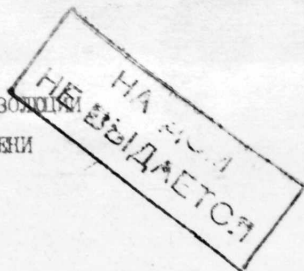


M472398

МОСКОВСКОЕ  
ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ  
ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА



на правах рукописи

Пиноский Феликс Ильич

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫМ  
УПРАВЛЕНИЕМ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА

Специальность 05.04.02 - тепловые двигатели

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Коломенском филиале Всесоюзного заочного политехнического института.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор К.Е.Долганов;

доктор технических наук, профессор С.И.Барсуков;

доктор технических наук, профессор В.И.Крутов.

Ведущая организация (предприятие) – указано в решении Совета.

Защита состоится "23" окт 1987 г. на заседании специализированного совета Д.053.15.10 при Московском высшем техническом училище им.Н.Э.Баумана; г.Москва, 2-я Бауманская, д.5.

В 14<sup>00</sup> а 210 э

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского высшего технического училища им.Н.Э.Баумана.

окт 1987 г.

ованного совета

Ивашенко Н. "

ир. 100 экз.

на

M472398

Актуальность проблемы. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года, принятые на 27 съезде КПСС, требуют от дизелеостроения значительного снижения удельного расхода топлива дизелями, применяемыми в различных областях народного хозяйства. Характерно, что улучшение структуры выпускаемого энергетического оборудования должно обеспечиваться увеличением степени его автоматизации на основе средств микропроцессорной техники при сокращении сроков разработки и освоения новой техники в 3-4 раза. Особое внимание к дизелям (включая свободно-поршневые и линейные дизель-компрессоры и дизель-генераторы) объясняется их большей по сравнению с другими тепловыми машинами топливной экономичностью.

Во всех развитых странах ведутся интенсивные работы по созданию все более мощных и экономичных дизелей с высокими удельными параметрами, все большее внимание уделяется достижению наилучшего возможного в различных конкретных эксплуатационных условиях качества, то есть оптимизации управления дизелем.

Основными препятствиями широкому внедрению известных результатов разработок и исследований по оптимизации отдельных характеристик дизелей являются конструктивная сложность, громоздкость и недостаточные эффективность, надежность и точность управляющих устройств, отсутствие теоретически обоснованных методов оптимизации управления дизелями.

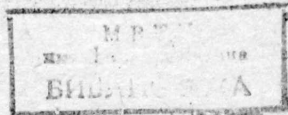
Расширение возможностей управления рабочим процессом необходимо не только для его оптимизации, но и для обеспечения требуемой форсировки дизелей при сохранении нижнего предела рабочих режимов, равномерного распределения нагрузки по цилиндрам, снижения шумности, токсичности и т.п. Эффективное управление рабочим процессом должно использоваться прежде всего на опытных дизелях, поскольку опытный дизель с управляемым рабочим процессом представляет собой удобное средство проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по выявлению возможностей совершенствования дизелей, независимо от того, с каким управлением они будут в конечном счете эксплуатироваться. Именно это сокращает сроки разработки и освоения новых дизелей и повышает качество разработок и исследований. Создание серийных дизелей с автоматической оптимизацией, кроме того, должно включать комплекс исследований на опытных дизелях реализуемых в условиях эксплуатации возможностей управле-

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1472398

Пинский Ф. И. Оптимизация р



ния рабочим процессом, выявления определяющих экстремальных характеристик дизелей и установления общего вида алгоритмов оптимального управления во всем диапазоне режимов работы.

Создание средств и методов управления рабочим процессом представляет собой актуальное направление совершенствования технических, экономических и экологических характеристик дизелей. Применяемые в дизелестроении механические, гидравлические и пневматические устройства не позволяют существенно повысить качество управления. Наиболее эффективны методы управления, реализуемые средствами электронной микропроцессорной техники. Однако электронная техника еще мало применяется в системах управления дизелей. Использование электронной техники сдерживается отсутствием работоспособных систем дизеля, определяющих качество его рабочего процесса и управляемых электрическими сигналами, методов синтеза таких систем и структуры электронных управляющих систем, соответствующей специфическим характеристикам дизеля как объекта электронного управления.

Цель работы: улучшение технико-экономических характеристик дизеля за счет оптимизации управления. В соответствии с этим непосредственными задачами работы были:

I. Создание теоретических основ электронных топливных и управляющих систем дизелей, включающих:

- математическое описание дизеля как объекта электронного управления;
- методы анализа и синтеза дизельных электронных топливных и управляющих систем;
- оптимальные алгоритмы управления дизелей, оснащенных электронными системами;
- аналитические зависимости предельно достижимых при оптимальном управлении показателей качества регулирования частоты вращения от параметров дизеля.

2. Разработка конструктивных схем основных элементов топливных и структурных схем управляющих электронных систем дизелей, методов их расчета, исследования и оптимизации параметров, обеспечивающих рациональное сочетание эффективности и реализуемости электронного управления.

Научная новизна заключается в том, что впервые в СССР сформулирована необходимость для оптимизации рабочего процесса дизелей, осуществимого в полной мере только электронными средствами, раздельного управления прежде всего параметрами впрыскивания топлива.

Впервые аналитически установлено наличие непренебрежимых при электронном управлении запаздывания и инерции в многосвязанных каналах управления рабочим процессом дизеля. Разработаны методы синтеза оптимальных схем и параметров электронных дизельных топливных и управляющих систем. Доказаны эффективность использования предельных возможностей переменной структуры при регулировании частоты вращения дизелей и топливных систем с электрически управляемыми форсунками по ширине диапазонов изменения и стабильности параметров впрыскивания.

Практическая ценность. Работа выполнена согласно плану работ, утвержденному Постановлением ГКНТ СССР от 23 декабря 1980 г № 520. Использование рекомендованных методов выбора исходных значений параметров дизеля, его электронных топливных и управляющих систем и методов их оптимизации сократило сроки разработки опытных дизелей с электронным управлением. Предложенные методы и средства оптимального управления обеспечивают снижение расхода топлива, улучшение качества регулирования частоты вращения и расширяют диапазон возможных режимов работы дизелей. Разработанные конструктивные схемы основных устройств топливных и управляющих систем дизелей и способы управления ими, защищенные авторскими свидетельствами СССР, дают возможность быстрой реализации оптимального управления в дизельных энергетических установках.

Реализация работы. Результаты работы воплощены в опытных дизель-генераторе ЦО "Звезда" и линейном безавальном электроагрегате ОКБ "Горизонт". Комплекты созданных электронных топливных и управляющих систем используются при ОК и НИР по совершенствованию рабочих процессов дизелей в ЦНИДИ, ЦНИТА, ЦО "Коломенский завод", ЦО "Турбомоторный завод", МВТУ, МАДИ. Экономический эффект от сокращения сроков и материальных затрат на создание новых дизелей с любыми вариантами топливных и управляющих систем, достигнутый использованием в ОК и НИР созданных средств и методов управления параметрами впрыскивания топлива, превышает 500 тыс. рублей. Материалы работы используются в учебном процессе ВЗПИ, МВТУ.

Апробация. Основные положения работы доложены и обсуждены на Всесоюзных научно-технических конференциях "Пути повышения мощности, надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания" (Москва, 1973 г), "Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания" (Москва, 1978 г), "Проблемы автоматизации разработки двигателей" (Коломна, 1978 г), "Проблемы создания и использования двигателей с высоким наддувом" (Харьков, 1979 г), "Перспективы

развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и топлив" (Москва, 1980 г), "Рабочие процессы в двигателях внутреннего сгорания" (Москва, 1982 г), "Развитие дизельных двигателей, топливной аппаратуры и повышение эксплуатационной экономичности" (Ленинград, 1985 г), Всесоюзных научно-технических семинарах по д.в.с. и по автоматическому регулированию теплоэнергетических установок при МВТУ в 1976-1985 гг, Всесоюзном научно-методологическом семинаре по перспективным д.в.с. при ХИИ и ХИТЕ в 1986 г, научно-технических конференциях в МВТУ, МАДИ, ИЭИИ в 1970-1985 гг.

Публикации. По результатам исследований, вошедших в диссертацию, автором опубликовано 54 печатные работы, получены 22 авторских свидетельства на изобретения.

Объем и структура работы. Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы, приложения. В первой главе рассмотрено состояние проблемы и сформулированы задачи исследований; во второй главе проведен анализ процессов управления в дизеле и определена структурная динамическая схема дизеля с электронным управлением; в третьей главе изложены разработанные методы синтеза электронных управляющих и топливных систем дизелей; в четвертой главе исследованы электронные топливные системы и в пятой главе изложены методы и результаты экспериментальных исследований на опытных дизелях эффективности разработанных систем, оценена экономическая и социальная эффективность использования их в народном хозяйстве.

Общий объем 406 страниц, включая 254 страницы основного текста, 4 страницы сокращений и обозначений, 97 рисунков на 78 страницах, 10 таблиц на 10 страницах, список литературы 233 наименования на 24 страницах, приложения на 31 странице, включая документы о внедрении результатов работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

### 1. ЭЛЕКТРОННОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДИЗЕЛЕЙ

Состояние дизеля определяется совокупностью выходных координат, к которым относятся: частота вращения или повторения циклов, отдаваемая потребителям мощность, жесткость и максимальное давление сгорания, температура и состав отработавших газов, температура и давление в системах охлаждения и смазки, уровни меха-

нических и термических напряжений деталей и т.п. Они зависят от сочетания внешних условий работы дизеля, иначе, - внешних возмущающих воздействий, таких как величина и характер изменения нагрузки, параметров воздуха, топлива, охлаждающей воды и др., характера их изменений во времени, исходного состояния дизеля и его систем и др. В то же время состояние дизеля зависит и от воздействий, выбираемых и осуществляемых человеком или автоматическими управляющими системами. Это величины и законы (алгоритмы) изменения параметров впрыскивания топлива, наддувочного воздуха, фаз газораспределения, геометрической степени сжатия, числа работающих цилиндров и порядка их периодического отключения, перепуска газов, положения механизмов, определяющих интенсивность теплообмена в агрегатах систем охлаждения, и смазки и т.п. Наивысшее качество работы дизеля достигается выбором оптимальных по выбранному критерию качества, чаще всего расходу топлива, значений и алгоритмов изменения этих управляющих воздействий в пределах, ограниченных допустимыми значениями выходных координат.

Для оптимизации всех возможных режимов работы дизеля необходимо раздельное, независимое изменение в достаточных пределах управляющих воздействий, позволяющее в каждом случае подобрать оптимальную их совокупность. Наличие топливной системы с раздельным управлением параметрами впрыскивания топлива необходимое, а во многих случаях и достаточное условие осуществления оптимального управления. Основными параметрами впрыскивания являются общая продолжительность, опережение начала и величина подачи, среднее и максимальное значения, скорость и закон изменения во времени давления топлива перед распыливающими отверстиями, количество отдельных последовательных фаз впрыскивания, их относительные величины и длительности пауз между ними.

Управление параметрами впрыскивания наиболее целесообразно выполнять электронными топливными системами (топливными системами, управляемыми электрическими сигналами, формируемыми электронными устройствами). Совокупность электронной топливной (ЭТС) и электронной управляющей (ЭУС) систем удобно называть электронногидравлической системой дизеля (ЭГС).

Основным связующим звеном ЭУС и ЭТС являются преобразователи электрических сигналов в гидравлические, которые могут быть выполнены в виде форсунок или насосов с электрическим управлением, содержащие промежуточные электромеханические преобразователи электрических сигналов в перемещения.

Возможны управляемые форсунки с силовым электрическим приводом затворов, маломощным электрическим приводом разгруженных затворов или с электрогидравлическим приводом, использующим также маломощные преобразователи. Наиболее быстро реализуемы при широкой унификации ЭГС различных дизелей электрогидравлические управляемые форсунки, не требующие применения принципиально новых видов преобразователей и затворов.

Управляемые насосы с непрерывным электрическим или электрогидравлическим приводом управляющего органа (рейки) часто применяются в ЭГС, так как все основные элементы такой топливной системы не отличаются от обычных. Импульсные преобразователи - электрические клапаны, аналогичные используемым в форсунках, могут управлять работой отдельных секций ТНв.д., подачей топлива из общего аккумулятора к обычным неуправляемым форсункам, осуществлять электрогидравлический привод нагнетательных плунжеров насосов.

Выполнение логических операций и расчетов, необходимых для управления дизелем, в ЭУС выполняют, как правило, микро-ЭЕМ. Именно использование микропроцессорной техники позволяет осуществлять автоматическую оптимизацию по любым, сколь угодно сложным алгоритмам.

Для создания ЭУС необходимо прежде всего определение оптимальных алгоритмов управления, включающих алгоритмы регулирования, обеспечивающие наиболее точное поддержание заданного режима работы дизеля, и алгоритмы адаптации (способы определения и осуществления в ЭУС изменений алгоритмов регулирования), обеспечивающие наилучшее качество в каждом режиме.

Необходима также разработка основ теории ЭГС и их элементов, позволяющей проводить сравнительные исследования всех возможных вариантов, выбор и оптимизацию их схем и параметров. ЭГС с управляемыми форсунками являются наиболее общим и универсальным вариантом, так как применяемые в них преобразователи и ЭУС позволяют моделировать и реализовывать и ЭГС с любыми вариантами управления насосами.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИЗЕЛЯ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Инерция и запаздывание в ЭУС могут быть сделаны сколь угодно малыми по сравнению с временными параметрами дизеля и ЭГС. Это исключает, например, допустимость пренебрежения импульсным характером процессов в ЭГС и дизеле и высокочастотными возмущениями.

Обеспечиваемое ЭУС оптимальное сочетание управляющих воздействий создает дополнительные связи вне дизеля и требует учета его внутренних межконтурных связей. Простота и точность осуществления в ЭУС ограничений управляющих воздействий позволяет исключить работу дизеля на неэкономичных режимах и изменяет характер протекающих в нем процессов.

При электронном управлении ограничениями подачи топлива с целью исключения непроизводительного его расхода реально используемая часть статической характеристики теплового звена достаточно линейна. Управляемую часть относительного крутящего момента при этом можно представить в виде

$$\mu = \mu_q + \sum_{i=2}^n \mu_i,$$

где  $\mu_q$  — составляющая, создаваемая относительным изменением подачи топлива  $q$ ,

$\mu_i$  — составляющие, создаваемые относительными изменениями остальных (дополнительных управляющих воздействий  $v_i$ ).

Анализ показал, что динамическая часть теплового звена наиболее точно представляется последовательным соединением звеньев чистого запаздывания и апериодического и при приведении входного сигнала ЭУС к выходу форсунки описывается дифференциальным уравнением

$$T_r \mu_q + \mu_q = q(t - \tau_r) \quad \text{с} \quad \tau_r = T_0 + 0.5 \frac{\alpha_m}{\omega_H} \quad \text{и} \quad T_r = 1.5 \frac{\alpha_m}{\omega_H},$$

где  $\omega_H$  — номинальная частота вращения;

$T_0$  — время от момента изменения входного сигнала до начала рабочего хода;

$\alpha_m$  — угол поворота вала, соответствующий максимальному моменту, развиваемому силами давления газов в цилиндре, и отсчитываемый от начала соответствующего рабочего хода.

Преобразования дополнительных управляющих воздействий в тепловом звене описываются уравнениями

$$T_{ri} \mu_i + \mu_i = v_i(t - \tau_{ri}), \quad i = 2, 3, \dots, n,$$

где  $T_{ri}$  — постоянная времени  $i$ -ого канала теплового звена,

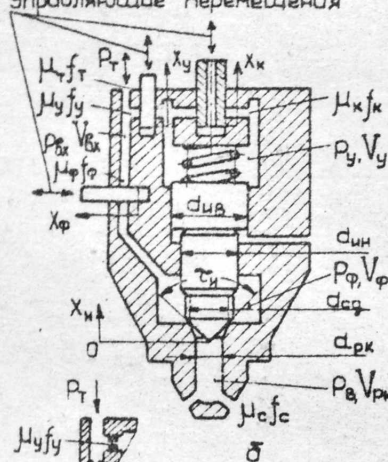
$\tau_{ri}$  — запаздывание  $i$ -ого канала.

В упрощенной модели системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ), позволяющей вести ее исследование и синтез без учета взаимных связей с другими САР, с достаточной достоверностью можно считать, что  $T_r$  при введении запаздывающих относительно подачи топлива дополнительных воздействий не изменяется, а постоянная времени эквивалентного теплового звена выражается зависимостью

$$T = 1.5 \frac{\alpha_m}{\omega_H} + \sum_{i=2}^n H_i (\tau_i + T_i - T_0),$$

где  $H_i$  - относительные величины дополнительных воздействий.

Примером описания процессов в элементах ЭТС может служить следующая система уравнений обобщенного варианта электрогидравлической форсунки, расчетная схема которого представлена на рис. 1: Управляющие перемещения



$$\alpha V_{yx} \frac{dp_{yx}}{dt} = \sigma_T Q_T - \sigma_y Q_y - \sigma_\phi Q_\phi,$$

$$\alpha(V_{y0} - \Delta V_y) \frac{dp_y}{dt} = \sigma_y Q_y - \sigma_k Q_k + \frac{dV_y}{dt},$$

$$\alpha(V_{\phi 0} + \Delta V_\phi) \frac{dp_\phi}{dt} = \sigma_\phi Q_\phi - \sigma_{\phi c} Q_{\phi c} - \frac{dV_\phi}{dt},$$

$$\alpha(V_{\phi k 0} + \Delta V_{\phi k}) \frac{dp_{\phi k}}{dt} = \sigma_{\phi c} Q_{\phi c} - \sigma_c Q_c - \frac{dV_{\phi k}}{dt},$$

$$\Delta V_y = \frac{\pi}{4} d_{\text{ив}}^2 x_{\text{и}},$$

$$\Delta V_\phi = \frac{\pi}{4} d_{\text{ин}}^2 x_{\text{и}} - \frac{\pi}{12} \frac{1}{\sin \tau_{\text{и}}} (d_{\text{сг}}^3 - d_{\text{к}}^3),$$

$$\Delta V_{\phi k} = \frac{\pi}{12} \frac{1}{\sin \tau_{\text{и}}} (d_{\text{сг}}^3 - d_{\text{к}}^3),$$

$$m_{\text{и}} \frac{d^2 x_{\text{и}}}{dt^2} = \frac{\pi}{4} [d_{\text{к}}^2 p_{\phi} + (d_{\text{ин}}^2 - d_{\text{к}}^2) p_{\phi} - d_{\text{ив}}^2 p_y] -$$

$$- C_{\text{пр}}(x_3 + x_{\text{и}}) - \sigma_{\text{ув}} C_{\text{уб}}(x_{\text{и}} - x_{\text{и макс}}) + \sigma_{\text{и}} C_{\text{и}} x_{\text{и}},$$

$$Q = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_2 - p_1|}, \quad \sigma = \text{sign}(p_2 - p_1),$$

Рис. 1. Обобщенная расчетная схема электрогидравлической форсунки, а - постоянные дроссели, б - переменные.

$$\theta = \begin{cases} 1 & \text{при } x_{\text{и}} - x_{\text{и макс}} \geq 0, \\ 0 & \text{при } 0 < x_{\text{и}} < x_{\text{и макс}}, \end{cases} \quad \text{или соответственно } x_{\text{и}} \leq 0,$$

где  $f$  - площадь отверстий;

$p$  - давление топлива;

$V, V_0$  - текущий и исходный (при нахождении иглы на седле) объемы камер;

$x_{\text{и}}, x_{\text{и макс}}$  - текущий и максимальный (до упора) подъемы иглы;

$x_3$  - начальная затяжка пружины;

$c$  - коэффициент жесткости;

$\alpha$  - средний коэффициент сжимаемости топлива;

$\mu$  - коэффициент расхода отверстия;

$\rho$  - плотность топлива;

$Q$  - сек. дный объемный расход;

$m_{\text{и}}$  - приведенная масса иглы, включающая в соответствующих вариантах массу поршня, 1/3 массы пружины и массу соединительных деталей.

В общем случае цикловая подача топлива является функцией нескольких сигналов ЭУС, которые задают длительность, давление, форму характеристики впрыскивания и др., то есть

$$q = q_u + \sum_{i=2}^n q_i,$$

где  $q_u$  — составляющая, определяемая управляющим сигналом ЭУС  $u_1$ ,  $q_i = \sigma_i v_i$  — составляющие, определяемые дополнительными воздействиями,

$$\sigma_i = \begin{cases} 1 & \text{для воздействий, влияющих на } q, \\ 0 & \text{для воздействий, не влияющих на } q. \end{cases}$$

$$\left[ \prod_{j=0}^{m_i} (T_{ij} p + 1) \right] q_u = u_1(t - \tau_{этс}),$$

где  $\tau_{этс}$  — суммарное запаздывание ЭТС, включая запаздывание преобразователя;

$m_i = 0, 1, 2, \dots$  — число аperiodических звеньев в канале формирования  $q_u$ .

Дополнительные воздействия, оказывая влияние на подачу топлива и крутящий момент, сами зависят от этих же параметров, частоты вращения и друг от друга, то есть

$$v_i = v_{iu} + v_{iq} + v_{i\mu} + v_{i\varphi} + \sum_{k=2}^n \delta_{ik} v_{ik},$$

где  $v_{iu}, v_{iq}, v_{i\mu}, v_{i\varphi}$  — составляющие, зависящие соответственно от сигнала ЭУС, подачи топлива, крутящего момента и частоты вращения;

$v_{ik}$  — составляющие взаимозависимых воздействий,

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{при } k \neq i, \\ 0 & \text{при } k = i. \end{cases}$$

Обобщенная полная система уравнений, описывающих процессы управления в дизеле с ЭГС, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} T_a p \varphi &= \mu - \mu_{сн}; \\ \mu &= \mu_q + \sum_{i=2}^n \mu_i; \\ (T_r p + 1) \mu_q &= q(t - \tau_r); \\ q &= q_u + \sum_{i=2}^n \sigma_i v_i; \\ (T_{ri} p + 1) \mu_i &= v_i(t - \tau_{ri}); \\ v_i &= v_{iu} + v_{iq} + v_{i\mu} + v_{i\varphi} + \sum_{k=2}^n \delta_{ik} v_{ik}; \\ \left[ \prod_{j=0}^{m_i} (T_{ij} p + 1) \right] q_u &= u_1(t - \tau_{этс}); \\ \left[ \prod_{j=0}^{m_i} (T_{ij} p + 1) \right] v_{iu} &= u_i(t - \tau_i); \\ \left[ \prod_{j=0}^{m_{iq}} (T_{iqj} p + 1) \right] v_{iq} &= \sigma_q q(t - \tau_{iq}); \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \left[ \prod_{j=0}^{m_{i\mu}} (T_{i\mu j} p + 1) \right] \dot{v}_{i\mu} &= \sigma_{\mu} \mu (t - \tau_{i\mu}); \\ \left[ \prod_{j=0}^{m_{i\varphi}} (T_{i\varphi j} p + 1) \right] \dot{v}_{i\varphi} &= \sigma_{\varphi} \varphi (t - \tau_{i\varphi}); \\ \left[ \prod_{j=0}^{m_{i\kappa}} (T_{i\kappa j} p + 1) \right] \dot{v}_{i\kappa} &= \delta_{i\kappa} \sigma_{\kappa} \dot{v}_{\kappa} (t - \tau_{i\kappa}); \\ l &= 2, 3, \dots, n; \quad \kappa = 2, 3, \dots, n, \end{aligned} \right\}$$

где  $T_a$  - постоянная времени дизеля;

$\mu_{\text{сп}}$  - относительный момент сопротивления;

$m_l = 0, 1, 2, \dots$  - числа аperiodических звеньев в соответствующих каналах;

$T_l$  - постоянные времени аperiodических звеньев ( $T_0 = 0$ ),

$\tau_l$  - суммарные запаздывания каналов;

$$\sigma = \begin{cases} 1 & \text{для действующих каналов,} \\ 0 & \text{для отсутствующих каналов,} \end{cases} \quad \delta_{i\kappa} = \begin{cases} 1 & \text{при } \kappa \neq i, \\ 0 & \text{при } \kappa = i. \end{cases}$$

В общем случае ЭУС подает на дизель  $n$  управляющих воздействий ( $u_1; u_2; \dots, u_n$ ), дизель имеет  $n$  выходных координат  $y_i$  ( $y_1 = \varphi; y_2 = v_2; y_3 = v_3; \dots, y_n = v_n$ ) и  $n$  возмущений  $f_l$  ( $f_1 = \mu_{\text{сп}}$ ). Путем подстановок можно привести все уравнения к форме

$$Y_l = \sum_{\kappa=1}^n w_{l\kappa} U_{\kappa} + \sum_{\kappa=1}^n c_{l\kappa} F_{\kappa}, \quad l = 1, 2, \dots, n,$$

где  $Y, U$  и  $F$  - изображения по Лапласу соответственно выходной координаты, управляющего и возмущающего воздействий,  $w$  и  $c$  передаточные функции каналов. Первый индекс обозначения соответствует индексу выходного сигнала канала (выходной координаты дизеля), второй - индексу входного сигнала (управляющего или возмущающего воздействий).

$$\text{В более общем виде} \quad Y = WU + CF,$$

где  $Y, U$  и  $F$  - вектор-столбцы изображений сигналов по Лапласу

$$Y = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix}, \quad U = \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix}, \quad F = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix},$$

$W$  и  $C$  - передаточные матрицы дизеля по управлению и возмущению

$$W = \begin{Bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nn} \end{Bmatrix}, \quad C = \begin{Bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{Bmatrix}.$$

Этой системе уравнений соответствует структурная динамическая схема дизеля, представленная правой частью рис. 2 в упрощенном ви-

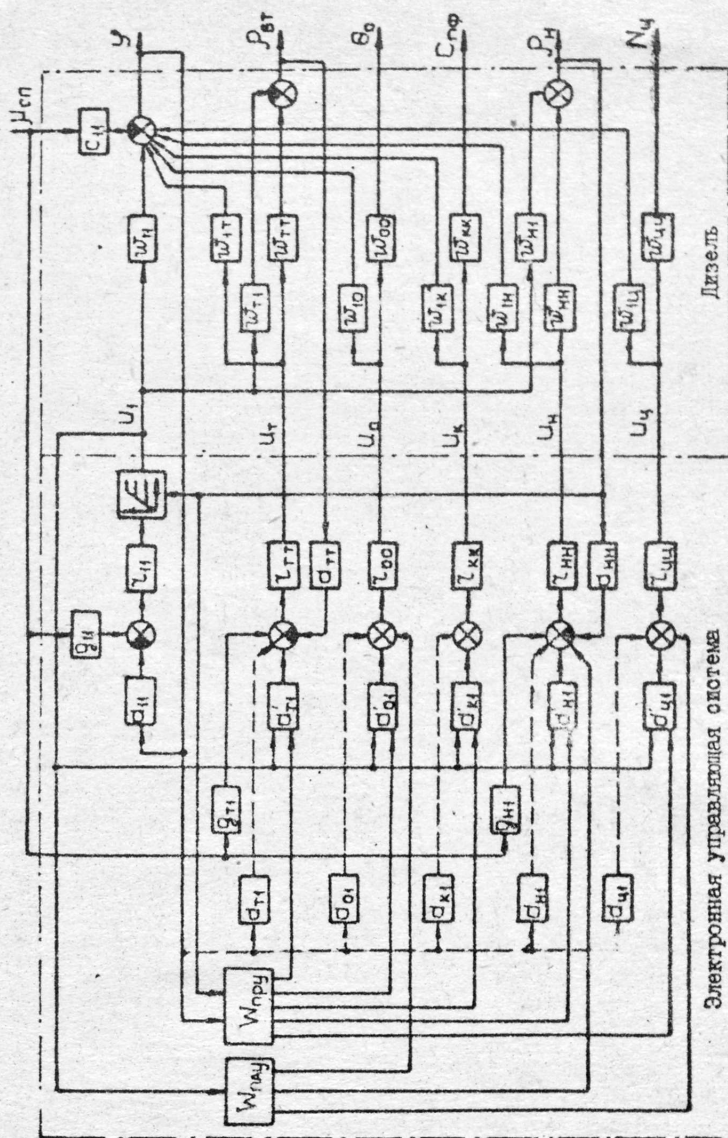


Рис. 2. Упрощенная структурная схема электронной системы автоматического управления дизеля.

де только с экспериментально проверенными каналами управления подачей топлива, давлением ( $p_{BT}$ ), опережением ( $\theta_o$ ), крутизной ( $C_{пф}$ ) переднего фронта характеристики впрыскивания топлива, давлением наддува ( $p_n$ ), числом работающих цилиндров ( $N_c$ ) и некоторыми связями между этими каналами. Индекс I относится к САРЧ, индексы т, о, к, н, ц — соответственно к САР  $p_{BT}$ ,  $\theta_o$ ,  $C_{пф}$ ,  $p_n$  и  $N_c$ .

### 3. СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОННО-ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИЗЕЛЯ

Уравнения ЗУС (обобщенного регулятора) с управлением по отклонениям и возмущениям, способной по принципу двухканальности обеспечить инвариантность — независимость регулируемых параметров от возмущений  $U = -RDY + RGF$ ,

где  $R$  — матрица передаточных функций  $r_{ii}$ , функционально необходимых неизменяемых частей регуляторов сепаратных систем;

$D$  и  $G$  — матрицы передаточных функций  $d_{ik}$  и  $g_{ik}$ , регуляторов соответственно по отклонениям и возмущениям,

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & r_{nn} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nn} \end{bmatrix}.$$

Обобщающая система уравнений дизеля и ЗУС

$$(E + WRD)Y = (C + WRG)F,$$

где  $E$  — единичная матрица.

Необходимые и достаточные условия абсолютной инвариантности ( $Y=0$ ) выражаются системой уравнений

$$(C + WRG) = \|0\|,$$

где  $\|0\|$  — нулевая матрица  $n \times n$ .

Передаточные функции регуляторов по возмущениям, соответствующие этим условиям

$$g_{ik} = - \frac{\sum_{j=1}^n w_{ji} c_{jk}}{r_{ii} \det(W)},$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

где  $w_{ij}$  — алгебраическое дополнение элемента  $w_{ij}$  матрицы  $W$ .

Синтез регуляторов по отклонениям вообще не связан с проблемой инвариантности.

Анализ показывает возможность пренебрежения взаимными связями САР дополнительных управляющих воздействий через дизель. Это позволяет разделить задачу синтеза ЭГС на совокупность задач синтеза двумерных САУ, состоящих из САРЧ и одной из САР дополнительных воз-

действий, и в каждом отдельном случае ограничиться матрицами только второго порядка. Соответственно САРЧ называется первичной и отмечается индексом I, а САР дополнительных воздействий - вторичными и обозначаются индексом 2.

Наиболее сложным примером взаимного влияния служит сочетание САРЧ с САР давления топлива. Но и в этом случае возмущение вторичной САР существенно меньше влияет на состояние ЭУС, чем главное возмущение САРЧ - момент сопротивления. Это позволяет считать, что  $C_{12} = C_{21} = 0$ . Произведение передаточных функций межконтурных связей  $w_{12}w_{21}$  мало относительно произведения передаточных функций прямых связей  $w_{11}w_{22}$ . При этом

$$g_{11} = -\frac{C_{11}}{\tau_{11}w_{11}}; \quad g_{21} = \frac{w_{21}C_{11}}{\tau_{22}w_{11}w_{22}}.$$

Характерно, что  $g_{11}$  зависит от параметров только собственно-го контура. Выражения  $g_{11}$  и  $g_{21}$  содержат нереализуемые, определяемые запаздыванием в каналах управления дизеля и отражающие недостижимость абсолютной инвариантности, и реализуемые, представляемые пропорционально-дифференцирующими звеньями, компоненты.

Предлагается следующий общий алгоритм (порядок) синтеза ЭУС:

1. Синтез регуляторов автономных САР из условий достижения необходимого качества регулирования отдельных параметров дизеля.
2. Определение межконтурных связей по отклонению частоты вращения из условий оптимизации рабочего процесса дизеля.
3. Синтез регуляторов по изменению нагрузки дизеля из условий инвариантности поочередно для двумерных САУ, образуемых САРЧ и САР одного из дополнительных воздействий.

4. Уточнение структур регуляторов по условиям реализуемости.

Приоритет по очередности выполнения синтеза и уровню достигаемой инвариантности должен принадлежать САРЧ.

Оптимальное качество регулирования частоты вращения как в установившихся, так и переходных процессах отработки различных воздействий достижимо только в электронных САРЧ с переменной структурой (СПС).

Для минимизации длительности переходного процесса САРЧ необходимо использование трех принципиально различных структур: форсирующей, обеспечивающей наибольшее возможное и допустимое управляющее воздействие на дизель, демпфирующей, снижающей скорость движения САРЧ, и устойчивой с большим запасом структуры для установившегося режима.

В установившемся режиме оптимален пропорционально-интегральный

алгоритм регулирования, осуществляемый раздельным формированием цифровыми методами пропорциональной и интегральной составляющих.

Схема релейного формирователя алгоритма регулирования (ФАР) для ввода САРЧ в окрестности установившегося режима представлена на рис. 3, где УПС - устройство переключения структуры.

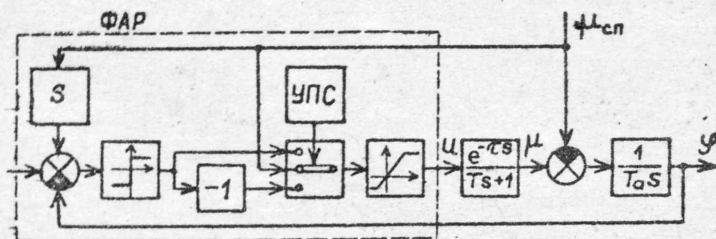


Рис. 3. Расчетная схема САРЧ

Все виды ЭТС могут быть представлены в САРЧ последовательным соединением только звеньев запаздывания. Вместе с  $\tau_r$  выходящая за его пределы часть  $\tau_{гтс}$  образует общее запаздывание канала управления условно автономной САРЧ, в которой

$$\left. \begin{aligned} \tau_{арч} &= \mu - \mu_{cn}, \\ (\tau_r + 1)\mu &= u(t - \tau). \end{aligned} \right\}$$

Для минимизации длительности процесса отработки наброса нагрузки требуется определить два момента переключения структуры:

$t_1$  - переход с форсирующей на демпфирующую и  $t_2$  - с демпфирующей на структуру установившегося режима. В общем случае кусочно-постоянная функция управления:

$$u(t) = \begin{cases} u_{1q}, & 0 \leq t \leq t_1, \\ -u_{2q}, & t_1 \leq t \leq t_2, \\ \mu_{cn}, & t > t_2. \end{cases}$$

Определение оптимальных по быстродействию САРЧ моментов переключения производится методом стыкования решений дифференциальных уравнений со знакопеременной правой частью. Момент сопротивления в универсальном приведенном виде, общем для любых дизелей с принятой передаточной функцией  $\mu_n = \frac{\mu_{cn}}{T_a}$ . Соответственно,  $u_n(t) = \frac{u(t - \tau)}{T_a} - \frac{\mu_{cn}}{T_a}$  - часть приведенного управляющего воздействия, которую можно активно использовать для управления переходным процессом, в отличие от части, которая необходима для обеспечения установившегося режима.

$$u_n(t) = \begin{cases} u_{n1} = \frac{u_{1q} - \mu_{cn}}{T_a}, & \tau \leq t < t_1 + \tau, \\ u_{n2} = -\frac{u_{2q} + \mu_{cn}}{T_a}, & t_1 + \tau \leq t < t_2 + \tau, \\ u_{n3} = 0, & t > t_2 + \tau. \end{cases}$$

Для более широкого обобщения результатов использованы относительные интервалы управления  $\theta_1 = \frac{t_1}{T}$ ,  $\theta_2 = \frac{t_2 - t_1}{T}$ , коэффициент асимметрии управления (влияние исходной точки по нагрузке)

$\varepsilon = -\frac{u_{n2}}{u_{n1}}$ , коэффициент изменения нагрузки (отношение величины скачка нагрузки к максимально-возможному активному изменению управления)  $\beta = \frac{\mu_n}{u_{n1}}$ , и относительное запаздывание  $\gamma = \frac{\tau}{T}$ .

Уравнение для определения моментов переключения трансцендентно и в общем случае аналитического решения не имеет. Для проведения некоторых исследований использованы численные решения. Наибольший теоретический и практический интерес представляют аналитические решения для частного случая  $\varepsilon = -1$ , в котором

$$\theta_2 = \sqrt{\frac{\beta \gamma}{1 + \beta(1 + \gamma)}}, \quad \theta_1 = \beta(1 + \gamma) + \theta_2 = \beta(1 + \gamma) + \sqrt{\frac{\beta \gamma}{1 + \beta(1 + \gamma)}}.$$

Моменты переключения в реальном времени

$$t_1 = \frac{\mu_{cn}}{u_{1q} - \mu_{cn}}(\tau + T) + T \sqrt{\frac{\mu_{cn} \tau}{u_{1q}^2 + \mu_{cn} \tau}}, \quad t_2 = \frac{\mu_{cn}}{u_{1q} - \mu_{cn}}(\tau + T) + 2T \sqrt{\frac{\mu_{cn} \tau}{u_{1q}^2 + \mu_{cn} \tau}}.$$

Оптимальные моменты переключения и соответственно длительность переходного процесса выхода в окрестности установившегося режима ( $\theta_n = \theta_1 + \theta_2 + \gamma$ ) зависят от конструкции дизеля, его исходного состояния и внешних воздействий.

Исследования численным решением уравнений показали, что  $\theta_1$  растет прямо пропорционально  $\beta$ . При  $|\varepsilon| = 1 \dots 20$  и  $\gamma = 1$  с приведенной погрешностью менее 2%  $\theta_1 = 2\beta$ .  $\theta_2$  растет примерно до  $\beta = 4$ . Причем этот рост тем больше, чем меньше  $|\varepsilon|$ . С ростом  $|\varepsilon|$   $\theta_2$  вообще принимает сравнительно малые значения. Длительность же  $\theta_1$  существенно растет с ростом  $|\varepsilon|$  только до  $|\varepsilon| = 1$ .  $\theta_n$  с ростом  $|\varepsilon|$  сначала снижается, а при  $|\varepsilon| > 1$  остается постоянной. Это позволяет использовать полученные аналитические решения для  $|\varepsilon| > 1$ , что соответствует большим набросам нагрузки. Значение  $|\varepsilon| < 0,5$ , при которых использование частных аналитических решений может вызвать ощутимые погрешности, соответствует малым сбросам нагрузки, когда достижение высокого качества не представляет трудностей.

$\theta_2$  зависит от  $\gamma$  только при малых  $\beta$  и  $|\varepsilon|$ . При  $\beta \geq 1$   $\theta_1$  линейно увеличивается с ростом  $\gamma$ . Поэтому и  $\theta_n$  в наиболее важном диапазоне изменения нагрузок - больших набросах - линейно зависит от  $\gamma$ . С погрешностью не более 3% при  $|\varepsilon| \geq 1$  и  $\beta \gg 1$

$\theta_n = (2\beta + 1)\gamma$ . Формулы оптимальных моментов переключения пред-

ставляют собой временные программы (алгоритмы) для УПС (переключения в функции времени).

Реализация временных алгоритмов не представляет принципиальных затруднений при наличии достаточно точной информации о возмущении и возможных управляющих воздействиях. В реальных условиях эксплуатации дизелей не исключены ненулевые начальные условия и необходима оптимизация и переходных процессов, вызванных неконтролируемыми возмущениями или изменениями задания, а также совместным действием нескольких внешних воздействий. В этих случаях временные алгоритмы переключения не только не оптимальны, но могут даже ухудшить качество регулирования по сравнению с жесткими структурами. Поэтому для общего случая была принята замкнутая схема переключения структуры непосредственно по частоте вращения и ее производной (с параметрическими алгоритмами переключения). Первое переключение структуры следует производить при достижении отклонением частоты вращения и ускорением вала дизеля значений

$$\varphi_1 = \frac{u_1 T}{T_a(1+\beta)} \left\{ (1+\beta) e^{-\left[\beta(1+\delta) - \delta + \sqrt{\frac{\beta\delta}{1+\beta(1+\delta)}}\right]} - (1+\delta) + \sqrt{\frac{\beta\delta}{1+\beta(1+\delta)}} \right\},$$

$$\dot{\varphi}_1 = -\frac{u_1}{T_a(1+\beta)} \left\{ (1+\beta) e^{-\left[\beta(1+\delta) - \delta + \sqrt{\frac{\beta\delta}{1+\beta(1+\delta)}}\right]} - 1 \right\}.$$

Уставки второго переключения

$$\varphi_2 = \frac{u_2 T}{T_a(1 + \frac{\beta}{|\delta\epsilon|})} (e^{\delta} - \delta - 1), \quad \dot{\varphi}_2 = -\frac{u_2 \delta}{T_a(1 + \frac{\beta}{|\delta\epsilon|})} (e^{\delta} - 1).$$

Уставки обоих переключений зависят от  $\beta$  и  $\gamma$ , а уставки второго переключения в общем случае зависят еще и от  $\epsilon$ . При нулевых начальных условиях  $\gamma$  и  $\epsilon$  постоянны или однозначно связаны с  $\beta$ . Поэтому для оптимизации типовых переходных процессов достаточно изменять уставки только по  $\beta$ .

Параметрические алгоритмы переключения структуры реализованы в САРЧ с параллельными каналами формирования пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих управляющего воздействия. Изменения структуры состоят в изменении коэффициентов передачи каналов от  $-\infty$  до  $+\infty$  и переключений фильтров и форсирующих звеньев (или изменении их параметров) в корректирующих блоках, включенных в пропорциональном и дифференциальном каналах ФАР. Реальная САРЧ не может быть, строго говоря, оптимальной из-за неточностей математического описания дизеля, индивидуальных отличий и неконтролируемых изменений его параметров в эксплуатации, а так-

же сложности реализации оптимальных алгоритмов.

Все практически осуществленные САРЧ являются только квазиоптимальными. Наибольшее отступление от оптимальности - применение постоянных уставок переключения структуры по отклонению частоты и знаку производной, выбранных из условий наиболее полной оптимизации для 100% набросов нагрузки.

Для больших набросов нагрузки при оптимальном управлении наибольшее отклонение частоты и длительность переходного процесса можно приближенно оценить величинами  $\varphi_{\min} \approx \frac{\mu_{\text{сп}}}{T_a} (T + \tau)$  и  $\tau_p \approx \frac{T + \tau}{\mu_{\text{сп}}}$ . Из этого, в частности, следует, что только ЭТС с управляемыми форсунами,  $\tau_{\text{ЭТС}}$  которых не выходит за пределы  $\tau_p$ , могут обеспечить достижение наилучшего качества регулирования частоты. ЭТС с непрерывным управлением насосами не могут обеспечить принципиального улучшения по сравнению с гидромеханическими топливными и управляющими системами (ГМС). Параметры дизеля, необходимые для обеспечения при оптимальном управлении отклонения частоты вращения  $\varphi_{\text{доп}}$  и длительности переходного процесса  $\tau_{\text{пдоп}}$  определяются зависимостями

$$\left( \frac{T + \tau}{T_a} \right)_{\text{необх}} \leq \varphi_{\text{доп}}, \quad \mu_{\text{необх}} \geq 1 + \frac{T + \tau}{\tau_{\text{пдоп}}}.$$

В большинстве вторичных САР используются исполнительные механизмы САРЧ, отсутствуют нестабильные и инерционные элементы, что позволяет выполнять их по разомкнутым схемам без ограничений на характер алгоритмов регулирования.

При синтезе САР давления топлива в аккумуляторах (САРДТ) необходимо учитывать не только качество регулирования, но и определяемые ею технико-экономические показатели дизеля и параметры форсунок. Для предварительного выбора конструктивных параметров наиболее характерного их варианта - дроссельной электрогидравлической форсунки-рекомендуется

$\mu_{\text{ф}} f_{\text{ф}} = \frac{q_{\text{цном}}}{\sqrt{0,6 p_{\text{г}} p_{\text{а}}} t_{\text{вном}}}$ ,  $\mu_{\text{у}} f_{\text{у}} = 0,42 \frac{d_{\text{и}}}{d_{\text{сг}}} \mu_{\text{ф}} f_{\text{ф}}$ ,  
( $q_{\text{цном}}$  и  $t_{\text{вном}}$  - подача и длительность впрыска, соответствующие номинальной мощности дизеля,  $p_{\text{а}}$  - давление топлива в аккумуляторе); минимально необходимое значение сечения полностью открытого управляющего клапана

$$(\mu_{\text{к}} f_{\text{к}})_{\text{мин}} > \mu_{\text{у}} f_{\text{у}} \sqrt{\frac{d_{\text{сг}}^2 (p_{\text{а}} - p_{\text{с}})}{d_{\text{и}}^2 (p_{\text{а}} - p_{\text{с}}) - d_{\text{сг}}^2 (p_{\text{а}} - p_{\text{с}})}},$$

( $p_{\text{с}}$  - максимальное давление сжатия в цилиндре); максимально допустимое эффективное сечение полностью закрытого клапана

$$(\mu_{кз} f_{кз})_{\max} < \mu_{уфу} \sqrt{\frac{d_{сг}^2 (p_a - p_c)}{d_n^2 (p_a - p_o) - d_{сг}^2 (p_a - p_c)}}$$

При наличии же унифицированного клапана можно рекомендовать в качестве рациональных по работоспособности форсунки значения  $\mu_{уфу}$ , средние в интервале

$$\sqrt{\frac{\mu_{кз} f_{кз}}{d_{сг}^2 (p_a - p_c) / (d_n^2 (p_a - p_o) - d_{сг}^2 (p_a - p_c))}} < \mu_{уфу} < \sqrt{\frac{\mu_{ко} f_{ко}}{d_{сг}^2 (p_a - p_c) / (d_n^2 (p_a - p_o) - d_{сг}^2 (p_a - p_c))}}.$$

Для обеспечения максимального быстродействия необходимы значения сечений полностью открытого клапана в шесть раз больше минимально необходимых.

Необходимый объем аккумулятора топлива

$$V_a \geq \frac{(Q_{ф\max} - Q_{ф\min}) t_{им} \alpha}{2 \alpha p_t |\Delta p|_{доп} K_{зн} \beta} - (V_{тф} + V_{ф}) \frac{\alpha}{\beta} - V_{тн} \frac{\alpha}{\beta},$$

где  $Q_{ф}$  - расход топлива одной форсункой,

$\alpha$  - число форсунок,

$\beta$  - число аккумуляторов в ЭТС,

$t_{им}$  - время полного перемещения исполнительного механизма САРДТ,

$|\Delta p|_{доп}$  - допустимое отклонение давления топлива,

$K_{зн}$  - коэффициент запаса производительности ТНв.д.,

$\alpha$  - количество трубопроводов от ТНв.д. к аккумуляторам,

$V_{тф}$  и  $V_{тн}$  - объемы трубопроводов соответственно от аккумуляторов к форсункам и от ТНв.д. к аккумуляторам,

$V_{ф}$  - объем внутренних аккумуляторов и каналов в форсунке.

При таком соотношении параметров синтез САРДТ выполняется оснащенными в автоматическом регулировании дизелей методами.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Основной целью исследований ЭТС была их оптимизация по ширине диапазонов стабильного регулирования параметров впрыскивания и энергопотреблению при рациональном конструктивном исполнении и достаточных технологичности и надежности.

Расчетно-аналитические и экспериментальные исследования различных электромеханических преобразователей, математическое и физическое моделирование их элементов позволили создать унифицированные быстродействующие электромагнитные управляющие клапаны, не-

обходимые для реализации различных схем управляемых форсунок, насосов и насос-форсунок. Насос-форсунки с электрогидравлическим приводом плунжера и неуправляемой форсункой отличаются от других вариантов ЭТС с импульсным управлением насосами практически только отсутствием трубопроводов высокого давления и могут рассматриваться как наиболее быстродействующий их вариант. Создание ЭТС с непрерывным и импульсным управлением насосами не требовало сложных исследований.

Характеристики насос-форсунок с электрогидравлическим приводом плунжера и управляемой форсункой определяются в конечном счете характеристиками управляемой форсунки. Поэтому такие электрогидравлические насос-форсунки рассматривались как управляемые форсунки с дополнительным управлением давлением на входе в форсунку. Основным методом сравнительных исследований управляемых форсунок было исследование их математических моделей. В первую очередь были исследованы схемы электрогидравлических форсунок с пружиной, поршнем и дросселем в канале впрыскивания, описанные приведенными выше уравнениями. Для расчетных исследований использовали зависимости  $x_k(t)$ ,  $\mu_k(x_k)$  и  $\mu_{ш}(x_{ш})$ , полученные экспериментально. Расчеты проводили на ЭМ "М-222", "Минск-22" и ЕС 1020 методом Эйлера при шаге интегрирования на 3 порядка меньше минимально возможной длительности впрыскивания.

Сравнение схем форсунок производили сопоставлением качества типовых циклов, получаемых в каждой из схем при оптимальных значениях варьируемых параметров, одинаковых давлениях топлива перед форсункой и эффективных сечениях распыливающих отверстий. Реально достигнутые диапазоны изменений параметров впрыскивания в управляемых форсунках определяются временем полного подъема (на  $x_{\text{макс}}$ )  $t_{\text{пн}}$  и временем полного опускания  $t_{\text{он}}$  иглы (затвора). Для обобщенной оценки можно использовать сумму этих времен  $t_{\text{пн}} + t_{\text{он}} = t_{\text{дн}}$  — общее время движения. Потери на управление представляют собой расход энергии на привод иглы и управление приводом. Для управляемых форсунок вычисляли подведенную энергию —  $E_{\text{исп}}$ , использованную непосредственно для распыливания топлива через сопло —  $E_{\text{впр}}$  и общие потери —  $E_{\text{пот}}$ .

Кроме прямых показателей качества в примере на рис. 4 представлены относительные потери  $e = \frac{E_{\text{пот}}}{E_{\text{исп}}}$ ; к.п.д.  $\eta = \frac{E_{\text{впр}}}{E_{\text{исп}}}$ ; удельные затраты  $e_{\text{дн}} = \frac{E_{\text{исп}}}{q_{\text{д}}}$ ; удельные потери  $e_{\text{дп}} = \frac{E_{\text{пот}}}{q_{\text{д}}}$ ; отношения к.п.д. ко времени движения  $K_1 = \frac{\eta}{t_{\text{дн}}}$ ; средней скорости иглы к удельным потерям  $K_2 = \frac{\eta x_{\text{ш}} q_{\text{д}}}{t_{\text{дн}} E_{\text{пот}}}$  и к удельным затратам  $K_3 = \frac{\eta x_{\text{ш}} q_{\text{д}}}{t_{\text{дн}} E_{\text{исп}}}$

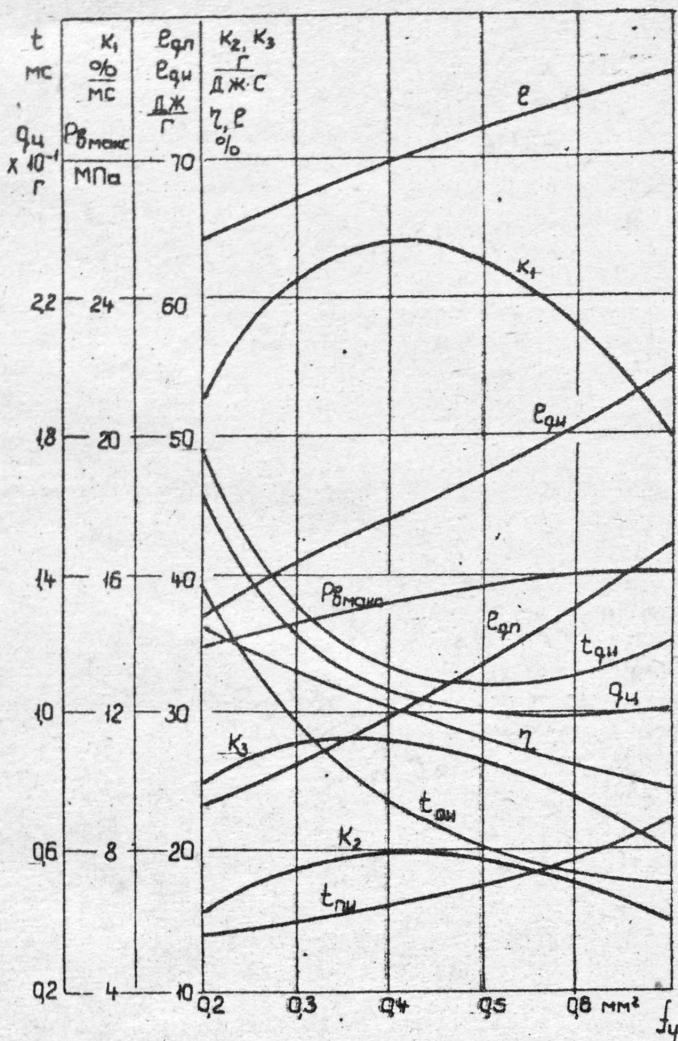


Рис. 4. Зависимости показателей качества типовых циклов электрогидравлической форсунки дизеля ЧН 26/26 от сечения дросселя в канале управления при давлении топлива в аккумуляторе 25 МПа и сечении дросселя в канале впрыскивания 1,1 мм<sup>2</sup>.

Даже в самом энергосъемном варианте — электрогидравлической форсунке с простейшим дроссельным приводом потери на управление не превосходят 0,1% энергии топлива, впрыснутого в цилиндр.

Сопоставление качества, достигаемого при оптимизированных дроссельном, поршневом и пружинном приводах, показало, что с учетом реализуемости, меньших габаритов и отсутствием зависимости оптимальных значений конструктивных параметров от давления топлива перед форсункой дроссельный привод наиболее целесообразен для базовой модификации электрогидравлических форсунок.

Сравнительные исследования конструктивных средств повышения качества электрогидравлических форсунок показали, что наибольший эффект может обеспечить увеличение числа управляющих клапанов или затворов в них. Введение обратных связей в гидравлическом приводе дает меньший эффект, но более просто реализуемо.

ЭТС с управляемыми форсунками имеют наиболее широкие возможности управления формой характеристики впрыскивания (рис. 5). Давление топлива перед форсунками сильно изменяет характеристики впрыскивания.



Рис. 5. Управление характеристикой впрыскивания форсунок изменением а — длительности электрического импульса, б — давления в аккумуляторе, в — формы электрического импульса (совмещенные осциллограммы давления впрыскивания).

Дополнительное импульсное управление осуществляется имеющимися в ЭТС (электроимпульсное) или устанавливаемыми дополнительно (гидроимпульсное) управляющими клапанами. Дополнительные клапаны существенно усложняют ЭТС, но, с другой стороны, они позволяют созда-

вать повышенное давление впрыскивания и применимы в любых вариантах ЭТС. Электроимпульсное управление выполняется изменением формы электрического управляющего импульса в ЭУС.

В зависимости от количества импульсов в пакете, длительности каждого импульса и их взаимного расположения удается либо рассчитывать процесс впрыскивания на отдельные циклы (фазы), имеющие различную амплитуду, длительность и паузу между ними (многофазовое впрыскивание), либо регулировать характеристику одного непрерывного впрыскивания. Этот метод более целесообразен для серийных дизелей, где диапазон необходимого управления известен, а конструктивная простота, надежность и отсутствие дополнительных потерь играют решающую роль.

Запаздывание механических форсунок, его различия при срабатывании и выключении обычно превосходят длительность составляющих электрического управляющего импульса. Это ограничивает возможности импульсного управления в насосах. По диапазону управления характеристикой впрыскивания управляемые насосы не конкурентноспособны с управляемыми форсунками. Преимуществами управляемых форсунок являются и их более высокая стабильность, и идентичность. Нестабильность, например, максимальных значений давления впрыскивания электрогидравлических форсунок не превышает 3%, нестабильность моментов начала и окончания впрыскиваний не превышает соответственно 5 и 15 мкс.

При использовании управляемых форсунок необходимая из-за неидентичности параметров воздушного заряда и камеры сгорания коррекция подач по цилиндрам выполняется в ЭУС, в ЭТС же не требуются никакие подрегулирующие механизмы, используемые при управлении насосами.

САРД с аккумуляторами постоянного объема обеспечили достаточные быстродействие и точность. Применение пневматических аккумуляторов при увеличении быстродействия САРД позволило использовать в ЭТС и нерегулируемые компактные и дешевые насосы.

## 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИЗЕЛЕЙ

ЭТС нашли применение на опытных дизельных установках, где исследуются возможности совершенствования рабочего процесса, форсировки дизелей, использования дизелей в изменяющихся условиях и т.п. для реализации в серийных дизелях и не электронными средствами;

на специальных тепловых машинах с воспламенением от сжатия, где ГМС не обеспечивают реализации основных ожидаемых преимуществ новой машины или вообще не позволяют осуществить ее функционирование, и на полноразмерных опытных дизелях для оценки целесообразности создания дизелей с адаптивным управлением.

При исследовании оптимизации работы дизелей по нагрузочным характеристикам установлено, что кривые  $\delta(\theta_0)$  имеют почти симметричный характер с крутизной, увеличивающейся по мере удаления от оптимума. С изменением  $P_e$  и  $P_a$  оптимумы дрейфуют (смещаются) в общем случае и по горизонтали и по вертикали. По  $\delta$  оптимальны более высокие значения  $C_{пф}$ , однако снижение  $\delta$  сопровождается ростом средней жесткости рабочего процесса и содержания токсичных компонентов в отработавших газах. Сравнительные исследования дизеля ИЧ ИЗ/И4 с гидромеханической системой (ГМС) и ЭГС показали, что при оптимизации только  $\theta_0$  и  $P_a$  в диапазоне  $P_{mi} = 0,48 \dots 0,85$  МПа ЭГС обеспечивает снижение  $\delta_i$  на  $4,4 \dots 2,9$  г/кВтч. При перегрузке ( $P_{mi} = 0,9$  МПа) снижение  $\delta_i$  более  $7,3$  г/кВтч.  $\theta_{с опт}$  с ЭГС в диапазоне  $P_{mi} = 0,48 \dots 0,93$  МПа изменяется с  $13^\circ$  до  $19^\circ$ . В ГМС серийного дизеля ИЧ ИЗ/И4 (А-41)  $\theta_0$  в этом же диапазоне возрастает только на  $2^\circ$ . Вероятно, что и "трапецеидальная" характеристика впрыскивания более рациональна для исследованных режимов, чем "треугольная" характеристика ГМС. Существенно также, что  $C_{пф}$  в ЭГС выше в 4 раза. Для проверенных режимов в ЭГС  $P_{в ср} = (0,7 \dots 0,8) P_a$ ,  $P_{в макс} = (0,9 \dots 1,1) P_a$ , а  $P_{макс}$  при  $\delta_{i мин}$  ниже на  $0,4 \dots 0,7$  МПа, чем с ГМС. Для дизеля 8ЧН 26/26 в составе дизель-генератора 22ДГ на КТЗ было установлено, что в диапазоне  $30 \dots 100\%$   $P_{еном}$   $\theta_{с опт}$  увеличивается с  $22$  до  $26^\circ$  и  $P_{а опт}$  с  $50$  до  $70$  МПа.

В ЭГС дизеля И2ЧН И8/20 Ю "Звезда" были использованы более совершенные схемы, конструкции и технология изготовления основных элементов. Достаточно высокая точность САРЧ и идентичность управляемых форсунок (неравномерность подач в диапазоне нагрузок  $20 \dots 100\%$   $P_{еном}$  составляла не более  $5\%$ , а в штатной ГМС —  $15 \dots 8\%$ ) обеспечили стабильность и равномерность рабочего процесса по цилиндрам. Разброс температуры отработавших газов по цилиндрам при любых нагрузках не превышал  $\pm 30^\circ\text{C}$  (с ГМС  $\pm 50^\circ\text{C}$ ). Оптимизация  $\theta_0$ , стабильность и идентичность форсунок и в  $1,5 \dots 2,5$  раза большая крутизна фронтов характеристики впрыскивания даже без оптимизации  $P_a$  в диапазоне нагрузок от  $150$  до  $500$  кВт снизили  $\delta_e$  по сравнению с ГМС соответственно от  $17$  до  $5$  г/кВтч ( $5,0 \dots 2,6\%$ ) (рис.6).

Для всех исследованных опытных дизелей характерно увеличение эффекта по  $\delta_e$  от применения ЭГС при удалении от номинальной нагрузки. Характерны также отсутствие неконтролируемого дрейфа экстремумов, сравнительно слабая выраженность экстремумов и расширение зон  $\delta_{e \text{ опт}}$  с ростом числа оптимизированных параметров.

Стабильность управляемых форсунок в сочетании с эффективностью электронных САРЧ позволили снизить минимально-устойчивую частоту вращения холостого хода опытных дизелей до 8% от номинальной. При этом расход топлива по сравнению с ГМС уменьшается в 1, ... 3,6 раза.

Оптимизация процессов пуска осуществлялась в ЭГС изменением  $\theta_o$ ,  $P_a$ , ограничения подачи, структуры и параметров САРЧ по жестким программам в функции действительной частоты вращения. На всех испытанных дизелях достигнуто сокращение времени и повышена надежность пуска, уменьшен расход

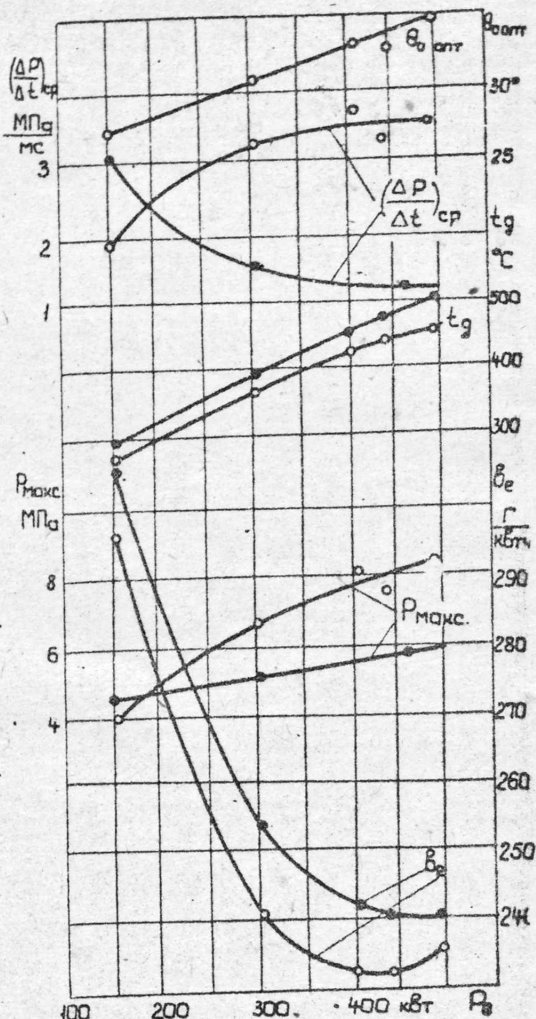


Рис. 6. Параметры дизеля 124Н 18/20 при работе по нагрузочной характеристике с ГМС —●— и ЭГС —○— при  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  и  $P_a = 40 \text{ МПа}$ .

топлива при пуске. Сокращается главным образом время разгона дизеля на топливе. Программы оптимального управления при пуске должны изменяться в функции исходного теплового состояния дизеля.

Применение на полноразмерных ДГ переменного тока САРЧ с линейными жесткими структурами в сочетании с любыми ЭТС также как и с СПС в сочетании с непрерывным управлением насосами не очень существенно улучшило качество регулирования частоты по сравнению с ГМС. В ЭТС с управляемыми форсунками использовали СПС с разными сочетаниями нелинейного регулирования по отклонению и возмущению, их интегралам и производным. На дизеле 8ЧН 26/26 при набросах нагрузки более 70% от номинальной включался дополнительный канал подачи воздуха под давлением 0,35 МПа в наддувный ресивер. При оценке качества допустимым считали отклонение частоты после наброса нагрузки 0,3%, после сброса - 0,4%. Параметры регулятора и уставки переключения структуры подбирались соответственно приведенным выше рекомендациям из условий оптимизации переходного процесса при набросе номинальной нагрузки. Они оставались неизменными и при набросах меньших нагрузок и сбросах любых нагрузок. СПС в сочетании с управляемыми форсунками обеспечили принципиальное улучшение качества установившихся и переходных процессов регулирования частоты по сравнению с ГМС, превосходящее требования ГОСТ 10511-83. Улучшен и характер переходного процесса - он стал существенно менее колебательным. На дизеле 8ЧН 26/26 с ЭТС достигнут диапазон инвариантности до принятых допустимых отклонений при набросах нагрузки менее 83%  $P_{ном}$  и при любых сбросах. Уменьшение запаздывания и инерции в канале управления, более полная оптимизация алгоритмов управления ЭТС дизеля 12ЧН 18/20 в ПО "Звезда" обеспечили инвариантность во всем диапазоне изменения нагрузок. Отклонение частоты при набросе нагрузки не превосходило 0,2%, а при сбросе - 0,25%. Такого качества эти ДГ не обеспечивали ни с ГМС, ни с любыми ЭТС, но при линейных жестких алгоритмах регулирования. Адаптация при исследованиях переходных процессов обработки набросов и обросов нагрузки дизеля 12ЧН 18/20 выполнялась по тому же перечню управляющих воздействий, что и при пусках. Кроме того, изменялись в функции нагрузки уставки СПС. Статическая ошибка САРЧ с любыми ЭТС снижена до 0,007%.

Дизель отличается сравнительно малой выраженностью и низкой скоростью неконтролируемого дрейфа экстремумов зависимостей расхода топлива и параметров переходных процессов от параметров впрыскивания топлива. Поэтому необходимой, а во многих случаях и доста-

точной для оптимизации режимов работы дизелей будет адаптация, осуществляемая простейшими системами программного управления.

У всех исследованных дизелей  $\theta_{опт}$  и  $P_{аопт}$  монотонно увеличиваются с ростом  $P_e$ . Поскольку при  $\theta_{опт}$  и  $P_{аопт}$  и неизменной частоте длительность управляющего импульса аналогично связана с  $P_e$ , можно принять, что  $\theta_{опт}$  и  $P_{аопт}$  однозначно, в первом приближении линейно связаны с выходным сигналом регулятора частоты. Поэтому программное управление  $\theta_o$  и  $p_a$ , а в общем случае и другими дополнительными воздействиями, можно производить в функции частоты вращения и выходного сигнала ее регулятора. В схеме на рис. 2 оно реализуется звеньями, передаточные функции которых, обозначение  $d'$ , являются составными частями соответствующих  $d$ . Это управление осуществляется ЭУС безынерционно. Поэтому  $d'$  можно представить набором достаточно линейных статических характеристик, сменяемых устройством программного управления, обозначенным  $W_{пр}$ . Адаптация, осуществляемая поисковыми системами, может обеспечить дополнительный эффект, в частности, уточнением алгоритмов программного управления. В схеме рис. 2 поисковую адаптацию выполняет устройство, обозначенное  $W_{пл}$ . Все вновь разрабатываемые ЭУС сочетают программную и поисковую адаптацию.

Главный экономический эффект от применения ЭУС определяется достигнутой экономией топлива. При введении наиболее отличных от ГМС ЭУС с управляемыми форсунками отпадает надобность в 8 агрегатах, необходимых для ГМС, 2 агрегата существенно упрощаются, но вводятся 5 новых. Из новых 3 в значительной степени могут быть унифицированы практически для всех дизелей, что открывает возможности повышения серийности их производства, и, следовательно, удешевления.

Снятие ряда агрегатов и упрощение требований к месту и условиям установки других агрегатов топливной и управляющей систем позволяют улучшить конструкцию и условия работы смежных систем дизеля, а также его общую компоновку, что отразится и на его стоимости. Применение таких ЭУС исключает из производственного процесса все ручные, неавтоматизированные регулировочные операции в топливной и управляющей системах. Поэтому себестоимость дизеля даже с наиболее сложной ЭУС можно сделать, если и не более низкой, чем с ГМС, то, по крайней мере, соизмеримой. Применение ЭУС увеличивает потребительскую стоимость дизеля.

Использование ЭУС в научно-исследовательских и конструкторских организациях и службах предприятий уже дает реальный эффект.

Создание электронных средств и методов оптимального управления рабочим процессом дизелей, представляющее собой перспективное направление улучшения их технико-экономических характеристик, возможно при наличии теоретических основ электронных топливных и управляющих систем дизелей. Проведенные исследования дали следующие основные результаты и вытекающие из них выводы:

1. Процессы преобразования управляющих сигналов в изменения крутящего момента дизеля с электронной топливной системой протекают в многочисленных взаимозависимых каналах управления, обладающих запаздыванием и инерцией, пренебрежение которых и при электронном управлении недопустимо.

2. Предложенные теоретически обоснованные методы синтеза структур и параметров дизельных электронных топливных и управляющих систем позволяют проектировать эти системы из условий оптимизации управления, их схем и параметров при высокой унификации элементов.

3. Электронные топливные системы с электрически управляемыми форсунками обеспечивают достижение предельно возможного качества регулирования частоты вращения дизеля и наибольший диапазон и стабильность управления параметрами впрыскивания топлива. Системы с импульсным электрическим управлением насосами обладают ограниченными возможностями повышения качества регулирования частоты, управления параметрами впрыскивания топлива и их стабилизации. Системы с непрерывным электрическим управлением насосами обеспечивают только частичное улучшение качества регулирования частоты и не создают новых возможностей улучшения параметров впрыскивания по сравнению с гидромеханическими системами.

4. Системы с непрерывным электрическим управлением топливными насосами высокого давления имеют преимущества по возможностям внедрения в серийное производство в кратчайшие сроки практически без изменения схем, конструкций и технологии изготовления их элементов. Из числа электрически управляемых форсунок наилучшим сочетанием эффективности управления параметрами впрыскивания топлива с быстротой и простотой реализации работоспособных образцов обладают электрогидравлические форсунки и в особенности электрогидравлические насос-форсунки.

5. Теоретически обоснована ведущая роль системы регулирования частоты вращения в комплексной электронногидравлической системе управления дизеля. Жесткие линейные структуры регуляторов частоты

вращения не позволяют реализовать все возможности электронных топливных систем, ограничивая достигаемый предел инвариантности и исключая одновременную оптимизацию установившихся и переходных режимов. Наивысшее качество регулирования частоты вращения как в установившихся, так и переходных режимах отработки изменения нагрузки и пуска дизеля обеспечивают переменные структуры электронных регуляторов.

6. Получены аналитические выражения оптимальных алгоритмов переключения структуры регуляторов частоты в функции параметров и исходного состояния дизеля, величины скачка нагрузки и характеристик дополнительных управляющих воздействий. Установленные зависимости достижимого при оптимальном управлении качества регулирования частоты вращения от параметров дизеля позволяют при проектировании дизеля минимизацией необходимого запаса мощности повысить его технико-экономические показатели.

7. Экспериментально доказано, что оптимизация по расходу топлива нагрузочных режимов работы дизелей с электронногидравлическими системами дает тем больший эффект, чем больше рабочий режим отличается от номинального. Экономия топлива достигается более рациональным сочетанием параметров впрыскивания, более высокой их стабильностью и идентичностью по цилиндрам дизеля и высоким качеством регулирования частоты вращения. Относительный эффект от оптимизации на холостых ходах существенно больше, чем на нагрузочных режимах, и тем больше, чем ниже частота вращения. Наибольшая экономия топлива, составляющая более 70% расхода на дизеле с гидромеханической системой, достигается за счет снижения минимально-устойчивой частоты вращения. Снижение расхода топлива в переходных режимах достигается программным управлением ограничением подач и сокращением длительности переходных процессов регулирования частоты вращения дизелей.

8. Созданные на основе разработанных методов синтеза образцы электронных топливных и управляющих систем обеспечили характеристики дизелей, превышающие требования действующих ГОСТов по диапазону устойчивой работы и качеству регулирования частоты вращения в установившихся и переходных режимах при одновременном снижении расхода топлива. Наиболее показательны достигнутые даже при неполной оптимизации управления на опытных дизелях с электронногидравлическими системами снижение минимально устойчивой частоты вращения до 8% и инвариантность частоты вращения до 0,2% от номинального значения.

9. Разработанные средства и методы оптимизации параметров впрыскивания топлива в значительной степени применимы для оптимизации и других управляющих воздействий. Основой структуры электронной управляющей системы целесообразно сделать программное управление в функции частоты вращения и выходного сигнала регулятора частоты, дополняемое поисковым адаптивным управлением ограниченным числом управляющих воздействий при максимальном использовании в качестве критерия оптимальности величины выходного сигнала регулятора частоты вращения дизеля. В электронных управляющих системах дизелей наиболее рациональны микропроцессорные устройства.

10. Целесообразно первоочередное применение электронногидравлических систем управления на дизель-генераторах переменного тока для потребителей с высокими требованиями к качеству вырабатываемой электроэнергии при высокой степени автоматизации всей электростанции и на транспортных дизелях с электрически управляемыми передачами, работающими в широком диапазоне частот вращения и нагрузок, при сохранении достигнутого уровня унификации электрических управляющих клапанов, датчиков и электронных устройств.

11. Целесообразно продолжить выпуск и расширить применение универсальных комплектов электронногидравлических систем, обладающих широкими возможностями управления параметрами впрыскивания различных видов топлива для институтов и предприятий, выполняющих ОК и НИР по созданию новых и совершенствованию освоенных в производстве тепловых поршневых машин с воспламенением от сжатия, независимо от типа топливных и управляющих систем, с которыми эти машины будут эксплуатироваться.

Применение электронногидравлических систем повышает экономическую и социальную эффективность всего жизненного цикла дизеля: создания, производства и эксплуатации.

Основное содержание диссертации получило отражение в следующих работах:

1. Пинский Ф.И. Опытная форсунка с электрогидравлическим управлением // Двигатели внутреннего сгорания: НИИИНФОРМТЯЖМАШ. - 1970. - № 12. - С. 30-33.
2. А.с. 315778 СССР. Форсунка с гидравлическим запирающим / Ф.И. Пинский, С.А.Абрамов, Г.В.Никонов // Б.И. - 1971. - № 29.

3. А.с. 353056 СССР. Способ автоматического регулирования угловой скорости вала двигателя внутреннего сгорания / Ф.И.Пинский, К.Б.Циреторов, В.Ф.Эрдман // Б.И. - 1972. - № 29.
4. Пинский Ф.И. Электрогидравлическое управление впрыском топлива // Двигатели внутреннего сгорания: Обзор НИИИНФОРМТЯЖМАШ. - 1973. - 40 с.
5. Пинский Ф.И. Электрогидравлические системы топливоподачи и автоматическое управление двигателями внутреннего сгорания // Пути повышения мощности, надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - М., 1973. - С. 32-33.
6. Оптимизация параметров впрыска топлива в дизелях автоматическим регулированием давления начала открытия форсунки / С.Г.Роганов, Ф.И.Пинский, А.В.Башкин и др. // Известия вузов. Машиностроение. - 1973. - № 4. - С. 94-98.
7. Пинский Ф.И. Исследование качества электрогидравлических форсунок // Двигатели внутреннего сгорания: НИИИНФОРМТЯЖМАШ. - 1976. - № 18. - С. 7-12.
8. Пинский Ф.И. Исследование качества электрогидравлических систем топливоподачи дизелей // Двигатели внутреннего сгорания: Сб. тр. ВЗПИ. - 1977. - Вып. 104. - С. 37-46.
9. Пинский Ф.И. Расчет оптимальных параметров электрогидравлических форсунок дизелей на ЭВМ // Проблемы автоматизации разработки двигателей: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - М.: 1978. - С. 101-104.
10. Никитин Е.А., Пинский Ф.И. Исследование дизель-генератора типа 8ЧН 26/26 с электрогидравлической системой топливоподачи и электронным управлением // Двигателестроение. - 1979. - № 10. - С. 18-20.
11. Абрамов С.А., Балакин В.И., Пинский Ф.И. О создании комплексных электронных адаптивных систем автоматического управления дизелей // Двигателестроение. - 1979. - № 11. - С. 25-27.
12. Пинский Ф.И., Зубков А.М. Определение оптимального по быстродействию алгоритма управления дизель-генератора при набросах и сбросах нагрузки // Двигателестроение. - 1980. - № 2. - С. 20-23.
13. Никонов Г.В., Пинский Ф.И., Рылов В.А. Электрогидравлическая система топливоподачи дизеля 8ЧН 26/26 // Двигателестроение. - 1980. - № 2. - С. 23-25.

14. Пинский Ф.И. Методы уменьшения статической ошибки в электронных САР частоты вращения дизелей // Двигателестроение. - 1980. - № 4. - С. 24-27.
15. Пинский Ф.И., Дутиков В.К. Методика выбора основных параметров электрогидравлических дизельных форсунок с дроссельным управлением // Двигателестроение. - 1980. - № 12. - С. 32-34.
16. Пинский Ф.И., Зубков А.М. Экспериментальные исследования эффективности электронных регуляторов частоты вращения дизель-генераторов // Двигателестроение. - 1981. - № 2. - С. 38-40.
17. А.с. 798340 СССР. Форсунка с гидравлическим запирающим иглы / Ф.И.Пинский, Е.А.Никитин, Г.В.Никонов и др. // Б.И. - 1981. - № 3.
18. А.с. 798748 СССР. Устройство для регулирования скорости двигателя / А.М.Зубков, Ф.И.Пинский // Б.И. - 1981. - № 3.
19. А.с. 853140 СССР. Устройство для электрического управления запорным органом топливной форсунки ДВС / Ф.И.Пинский, В.К.Дутиков, В.А.Рыжов и др. // Б.И. - 1981. - № 29.
20. Исследование дизеля 8ЧН 26/26 с электрогидравлической системой топливоподачи на холостом ходу / С.Г.Роганов, Ф.И.Пинский, В.А.Рыжов и др. // Известия Вузов. Машиностроение. - 1981. - № 3. - С. 80-84.
21. А.с. 891993 СССР. Устройство для впрыска топлива в дизель / Ф.И.Пинский, В.К.Дутиков // Б.И. - 1981. - № 47.
22. А.с. 907287 СССР. Форсунка / Ф.И.Пинский // Б.И. - 1982. - № 7.
23. А.с. 909262 СССР. Форсунка с гидравлическим запирающим иглы / Ф.И.Пинский // Б.И. - 1982. - № 8.
24. А.с. 909263 СССР. Форсунка / Ф.И.Пинский // Б.И. - 1982. - № 8.
25. Пинский Ф.И., Кузин В.Е., Долинин В.Н. Унифицированное электронное устройство регулирования топливоподачи // Двигателестроение. - 1982. - № 7. - С. 53-54.
26. Электрогидравлическая система топливоподачи дизеля / А.В.Башкин, В.К.Дутиков, Ф.И.Пинский и др. // Механика и электрификация сельского хозяйства. - 1982. - № 8. - С. 52-54.
27. А.с. 918471 СССР. Устройство для впрыска топлива в дизель / Ф.И.Пинский, В.К.Дутиков // Б.И. - 1982. - № 13.
28. А.с. 929879 СССР. Система подачи топлива для двигателя внутреннего сгорания / Ф.И.Пинский // Б.И. - 1982. - № 19.
29. А.с. 966272 СССР. Устройство управления форсункой / Ф.И.Пинский // Б.И. - 1982. - № 38.

30. Формирователь дополнительного гидравлического импульса для управления рабочим процессом дизелей / Ф.И.Пинский, А.В.Башкин, В.К.Дутиков и др. // Двигателестроение. - 1983. - № 4. - С. 35-37.
31. А.с. 1015100 СССР. Система топливоподачи двигателя внутреннего сгорания / А.В.Башкин, А.С.Виксман, Ф.И.Пинский и др. // Б.И. - 1983. - № 16.
32. Пинский Ф.И., Дутиков В.К. Выбор емкости аккумуляторов и производительности топливного насоса электрогидравлической системы топливоподачи дизель-генераторов // Двигателестроение. - 1983. - № 9. - С. 31-33.
33. Пинокий Ф.И., Кузин В.Е. Электроимпульсный метод управления законом подачи топлива // Двигателестроение. - 1984. - № 8. - С. 21-22.
34. Экспериментальная проверка эффективности адаптивного управления дизель-генератора переменного тока с дизелем 12 ЧН 18/20 / С.А.Абрамов, В.И.Балакин, Ф.И.Пинский и др. // Двигателестроение. - 1984. - № 12. - С. 33-36.
35. А.с. 1239691 СССР. Система управления двигателем внутреннего сгорания / Ф.И.Пинский, Н.Х.Мяльдзин, В.К.Дутиков и др. // Б.И. - 1986. - № 23.
36. Пинокий Ф.И. Электронные адаптивные системы автоматического управления дизелей // Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научно-технич. сборник (Харьков). - 1986. - № 44. - С. 48-54.
37. Пинский Ф.И., Мяльдзин Н.Х. Исследование двухконтурной системы управления дизелем // Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научно-технич. сборник (Харьков). - 1986. - № 44. - С. 26-33.
38. А.с. 1257263 СССР. Способ управления тракторной моторно-трансмиссионной установкой / Ф.И.Пинский, Н.Х.Мяльдзин, В.К.Дутиков и др. // Б.И. - 1986. - № 34.
39. А.с. 1257602 СССР. Способ управления двигателем внутреннего сгорания с электроуправляемыми форсунками / Ф.И.Пинский, Н.Х.Мяльдзин, В.К.Дутиков и др. // Б.И. - 1986. - № 34.
40. Электронное нормирование подачи топлива в дизель / Хачиян А.С., Пинский Ф.И., Десятун С.В. и др. // Автомобильная промышленность. - 1986. - № 12. - С. 11-12.

