, предназначенного для установки на автомобиль или трактор (с преобладанием транспортных работ), можно выделить шесть характерных зон регулирования.

1 - зона стартовых подач (включение стартового устройства ручное, а выключение - автоматическое с надежной гарантией невозможности повторного включения в любых других условиях, кроме пускового); 2 - зона маневрирования (на минимальных частотах вращения частичные регуляторные характеристики имеют более крутое протекание, предохраняя двигатель от заглохания); 3 - зона внешней скоростной характеристики (ограничение максимальной подачи топлива с учетом экономических и экологических критериев); 4 - зона крейсерских режимов (пологое протекание характеристик для обеспечения пропорционального изменения подачи топлива по ходу педали акселератора); 5 - зона предельных скоростных режимов (ограничение максимальной частоты вращения); 6 - зона холостого хода (на минимальных подачах более крутое протекание характеристик).

Такое формирование характеристик наиболее рационально выполнять либо регуляторами скорости с переменным наклоном пружины управления, либо регуляторами с переменным передаточным отношением рычага рейки (при перемещении рычага управления в сторону увеличения подачи топлива передаточное отношение уменьшается), либо регуляторами с двумя парами грузов (легкие и тяжелые) с отключением тяжелых грузов на среднем скоростном режиме.

Анализ экспериментальных характеристик управления дизелей ЯМЗ, КамАЗ с трехрежимными регуляторами показывает, что они близки к аналогичным характеристикам карбюраторных двигателей (таких, как ЗИЛ-130), поэтому при внедрении таких регуляторов в производство водителям будет легче адаптироваться при смене марок автомобилей (с карбюраторного на дизельный и наоборот).

В последнее время особое значение приобрели экологические аспекты применения дизелей на автотранспорте. Больше всего дымление дизелей отмечается на режиме разгона по внешней характеристике в зоне малых скоростных режимов, откуда возникает задача уменьшения величины подачи топлива на малых скоростных режимах при сохранении точки максимального крутящего момента. Таким образом, корректор должен (при уменьшении скоростного режима от номинального) сначала увеличить подачу топлива до точки M_{max} , а затем уменьшить её в заданных пределах. Эту задачу стали выполнять реверсивные корректоры (за рубежом такие корректоры получили название "плюс-минус" корректоры). Нами была заявлена схема такого корректора в 1964 году (А.с. № 200949, СССР).

При работе трехрежимных регуляторов с такими корректорами выяснилось, что они сильно искажают протекание частичных регуляторных характеристик, поэтому возникла новая задача: сделать такой корректор, чтобы он работал только на внешней характеристике, а на всех частичных регуляторных характеристиках выключался бы из работы.

Было разработано несколько схем регуляторов с раздельным формированием трех групп характеристик: внешней скоростной, частичных регуляторных и предельных регуляторных (А.с. № 696171, № 1110919). В этих схемах возможно уменьшение подачи топлива при уменьшении частоты вращения от $n_{M_{max}}$ на внешней скоростной характеристике и увеличение подачи топлива при таком же изменении частоты вращения на частичных регуляторных характеристиках.

В четвертой главе описана математическая модель динамической системы "регулятор-двигатель-автомобиль" с учетом упруго-диссипативных свойств трансмиссии. Отдельно указана математическая модель системы "двигатель-автомобиль", которая опирается на двухмассовую приведенную крутильную систему, представляющую в данном случае регулируемый объект. Приведены выражения для расчета амплитудно-частотных характеристик как всей системы РДА, так и отдельных её элементов. Разработана электронная модель системы РДА с учетом нелинейной зависимости момента дизеля от координаты рейки.

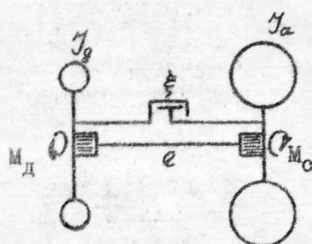


Рис.9 Двухмассовая система автомобиля (регулируемый объект)

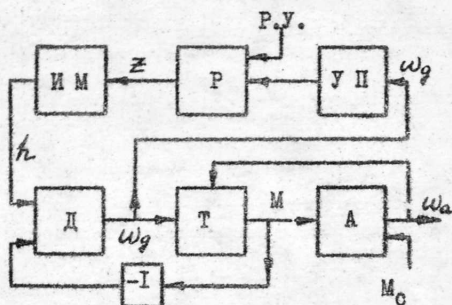


Рис.10 Функциональная схема системы РДА

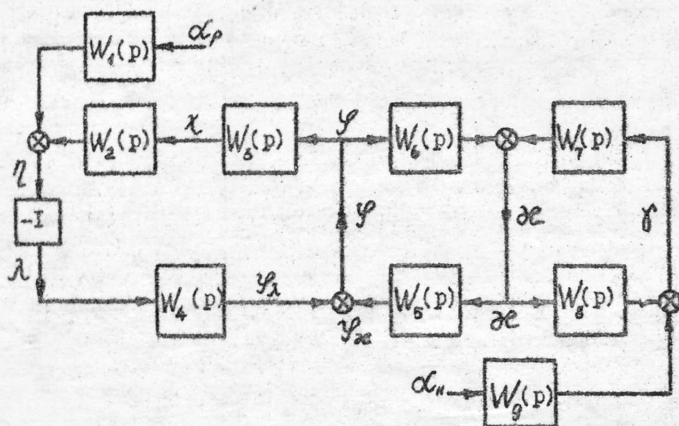


Рис.11 Структурная схема математической модели системы РДА

В рабочих условиях коленчатый вал двигателя подключен системой валов к колесам автомобиля, в этом случае всю эту механическую систему представляют в виде эквивалентной крутильной системы. Обычно ограничиваются анализом пятимассовой системы. САРЧ АД имеет полосу пропускания, в которую попадает только низшая частота крутильной системы. Но низшая частота пятимассовой системы незначительно отличается от собственной частоты двухмассовой системы, поэтому для анализа системы РДА взята именно двухмассовая система (рис.9), т.к. это в сильной степени упрощает математический аппарат и более подходит для целей проектирования.

Уравнения движения масс имеют вид:

$$J_g \ddot{\alpha}_g + \xi (\dot{\alpha}_g - \dot{\alpha}_a) + \frac{1}{e} (\alpha_g - \alpha_a) = M_g;$$

$$J_a \ddot{\alpha}_a - \xi (\dot{\alpha}_g - \dot{\alpha}_a) - \frac{1}{e} (\alpha_g - \alpha_a) = -M_c.$$

Путем несложных преобразований этой системы уравнений можно получить уравнения движения элементов системы "двигатель-трансмиссия-автомобиль" (второе уравнение приведено в операторной форме)

Двигатель

$$T_g \dot{\varphi} + K_g \varphi = K_h \lambda - T_y \dot{\theta} - H;$$

Трансмиссия

$$d_g(p) \varphi = K_h \lambda - d_y(p) \theta;$$

$$\varphi - \theta = T_a \dot{\theta};$$

$$d_r(p) \theta = \varphi - \theta;$$

Автомобиль

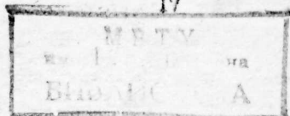
$$T_a \dot{\theta} + K_a \theta = T_y \dot{\theta} + \theta - d_n;$$

$$d_a(p) \theta = d_y(p) \theta - d_n,$$

где T_g, K_g, K_h совпадают с коэффициентами уравнения двигателя;
 $T_y = \xi e$ — время демпфирования упругих связей; $T_a = e \cdot M_n / \omega_0$ — время соединительных валов трансмиссии; $T_a = J_a \omega_0 / M_n$ — время автомобиля (ведомые массы); $K_a = \xi_a \cdot \omega / M_n$ — коэффициент автомобиля; d_n — случайные отклонения момента сопротивления, θ — относительная координата момента в трансмиссии; γ — относительная частота вращения приведенной ведомой массы (автомобиль); φ — относительная частота вращения приведенной ведущей массы (двигатель); λ — относительная координата рейки ТНВД.

Уравнения движения системы ДТА (регулируемый объект) относительно каждой текущей координаты имеют вид:

$$d_{p.o.}(p) \varphi = K_h d_n(p) \lambda + d_y(p) d_n,$$



$$d_{p.o.}(p) H = k_h d_a(p) \lambda + d_g(p) d_n ;$$

$$d_{p.o.}(p) \delta = k_h d_y(p) \lambda + d_n(p) d_n ,$$

где $d_{p.o.}(p)$ - собственный оператор регулируемого объекта (ДТА).

$$d_{p.o.}(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 ;$$

$$a_3 = T_a T_g T_\theta ; \quad a_2 = T_\theta (T_a K_g + T_g K_a) + T_g (T_a + T_g) ;$$

$$a_1 = T_\theta K_a K_g + T_g (K_a + K_g) + (T_a + T_g) ; \quad a_0 = K_a + K_g .$$

Уравнение движения регулятора с учетом податливости в приводе грузов имеет вид:

$$D_p(p) \eta = d_n(p) \varphi - k_\psi d_r(p) \alpha_p ,$$

где $d_n(p)$ - оператор упругого привода грузов, причем $d_n(p) = T_3 p + 1$ ($T_3 = q K_1$; q - податливость привода грузов; K_1 - коэффициент внутреннего трения в приводе); $d_r(p)$ - оператор грузового чувствительного элемента, причем, $d_r(p) = T_2^2 p^2 + T_1 p + 1$ ($T_2^2 = q J_r$; $T_1 = q K_x$; J_r - момент инерции грузов; K_x - коэффициент внутреннего и внешнего трения); $D_p(p) = \beta_4 p^4 + \beta_3 p^3 + \beta_2 p^2 + \beta_1 p + \beta_0$, - собственный оператор регулятора, причем $\beta_4 = T_z^2 \cdot T_p^2$; $\beta_3 = T_1 T_p^2 + T_z^2 T_K$; $\beta_2 = T_p^2 + T_K T_1 + T_z^2 \delta_p^2$; $\beta_1 = T_K + T_1 \delta_p^2$; $\beta_0 = \delta_p^2$.

На рис. 10 показана функциональная схема системы РДА, на которой видно, что регулятор (Р) связан с двигателем, с одной стороны через упругий привод (УП) грузов, с другой - через исполнительный механизм (ИМ) рейки ТНВД. Поэтому уравнение движения динамической системы "регулятор-двигатель-автомобиль" получается совместным решением одного из уравнений системы ДТА и уравнения движения регулятора с учетом уравнения движения исполнительного механизма $\lambda = -2$ или $\lambda = k_n d_n - 2$. Для первого случая ($\lambda = -2$ - регуляторы с переменной затяжкой пружины) уравнение системы РДА в операторной форме имеет вид:

$$D_c(p) \varphi = k_h k_\psi D_y(p) \alpha_p - D_n(p) d_n ,$$

где $D_c(p)$ - собственный оператор системы РДА; $D_y(p)$ - оператор управляющего сигнала; $D_n(p)$ - оператор настройки нагрузки.

Указанные операторы можно представить в виде многочленов:

$$- D_c(p) = E_7 p^7 + E_6 p^6 + \dots + E_1 p + E_0,$$

где $E_7 = a_3 B_4$; $E_6 = a_3 B_3 + a_2 B_4$; $E_5 = a_3 B_2 + a_2 B_3 + a_1 B_4$;
 $E_4 = a_3 B_1 + a_2 B_2 + a_1 B_3 + a_0 B_4$;
 $E_3 = a_3 B_0 + a_2 B_1 + a_1 B_2 + a_0 B_3 + T_6 T_a T_3 k_h$;
 $E_2 = a_2 B_0 + a_1 B_1 + a_0 B_2 + k_h (T_a T_6 + T_6 T_3 K_a + T_3 T_y)$;
 $E_1 = a_1 B_0 + a_0 B_1 + k_h (T_6 K_a + T_y + T_3)$; $E_0 = a_0 B_1 + k_h$,

$$- D_y(p) = C_4 p^4 + C_3 p^3 + C_2 p^2 + C_1 p + C_0,$$

где $C_4 = T_2^2 T_a T_6$; $C_3 = T_2^2 (T_6 K_a + T_y) + T_a T_6 T_1$;
 $C_2 = T_2^2 K_g + T_1 (T_6 K_a + T_y) + T_a T_6$;
 $C_1 = T_1 K_a + T_6 K_a + T_y$; $C_0 = K_g$,

$$- D_u(p) = D_5 p^5 + D_4 p^4 + D_3 p^3 + D_2 p^2 + D_1 p + D_0,$$

где $D_5 = B_4 T_y$; $D_4 = B_4 + B_3 T_y$; $D_3 = B_3 + B_2 T_y$;
 $D_2 = B_2 + B_1 T_y$; $D_1 = B_1 + B_0 T_y$; $D_0 = \delta_z^2$

Структурная схема математической модели системы ПДА показана на рис. II. Здесь $W_1(p)$, $W_2(p)$, ..., $W_9(p)$ — передаточные функции элементов системы по соответствующим координатам.

Если пренебречь влиянием податливости привода грузов регулятора ($q = 0$) приведенной массы регулятора ($M = 0$), то порядок уравнения понижается до четвертого и тогда

$$E_4 = a_3 T_k$$
; $E_3 = a_3 \delta_z^2 + a_2 T_k$; $E_2 = a_2 \delta_z^2 + a_1 T_k$;
 $E_1 = a_1 \delta_z^2 + a_0 T_k$; $E_0 = a_0 \delta_z^2 + k_h$;
 $C_2 = T_a T_6$; $C_1 = T_6 K_a + T_y$; $C_0 = K_g$;
 $D_2 = T_k T_y$; $D_1 = T_k + \delta_z^2 T_y$; $D_0 = \delta_z^2$.

Если, кроме того, и трансмиссию считать жесткой системой (т.е. принять $e = 0$), то коэффициенты уравнения системы примут вид:

$$E_2 = T_K (T_g + T_a) ; E_1 = \delta_2 (T_g + T_a) + T_K (K_g + K_a) ;$$

$$E_0 = \delta_2 (K_g + K_a) + K_h ; C_0 = K_g ; D_1 = T_K ; D_0 = \delta_2$$

Эти коэффициенты совпали с коэффициентами уравнения движения САУ АД за исключением величины приведенного момента инерции, здесь он включает в себя и приведенные массы автомобиля.

Аналогичные выражения можно получить и для других координат, например, H, η, λ . Последняя координата привлекает исследователей относительной простотой её записи при экспериментальном определении частотных характеристик системы РДА.

Таким образом, полученная математическая модель динамической системы "регулятор-дизель-автомобиль" с учетом податливости привода грузов регулятора и податливости валов трансмиссии автомобиля является линейным дифференциальным уравнением седьмого порядка, в отдельных случаях порядок уравнения может быть понижен до четвертого за счет пренебрежения влиянием приведенной массы регулятора и податливости привода регулятора.

В пятую главу включены результаты экспериментальных исследований, моторных и дорожных исследований системы РДА с различными регуляторами частоты вращения (эсережимный, двухрежимный, трехрежимный). Анализируется протекание расчетных и экспериментальных амплитудно-частотных характеристик системы РДА и влияние на форму этих характеристик различных параметров регулятора, двигателя и автомобиля. Приведены результаты статистических исследований с применением режимометрирования и корреляционного анализа. Приводятся данные анализа эксплуатационных расходов топлива, а также замеров теплового состояния двигателя при работе автомобильных дизелей с разными регуляторами частоты вращения в дорожных условиях.

Для динамических исследований сложных систем (к которым относится и система РДА) удобно применять частотные методы, обладающие большой наглядностью и информативностью.

Если исходные уравнения при выводе математической модели системы РДА были получены с помощью интегрального преобразования Фурье (а не Лапласа), то передаточные функции называются частотными, модуль которых (R) является амплитудной частотной характеристикой (АЧХ), а аргумент (δ) — фазовой частотной характеристикой (ФЧХ), причем:

$$R(\omega) = \sqrt{x^2 + y^2};$$

$$\delta(\omega) = \operatorname{arctg}(y/x),$$

где x - вещественная часть комплексного выражения, соответствующая передаточной функции, y - мнимая часть этого выражения.

При воздействии на настройку регулятора (α_p) выражение для расчета относительной АЧХ системы РДА для регулируемой координаты (φ) имеет вид:

$$\bar{R}_{\varphi}^{\alpha_p} = \sqrt{\frac{E_0^2 (C_4 \omega^4 + C_2 \omega^2 + C_0) + \omega^2 (C_1 - C_3 \omega^2)^2}{C_0^2 (E_4 \omega^4 - E_6 \omega^2 - E_2 \omega^2 + E_0)^2 + \omega^2 (E_5 \omega^4 - E_7 \omega^2 - E_3 \omega^2 + E_1)^2}}$$

На рис. 12 показано, что учет податливости валов трансмиссии (линия 3) резко изменяет протекание АЧХ системы РДА (линия 2) и более соответствует реальным характеристикам системы автоматического регулирования частоты вращения автомобильного двигателя, работающего на автомобиле с включенным сцеплением.

Параметры крутильной системы, использованные в расчете, частично были получены также экспериментальными или расчетно-экспериментальными методами (коэффициент демпфирования трансмиссии ξ , податливость трансмиссии Θ и др.). На рис. 12 нанесены также экспериментальные точки (4) АЧХ, полученные на автомобиле МАЗ-500А, при гармоничном ^{вс} воздействии на рычаг управления регулятора и движениях автомобиля по ровному участку шоссе (т.е. $\alpha_H = 0$) на второй передаче. Аналогичные результаты получены при исследовании электронной модели системы РДА с помощью АБМ ЭМУ-10.

Результаты исследований свидетельствуют о наличии дополнительного резонансного пика, получающегося при совместной работе САРЧ АД и крутильной системы автомобиля. Резонансная частота этого пика 0,5-1 Гц близка к нижней частоте колебаний подвесочных масс автомобиля и при определенных условиях эти колебания могут резонировать. Наиболее радикальным методом борьбы с этим явлением следует признать использование двухрежимных или трехрежимных регуляторов, т.к. в зоне рабочих режимов управление подачей топлива осуществляется самим водителем, а обратная связь "двигатель-регулятор" или выключается совсем (при двухрежимном регуляторе), или происходит при малом коэффициенте усиления (при трехрежимном регуляторе).

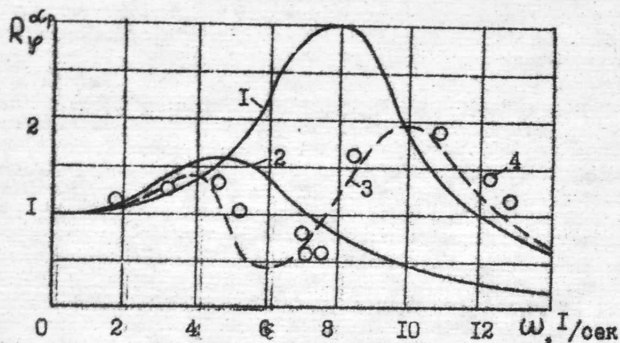


Рис.12 Амплитудно-частотные характеристики
(1-системы "регулятор-двигатель"; 2-системы
РДА с жесткими валами; 3-системы РДА с упру-
гими валами; 4-экспериментальные точки)

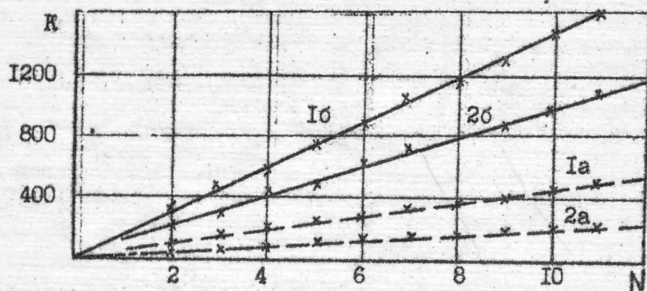


Рис.13 Число выходов (к) на внешнюю характеристику (1)
и на режим торможения двигателем (2) с двухре-
жимным (а) и всережимным регулятором (б)
(N -номер заезда)

Выше было указано, что использование всережимных регуляторов с переменным наклоном пружины (типа ЯМЗ, КамАЗ) приводит к более крутому протеканию регуляторных характеристик, т.е. к меньшим величинам степени неравномерности на частичных режимах и, следовательно, к большему коэффициенту усиления по управляющему сигналу. Такая острая чувствительность органа регулирования подачи топлива (рейки топливного насоса высокого давления) к перемещению педали акселератора приводит к тому, что двигатель чаще, чем это необходимо по условиям движения, работает либо в режиме разгона, либо в режиме торможения. Замеры режимов работы дизелей с различными регуляторами (двухрежимный, всережимный) в городе их условиях движения показали, что при всережимном регулировании рейка ТНВД выходит в зоны экстремальных режимов в 5-6 раз большее количество раз (рис. 13). Эти испытания проводились на автомобиле МАЗ-500А с двигателем ЯМЗ-236. Режимометрическое устройство, учитывающее количество выходов рейки в экстремальные зоны, включалось лишь после того, как она предварительно побывала в средней зоне, что исключало учет мелких колебаний, характерных для работы со всережимным регулятором. Сделанный вывод подтверждается также визуальным анализом осциллограмм поведения рейки. Дифференциальный закон распределения вероятностей пребывания рейки на разных уровнях также смещен в крайние зоны при работе со всережимным регулятором, при этом среднеквадратичное отклонение координаты рейки от её среднего положения в 1,6 раза больше, чем при работе с двухрежимным регулятором. Аналогичные испытания были проведены и на автомобиле КамАЗ-5320 с записью результатов на магнитные носители и последующей обработкой на ЭЕМ методами корреляционного анализа. Автокорреляционные функции изменения координаты рейки имеют экспоненциальный характер и при работе со всережимным регулятором убывает более резко, что указывает на большую частотность процесса изменения исследуемой координаты. Все это позволяет утверждать, что при работе со всережимным регулятором подача топлива в двигателе отличается большей переменностью, поэтому расход топлива получается на 5-7% больше.

Выводы

Основным содержанием диссертации является разработка способов повышения технико-экономических показателей автомобильных дизелей путем совершенствования системы автоматического регулирования частоты вращения.

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

1. Разработана математическая модель динамической системы "регулятор-двигатель-автомобиль", пригодная для использования на ранней стадии проектирования и на её основе предложены:

- метод исследования системы РДА с помощью электронных моделей;
- комплексные методы синтеза системы РДА с помощью расчетных и экспериментальных частотных характеристик;
- алгоритмы и программы расчета амплитудных частотных характеристик при воздействии на различные входные координаты.

2. Проведены исследования процессов управления и регулирования автомобильного дизеля, послужившие базой для разработки теоретических основ структурно-параметрической оптимизации конструкций регуляторов частоты вращения автомобильных дизелей, на основании которых разработаны и защищены авторскими свидетельствами:

- всережимные регуляторы с пологими характеристиками на различных режимах (трехрежимные регуляторы);
- корректоры внешней скоростной характеристики с восходящим перемещением дозирующего органа (антикорректоры);
- всережимные регуляторы с двумя парами грузов (легкие и тяжелые, характеризующиеся значительным уменьшением реактивных усилий в силовых шарнирах);
- всережимные регуляторы с независимым формированием трех групп характеристик двигателя (внешней скоростной характеристики с нисходящей и восходящей корректорными ветвями, регуляторных характеристик максимальных скоростных режимов, частичных регуляторных характеристик).

Внедрение указанных устройств в производство позволит повысить безопасность движения, моторесурс и надежность силовой установки автомобиля, упрощение изделий, снизить затраты на производство.

3. На основе теории случайных функций проведены исследования статистической динамики системы РДА, в результате которых установлено, что при уменьшении фактора устойчивости регулятора происходит смещение нагрузочных режимов работы двигателя в экстремальные зоны, что приводит к более нестационарной работе двигателя по подаче топлива, а в конечном итоге - к ухудшению технико-экономических показателей всего автомобиля. Теоретические выводы подтверждены экспериментальными исследованиями, проведенными совместно с ЯМЗ, ЯЗДА и Автополигоном НАМИ.

4. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективными методами борьбы с дымностью дизелей является применение обратных корректоров (антикорректоров), встраиваемых в конструкцию регуляторов частоты вращения. В сочетании с обычными корректорами эти устройства получили название "реверсивные корректоры", что является новым в области регуляторостроения автомобильных и тракторных дизелей.

5. Впервые разработаны метод регулирования и конструкция автоматического регулятора частоты вращения автомобильного дизеля, обеспечивающие оптимальную работу дизеля в режиме тормоза-замедлителя, повышение надежности и экономичности автолюбил в горных условиях движения.

6. Предложены, разработаны и внедрены в исследовательскую практику заводов-изготовителей дизелей частотные методы исследования САР частоты вращения дизелей при воздействии на рычаг управления регулятора, что значительно упростило экспериментальное оборудование и ускорило процесс эксперимента. Разработана и внедрена в исследовательскую практику ЯЗДА, ЯМЗ, ЯПИ и др. методика определения величины фактора торможения топливopод-ающей аппаратуры быстроходных дизелей с помощью фазовых и амплитудных частотных характеристик при воздействии на настройку регулятора частоты вращения.

7. Установлена взаимосвязь динамических процессов в сцеплении автомобиля и в САРЧ дизеля, происходящих при трогании автомобиля. Уменьшение степени неравномерности регуляторных характеристик приводит к более быстрому нарастанию крутящего момента буксования сцепления и увеличивает работу буксования. Величины средних и максимальных значений моментов при этом также становятся больше.

8. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что статические характеристики топливopод-ающей аппаратуры дизеля оказывают искажающее влияние на статические характеристики дизеля и системы автоматического регулирования частоты вращения, что в конечном итоге приводит к неустойчивой работе всей САРЧ АД, появлению автоколебаний. Проведены исследования влияния формы скоростных характеристик цикловых подач ГНВД на устойчивость работы САРЧ АД, закончившиеся внедрением корректирующих нагнетательных клапанов в серийное производство на Ярославском заводе топливной аппаратуры. В результате проведенных исследований была обеспечена возможность использования

регулятора частоты вращения дизеля ЯМЗ-236 для регулирования частоты вращения дизелей ЯМЗ-238 и ЯМЗ-240. В последующие годы эти же регуляторы послужили основой для разработки конструкции однотипного регулятора частоты вращения для дизелей размерностью 140х140.

Основные положения диссертации получили отражение в следующих работах:

1. Блаженнов Е.И. О степени неравномерности всережимного регулятора автомобильного дизеля // Автомоб. пром-сть. - 1966. - № 6. - С.9-13.

2. Блаженнов Е.И., Малышев В.М. О колебаниях скорости коленчатого вала двигателя ЯМЗ-236 // Автомоб. пром-сть. - 1967. - № 1. - С.16-17.

3. Крутов В.И., Блаженнов Е.И. Применение частотных характеристик для определения фактора торможения топливноподающей аппаратуры дизеля // Изв. вузов. Машиностроение. - 1967. - № 11. - С.83-87.

4. Крутов В.И., Блаженнов Е.И. О выборе местной степени неравномерности чувствительного элемента регулятора скорости дизеля // Изв. вузов. Машиностроение. - 1967. - № 12. - С. 118-121.

5. Блаженнов Е.И., Терещук А.Г. Некоторые работы по доводке регулятора ЯМЗ-236 // Автомоб. пром-сть. - 1967. - № 3. - С. 10-13.

6. К вопросу о влиянии регулятора двигателя на работу сцепления / Е.И.Блаженнов, И.М. Козлов, Л.М.Малышев и др. // Автом. пром-сть. - 1967. - № 11. - С. 6-8.

7. Повышение устойчивости скоростного режима двигателей ЯМЗ / Е.И.Блаженнов, А.Г.Терещук, И.К.Скрипкин и др. // Автомоб. пром-сть. - 1968. - № 4. - С. 4-6.

8. Определение статических показателей регуляторов скорости ЯМЗ / Е.И.Блаженнов, А.Г.Терещук, П.Б.Поляков и др. // Автомоб. пром-сть. - 1969. - № 8. - С. 1-4.

9. Блаженнов Е.И., Сорокин В.П. Устройство для статистического анализа режимов работы дизеля // Автомоб. пром-сть. - 1970. - № 3. - С. 7-9.

10. Блаженнов Е.И., Каретин Н.И. Тяговый расчет автомобиля: Методическое пособие. - Ярославль: Изд-во Яросл.технол.ин-та, 1970. - 25 с.

11. Блаженнов Е.И., Поляков П.Б. Методика определения фактора торможения по частотным характеристикам САРЧ дизеля // Науч. тр. / Ярослав.технол.ин-т. - 1972. - Т.29. - С.81-84.

12. Блаженнов Е.И. Элементы теории систем автоматического регулирования скорости быстроходных дизелей. - Курс лекций. - Ярославль; Изд-во Ярослав.политехн. ин-та, 1974. - 112 с.

13. Блаженнов Е.И. Автоматические регуляторы скорости автомобильных и тракторных двигателей (описательный курс): Курс лекций. - Ярославль: Изд-во Ярослав.политехн.ин-та, 1974. - 120 с.

14. Блаженнов Е.И. Параметры системы автоматического регулирования четырехтактного дизеля ЯМЗ-238А // Научн.тр. / Ярослав.технол.ин-т. - 1972. - Т.29. - С.84-89.

15. Блаженнов Е.И., Влияние местной степени неравномерности чувствительного элемента на эффективность воздействия сигнала по настройке регулятора // Научн.тр. / Ярослав.технол.ин-т. - 1972. - Т.29. - С.90-91.

16. Блаженнов Е.И. Расчет регуляторов скорости быстроходных дизелей: Учебное пособие. - Ярославль: Изд-во Ярослав.технол.ин-та, 1973. - 63 с.

17. Блаженнов Е.И. К вопросу об использовании частотных характеристик для определения фактора торможения топливоподающей аппаратуры дизеля // Научн.тр. / Ярослав.технол.ин-т. - 1972. - Т.23. - С.31-33.

18. Влияние приведенной массы регулятора на решение уравнений движения регулятора и САРЧ двигателя ЯМЗ-238 / Е.И.Блаженнов, Ю.С.Смирнов, П.Б.Поляков // Научн.тр. / Ярослав.технол.ин-т. - 1972. - Т.23. - С.49-54.

19. Влияние формы частичных характеристик на устойчивость скоростного режима дизелей ЯМЗ / Е.И.Блаженнов, Л.М.Малышев, И.К.Скришкин и др. // Научн.тр. / Ярослав.технол.ин-т. - 1972. - Т.23. - С.92-98.

20. Блаженнов Е.И., Поляков П.Б. Оптимизация величины фактора торможения топливоподающей аппаратуры дизеля по условиям устойчивости САРЧ // Двиг.внутр.стор: Междув.об. - Ярославль, 1973. - С.93-100.

21. Блаженнов Е.И., Романенко Н.И. Выбор параметров САРЧ автомобильного дизеля при оптимизации времени переходного процесса // Топливная аппаратура дизелей: Междув.об. - Ярославль, 1973. - С.67-70.

22. Блаженнов Е.И. Об одной форме записи уравнений движения САРЧ автомобильного дизеля // Топливная аппаратура дизелей: Межвуз. сб. - Ярославль, 1973. - С.70-73.

23. Блаженнов Е.И. Определение частоты свободного переходного процесса САРЧ дизеля // Двигатели внутр.сгор.: Межвуз. сб. - Ярославль, 1973. - С.105-107.

24. Блаженнов Е.И., Терещук А.Г., Корнилов Г.С. Динамическая тарировка режимометрических устройств // Двигатели внутр.сгор.: Межвуз. сб. - Ярославль, 1973. - С.100-105.

25. Блаженнов Е.И., Скобелкин С.З. Применение параметров свободного переходного процесса САРЧ дизеля для определения коэффициента гидравлического трения // Топливная аппаратура дизелей: Межвуз. сб. - Ярославль, 1974, вып.2 - С.54-57.

26. Блаженнов Е.И., Поляков П.Б. Местная деформация регуляторных характеристик дизеля // Топливная аппаратура дизелей: Межвуз. сб. - Ярославль, 1974, вып.2.- С.47-48.

27. Влияние уровня масла на надежность топливоподающей аппаратуры дизеля / Е.И.Блаженнов, Т.Д.Масляный, Л.М.Эрлих и др. // Автомот.тран.-т. - 1974. - № 7. - С.30-31.

28. Блаженнов Е.И., Третьев А.М. Коэффициенты уравнений САРЧ дизелей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-240Н // Топливная аппаратура дизелей: Межвуз. сб. - Ярославль, 1974, вып.2 - С.49-53.

29. Исследование режимов работы двигателя ЯМЗ-236 с двухрежимным и всережимным регуляторами / Е.И.Блаженнов, А.Г.Терещук, Г.С.Корнилов и др. // Двигатели внутр.сгор.: Межвуз. сб. - Ярославль, 1975. - С.119-124.

30. Блаженнов Е.И. Математическая модель системы "регулятор-дизель-автомобиль" / Яросл.политехн.ин-т. - Ярославль, 1978. - 15 с. - Деп. в НИИНавтопром 11.06.79, № Д 395.

31. Блаженнов Е.И., Полуэктов В.С., Хрящев Ю.Е. Электронная модель системы "регулятор-дизель-автомобиль" / Яросл.политехн.ин-т. - Ярославль, 1978. - 7 с. - Деп. в НИИНавтопром 11.06.79, № Д 397.

32. Экспериментальное исследование системы "регулятор-дизель-автомобиль" / Е.И.Блаженнов, С.З.Скобелкин, Ю.Е.Хрящев и др. / Яросл.политехн.ин-т. - Ярославль, 1978. - 6 с. - Деп. в НИИНавтопром 11.06.79, № Д 393.

33. Блаженнов Е.И., Скобелкин С.З. О выборе величины фактора торможения регулятора скорости дизеля / Яросл.политехн.ин-т. - Ярославль, 1978. - 6 с. - Деп. в НИИНавтопром 11.06.79, № Д 394.

34. Блаженнов Е.И., Скобелкин С.З. Методика определения сил и коэффициента сухого гидравлического трения в регуляторных скоростях дизелей / Ярослав. политехн. ин-т. - Ярославль, 1978. - 9 с. - Деп. в НИИНавтопром 11.06.79, № Д 395.

35. Исследования системы "регулятор-дизель-автомобиль" с помощью ЭВМ / Е.И. Блаженнов, Ю.Б. Хрищев, С.И. Субботина и др. / Ярослав. политехн. ин-т. - Ярославль, 1978. - 7 с. - Деп. в НИИНавтопром 11.06.79, № Д 392.

36. Совершенствование конструкции регуляторов скорости автомобильных дизелей / Е.И. Блаженнов, Л.М. Малышев, В.Р. Гальгозовский и др. // Рабочие процессы ДВС: Тез. докл. всес. конф. - М., 1978. - С. 182.

37. Стенд для определения фактора торможения дизеля / Е.И. Блаженнов, С.З. Скобелкин, С.Н. Иванов и др. // Топливная аппаратура дизелей: Межвуз. сб. - Ярославль, 1975, вып. 3. - С. 79-81.

38. Блаженнов Е.И., Скобелкин С.З. Частотные характеристики регулятора скорости дизеля при наличии гидравлического и сухого трения / Топливная аппаратура дизелей: Межвуз. сб. - Ярославль, 1975, вып. 3. - С. 76-78.

39. Блаженнов Е.И., Скобелкин С.З. Анализ методов определения фактора торможения регулятора и ТНВД // Топливная аппаратура дизелей: Межвуз. сб. - Ярославль, 1978, вып. 4. - С. 71-75.

40. Блаженнов Е.И., Поляков П.Б. Оптимизация параметров САРС одноцилиндровых дизелей // Топливная аппаратура дизелей: Межвуз. сб. - Ярославль, 1978, вып. 4. - С. 76-83.

41. Крутов В.И., Блаженнов Е.И. Местная степень неравномерности регуляторной характеристики дизеля // Автомоб. пром-сть. - 1976. - № 2. - С. 12-13.

42. Блаженнов Е.И., Крутов В.И. Математическая модель системы "регулятор-дизель-автомобиль" // Рабочие процессы в ДВС: Тезисы докладов всес. конф. - М., 1978. - С. 170.

43. Блаженнов Е.И., Субботина С.И. Параметры крутильной системы автомобиля МАЗ-500А / Ярослав. политехн. ин-т. - Ярославль, 1978. - 13 с. - Деп. в НИИНавтопром 11.08.79, № Д 389.

44. Блаженнов Е.И., Субботина С.И. Определение податливости и коэффициента демпфирования трансмиссии автомобиля МАЗ-500А / Ярослав. политехн. ин-т. - Ярославль, 1978. - 8 с. - Деп. в НИИНавтопром 11.06.79, № Д 391.

45. Блаженнов Е.И. Совершенствование конструкции и методов исследования регуляторов скорости автомобильных дизелей // Перспективы развития комбинированных ДВС и двигателей новых систем и топлив: Тезисы докладов всес.конф. - М., 1980. - С.123-124.

46. Блаженнов Е.И., Хрящев Ю.Е., Субботина С.И. Исследование динамических свойств САРС двигателя КАМАЗ-740 // Рабочие процессы в ДВС: Тезисы докл.всес.конф. - М., 1982. - С.191-192.

47. Блаженнов Е.И., Хрящев Ю.Е., Пугин Е.В. К вопросу об экспериментальном определении частотных характеристик системы "регулятор-дизель-автомобиль" / Ярослав.политехн.ин-т. - Ярославль, 1983. - 13 с. - Деп. в НИИНавтопром 15.06.83, № 913ап-Д83.

48. Блаженнов Е.И., Хрящев Ю.Е. Исследование работы автомобильного дизеля с разными типами регуляторов скорости и эксплуатационных условиях / Ярослав.политехн.ин-т. - Ярославль, 1983. - 18 с. - Деп. в НИИНавтопром 20.09.83, № 952ап-Д83.

49. Блаженнов Е.И., Подуктов В.С. Особенности экспериментального определения частотных характеристик дизелей / Ярослав.политехн.ин-т. - Ярославль, 1983. - 11 с. - Деп. в НИИНавтопром 15.09.83, № 950ап-Д83.

50. Блаженнов Е.И., Хрящев Ю.Е., Скобелкин С.З. Способ улучшения динамической системы "регулятор-двигатель-автомобиль" // Двигателестроение. - 1984. - № 7. - С.30-31.

51. Блаженнов Е.И., Хрящев Ю.Е. Влияние типа регулирования частоты вращения на динамику системы "регулятор-дизель-автомобиль" // Динамика и прочность автомобиля / Тезисы докл.всес.конф. - М., 1984. - С.33.

52. Блаженнов Е.И., Хрящев Ю.Е. Работа системы автоматического регулирования КАМАЗ-740 с двухрежимным регулятором // Автомоб.пром-сть. - 1985. - № 3. - С.15-17.

53. Блаженнов Е.И., Хрящев Ю.Е., Исаев А.И. Оптимизация системы автоматического регулирования автомобильного дизеля // Двигатели внут.сгор.: Межвуз.сб. - Ярославль, 1985. - С.26-30.

54. Блаженнов Е.И. Трехрежимные регуляторы автомобильных дизелей // Автомоб.пром-сть. - 1986. - № 7. - С.12-13.

55. Блаженнов Е.И., Подуктов В.С. Влияние нелинейности статических характеристик дизеля на автоколебания частоты вращения // Изв.вузов. Машиностроение. - 1986. - № 6. - С. 95-98.

56. Блаженнов Е.И., Хрячев Д.Е., Корнилов Г.С. Динамика системы автоматического регулирования дизеля КамАЗ-740 с трех-режимным регулятором // Двигателестроение. - 1987. - № 3. - С. 19-21.

57. Полубуктов В.С., Блаженнов Е.И. Оценка устойчивости САР частоты вращения дизеля при учете гистерезисного трения // Изв. вузов. Машиностроение. - 1986. - № II. - С. 75-78.

и изобретениях:

1. А.с. 191270 СССР, МПК F 02 d . Всережимный регулятор числа оборотов двигателя внутреннего сгорания / Е.И. Блаженнов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн. знаки. - 1967. - № 3. - С. 17.

2. А.с. 200949 СССР, МПК F 02 d . Всережимный регулятор топливного насоса / Е.И. Блаженнов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн. знаки. - 1967. - № 17. - С. 132.

3. А.с. 264844 СССР, МПК F 02 d . Двухступенчатый всережимный центробежный регулятор числа оборотов / Е.И. Блаженнов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн. знаки. - 1970. - № 9. - С. 146.

4. А.с. 549586 СССР, МКИ F 02 d . Всережимный регулятор скорости для двигателя внутреннего сгорания / Е.И. Блаженнов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн. знаки. - 1977. - № 9. - С. 125.

5. А.с. 559030 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Регулятор скорости для двигателя внутреннего сгорания / Е.И. Блаженнов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн. знаки. - 1977. - № 19. - С. 88.

6. А.с. 585304 СССР, МКИ F 02 d , II/04. Корректор регулятора скорости прямого действия для двигателя внутреннего сгорания / Е.И. Блаженнов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн. знаки. - 1977. - № 47. - С. 110.

7. А.с. 681203 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Всережимный регулятор топливного насоса / Е.И. Блаженнов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн. знаки. - 1979. - № 31. - С. 129.

8. А.с. 696171 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Всережимный регулятор скорости для двигателя внутреннего сгорания / Е.И. Блаженнов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн. знаки. - 1979. - № 41. - С. 132.

9. А.с. 757760 СССР, МКИ F 02 d , 9/06. Устройство для управления двигателем транспортного средства / Е.И. Блаженнов, И.Б. Бондырева, Л.Л. Иванов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн. знаки. - 1980. - № 31. - С. 142.

10. А.с. 781380 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Регулятор скорости для двигателя внутреннего сгорания / Е.И.Блаженнов, А.И.Цветков // Открытия. Изобретения. Пром.образцы. Товарн.знаки. - 1980. - № 43. - С.117.

11. А.с. 909253 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Всережимный регулятор частоты вращения для двигателя внутреннего сгорания / Е.И. Блаженнов, В.Р.Лаптев // Открытия. Изобретения. Пром.образцы. Товарн.знаки. - 1982. - № 8. - С.170.

12. А.с. 1038513 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Центробежный регулятор частоты вращения дизеля / Е.И.Блаженнов, С.Ю.Замазкин, Л.Л. Иванов // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарн.знаки. - 1983. - № 32. - С.116.

13. А.с. 1048146 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Регулятор частоты вращения дизеля / Е.И.Блаженнов // Открытия. Изобретения. - 1983. - № 38. - С.124.

14. А.с. 1110919 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Центробежный регулятор частоты вращения дизеля / Е.И.Блаженнов, Ю.Е.Хрящев, С.З. Скобелкин и др. // Открытия. Изобретения. - 1984. - № 32. - С.98.

15. А.с. 1118780 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Регулятор частоты вращения / Е.И.Блаженнов, Ю.Е.Хрящев // Открытия. Изобретения. - 1984. - № 38. - С.91.

16. А.с.1135914 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Регулятор частоты вращения дизеля / Е.И.Блаженнов, Ф.Н.Загоский // Открытия. Изобретения. - 1985. - № 3. - С.95.

17. А.с. 1204763 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Трехрежимный центробежный регулятор частоты вращения двигателя внутреннего сгорания / Е.И.Блаженнов, Ю.Е.Хрящев, Г.С.Корнилов и др. // Открытия. Изобретения. - 1986. № 2. - С.132.

18. А.с. 1236133 СССР, МКИ F 02 d , I/10. Регулятор частоты вращения двигателя внутреннего сгорания / Е.И.Блаженнов, Д.В.Боровков // Открытия. Изобретения. - 1986. № 21. - С.132.

Подписано в печать 10.09.87. АК 09657.

Формат 60x84¹/₁₆. Бумага газетная. Офсетная печать.

Печ.л. 2. Тираж 100. Заказ 1785. Бесплатно.

Типография Ярославского политехнического института.

Ярославль, ул.Советская, д14а.

Блаженнов