1544710

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им.Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

УДК 621.436-523.8.0004.I

Федоров Павел Валентинович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Специальности: 05.04.02 – тепловые двигатели
05.13.07 – управление в технических системах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Федоров 10.03.94

Москва 1994

Работа выполнена во Всероссийском сельскохозяйственном институте заочного обучения

Официальные оппоненты:

Болдырев И.В.	доктор технических наук, ст. научный сотрудник
Пинский Ф.И.	доктор технических наук, академик АЭН
Попов Д.Н.	доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ)

Защита состоится "20" апреля 1994г. на заседании специализированного ученого совета Д.053.15.10 в Московском государственном те[illegible] им. Н.Э. Баумана по адресу: Лефортовск[illegible] строение".

С диссертацие[illegible] Н.Э. Баумана.

Автореферат [illegible]

Ваш отзыв на[illegible] печатью учереждени[illegible] 2-я Бауманская ул. [illegible] специализированног[illegible]

Ученый сек[illegible] специализи[illegible] кандидат т[illegible]

1544710

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Футурологические прогнозы на ближайшие десятилетия уверенно предсказывают сохранение преимущественного использования поршневых ДВС в качестве основной энергетической установки для наземных транспортных средств. Наряду с сохраняющимися тенденциями дальнейшего совершенствования конструкции и рабочего процесса ДВС в последние годы наблюдается повышение внимания разработчиков к вопросам рациональной организации управления работой транспортного двигателя по всей обширной области его эксплуатационных режимов. Усугубляющиеся энергетические проблемы, с одной стороны, и чрезвычайно ужесточившиеся потребительские и экологические требования к ДВС - с другой, обусловливают буквально скрупулезную аккуратность в решении задач рационального управления ДВС.

Потенциальные возможности современных технических средств, которые могут быть применены в устройствах для управления ДВС, чрезвычайно велики и разнообразны. Здесь возможно использование многих достижений приборной автоматики, телемеханики, гидравлики, микроэлектроники, вычислительной т ники, вплоть до аппаратно-программных средств искусственного интелекта. Вместе с тем, любые технические средства и возможности могут быть эффективно и достаточно полно реализованы лишь при использовании хорошо обоснованных функциональных алгоритмов управления, что, в свою очередь, предполагает наличие высокоразвитого, физически реализуемого математического и научного обеспечения решений многочисленных задач оптимального управления транспортным ДВС.

Естественным стремлением разработчика и исследователя систем управления является создание в первую очередь математических моделей с наиболее возможной полнотой и достоверностью отражающих поведение и характеристики реальной системы и ее составляющих подсистем, моделей, позволяющих подойти к вопросам определения эффективности различных стратегий управления объектом - ДВС при его взаимодействии с внешней средой. Исключительно сложные явления и процессы, происходящие в системе управления транспортным двигателем (СУТД), не поддаются чисто теоретическому описанию. С другой стороны, эксперементальные и натурные исследования этих явлений обычно связаны с большими материальными затратами. Эти обстоятельства инициируют привлечение такого универсального инструмента как

1544710
НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1544710
Федоров П.В. Разработка ме
МГТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

численный эксперимент или математическое моделирование.

Целью работы являлось улучшение основных тактико-технических качеств транспортных средств путем оптимизации систем управления двигателями. На основании кибернетического подхода к вопросам анализа и синтеза сложных систем указанная цель достигалась решением следующих задач:

- обоснование важнейших аспектов системного подхода к проектированию устройств управления двигателем с учетом взаимодействия звеньев в системе "среда - машина - двигатель - управляющее устройство- водитель";

- построение рациональных логико-математических моделей подсистем управления, пригодных для использования на начальных этапах проектирования СУ;

- разработка методов, математических и технических средств статистического оценивания и стохастической аппроксимации характеристик СУ ДВС;

- обоснование системы критериев качества функционирования СУ, формализация критериев оптимизации и композиций критериев для характерных условий движения машины;

- определение характеристик (функций, операторов, числовых последовательностей) оптимальных управлений для характерных ситуаций движения машины с использованием специфики форм целевых функций и формализмов описаний режимов;

- синтез функциональных и алгоритмических структур подсистем СУ двигателем;

- синтез технических структур, подсистем СУ, устройств функциональной диагностики и самотестирования, разработка математического и программного обеспечения СУ и систем диагностики.

Научная новизна работы состоит в том, что разработан комплексный кибернетический подход к проектированию систем управления ДВС. Разработанные теоретические положения оптимального управления являются основой научной базы создания эффективных СУТД. Определены характерные категории режимов и условий функционирования СУТД в соответствующих ситуациях движения транспортного средства. Впервые установлены необходимые и достаточные атрибуты оптимального управления транспортным двигателем. Обоснованы математические модели и структурные модули, функционирующие в характерных режимах, определены приоритетные задачи, критерии и алгоритмы выбора оптимального управления для соответствующих ситуаций движения машины. Развиты

и обобщены методы оценки устойчивости двигателя, определена связь критериев устойчивости, найденных по методу Вышнеградского-Крутова и предложенному по методу определения статистических критериев устойчивости. Обоснована необходимость применения фильтров Калмана-Бьюси для оценивания текущего состояния двигателя, разработаны алгоритмы фильтрации, устойчивые к отказам в измерительных каналах. Разработана классификация стратегий управления, позволяющих решать ситуационные задачи, установлена приоритетная целесообразность применения в большинстве ситуаций концепции идентификационного подхода с использование для решения задач управления неклассических вариационных методов на базе принципа избирательной инвариантности в отношении неконтролируемой случайной нагрузки на коленчатом валу двигателя.

Практическая ценность диссертации заключается в создании новых теоретических положений, позволяющих осуществлять оптимизационный комплексный подход к проектированию систем управления с управляющими устройствами различной целесообразной степени сложности. Разработанные средства оценки состояния позволяют осуществлять текущую несмещенную оценку координат состояния двигателя, функционирующего в условиях нестационарных случайных воздействий. Разработаны и предложены к применению аппаратные средства воспроизведения квазислучайных режимов двигателей, статистические параметры которых адекватны характеристикам натурных реализаций. Предложены методы синтеза управляющего устройства, в полной мере реализующего комплекс задач оптимального управления транспортным двигателем. На основе отдельных положений разработанной концепции оптимального управления двигателем осуществлен ряд макетных и опытно-конструкторских решений аппаратных средств управления, защищенных авторскими свидетельствами.

Реализация. Результаты, полученные в процессе работы над тематикой диссертации, использованы при разработке электронных регуляторов частоты вращения совместно с НЗТА, ОГК НЗТА принята методика определения качества переходных процессов в САУ. ВИМом приняты для внедрения методика расчета устройств оценки энергетических показателей тракторных ДВС и технические требования на изготовление автоматического работомера. В НПО "Автоэлектроника" приняты для использования в работе предприятия: методика определения динамических параметров регуляторов частоты вращения вала двигателя, технические условия на изготовление электронных корректоров, элементы алгоритмического обеспечения их работы, расчеты и рекоменда-

ции по проектированию электромагнитных актюаторов. Результаты теоретических исследований и устройств управления частотой вращения вала ДВС приняты НИКТИД для разработок перспективных электронных САУ ДВС. Результаты исследований использованы в учебно-методических разработках и учебном процессе более чем в пятидесяти вузах.

Апробация. Основные результаты исследований докладывались на следующих конференциях и семинарах: Всесоюзных научно-технических конференциях ВСХИЗО (1977-92гг), Всесоюзной научно-технической конференции по проблемам кибернетики (1979г), Всесоюзных семинарах по комбинированным ДВС в МГТУ им. Н.Э.Баумана (1989,1991гг), Всесоюзных семинарах по автоматическому регулированию теплоэнергетических установок в МГТУ им.Н.Э.Баумана (1982-1993гг), Всесоюзной научно-технической конференции по применению микроэлектроники в сельском хозяйстве (1985г), Всесоюзного научно-технического совещания по автоматизации производственных процессов (1982г), Всесоюзной межвузовской и межотраслевой конференции "Перспективы развития комбинированных ДВС и двигателей новых схем м на новых топливах" - 2 доклада, МГТУ им.Н.Э.Баумана (1987г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 50 работ, среди них 7 авторских свидетельств на изобретения, 8 отчетов по научно-исследовательской тематике и 6 учебно-методических разработок.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, девяти глав, общих выводов, библиографии и приложения. Основная часть работы содержит 364 страниц, 92 рисунка, 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе рассмотрены исходные предпосылки к вопросам теории управления двигателем транспортного средства. Самоходное тягово-транспортное средство (ТТС) с двигателем внутреннего сгорания рассматривается как совокупность объектов одной физической природы - технических устройств, действующих с помощью средств управления при главном приоритете водителя-оператора ТТС. Применение мощного арсенала микроэлектроники и вычислительной техники в системах управления ТТС позволяет осуществлять процессы управления объектами на принципиально новой основе и на качественно новом уровне, обеспечивая наивысшую эксплуатационную эффективность машин при всех возможных условиях их функционирования. Чрезвычайно важное особое свойство, приобретаемое современными системами управления транспортных двигателей при внедрении электронных устройств, заключается в том, что системы управления наделяются способностями автоматичес-

кого анализа и текущей оценки параметров режима и эксплуатационной ситуации в моменты необходимого формирования управляющих воздействий на исполнительные органы. При этом часть интеллектуальной нагрузки водителя переносится на управляющие и решающие устройства, которые обладают исключительно высокими способностями переработки информации. Возрастает объем и сложность параллельно решаемых задач управления при минимальном времени анализа рабочей ситуации и адекватной реакции системы на сложившуюся в момент управления ситуацию движения машины. Сущность понятия управления целесообразно рассматривать с точки зрения кибернетики как науки об общих закономерностях, свойствах, приемах, способах и техники управления в системах различной физической природы. К исходным атрибутам кибернетики относятся: объекты управления, цели управления, стратегии и движение информации в системе. В дальнейшем объект управления - ДВС формализуется в виде общего понятия "управляемый случайный процесс", заданный как множество управляемых условных вероятностных мер на измеримом фазовом пространстве и пространстве управлений, цель определяется как задача придания объекту некоторых конкретных свойств, определяющих показатели качества и эффективности процесса функционирования системы.

Отыскание наилучшего способа достижения цели сводится к построению математических моделей операций, количественно описывающих способы действий, называемых стратегиями или алгоритмами управления. Применительно к транспортному двигателю стратегией можно назвать общую идеологию наилучшего использования всех средств математического обеспечения, имеющихся аппаратных и программных ресурсов системы управления в целом, включая её объектовые части, управляющие устройства и средства мониторинга. Реализация стратегии управления ДВС осуществляется путем одновременного решения двух типов тактических задач; классификация задач приведена на рис 1.

Содержание задач первого типа связано с условиями функционирования машины в среде различных дорожных или внедорожных ситуаций, с выбором водителем определенного режима движения. Классификация режимов двигателя, соответствующих характерным условиям движения ТТС, приведена на рис.2 . Решение задач происходит на фоне использования потребительских качеств двигателя машины, подобные задачи возможно назвать тактическими или операционными.

Задачи управления второго типа порождаются условиями задач первого типа и носят подчиненный характер. Ядро условий задач второго типа оказывается заданным и их решение с помощью СУ должно обеспечить устойчивое функционирование двигателя с предельно дос-

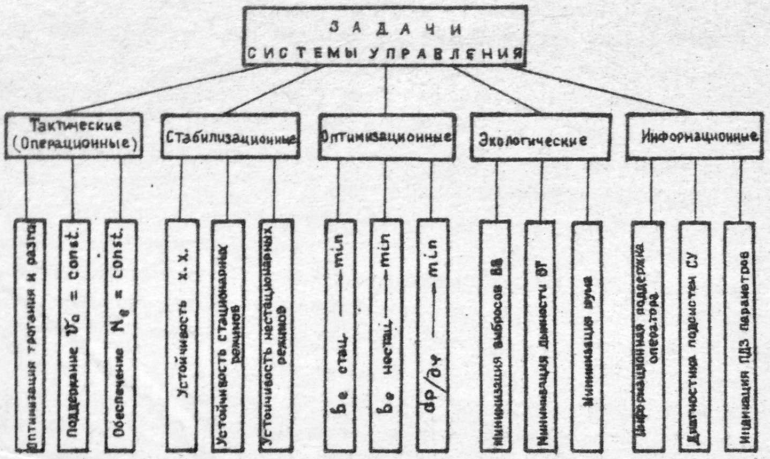


Рис. I . Классификация задач, решаемых СУТД

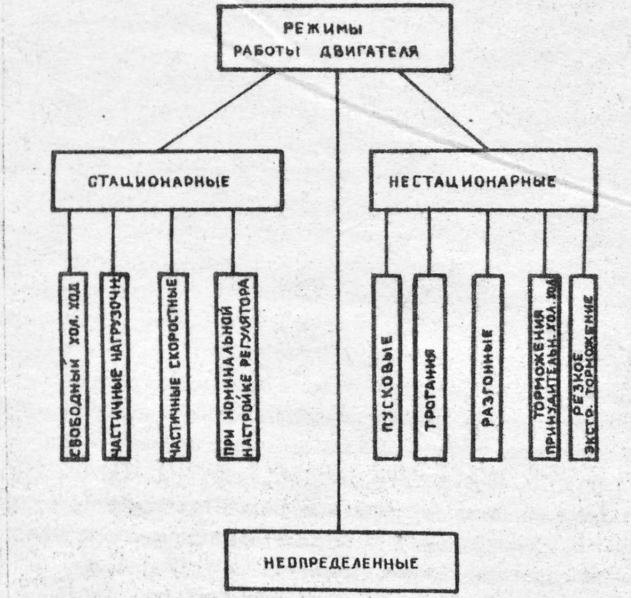


Рис. 2. Классификация режимов транспортного двигателя

тижимыми в заданных условиях показателями экономичности, токсичности, эргономичности и др.

Оптимизация процесса управления двигателем при возникновении некоторой ситуации движения машины включает восемь обязательных этапов, являющихся неотъемлемыми чертами, свойствами кибернетического управления. Управление, организованное наилучшим образом в смысле какого-либо критерия, или композиции критериев качества является оптимальным.

Вторая глава посвящена анализу возможных способов и форм математического описания систем управления транспортным ДВС. Выбор формы описания СУТД имеет большую значимость для теоретического исследования поведения системы при моделировании различных ситуаций управления, так как принятая форма в дальнейшем определяет методы и подходы к решению задач синтеза.

Проанализированы основные формы описаний СУ : описание переменных "вход-выход"; аналитический подход к оптимизации линейных СУ, основанный на использовании в качестве критериев системы интегральной квадратичной и среднеквадратичной оценки минимума ошибки; подход, базирующийся на фундаментальных понятиях и идеях пространства состояний. Исследованиями подтверждена плодотворность третьего подхода, упрощающего синтез большого класса многомерных, нестационарных систем, со многими условиями и ограничениями, позволяющего установить оптимальные структуры управляющих устройств. Описание систем в переменных состояния с помощью обобщенных координат дает возможность определить поведение системы в будущем, если известно её состояние в какой-либо начальный момент времени t_0 и приложенные к системе воздействия. Идеология данного подхода направлена на определение стратегии оптимального управления, экстремизирующего определенную конечную совокупность критериев качества системы. При этом решение задач управления может удовлетворять многим условиям и ограничениям. В общем случае СУТД в режиме нормального функционирования без отказов при непрерывном времени t описывается векторно-матричным линейным дифференциальным уравнением, характеризующим поведение двигателя во времени.

$$\dot{\bar{x}}(t) = A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{u}(t) + C(t)\bar{f}_c(t),$$

где $A(t)$ - динамическая матрица коэффициентов уравнения процесса, размера $n \times n$; $\bar{x}(t)$ - n - мерный вектор фазового пространства; $B(t)$ - матрица управления, размера $n \times m$; $\bar{u}(t)$ - m - мерный вектор управлений; $C(t)$ - матрица возмущений, размера $n \times r$;

$\bar{f}_c(t)$ - случайный r - мерный вектор возмущающих воздействий. Уравнение решается на интервале времени $[t_н, t_к]$, реализации функций $x_i(t)$ и $u_i(t)$ являются измеримыми, а элементы матриц $A(t)$, $B(t)$ непрерывными. Относительно случайного возмущения $\bar{f}_c(t)$ предполагаем, что оно ограничено $|f_c(t)| \leq f_{c\,пред.}$, заранее неизвестно и ненаблюдаемо.

Сущность последовательных измерений наблюдаемых выходных величин $\{y(1), y(2), \ldots, y(k)\} = Y^{(k)}$ позволяет найти оптимальную оценку вектора состояния $\bar{x}(t)$ процесса $\omega_{ke}(t)$. Предполагается, что число измеряемых координат состояния равно n и наблюдению доступен вектор наблюдаемых координат

$$\bar{y}(t) = N(t)\bar{x}(t-\tau_3^{(u)}) + D(t)\bar{u}(t) + E(t)\bar{v}(t),$$

где $N(t)$ -матрица наблюдений системы размера $s \times n$; $D(t)$ и $E(t)$- непрерывные матрицы системы размера $s \times p$ и $s \times m$ соответственно, $\tau_3^{(u)}$ - запаздывание информации в процессе измерения; $\bar{v}(t)$ - случайный вектор гауссовских шумов измерений с нулевым средним и корреляционной матрицей

$$M[f(t)f^T(\tau)] = R_v(t)\delta(t-\tau).$$

При учете вероятностного характера воздействий возмущений на процессы управления объектом, при наличии шумов измерений и помех на линии передачи управляющих воздействий, идентификация системы с помощью и методов пространства состояний является наиболее удобным и адекватным средством математического описания систем. В этом случае наиболее полно формализуется одна из основных целей управляющих устройств - минимизация вероятностей принятия ошибочных решений в процессе управления функционированием систем.

В третьей главе рассмотрены вопросы идентификации двигателя транспортного средства как объекта управления. На современном этапе развития науки об управлении техническими системами вполне естественным оказалось привлечение к синтезу оптимальных систем управления ДВС методов математической кибернетики, теории случайных процессов и математической статистики, что обусловило возможность идентификации двигателя с учетом существующих особенностей его функционирования в вероятностном пространстве режимов.

Установлены четыре категории условий функционирования объекта и СУТД, определяемых статистическими свойствами случайных переменных или элементов матриц $A(t)$, $B(t)$ и $C(t)$. В случае работы двигателя на стенде, при строго заданной постоянной частоте вращения КВ такой режим работы является определенно-детерминированным. На некоторых режимах ДВС наблюдается инвариантность во вре-

мени процессов изменения частоты вращения коленчатого вала. В этом случае матрицы коэффициентов сохраняются примерно постоянными, моментные функции процессов $\omega(t)$ и функции распределения не зависят от начала отсчета времени. Такие режимы определены как определенно-стационарно-вероятностными.

В случае, когда уравнения, характеризующие динамику процесса и статистические характеристики процесса, в том числе $M[x(t)]$ и $D_x(t)$ меняются некоторым определенным образом во времени, режим двигателя можно назвать определенно-нестационарным.

Для ситуации, когда распределение вероятностей для случайных переменных и моментные функции не известны, а имеются лишь некоторые сведения о законах распределения или о пределах значений характеристик и параметров $f_c(t)$, уместно применить определение категории неопределенных условий процесса, или неопределенного режима: $|f_c(t)| \leq f_c^{пред}$.

Предложено для общего случая режимом называть состояние двигателя, определяемое вещественными числовыми параметрами, как выражение существенных свойств, присущих именно данному состоянию и выделяющих его из множества других состояний. Режим двигателя является следствием сложившейся ситуации движения машины. Продолжительность режима может составить от нескольких секунд до десятков минут, вследствие чего может идти речь о микро и макроинтервалах режимов.

Модель функционирования двигателя показана на рис.3

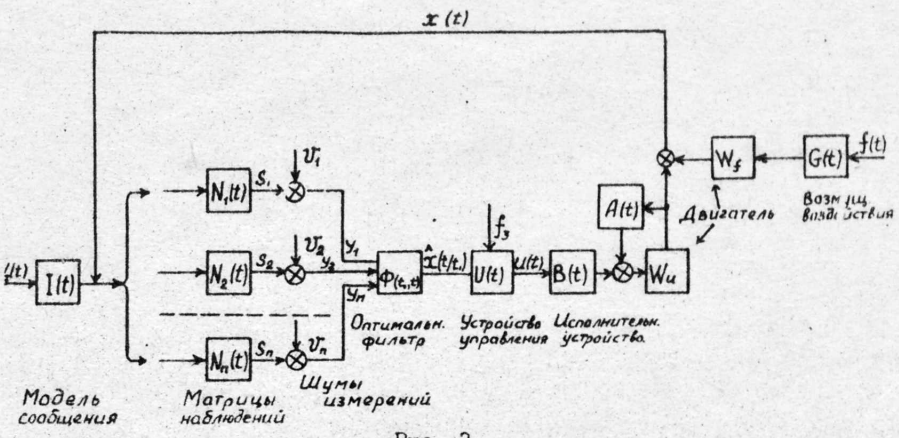


Рис. 3

Для стационарных режимов, соответствующих приведенной классификации, уравнение переходных состояний принимает вид

$$\bar{x}(t)=\Phi(t-t_0)\bar{x}(t_0)+\int_{t_0}^{t}\Phi(t-\tau)B\bar{u}(\tau)d\tau+\int_{t_0}^{t}\Phi(t-\tau)\bar{f}_c(\tau)d\tau.$$

При дискретном времени решением уравнения при переходной матрице $\Phi(n)=A^{(n)}$ будет

$$x(n)=\Phi_x(0)+\sum_{i=0}^{n-1}\Phi(n-i-1)Bu(i)+\sum_{i=0}^{k-1}\Phi(n-i-1)C_{f_c}.$$

Преобладание нестационарных макроструктур процессов управления автомобильным двигателем имеет место в условиях городского или интенсивного магистрального движения. Для двигателей тракторов, работающих на транспортных операциях, нестационарные режимы составляют основную долю в общем времени работы машин.

Для случайного нестационарного процесса $\omega(t)$ получено выражение для плотности распределения при $t=t_1$, имеющее вид близкий к закону нормального распределения. Функция распределения определяется нестационарным средним $m_\omega(t_1)$ - нестационарным средним значением квадрата сечения процесса $\omega(t)$ при $t=t_1$ и дисперсией $D_\omega(t_1)$.

Для оценки истинного среднего значения $m_\omega(t)=\int_{t-\tau/2}^{t+\tau/2}[\bar{\omega}(t)+f(t)]dt=\int_{t-\tau/2}^{t+\tau/2}\omega(t)\,dt$ на момент $t=t_1$ в работе предложено преобразование нестационарной корреляционной функции $R_\omega(\tau,t)$ в виде $R_\omega(\tau,t)=R_\omega^{(1)}\left(\frac{t_1+t_2}{2}\right)R^{(2)}(t_2-t_1)$, где $R_\omega^{(2)}(\tau)=R_\omega^{(2)}(t_2-t_1)$ - корреляционная функция стационарного процесса; $R_\omega^{(1)}(t)=R_\omega^{(1)}=R\left(\frac{t_1+t_1}{2}\right)$ - функция, играющая роль переменного масштабного множителя, определенная в точке $\frac{t_1+t_2}{2}$, при этом $t_1=t$, $t_2=t_1+\tau$, $\tau=t_2-t_1$. Нормируя корреляционную функцию $R_\omega^{(2)}(\tau)$ так, чтобы $R_\omega^{(2)}(0)=1$ получим выражение для частотно-временной спектральной плотности $S_\omega(\Omega,t)=[m_\omega(t)]^2S_\omega(\Omega)$. При $\tau=0$ имеем $M[\omega^2(t)]=R_\omega(0,t)=\int_0^\infty S_\omega(\Omega,t)d\Omega\geq 0$, откуда легко вычисляется среднее значение квадрата процесса $\omega(t)$ в момент t.

При дискретном представлении и преобразовании информации на интервале $\kappa T_0\leq\tau\leq(\kappa+1)T_0$ решение уравнения состояния выражается уравнением переходных состояний $x(\kappa+1)=\Phi[(\kappa+1)T_0,\kappa T_0]x(\kappa T_0)+\int_{\kappa T_0}^{(\kappa+1)T_0}\{\Phi[(\kappa+1)T_0,\tau]B(\tau)u(\kappa T_0)\}dt+\int_{\kappa T_0}^{(\kappa+1)T_0}\Phi[(\kappa+1)T_0,\tau]f_c(\tau)d\tau.$

Анализ осциллограмм, полученных при ходовых испытаниях тракторов и автомобилей показывает, что работа транспортного двигателя сопровождается непрерывными колебаниями момента сопротивления, крутящего момента, колебаниями угловой скорости коленчатого вала, что обусловливает дополнительные инерционные нагрузки, затраты дополнительной энергии, в результате чего увеличивается

расход топлива и повышается скорость изнашивания деталей. Для определения доли дополнительных инерционных нагрузок в общем силовом балансе в работе рассматривается упрощенная геометрическая модель колебательного процесса длительностью в один период $\tau_к$ (рис.4.), с временем нарастания и спада нагрузки $t_р$, при наиболее вероятном случае $t_р \leq \frac{\tau_к}{2}$. Такая модель достаточно адекватно отражает переходные процессы при ступенчатом изменении нагрузки.

В результате проведенного аналитического исследования установлены функциональные зависимости между долей дополнительных инерционных нагрузок, коэффициентом неравномерности частоты вращения и параметрами колебательных процессов:

$$\Delta_Д = (\delta_{T_{tqr}} \cdot t_р)/\tau_к, \quad \Delta\omega = \delta_{T_{tqr}} \cdot T^{ср}_{tqr} \cdot t_р/(2J_{пр}).$$

В полученных выражениях: $\Delta_Д$ -доля (коэффициент) дополнительных инерционных нагрузок в переходном процессе; $\delta_{T_{tqr}}, \Delta\omega$ -коэффициенты неравномерности момента сопротивления и частоты вращения коленчатого вала; $t_р$ - время переходного процесса; $\tau_к$ - период колебаний момента сопротивления T_{tqr}; $J_{пр}$ - момент инерции движущихся масс, приведенных к оси коленчатого вала.

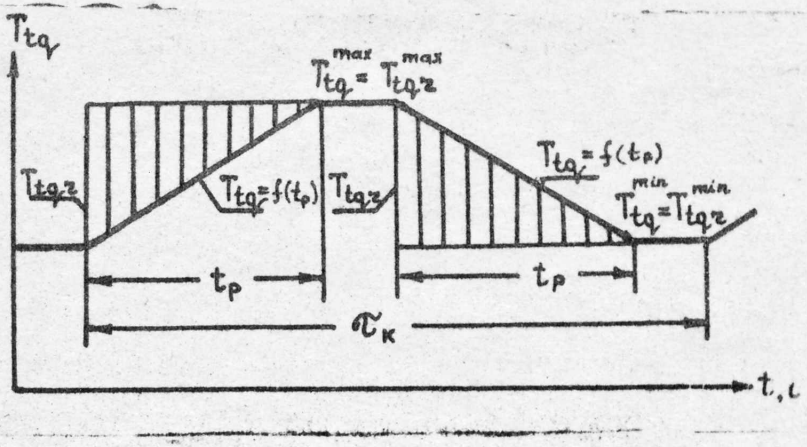


Рис.4.

Результаты исследований показывают на тесную корреляционную связь значений дополнительных инерционных нагрузок и степени неравномерности частоты вращения со стохастическим показателем колебательности M_c, выраженным через спектральные плотности возмущающих воздействий и выходных параметров двигателя.

В четвертой главе вопросы оптимального управления ДВС рассмотрены с точки зрения общего теоретического подхода с учетом особенностей формирования режима как следствия случайной ситуации движения машины.

На каждом режиме работы транспортного ДВС преследуется одна основная тактическая цель управления и параллельно решаются другие, в основном, оптимизационные задачи. Мерой эффективности решения каждой из задач управления является значение критерия качества, который выступает в роли целевой функции оптимального управления. Математическое описание целевой функции сводится к формализации требований, предъявляемых к системе управления, выражении их в терминах и символах логики и математики.

Обоснование выбора критерия оптимальности I_i , определяемого конкретными условиями работы двигателя, создается в результате моделирования ДВС на уровне физических представлений с последующей формализацией обнаруженных связей между свойствами двигателя и требуемыми на него воздействиями. Критерии могут быть поделены условно на 4 группы в соответствии с классификацией на рис. 5.

В этом случае первая группа критериев связана с потребительскими свойствами машины : оптимизацией и минимизацией времени разгона $I^{опт}_{разг}$ и $I^{мин}_{разг}$, точностью поддержания постоянной для данной ситуации установленной скорости движения $I^{стац}_{точн}$, точностными показателями разгонных характеристик $I^{нестац}_{точн}$

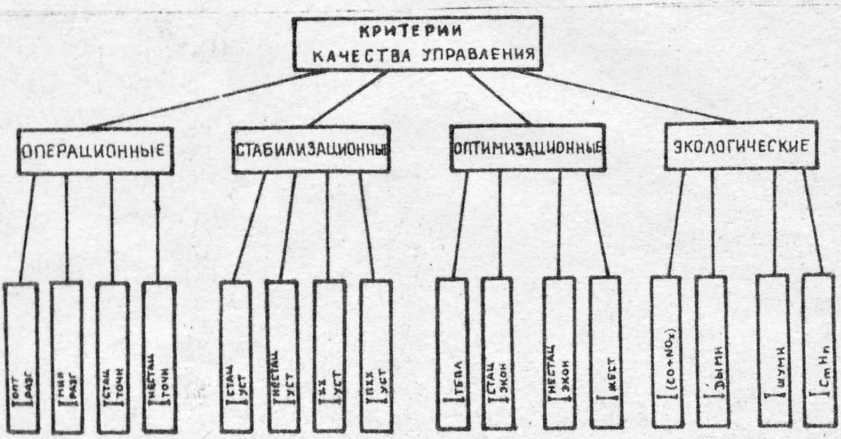


Рис. 5. Классификация критериев качества управления ДВС.

Стабилизационные критерии оценивают устойчивость частоты вращения коленчатого вала на режимах стационарных $I_{уст}^{стац}$, нестационарных $I_{уст}^{нестац}$, режимах холостого хода $I_{уст}^{хх}$ и принудительного холостого хода $I_{уст}^{пхх}$.

Третья группа критериев является совокупным выражением общепринятых целей оптимизации собственно рабочего процесса двигателя при его работе на стационарных и нестационарных режимах, формализацией меры достижимой топливной экономичности $I_{эк он}^{стац}$, $I_{эк он}^{нестац}$, оптимальной теплонапряженности деталей КШМ и допустимой жесткости работы $I_{тепл}$, $I_{жест}$.

К четвертой группе критериев можно отнести критерии, характеризующие экологическую безопасность двигателя, максимально-допустимые нормы токсичности выделяемых ВВ, а также шумность работы двигателя $I_{(CO+NO_x)}$, $I_{дымн}$, $I_{шумн}$.

Управление транспортным ДВС – многосвязным объектом оптимизируется, как правило, одновременно по нескольким частным критериям I_i. При оптимизации решений многокритериальных задач управления в работе применялся метод последовательных уступок. Для этого частные критерии упорядочивались и пронумеровывались в порядке относительной важности, после чего осуществлялась поочередная экстремизация частных критериев и выбор величин уступок. Формализм процедуры представляется следующим образом

$$\underset{u\in U}{extr}\{I_i = \int_{t_0}^{t_к} F_{n+i}(x,u)dt \,/\, \dot{x} = F(x,u);\ x(t_0)=x_0;\ x(t)\in X\};$$

$$\underset{u\in U}{extr}\{I_i = -\int_{t_0}^{t_к} F_{n+i}(x,u)dt \,/\, \dot{x} = F(x,u);\ x(t_0)=x_0;\ x(t)\in X;$$

$$I_i(u^*) \geq I_{i\,max} - \Delta i;\ i = 2,3,\ldots,j-1\};\ F_{n+i}(x,u) = \frac{dx_{n+i}}{dt};$$

$$x_{n+i}(t_0) = 0;\ i = 1,\ldots,m.$$

Решение задачи определяет управление, при котором значения частных критериев отличаются от максимальных на значения соответствующих уступок Δi. За оптимальное из множества U принимается то управление u^*, которое получено при нахождении условного максимума последнего по важности критерия.

В пятой главе приведены результаты аналитического исследования вопросов устойчивости систем управления транспортными ДВС. Взятые за основу положения теории А.М.Ляпунова позволили рассмотреть в развитии устойчивость движения СУТД на основных режимах при

любых начальных условиях и нелинейностях, принадлежащих к определенному классу. В работе понятие абсолютной устойчивости системы распространено на случайные, в том числе и нестационарные процессы и режимы работы ДВС. Полученные результаты позволяют формулировать и решать задачи формирования желаемых статистических характеристик устойчивости нелинейных подсистем и их звеньев. Доказано, что применение круговых критериев абсолютной устойчивости, при выбранном варианте управляющего устройства, сводится к нахождению предельного сектора, внутри которого должна находиться статистическая характеристика нелинейного звена $P(q,t)$, т.е. $K_{np}q < P_n(q) < \gamma_{np}q$.

Известный критерий В.М.Попова модифицируется в работе следующим образом: $R_e \frac{W_1(s)}{1+KW_1(s)} + \frac{1}{\gamma-K} > 0$, при дополнительном требовании: $K < \partial m_z/\partial m_q < \gamma$. При осуществлении статистической линеаризации теплового звена ограничиваются также коэффициенты линеаризации $K_{np} < K_1 < \gamma_{np}$ и $K_{np} < K_2 < \gamma_{np}$. В приведенных выражениях K, K_{np} и γ_{np} - значения коэффициентов усиления управляющего устройства; $W_1(s)$ - частотная передаточная функция системы; K_1 и K_2 - коэффициенты статистической линеаризации; m_z и m_q - математические ожидания $P(q,t)$ и $q(t)$.

При анализе стабилизируемости СУ плодотворным оказалось использование такого параметра как степень устойчивости, характеризующего качество переходных процессов $\omega_{кв}(t)$. Установлено, что степень устойчивости связана с предельно минимальным временем переходного процесса таким образом, что быстродействие СУ определяется выбором α_0, при котором замкнутая система с передаточной функцией $W_{уп}(s-\alpha_0)$ еще сохраняет устойчивость. Введение степени устойчивости α_0 в достаточное условие абсолютной устойчивости процессов в нелинейной системе $R_e \frac{W_1(s-\alpha)}{1+KW_1(s-\alpha)} + \frac{1}{\gamma-K} > 0$ для всех $\Omega \geq 0$ означает, что все отклонения от процесса будут иметь степень устойчивости не менее заданной при сохранении ограничений на производные соответствующей нелинейной характеристики. Задаваясь требуемым значением α_0 получаем предельные значения K_{np} и γ_{np} для коэффициентов линеаризации K_1 и K_2, обеспечивающих достаточную степень устойчивости нелинейной подсистемы.

В работе показано, что в случае выполнения критерия Попова существует V - функция Ляпунова в форме Лурье-Постникова, имеющая во всем фазовом пространстве знакопостоянную производную dV/dt со знаком, обратным знаку V.

Для количественной оценки запаса устойчивости замкнутой СУ в работе, введен стохастический показатель колебательности системы выражаемый через статистические характеристики входных $u(t)$ и выходных сигналов $y(t)$: $M_c = |W(i\Omega)/(1+W(i\Omega))|_{max} = |S_{yu}(\Omega)/S_u(\Omega)|_{max} \leq 1{,}2 \ldots 1{,}6$.

В результате испытаний СУТД с различными управляющими устройствами выявлены существенные корреляционные связи M_c с характеристиками качества функционирования СУ (точностью, быстродействием, устойчивостью) а также эффективными показателями собственно дизеля. В качестве примера на рис.6.показано влияние показателя M_c на удельный расход топлива дизелем 4ЧН II/I2,5.

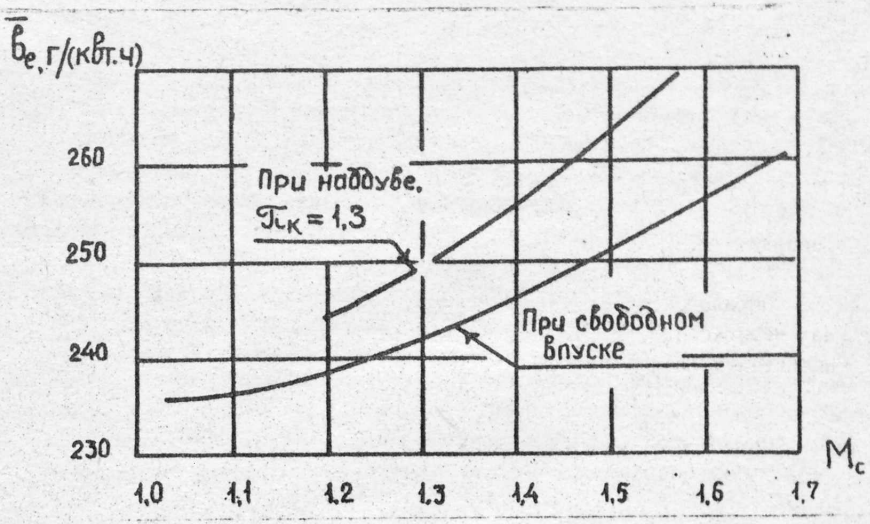


Рис. 6

В то же время значения показателя M_c зависят от свойств СУ и вектора внешних воздействий. Экспериментально показано, что снижение значений M_c достигается ограничением мощности $[u(t)]^2$ и скорости $\dot{u}(t)$ управляющих воздействий путем изменения коэффициентов передачи (усиления) УУ на отдельных интервалах управления а также за счет введения управляемых интегрирующих звеньев в цепь ОС , обеспечивающей воздействие регулируемой координаты на состояние объекта. При этом изменение коэффициента ОС и эквивалентного коэффициента передачи существенно изменяет динамические свойства двигателя , уменьшая его инерционность и колебательность в $(1 + k_0 k_{oc})$ раз.

Шестая глава посвящена выбору рациональных способов оценки состояния ДВС. Оптимальная оценка вектора состояния $\bar{x}(k)$ на всех рабочих режимах ДВС, определяемая в дальнейшем как фильтрация выходного сигнала $\hat{y}$ и формально выражающаяся в виде задачи нахождения дифференциального уравнения оптимального фильтра, осуществлялась, минуя сложные методы исследования интегральных уравнений, путем синтеза и применения фильтров Калмана–Бьюси. На основании полученных соотношений сформированы алгоритмы оптимального оценивания вектора состояния подсистемы управления частотой вращения коленчатого вала ДВС. Алгоритм описывается системой рекуррентных уравнений:

$$\hat{\bar{x}}(k/k) = \Phi(k,k-1)\hat{\bar{y}}(k-1/k-1) + K(k)[\bar{y}(k) - N(k)\Phi(k,k-1)\hat{\bar{y}}(k-1/k-1)] =$$
$$= \hat{\bar{x}}(k/k-1) + K(k)\tilde{z}(k/k-1).$$

В целях экономии вычислительных ресурсов ЦВУ при сохранении приемлемой точности оценки автором разработан квазиоптимальный фильтр оценки состояния ДВС, в основу работы которого положены субоптимальные алгоритмы оценивания вектора $\bar{x}(k)$. При выводе алгоритмов использовалось допущение о гауссовском характере плотности распределения вероятностей оценок экстраполяции с вектором средних $\hat{\bar{x}}(k/k-1)$ и корреляционной матрицей $Q(k/k-1)$.

Определены алгоритмы фильтрации, устойчивые к отказам в каналах измерения. В основу алгоритмов положен принцип адаптивного оценивания вектора состояния двухканальным фильтром Калмана. Разработаны способы и технические средства оценки состояния и параметров двигателей, позволяющие в условиях лабораторных исследований в достаточной степени адекватно имитировать и многократно воспроизводить квазиреальные ситуации и режимы работы транспортных ДВС.

В главе седьмой приведены результаты исследования вопросов формирования стратегий оптимального управления транспортным ДВС. Одна из возможных классификаций стратегий управления транспортным двигателем приведена на рис.7. Для большинства ситуаций работы двигателя установлена приоритетная целесообразность идентификационного подхода, предполагающего: а) непрерывное получение состоятельных оценок параметров объекта ; б) осуществление заложенных в логико-вычислительном устройстве методов (алгоритмов) вычисления оптимальной стратегии; в) зависимость оптимальных правил управления от критерия качества и параметров объекта.



Рис.7 Классификация стратегий управления транспортным ДВС.

1544710

Исследованиями установлено, что транспортный ДВС относится к классу объектов, управление которыми осуществляется в результате ограниченного числа решений, принимаемых последовательно в фиксированные моменты времени - на интервалах квазистационарности $[t_i, t_i + T_o]$. Для решения задач управления применялся метод динамического программирования Р.Беллмана, принцип максимума Понтрягина, метод фазовых траекторий и методы математического программирования. При рассмотрении двигателя как линеаризированного объекта управления, функционирующего на стационарном режиме, вспомогательная функция Беллмана $S(t', \bar{x}) = min\left[\int_{t'}^{t'+\Delta t} F(\bar{x}, \bar{u}, t)dt\right]$ для произвольного момента времени t', выраженная в квадратической форме $S(\bar{x}) = \sum_{i,j=1}^{n} A_{ij} x_i x_j$, является функцией Ляпунова, что обусловливает получение оптимального управления - минимизацию функционала $I = \int_{t_0}^{t_к} F(\bar{x}, \bar{u}, t)dt$, обеспечивающего асимптотическую устойчивость системы. Известное для детерминированных процессов нелинейное дифференциальное уравнение Беллмана распространено на случайные процессы - $\frac{\partial S}{\partial t} = \min_{u}\left\{F(\bar{x}, \bar{u}, t) + \sum_{i=1}^{n}\left[m_{x_i}\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\delta_x^2}{2}\frac{\partial^2 S}{\partial x_i^2}\right]\right\}$, где $S = min\langle I \rangle$.

Полученные уравнения не всегда удается решить аналитически, однако, при введении дискретного времени вариационную задачу оптимизации можно свести к N простым задачам экстремизации функций малого числа переменных управлений $S_1(\bar{x}_0) = \min_{u_0^* \in U}[F_1(\bar{x}_0, \bar{u}_1^*)\Delta t]$;

. . . . . .

$S_{к+1} = \min_{u_к^* \in U}[S_к(\bar{x}_{к-1}, \bar{u}_к^*) + F_{к+1}(\bar{x}_к, \bar{u}_{к+1}^*)\Delta t]$, $к = 1, 2, \ldots, N-1$.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

В работе показано, что с помощью принципа максимума Понтрягина возможно получение более удобного аналитического выражения для нахождения оптимального управления двигателем при минимизации качества, соответствующего текущему режиму двигателя и ситуации движения машины.

Одной из трудностей организации оптимального управления транспортным двигателем является недоступность для прямого измерения координат случайного вектора нагрузки $\bar{f}_3(t)$. В такой ситуации наиболее целесообразен синтез процедур управления, позволяющих приблизить свойства системы к полностью инвариантной. Вследствие неприменимости принципа компенсационной инвариантности из-за неконтролируемости возмущающих воздействий в работе отдается предпочтение методу избирательной инвариантности, позволяющему осуществить квазиастатическое регулирование двигателя во всем рабочем диапазоне его режимов. Реализация этого метода осуществляется введением интегрирующих звеньев в каналы обратной связи. При этом матрица ОС определяется для замкнутой системы $A-BK_{oc}$ с передаточной функцией $W(s)=1/[sE-A+BK_{oc}]$, где $S=\alpha+i\Omega$, E - единичная матрица, A - матрица объекта $n\times n$, B - матрица управления $n\times m$; знаменатель передаточной функции представляет матрицу, определитель которой является характеристическим полиномом от S степени n, т.е. $|sE-A+BK_{oc}|=\sum_{k=0}^{n}\alpha_k S^k=\prod_{k=1}^{n}(s-S_k)$, где α - коэффициенты полинома, $\alpha_n=1$; S_k - нули полинома, являющиеся полюсами или собственными числами передаточной функции. Условием приближения к полной инвариантности системы является максимальное удаление от мнимой оси всех полюсов S_k передаточной функции $W(s)$. Упрощенная структурная схема управления, включающая наблюдающее устройство, показана на рис.3. Управляющий вектор $\bar{u}(t)$ формируется с помощью матрицы K_{oc} и текущей оценки вектора состояния двигателя $\hat{x}$; $\bar{u}(t)=K_{oc}[\bar{x}_3(t)-\hat{\bar{x}}(t)]=K_{oc}(t)\delta(t)$, где $\bar{x}_3(t)$ - желаемое значение случайного вектора $\bar{x}(t)$; $\delta(t)$ - ошибка системы.

Рассмотрим простую систему, когда объект управления задан уравнением $T_д\dot{x}(t)+x(t)=K_c u$ или в форме Коши $\dot{x}_1=\alpha x_1+\beta u_1$, где $\alpha=1/T_д$, $\beta=1/T_д$, $x_1=x(t)$, $u_1=u(t)$. Оптимальное управление объекта находится из условия минимизации функционала вида $I=\int_0^{\infty}(q_1x_1^2+q_2u_1)dt$. Решая задачу методом Беллмана с помощью вспомогательной функции $S(x)=A_{11}x_1^2$ и записывая функциональное уравнение Беллмана в виде $q_1x_1^2+q_2u_1^2+(\alpha x_1+\beta u_1)\partial S/\partial x_1=0$; $2q_2u_1+\beta\partial S/\partial x_1$,

получаем $u^{\circ}(t) = -[\beta/(2q_1)]A_{11}x_1(t) = K_{oc}x(t)$, где $K_{oc} = -A_{11}\beta/q_2$. К аналогичному результату приходим, если та же задача нахождения u° решается с помощью принципа максимума. В этом случае составляется функция Гамильтона $H = \psi_0(q_1x_1^2 + q_2u^2) + \psi_1(\alpha x_1 + \beta u)$, где вспомогательные функции ψ_i определяются уравнениями $\dot{\psi}_0 = -\partial H/\partial x_0 = 0$; $\dot{\psi}_1 = -\partial H/\partial x_1 = -2q_1x_1\psi_0 - \alpha_0\psi_1$. В силу теоремы Л.С.Понтрягина $\partial H/\partial u_i = 0$; $i = 1,2,\ldots,r$, $\psi_0 2q_2u_1 + \psi_1\beta = 0$. при $\psi_0 = -1$ получаем оптимальное управление $u_1^{\circ} = \beta\psi_1/(2q_2)$. Из совместного решения уравнений $\dot{x}_1 = \alpha x_1 + (\beta^2/2q_2)\psi_1$ и $\dot{\psi}_1 = 2q_1x_1 - \alpha\psi_1$ находим $\psi_1 = (-\sqrt{\alpha^2 - \beta^2q_1/q_2} - \alpha)2q_2x_1/\beta^2$ и далее получаем $u^{\circ}(x) = K_{oc}x$, где $K_{oc} = [-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2q_1/q_2} - \alpha]/\beta$. Принцип максимума позволяет находить экстремали в виде кусочно-непрерывных функций с учетом ограничений координат состояния и управления.

<u>В восьмой главе</u> рассмотрены принципы синтеза систем управления оптимальных по быстродействию. За основу идеологии построения таких систем взят принцип минимизации времени разгона или торможения коленчатого вала с учетом ограничений, налагаемых на координаты выхода и координаты управлений и принятием во внимание условий безопасности, экономичности, износа, экологических и других требований, предъявляемых к двигателю и его системе управления.

Если при оптимизации управления из условия минимума времени переходного процесса в функционале $J = \int_{t_0}^{t_к} F(\bar{x},\bar{u})dt$, $T = t_к$ принять $F(x,u) = 1$, то с учетом $\psi_0 = -1$ функция Гамильтона определится выражением $H = -1 + \sum\psi_i F_i(\bar{x},\bar{u}) = -1 + \sum_{i=1}^{n}\psi_i F_i(\bar{x},\bar{u})$, тогда $\max_{u\in U}\{H[\psi(T),\bar{x}(T)]\} = 1$, $\psi_0(T) = -1$. Оптимальное управление с учетом ограничения $|u(t)| \le U_{max}$ определяется из условия максимума преобразованной функции Гамильтона и для линейного (линеаризированного) объекта записывается в виде $\bar{u}^{\circ}(t) = U_{max}\,sign\,\partial H/\partial u$. При $U_{max} = 1$ $u^{\circ}(t) = sign\,\partial H(\psi,\bar{x},\bar{u})/\partial u$. Нетрудно показать исходя из принципа максимума, что функция $\psi(t)$, определяемая суммой экспонент с вещественными показателями степени, изменяет знак за время управления $T - t_0$ $n-1$ раз, поэтому управление имеет не более n интервалов постоянных значений $|u| = 1$. Это положение "об n интервалах" впервые было доказано А.А.Фельдбаумом в 1959г без применения принципа максимума Понтрягина. Основная задача при определении алгоритмов оптимальных управлений $u^{\circ}(t)$ состоит в нахождении моментов переключения управления t_m ($m = 1,2,\ldots,n$). При наличии в уравнении объекта $x^{(n)} + \sum_{i=1}^{n}a_{n-i}x^{(n-i)} = b_0u$ n нулевых корней моменты переключения определяются как $t_m = 4\sqrt[n]{\frac{(n-1)!}{4}\left|\frac{x(T)-x(0)}{b_0U_{max}}\right|}\sin^2\frac{mn}{2n}$. Особое значение име-

ет выбор знака сигнала управления на первом интервале u_1^0. Принимая начальное и конечное значения состояний объекта установившимся имеем $u_1^0 = U_{max} \cdot sign[x(T) - x(0)]$.

Для определения длительности интервалов предпочтительны методы математического программирования с использованием уравнений переходных состояний. На интервалах управлений $[t_i, t_{i-1}] = \Delta t_i$, $\bar{x}(\Delta t_i) = \Phi(\Delta t_i)\bar{x}(\Delta t_{i-1}) + \Delta(\Delta t_i)u(\Delta t_i)$, где $\Delta(\Delta t_i) = \int_0^{\Delta t_i} \Phi(\tau)B\,d\tau$, $i = 1, \ldots, n$. Задача формулируется для значения вектора координат на последнем интервале $\bar{x}(\Delta t_n)$: $\min \{I = \Phi(\Delta t_n)\bar{x}(\Delta t_{n-1}) + \Delta(\Delta t_n)u(\Delta t_n);\ \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0;\ \bar{x}(\Delta t_n) = \bar{x}_K;\ {}^{\Delta t}|u(\Delta t_i)| \leq U_{max};\ \bar{x}(\Delta t_i) \leq \bar{x}(t_K)\ ;\ i = 1, 2, \ldots, n\}$. Решение задачи осуществлялось методами линейного или квадратичного программирования.

Для комбинированного ДВС, работающего на неустойчивом режиме и представляющего колебательное звено с коэффициентом демпфирования ξ уравнение динамики в относительных единицах координат выхода имеет вид $d^2y/dt^2 + 2\xi\, dy/dt + y = u(t)$. Преобразуя это уравнение в форму уравнений состояния получаем $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_2 = -x_1 - 2\xi x_2 + u$; $y(t) = x_1(t)$. Для последней системы функция Гамильтона составляется как $H = \psi_1 x_2 + \psi_2(-x_1 - 2\xi x_2 + u)$. Оптимальное управление находится из условия максимума H: $u^0(t) = sign\, \psi_2$. При неустойчивом режиме $\xi < 1$ корни характеристического уравнения являются комплексными, что не позволяет применить теорему "об n интервалах". Поэтому из уравнения для вектора вспомогательных переменных $\psi(t) = -\partial H/\partial x = -\psi^T(t)\partial F(x,u)/\partial x$ определяется функция $\psi_2(t)$; $\dot{\psi}_1(t) = \psi_2(t)$; $\dot{\psi}_2(t) = -\psi_1(t) + 2\xi\psi_2(t)$ и соответствующее характеристическое уравнение $p^2 - 2\xi p + 1 = 0$, которое дает возможность записать решение в общем виде $\psi_2(t) = Ce^{\alpha t}\sin(\Omega_0 t + \psi_0)$, где C и ψ_0 – постоянные при начальных значениях $\psi_1(0)$ и $\psi_2(0)$; $\Omega_0 = \sqrt{1-\xi^2}$. Функция $\psi_2(t)$ определяет закон управления $u^0(t) = sign[\psi_2(t)] = \begin{cases} +1 \text{ при } \psi_2(t) > 0 \\ -1 \text{ при } \psi_2(t) < 0 \end{cases}$, с длительностью интервалов $t_{pi} \leq \pi/\Omega_0$.

Приведенные в девятой главе примеры конструкций управляющих устройств показывают возможность аппаратной реализации некоторых идей оптимального управления транспортным двигателем. Определена общая идеология аппаратного решения и ориентации логико-вычислительных устройств для требуемого круга задач управления на основе принципа единого кибернетического подхода к проблеме оптимального управления, сутью которого является текущее вычисление вектора управления $u^0(t)$, при котором целевая функция J_i или J_Σ при

соответствующей ситуации работы двигателя достигает области экстремальных значений. При этом обоснована концепция аппаратного решения управляющего устройства системы управления транспортным двигателем, в полной мере реализующего задачи оптимального управления. Признано целесообразным включение в состав управляющего устройства таких блоков как анализатор ситуации движения машины, формирователь критерия качества, решающее устройство – процессор с периферийным оборудованием, пакеты и драйверы эталонных управляющих программ для характерных режимов работы двигателя.

На рис. 8 приведена функциональная схема одной из разработанных реализаций оптимальной системы управления автомобильным двигателем. Схема включает анализатор ситуации движения машины (АСДМ), устройство формирования критерия качества (УФКК), решающее устройство (РУ), формирователь команд (ФК), пакет эталонных программ (ПЭП), пакет эталонных команд (ПЭК), исполнительное устройство (ИУ), объект управления (ДВС), блок датчиков параметров режима ДВС (ДПР), задатчик (ЗЧВ) и датчик частоты вращения (ДЧВ).

В анализатор ситуации движения машины АСДМ от ДЧВ и ЗЧВ поступает информация о динамичности процессов изменения ЧВ, о числе и продолжительности разгонов и торможений КВ в единицу времени, интенсивности и амплитудах разгонов. Анализатор АСДМ, включающий коррелометр экспресс-анализа, на основе поступившей информации оценивает распределения и вероятностные характеристики преобладающих процессов изменения скоростного режима двигателя на некотором интервале измерения $\mathcal{T}_{изм}$. В дискретные моменты времени на выходе АСДМ выделяется вектор признаков режима $Y_p(kT)$, являющийся определяющим для УФКК, которое, получив информацию о характере режима, производит отбор соответствующих частных критериев из отмеченных выше 4-х групп, осуществляет их свертывание и выделяет обобщенный функционал $I_\Sigma(Y_p, u_p)$, связывающий признаки режима и некоторый набор $\{u_p\}$ управлений. Задачей РУ является коррекция управлений u_p на основе информации комплекса ДПР, выбор адекватной программы из пакетов эталонных программ и передача управляющих последовательностей $u[(k+1)T]$ на формирователь команд кодов (ФКК). Формирователь КК выбирает из прикладного пакета эталонных команд соответствующую комбинацию – серию кодов и передает их на ИУ – электромагнитный актюатор, приводящий в действие топливодозатор ТНВД. Программы, содержащиеся в ПЭП, соответствуют режимам работы двигателя при движении машины в соответствующих дорожных ситуациях.

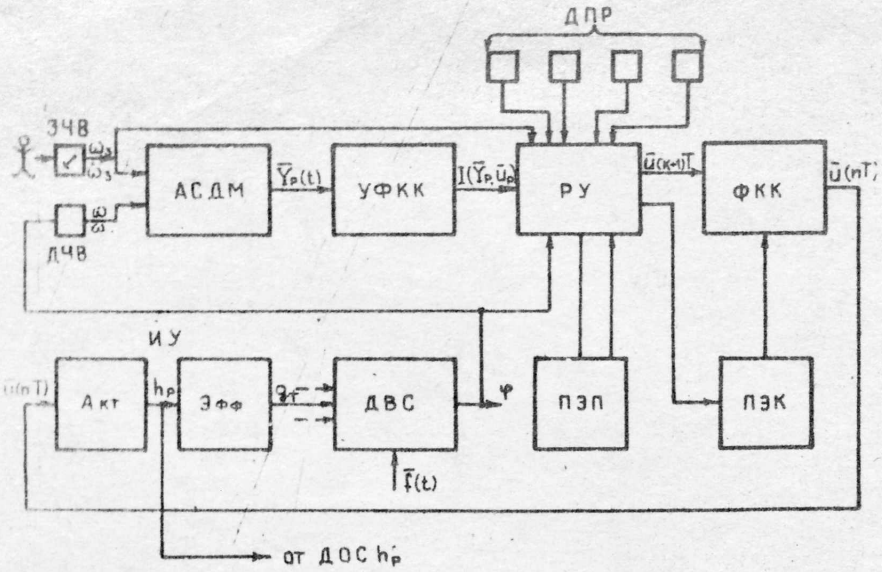


Рис 8.Схема оптимальной системы управления транспортным ДВС

Таблица I

Характеристики актоаторов

Основные параметры актоатора	Для привода рейки ТНВД НЗТА	Для привода рейки ТНВД НЗТА
Располагаемая работоспособность,Дж	0,5	0,5
Необходимая номинальная работоспособность,Дж	0,05	0,I44
Максимальный рабочий ход якоря,мм	5	I2
Максимальное необходимое статическое усилие страгивания рейки,Н	I0	I2
Полное время срабатывания (быстродействие),с	0,020	0,030
Потребляемая мощность в импульсе,Вт	60	I20
Средняя потребляемая мощность,Вт	6...I2	I2...I8
Максимальный импульсный ток,А	5	5
Напряжение питания,В	I2	24

На рисунках 9а, 9б, и 9в приведены подобласти работы транспортного ДВС при наиболее характерных дорожных ситуациях, графы смены режимов работы двигателя при переходе из одной подобласти в другую и соответствующие подпространства управления двигателем путем воздействия на цикловую подачу топлива.

Исследованиями выявлена наибольшая целесообразность полной электронизации ДВС путем создания комплексных многомерных адаптивных систем управления при постепенном внедрении электронных и микропроцессорных средств управления в классические системы и агрегаты двигателя. На основе отдельных положений разработанной концепции оптимального управления двигателем осуществлен ряд макетных и опытно-конструктивных решений аппаратных средств управления различной степени сложности, защищенных авторскими свидетельствами. К ним относятся: устройства на основе фильтра Калмана для оценки текущего состояния двигателя как в режиме нормального функционирования при наличии помех, так и при наличии отказов в каналах измерения; логико-вычислительные и исполнительные устройства систем управления различной степени сложности, включая блоки анализа, процессоры с периферийным оборудованием, актюаторы электромагнитного и электромагнитно-гидравлического действия; устройства для управления углом опережения впрыскивания топлива в зависимости от параметров скоростного, нагрузочного и теплового режимов двигателя, а также от давления и температуры наддувочного воздуха; динамический корректор, изменяющий цикловую подачу топлива в функции от параметров режима двигателя; блок обеспечения устойчивости системы управления.

Во многих управляющих устройствах нашли применение разработанные автором экономичные электромагнитные актюаторы повышенной работоспособности, их характеристики приведены в таблице I.

Аппаратные средства управления проверены на работоспособность и возможность достижения при их применении наиболее приоритетных целей оптимального управления в условиях стендовых, дорожных и внедорожных испытаний автомобилей МАЗ-500, КамАЗ-5320, тракторов МТЗ-80, МТЗ-100. В таблице 2 показаны результаты сравнительных испытаний различных систем управления на стенде по единой программе квазислучайных нагружений.

Анализ результатов комплексных испытаний показал, что аппаратные средства управления двигателями, разработанные на основе принятой концепции управления и выполненные на уровне макетных образцов, позволяют: существенно улучшить экологические показатели тран

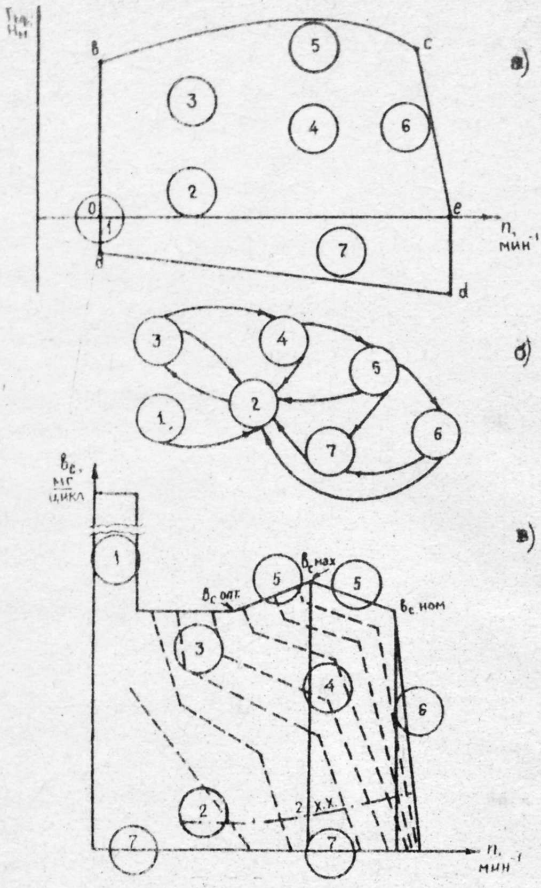


Рис. 9. Подобласти работы и подпространства управления транспортным ДВС

Таблица 2

Статистические эффективные показатели дизеля 4Ч II/I2,5 (Д - 240)

Выходные показатели дизеля / Тип управляющего устройства	Показатель колебательности процесса $\frac{\omega(t)}{M_c}$	Полная вероятность пребывания процесса в зоне $\Delta\omega = 0{,}03$ P_ω	Средняя эффективная мощность $\overline{P_e}$, кВт	Полученная полезная энергия за время $T_и$ A, кВт.ч	Расход топлива: За время испытаний $B_и$, кг	Расход топлива: Часовой $\overline{B_T}$, кг/ч	Средний удельный расход топлива $\overline{b_e}$, г/(квт.ч)	%
Штатный регулятор насоса УТН-5	I,7	0,55	59	9,8	2,62	I5,7	266	I00
УТН-Электрон-I	I,45	0,63	60	I0	2,4I	I4,45	242	92
УТН-Электрон-2	I,3	0,68	60,5	I0,I	2,35	I4,2	234	90
Электрон-3	I,4	0,65	60	I0	2,40	I4,4	24I	92
Электро-гидравлический регулятор	I,6	0,60	59,5	9,9	2,52	I5,2	256	96
Центробежный регулятор с ДЭК	I,I5	0,72	60	I0	2,3I	I3,85	232	88

спортных ДВС, в частности до 40% снизить дымность дизелей на нестационарных и переходных режимах, в особенности, при наличии на дизеле турбокомпрессора; уменьшить средний расход топлива на основных эксплуатационных режимах на 7...12%; улучшить статистические показатели колебательности частоты вращения коленчатого вала; снизить в среднем на 15% минимально-устойчивую частоту вращения холостого хода; увеличить устойчивость и стабилизируемость всей системы управления двигателем как на стационарных, так и на нестационарных режимах его работы.

Установка на центробежные регуляторы устройств компенсации или корректоров, выполненных на базе электромагнитных актюаторов и управляемых с помощью электронных логических блоков, позволяет оптимизировать динамические параметры переходных режимов регулятора, обусловливает существенное, до 15% снижение расхода топлива на этих режимах и уменьшение дымности дизеля на 25-40%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Содержанием диссертации являлось определение путей улучшения основных потребительских качеств транспортных средств за счет оптимизации процессов управления двигателями. Указанная цель достигалась постановкой и решением комплекса взаимосвязанных задач управления, на основании чего были получены следующие результаты:

1. Определены характерные категории режимов и условий функционирования системы управления двигателем транспортного средства. Предложена классификация режимов функционирования двигателя в вероятностном пространстве его состояний. Осуществлена идентификация основных категорий режимов транспортных ДВС.

2. В результате аналитического исследования ДВС как колебательного звена СУ получены функциональные зависимости между долей дополнительных инерционных нагрузок в переходных процессах ,коэффициентом неравномерности угловой скорости и основными параметрами колебательных процессов.

3. Определены условия обеспечения устойчивости системы управления двигателем на стационарных и нестационарных режимах его работы.Показана плодотворность применения критерия абсолютной устойчивости В.М.Попова для анализа и оценки случайных процессов . Предложен подход к определению статистических показателей устойчивости случайных процессов в СУ ДВС. Для количественной оценки запаса устойчивости замкнутой системы в работе введен стохастический показатель колебательности системы , выражаемый через статистические характеристики входных и выходных сигналов.

В результате испытаний систем управления с различными управляющими устройствами выявлены тесные корреляционные связи стохастического показателя колебательности с характеристиками качества функционирования СУ ДВС (точностью ,быстродействием , абсолютной устойчивостью), а также эффективными показателями собственно дизеля. Для трех,испытанных по программам квазислучайных нагружений дизелей, установлены зависимости удельных расходов топлива от значений показателя колебательности.

4. Разработанные автором аппаратные и программные средства на основе теории Р.Калмана и Р.Бьюси позволяют осуществлять динамическую несмещенную оценку непрерывно изменяющихся координат состояния двигателя, функционирующего в условиях нестационарных случайных воздействий при наличии помех. Предложен способ синтеза алгоритмов фильтрации, устойчивых к отказам в каналах измерения. Разработаны и применены при исследованиях методика и аппаратные средства воспроизведения квазислучайных режимов двигателей, статистические параметры которых адекватны характеристикам натурных реализаций. Применен способ оценки колебательности частоты вращения коленчатого вала с применением теории выбросов, основанный на втором уравнении А.Н.Колмогорова для определения плотности распределения оценочных показателей двигателя на макроинтервалах наблюдений.

5. Обоснована идеология управления транспортным двигателем, предполагающая формирование детерминированных и адаптивных стратегий управления, решающих определенный круг частных задач управления, постановка которых определяется ситуацией движения транспортного средства; предложена классификация стратегий управления. Обусловлена целесообразность применения в большинстве ситуаций работы двигателя концепции идентификационного подхода.

6. В результате теоретических исследований установлена возможность применения для решения ситуационных задач оптимального управления двигателем известных в кибернетике аналитических методов: вариационного исчисления, метода динамического программирования Р.Беллмана, принцип максимума Л.С.Понтрягина, математического программирования. Показано, что при рассмотрении двигателя как линеаризированного объекта управления, функционирующего на стационарном режиме, функция Беллмана является функцией Ляпунова, что обусловливает получение оптимального управления, обеспечивающего устойчивые процессы управления и ,главным образом, устойчивость частоты вращения коленчатого вала. В то же время с помощью принципа максимума Понтрягина достигнуто получение более удобных

аналитических выражений для оптимального управления двигателем при минимизации функционалов качества, соответствующих текущему режиму двигателя и ситуации движения машины.

7. Установлено, что при синтезе оптимального по быстродействию управления в зависимости от располагаемого времени целесообразно применение законов, обеспечивающих разомкнутое управление, или законов, формируемых в соответствии с принципом максимума в виде нелинейной зависимости координат управления от координат состояния двигателя. При этом структура оптимального по быстродействию управляющего устройства определяется аналитическим выражением функции переключения.

8. Сформулированы общие принципы аппаратного решения и ориентации логико-вычислительных устройств для требуемого круга задач управления двигателем. Обоснована концепция синтеза управляющего устройства системы управления транспортным двигателем, в полной мере реализующего задачи оптимального управления. Доказана перспективность пути всеобъемлющей электронизации ДВС, создания комплексных адаптивных систем электронного управления всеми агрегатами двигателя, разработки специальных конструкций двигателей, полностью приспособленных для размещения в них элементов управляющих устройств. В то же время, при современном уровне развития техники, допускается существование альтернативной идеологии постепенного внедрения электронных и микропроцессорных средств управления в классические системы и агрегаты двигателя с целью повышения гибкости регулирования этих систем и более полной адаптации двигателя к стохастическим переменным режимам работы.

9. На основе отдельных положений разработанной концепции оптимального управления двигателем осуществлен ряд макетных и опытно-конструкторских решений средств управления различной степени сложности, защищенных авторскими свидетельствами. Разработанные средства управления проверены на работоспособность и возможность достижения при их применении наиболее важных целей оптимального управления в условиях стендовых, дорожных и внедорожных испытаний двигателей тракторов и автомобилей. Применение предложенных управляющих устройств позволяет улучшить экологические и топливно-экономические показатели транспортных ДВС: до 40% снизить дымность дизелей на нестационарных и переходных режимах; уменьшить средний расход топлива на основных эксплуатационных режимах на 7...12%; улучшить статистические показатели колебательности частоты вращения коленчатого вала; снизить в среднем на 15% мини-

мально-устойчивую частоту вращения холостого хода; увеличить устойчивость и стабилизируемость всей системы управления двигателем.

Установка на центробежные регуляторы корректоров, выполненных на базе электромагнитных актюаторов и управляемых с помощью электронных логических блоков, позволяет оптимизировать динамические параметры переходных режимов регулятора, обусловливает существенное, до 15% снижение расхода топлива на этих режимах и уменьшение дымности дизеля на 25...40%.

Анализ результатов проведенной исследовательской работы, а также изучение и экстраполяция тенденций развития систем управления ДВС транспортных средств приводит к следующему заключению. Высокие потенциальные возможности современных технических средств автоматики, электронной аппаратурной и элементной базы, микропроцессорных средств могут быть в достаточной мере эффективно использованы в управляющих системах транспортных ДВС лишь при наличии достаточно полного рационального математического и научного обеспечения решений тактических и оптимизационных задач управления.

Предложенная в работе научная концепция ,а также ряд разработанных аппаратных и алгоритмических решений будут способствовать достижению целей улучшения тактико-технических качеств транспортных средств за счет оптимизации управления ДВС.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ленин И.М., Покровский Г.П., Федоров П.В. Аппаратура для электронного управления впрыском топлива // Автомобильный транспорт. - 1964.- № 8. - С.40-42.

2. Ленин И.М., Покровский Г.П., Федоров П.В. Применение средств электроники для дозирования топлива // Автомобильная промышленность.- 1965.- № 3. - С. 18-21.

3. Федоров П.В. Переносной прибор измерения мощности мотора // Автомобиль: Чешск. - 1964.- № 10.- С. 15.

4. Федоров П.В., Лайок В.В. Эксплуатационный метод определения экономичности карбюраторного двигателя.- М.:ГОСИНТИ,1965.-8с.

5. Федоров П.В., Самоль Н.Г. Прибор для измерения работы, затраченной карбюраторным двигателем. М.:ГОСИНТИ, 1965.- 9с.

6. Федоров П.В. Новое о приборах системы питания. // Автомобильный транспорт.- 1968.- № 1. - С.62.

7. Федоров П.В., Самоль Н.Г. Режимометр для дорожных испытаний карбюраторного двигателя // Автомобильная промышленность. - 1967.- № 1- С.17-19.

8. Федоров П.В., Хорошенков В.К., Клоков А.Н. Системы контроля режимов тракторных дизелей // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1981. - № 3.- С. 42-44.

9. Федоров П.В. Система управления режимами работы тракторного дизеля // Межвуз. сб. науч.тр. - М.,1 151.- 1978.С.137-140.

10. Федоров П.В. Система стабилизации скорости МТА //Сб. докл. "Проблемы кибернетики в с/х производстве".- Одесса.- 1979. - С. 138-139.

11. Федоров П.В. Использование результатов исследований при проектировании автоматических систем регулирования скорости машинно-тракторных агрегатов // Межвуз.сб.научн.тр.- М.1981.-С.136.

12. Федоров П.В. Синтез электронных регуляторов частоты вращения тракторных дизелей //Автоматизация производственных процессов в растениеводстве: Тез.докл.Всесоюзн.науч.-техн.совещания.- Каунас.- 1982. - С. 67-68.

13. Федоров П.В. Система электронного управления топливоподачей дизеля // Механизация и электрификация с/х-ва.- 1981. -№ 7. - С. 55-57.

14. Федоров П.В. САУ тракторного дизеля с электронным управлением //Повышение топливной экономичности и долговечности автомобильных и тракторных двигателей: Межвуз.сб.науч.тр. МАМИ М.,1982. - С. 163-167.

15. Федоров П.В. Электронное управление подачей топлива // Автомобильный транспорт.- 1983.- № 7. - С. 48-50.

16. Федоров П.В. Исследование микропроцессорного управляющего устройства режимами работы дизеля: Тез.докл.Всесоюзн.науч.-техн. конференции.- М.- Рига.-1985. -С. 23-24.

17. Федоров П.В. Способ определения загрузки двигателей. // Влияние технического обслуживания на долговечность сельскохозяйственной техники: Межвуз.сб.научн.тр. - М.,1985.- С. 88-90.

18. Крутов В.И.,Федоров П.В. Тенденции развития электронных систем управления транспортных дизелей //Двигателестроение.- 1985.- № 11.- С. 17-18.

19. Крутов В.И.,Федоров П.В.,Кудрявцев В.Г.,Павлов В.А.

Электронные устройства управления скоростными режимами транспортных дизелей // Двигателестроение.- 1986.- № 4.- С. 35-37.

20. Федоров П.В.,Клоков А.Н,,Межеумов В.М. Разработка средств оценки энергозатрат тракторных дизелей // Автоматизация технологических процессов на базе микропроцессоров и микроЭВМ: Сб.научн.тр. ВИМ.- т.114, 1987. С. 16-20.

21. Федоров П.В. Шегалов И.Л. Автоматизация стендовых испытаний ДВС с вероятностной программой нагружений // Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюзн.науч.-техн.конф.МВТУ им.Н.Э.Баумана.-М.,1987.-С.183.

22. Федоров П.В. Определение энергозатрат тракторных дизелей // Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания: Тез.докл.Всесозн.науч.-техн.конф.МВТУ им. Н.Э. Баумана. - М. 1987.- С.143.

23. Крутов В.И.,Федоров П.В. Анализ функциональных схем устройств электронного управления транспортных двигателей // Двигателестроение.- 1988.- № 6.- С. 14-16.

24. Федоров П.В. Исследование процесса колебаний частоты вращения коленчатого вала дизеля // Двигателестроение.- 1988.- С. 54.

25. Федоров П.В. Бортовые средства оценки энергозатрат автотракторных двигателей // Двигателестроение.- 1988.-№9.-С. 26-18.

26. Федоров П.В. Постановка задач оптимального управления транспортным двигателем // Автомобильные и тракторные двигатели: Межвуз.сб.научн.работ МАМИ.- вып.10.- 1990.- С. 101-107.

27. Федоров П.В.,Федорова Е.Н. Концептуальные основы выбора стратегии управления транспортными двигателями // Эксплуатация и ремонт сельскохозяйственной техники: Межвуз.сб.научн.тр.М.- 1990. - С. 18-27.

28. Федоров П.В. Теоретическое обоснование алгоритмов функционирования микропроцессорных устройств оценки энергозатрат дизелей //Эксплуатация и ремонт с/х техники: Межвуз.сб.науч.тр. М. - 1990. - С. 53-62.

29. Федоров П.В. Теоретические вопросы оптимального управления транспортным двигателем // Автомобильные и тракторные двигатели: Межвуз.сб.науч.тр.МАМИ,вып.12.- 1993.-С. 80-87.

и изобретениях:

1. А.с. №79121 СССР, МПК F02. Карбюратор с электронным управлением для двигателей внутреннего сгорания / Федоров П.В.,Покров-

ский Г.П.,Ленин И.М. //Открытия.Изобретения.Пром.образцы.Товарн. знаки.- 1964. - № 4.- С.110.

2. А.с. 716886 СССР,М.Кл. В60К31/00. Стабилизатор скорости движения транспортного средства / Федоров П.В.// Открытия.Изобретения.Пром.образцы.Товарн.знаки.- 1977.- № 7.- С.88.

3. А.с. 979911 СССР, М.Кл. 01 3/24. Устройство для контроля и регулирования загрузки дизеля/ Федоров П.В.// Открытия. Изобретения. Пром.образцы. Товарн.знаки.- 1982.- № 42.- С.140.

4. А.с. 992773 СССР, М.Кл. F02 31/00. Регулятор скорости дизеля/ Крутов В.И.,Федоров П.В.,Кудрявцев В.Г.,Павлов В.А.// Открытия. Изобретения. Пром.образцы. Товарн.знаки.- 1983.- № 4. - С.82.

5. А.с. 1086199 СССР, М.Кл. F 02 1/18. Устройство для регулирования угла опережения впрыскивания топлива насосом высокого давления дизеля / Крутов В.И.,Федоров П.В.,Кудрявцев В.Г., Павлов В.А. // Открытия. Изобретения. Пром.образцы. Товарн.знаки.- 1984.- № 14.- С.24.

6. А.с. 1404848 СССР, М.Кл. 013/24. Устройство для контроля регулирования загрузки дизеля /Федоров П.В.,Хорошенков В.К., Клоков А.Н.// Открытия. Изобретения. Пром.образцы. Товарн.знаки. - 1986. - № 23.- С.88.

7. А.с. 1430572 СССР, М.Кл. F02 41/16. Устройство для регулирования частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания/ Федоров П.В.,Шефатова В.М.,Межеумов В.М. //Открытия.Изобретения. Пром.образцы. Товарн.знаки.- 1986.- №38.- С.32.

Подписано в печать 10.03.94 . 2 п.л.

Заказ 94 Тираж 100 экз.

Тип. МВТУ им. Н.Э. Баумана