

На правах рукописи

Бурцев Никита Владимирович

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ГАЗОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ  
НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(промышленность)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рыбинск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева».

Научный руководитель	кандидат технических наук, профессор Комаров Валерий Михайлович
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор Хрящев Юрий Евгеньевич
	кандидат технических наук, профессор Мотайленко Лилия Владимировна
Ведущая организация	ГНЦ ФГУП «НАМИ», г. Москва

Защита состоится 30 июня 2010 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.04 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева» по адресу: 152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева».

Автореферат разослан « 27 » мая 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета \_\_\_\_\_ Конюхов Б. М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время все большее распространение получает применение различных газов в качестве моторного топлива для транспортных средств и автономных энергетических установок. Это обусловлено и экономическими (относительно низкой ценой газового топлива и достаточно высокой его доступностью на местах добычи полезных ископаемых) и экологическими факторами (в частности, существенным снижением содержания вредных веществ в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания).

Однако алгоритмы, используемые в настоящее время в управлении газовыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС), не позволяют достигать требуемого качества переходных процессов (для электроагрегатов) и ездовых качеств (для автомобилей). В связи с этим задача исследования математических моделей двигателя с целью разработки новых, улучшенных алгоритмов, является актуальной.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям вопросов управления двигателями внутреннего сгорания (в том числе и газовыми) посвящены работы В. И. Крутова, Е. И. Блаженнова, Ю. Е. Хрящева, А. С. Тюфякова, А. К. Гирявца, Ф. И. Пинского. Стоит отметить и недавние диссертационные работы Ю. А. Баркова, С. А. Мигуша, Д. Н. Герасимова и И. Г. Шишлова, посвященные совершенствованию систем управления различными ДВС.

Проведенный анализ типовых современных систем управления газовыми двигателями выявил следующие особенности. Для газовых двигателей автотранспортных средств характерно следующее:

- применяемые на большегрузных автомобилях и автобусах системы управления газовыми двигателями работают в основном на всережимном или двухрежимном типе регуляторов частоты вращения (РЧВ) коленчатого вала двигателя (КВД). Оба типа регуляторов имеют недостатки, достаточно подробно описанные в работах Блаженнова Е. И. и Хрящева Ю. Е., заключающиеся в том, что они не обладают требуемой универсальностью, обеспечивающей ездовые качества и комфортность управления транспортным средством как в городских условиях с плотным движением, частыми остановками, так и на шоссе;

- двигатели транспортных средств, работающие на сверхбедных смесях (например, газородные, работающие на смеси метана и водорода – гайтана), обеспечивают отличные показатели по экологии и экономии топлива, но ни с одним видом известных РЧВ не позволяют достичь приемлемой динамики движения транспортного средства.

Наиболее широко известные в России системы управления газовыми двигателями различной мощности для электроагрегатов обеспечивают выполнение требований ГОСТ 10511–83 по качеству регулирования частоты вращения ДВС не выше 3–4 класса точности при возрастающей потребности в электроагрега-

тах, системы автоматического регулирования частоты (САРЧ) которых должны обеспечивать точность не ниже 2 класса.

Таким образом, существует необходимость в разработке таких структур и алгоритмов, которые обеспечивали бы для газового двигателя, работающего на транспортном средстве, реализацию оптимальных характеристик регулирования, а для электроагрегатов на газовых двигателях – улучшение качеств регулирования частоты вращения для соответствия требованиям 1 или 2 класса точности.

**Цели и задачи исследования.** Цель исследований заключается в совершенствовании систем управления газовыми ДВС путем разработки математической модели газового двигателя, которая позволила бы реализовать адаптивные алгоритмы управления частотой вращения коленчатого вала двигателя с целью улучшения качества переходного процесса и точности поддержания частоты вращения КВД в установившемся режиме до 1 или 2 класса точности, а также ездовых качеств автомобиля. Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

- провести системный анализ способов подачи топлива в двигатель, методик управления, применяемых в газовых ДВС, разработать способ управления газовым ДВС, сочетающий в себе использование как метода табличного выражения функций, так и адаптивных алгоритмов;
- разработать математические модели газового ДВС и статических характеристик двигателя, ориентированные на синтез адаптивных алгоритмов управления;
- разработать вычислительные структуры и алгоритмы адаптивного управления частотой вращения газового ДВС;
- с учетом разработанных математических моделей, алгоритмов и структур усовершенствовать цифровой имитатор газового ДВС;
- провести экспериментальные исследования разработанных алгоритмов как на имитаторе газового ДВС, так и непосредственно на газовых двигателях (на электроагрегате АП-100 и автомобиле «Соболь»).

**Методы исследования** базируются на применении системного анализа, теории автоматического управления, методов планирования эксперимента, интерполяции и аппроксимации, статистической обработки экспериментальных данных, матричного и дифференциального исчисления; математического, цифрового и имитационного моделирования с применением метода пространства состояний для описания системы управления газовым двигателем. Усредненная математическая модель газового двигателя разработана на основе экспериментально полученных в ООО «Газомотор-Р» характеристик газовых модификаций двигателей ЗМЗ-40522.10 и ЯМЗ-831.10.

Достоверность основных результатов работы подтверждается совпадением результатов экспериментальных исследований разработанных алгоритмов в

составе систем управления двигателями ЗМЗ-40522.10 на автомобиле «Соболь» и ЯМЗ-831.10 в составе автономной энергетической установки АП-100 с результатами теоретических исследований.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель газового двигателя, ориентированная на синтез алгоритмов адаптивного управления;
- предложен способ управления газовым двигателем внутреннего сгорания, основанный на использовании таблиц оптимальных значений параметров двигателя с применением методов адаптивного управления;
- разработаны структуры и алгоритмы самонастраивающейся системы адаптивного управления частотой вращения коленчатого вала двигателя, позволяющие в рамках классического ПИД-регулятора частоты вращения (ЧВ) оперативно изменять параметры работы двигателя, обеспечивая существенное улучшение качеств переходного процесса в электроагрегатах, а именно: уменьшение длительности переходного процесса до 2...3 с, снижение заброса частоты вращения коленчатого вала двигателя при ступенчатом изменении нагрузки до 5...7 % и неустойчивости частоты вращения в установившемся режиме до 0,8...1 %, а также позволяющие реализовать оптимальный регулятор частоты вращения на базе классического всережимного регулятора.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1) способ управления газовым двигателем, основанный на сочетании табличного способа управления и использования адаптивных алгоритмов;
- 2) математическая модель газового двигателя внутреннего сгорания, ориентированная на синтез алгоритмов адаптивного управления;
- 3) алгоритмы самонастраивающейся системы управления газовым двигателем внутреннего сгорания, обеспечивающие адаптивное управление частотой вращения коленчатого вала газового двигателя внутреннего сгорания и изменение статизма регуляторных характеристик.

**Практическая значимость и реализация полученных результатов.** Результаты работы, а именно адаптивные алгоритмы управления частотой вращения коленчатого вала двигателя, применены в совместных работах ООО «Газомотор-Р» с ОАО «Автодизель» (при разработке системы управления газопоршневым электроагрегатом АП-100 с двигателем ЯМЗ-831.10) и с ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ» (при разработке системы управления газовой модификацией автомобиля «Соболь» с двигателем ЗМЗ-40522.10, работающего на смеси природного газа (метана) и водородосодержащего газа).

**Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались на научных конференциях:

- 65-я международная научно-техническая конференция Ассоциации автомобильных инженеров «Автомобиль и окружающая среда», г. Дмитров, 2008 г.;

- 66-я международная научно-техническая конференция Ассоциации автомобильных инженеров «Автомобиль и окружающая среда», г. Дмитров, 2009 г.;

- VII Международный автомобильный научный форум (МАНФ), г. Москва, 2009 г.

### **Публикации.**

Материалы диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах, в т. ч. 3 – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов научных исследований.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, приложения и список использованных источников, насчитывающий 80 наименований. Основная часть работы изложена на 157 страницах печатного текста. В работе содержится 61 рисунок, 19 таблиц и 3 приложения.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

**В первой главе** проведено исследование существующих систем топливоподачи в газовых двигателях, анализ методов управления, применяемых в системах управления газовыми двигателями, анализ существующих математических моделей газовых двигателей, приведена общая структура системы управления газовым двигателем.

Проведено экспериментальное исследование существующих систем управления газовыми ДВС, работающими в составе автономных энергетических установок. Исследование проводилось на разработанной в ООО «Газомотор-Р» микропроцессорной системе управления (МПСУ) двигателем ЯМЗ-831.10, в основе которой лежит САРЧ с классическим ПИД-регулятором ЧВ. При исследовании данной МПСУ на автономной энергетической установке АП-100 было установлено, что при ступенчатом набросе нагрузки на двигатель длительность переходного процесса САРЧ составляет 5,5 секунд, заброс частоты вращения равен 15 %. Согласно требованиям ГОСТ 10511–83, данная САРЧ соответствует самому низкому 4 классу точности, что не удовлетворяет современным условиям и требованиям, предъявляемым к стационарным установкам, поставляемым на российский и международный рынок.

При проведении исследования с целью улучшения показателей переходного процесса был увеличен коэффициент усиления  $K_{\Pi}$  пропорционального звена ПИД-регулятора ЧВ. За счет этого при тех же условиях эксперимента длительность переходного процесса уменьшилась до 2,5 секунд, заброс частоты

вращения уменьшился до 4,5 %, что соответствует 2 классу точности. Однако, при этом наблюдалась нестабильность ЧВ – автоколебания в диапазоне до 3 %, что не удовлетворяет требованиям даже 4 класса точности.

В таблице 1 приведены основные характеристики рассмотренных систем управления газовыми ДВС.

Таблица 1

## Сравнение показателей систем управления

Характеристика	Базовая система (4 класс точности)	Базовая система с увеличенными коэффициентами (3 класс точности)	Требования ГОСТ по 2 классу точности	Требования ГОСТ по 1 классу точности
Нестабильность ЧВ в установившемся режиме	0,8...1 %	<b>2...3 %</b>	0,8...1 %	0,6...0,8 %
Заброс ЧВ при ступенчатом изменении нагрузки	<b>15 %</b>	4,5 %	7,5 %	5,0 %
Длительность переходного процесса	5...6 с	4...5 с	3 с	2 с

Проанализировав полученные значения, можно сделать вывод о том, что имеющаяся базовая система не удовлетворяет современным требованиям по длительности переходного процесса, нестабильности ЧВ в установившемся режиме и забросу ЧВ при переходном процессе. Для достижения требований 1 и 2 классов точности по ГОСТ 10511–83 необходимо значительное улучшение всех показателей как переходного процесса, так и работы системы в установившемся режиме. Одним из возможных вариантов решения этой задачи является применение адаптивного управления при регулировании частоты вращения КВД.

В исследованиях по повышению экологических и экономических показателей газового двигателя ЗМЗ-40522.10, проводимых ООО «Газомотор-Р» совместно с заводом-изготовителем двигателя (ОАО «ЗМЗ»), было установлено, что возможна нормальная работа двигателя при сверхбедной топливовоздушной смеси ( $\lambda = 1,8$ ) без потери крутящего момента. Однако, динамика двигателя при использовании типового двухрежимного регулятора значительно ухудшилась, что отрицательно повлияло на ездовые качества автомобиля. В связи с этим возникла необходимость реализации оптимального регулятора, совмещающего в себе особенности двухрежимного и всережимного регулятора. Теоретические характеристики подобного оптимального регулятора ЧВ предложены в работах Блаженнова Е. И. и Хрящева Ю. Е.

Для реализации данных оптимальных характеристик необходимо в процессе работы двигателя изменять статизм регуляторных характеристик в широком диапазоне. Для этого следует разработать регулятор частоты вращения, обеспечивающий выполнение следующей зависимости между положением педали газа, крутящим моментом и частотой вращения двигателя:

$$\omega_3^* = \omega_3 \cdot \left( 1 + S \cdot \left( 1 - \frac{M_\phi}{M_{max}} \right) \right), \quad (1)$$

где  $\omega_3^*$  – новое заданное значение частоты вращения КВД с учетом статизма, об/мин;  $\omega_3$  – заданное значение частоты вращения КВД, об/мин;  $S$  – статизм регуляторной характеристики,  $M_\phi$  – фактический момент нагрузки, Н·м;  $M_{max}$  – максимально возможный момент нагрузки, Н·м.

На основании проведенных исследований существующих систем управления газовым ДВС были сформулированы общие задачи управления газовым двигателем и конкретные задачи, которые требуется решить в данной работе. Для совершенствования системы управления газовым ДВС необходимо усовершенствовать ПИД-регулятор ЧВ путем обеспечения возможности адаптивного изменения его коэффициентов как функции изменения относительной нагрузки. Это обеспечит улучшение качества переходного процесса и стабильности ЧВ в установившемся режиме.

**Во второй главе** разработана математическая модель газового двигателя, сочетающая в себе достоинства существующих моделей и ориентированная на решение задачи построения системы адаптивного управления с учетом особенностей рабочего процесса газового двигателя. На рис.1 приведено формализованное представление системы управления газовым ДВС, отражающее основные параметры работы двигателя – потоки воздуха  $\mu_m$  и топлива  $\mu_{fi}$  в двигатель, угол открытия (положение) дроссельной заслонки  $\phi$ , крутящий момент  $M_{кр}$ , частоту вращения коленчатого вала двигателя  $\omega$ , давление во впускном коллекторе  $P_m$ , измеренное по датчику избыточного кислорода ( $\lambda$ -зонду) соотношение воздух-топливо  $\lambda$ .

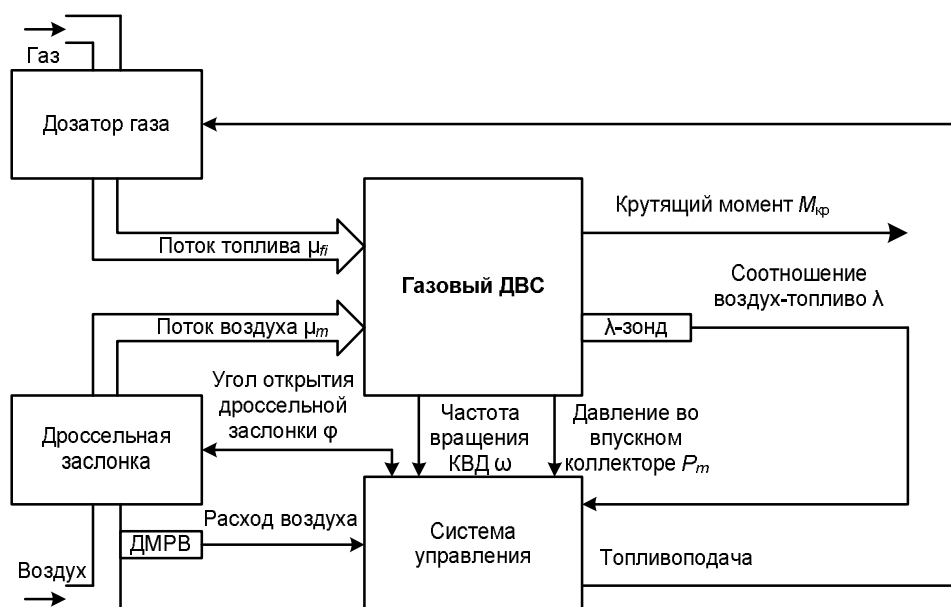


Рис. 1. Формализованное представление системы управления газовым двигателем внутреннего сгорания



В качестве основы математической модели газового ДВС были использованы известные математические соотношения для инжекторного двигателя (2–4), предложенные в работах Никифорова В. О., Мигуша С. А., Герасимова Д. Н. Эти формулы описывают поток воздуха через дроссельную заслонку (ДЗ), давление во впускном коллекторе и динамику датчика кислорода.

Зависимость потока воздуха через ДЗ  $\mu_m(\varphi, P_m)$ , кг/с, от угла поворота заслонки  $\varphi$ , рад, и давления во впускном коллекторе  $P_m$ , Па, может быть выражена как

$$\mu_m(\varphi, P_m) = \eta_t \cdot f_1(P_m) \cdot f_2(\varphi), \quad 0 \leq \eta_t \leq 1, \quad (2)$$

где функции  $f_1(P_m)$  и  $f_2(\varphi)$  – нелинейные зависимости, характеризующие поток воздуха через единицу площади сечения и текущую площадь сечения ДЗ соответственно;  $\eta_t$  – коэффициент эффективности заполнения впускного коллектора.

Аналитическое выражение для определения давления во впускном коллекторе имеет вид:

$$\dot{P}_m = \frac{RT_m}{V_m M} \mu_m(\varphi, P_m) + \frac{RT_m}{V_m M} \mu_c(\omega, P_m), \quad (3)$$

где  $P_m$  – давление во впускном коллекторе, Па;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T_m$  – температура во впускном коллекторе, К;  $V_m$  – объем впускного коллектора, м<sup>3</sup>;  $M$  – молярная масса, кг/моль;  $\omega$  – частота вращения коленчатого вала двигателя, с<sup>-1</sup>;  $\mu_m(\varphi, P_m)$  – поток воздуха через дроссельную заслонку, кг/с;  $\mu_c(\omega, P_m)$  – поток топлива в цилиндр, кг/с;  $\varphi$  – угол открытия дроссельной заслонки, рад.

Динамика датчика кислорода (т. н. « $\lambda$ -зонда») определяется выражением:

$$T_s \dot{\lambda}_s + \lambda_s = \lambda(t - \tau_s), \quad (4)$$

где  $T_s$  – константа, определяющая задержку измеренного сигнала во времени;  $\lambda_s$  – измеренное значение соотношения реального количества воздуха к необходимому;  $\lambda(t - \tau_s)$  – непосредственное значение соотношения реального количества воздуха к необходимому.

Для дальнейшего развития математической модели, адекватно описывающей процессы, происходящие в газовом двигателе, в данной диссертационной работе были получены выражения (5–6) для соотношения воздух-топливо в цилиндре и крутящего момента двигателя.

Соотношение воздух-топливо в цилиндре  $\lambda$  может быть представлено в следующем виде:

$$\lambda = \frac{\mu_{ac}}{F_s \cdot \mu_{fc}} = P_m \omega \frac{\eta_c V_d M}{F_s N_c \pi R T_m} \cdot \frac{1}{\mu_{fc}}, \quad (5)$$

где  $\mu_{ac}$  – поток воздуха в цилиндр, кг/с;  $\mu_{fc}$  – поток газа в цилиндр, кг/с;  $F_s = 9,5$  – стехиометрическое соотношение по массе для метана;  $V_d$  – вытесняемый объем цилиндра;  $N_c$  – число цилиндров.

Выражение для крутящего момента двигателя  $M_{кр}$ , Н·м, имеет вид

$$M_{кр} = \frac{F_s \cdot \pi \cdot R^2 \cdot T_m^2 \cdot M^2 \cdot g_e}{\gamma_T \cdot \eta_c \cdot V_d \cdot P_m \cdot V_m} \eta_f(\omega), \quad (6)$$

где  $\gamma_T$  – плотность топлива;  $g_e$  – удельный расход топлива (индивидуально для каждого двигателя);  $\eta_f(\omega)$  – функция, определяющая эффективность преобразования энергии.

На основе выражений (2–6) была разработана математическая модель газового ДВС. Эта модель представляет собой систему уравнений (7-11) в пространстве состояний.

Разработанная математическая модель газового ДВС в пространстве состояний обеспечивает описание преобразования управляющих воздействий (угол поворота дроссельной заслонки  $u_1 = \varphi$ ; поток топлива, подаваемого в цилиндр,  $u_2 = \mu_{fi}$ ) через переменные состояния (частота вращения КВД  $x_1 = \omega$ , давление во впускном коллекторе  $x_2 = P_m$ ) в выходные величины (соотношение воздух/топливо в цилиндре  $y_1 = \lambda$ , крутящий момент  $y_2 = M_{кр}$ ):

$$\dot{x}_1 = -a_1 x_1 + b_{11} x_1 x_2 - b_{12} \delta_1(t), \quad (7)$$

$$\dot{x}_2 = -a_2 x_1 x_2 + b_2 f_1(x_2) f_2(u_1), \quad (8)$$

$$y_1 = c_1 x_1 x_2 / u_2, \quad (9)$$

$$y_2 = d_1 u_2 f_3(x_1), \quad (10)$$

$$\dot{z}_1 = f_1(y_1(t - \tau_s) - z_1), \quad (11)$$

где  $f_3(x_1) = \eta_f(x_1) = 1 - k_3 e^{-k_4 x_1}$ .

Крутящий момент  $y_2 = M_{кр}$  определяется величиной цикловой подачи топлива  $u_2 = \mu_{fi}$  и частотой вращения КВД  $x_1 = \omega$ . Соотношение воздух-топливо в цилиндре  $y_1 = \lambda$  определяется положением дроссельной заслонки  $u_1 = \varphi$ , частотой вращения КВД  $x_1 = \omega$ , потоком топлива в цилиндр  $u_2 = \mu_{fi}$ . На эти величины оказывают влияние и параметры, приведенные в таблице 2.

Представление математической модели газового ДВС в пространстве состояний по сравнению с классическим представлением ДВС в виде структурной схемы является оптимальным для синтеза алгоритмов адаптивного управления.

На основе математической модели газового двигателя разработаны математические модели, отражающие статические характеристики газового двигателя – зависимость крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала двигателя и положения дроссельной заслонки (скоростная характеристика), а также зависимость давления во впускном коллекторе от частоты вращения коленчатого вала двигателя и положения дроссельной заслонки, на основе данных моделей построен график скоростной характеристики, приведенный на рис. 7 совместно с графиком внешней скоростной характеристики, снятой с реального газового ДВС.

Проведен анализ статических и динамических ошибок по состоянию объекта и выходному сигналу, разработана структурная схема и математическая модель адаптивного ПИД-регулятора ЧВ (рис. 2).

Таблица 2

Параметры математической модели  
газового двигателя  
в пространстве состояний

Параметр	Формула для расчета
$a_1$	$c_\omega / J$
$a_2$	$\eta_c V_d / N_c \pi V_m$
$b_{11}$	$C_M \eta_c V_d / N_c \pi J R T_m$
$b_{12}$	$1 / J$
$b_2$	$\eta_t R T_m / V_n$
$c_1$	$F_s N_c \pi R^2 T_m^2 M^2 / \eta_c V_d V_m$
$d_1$	$N_c \gamma_\tau / g_e$

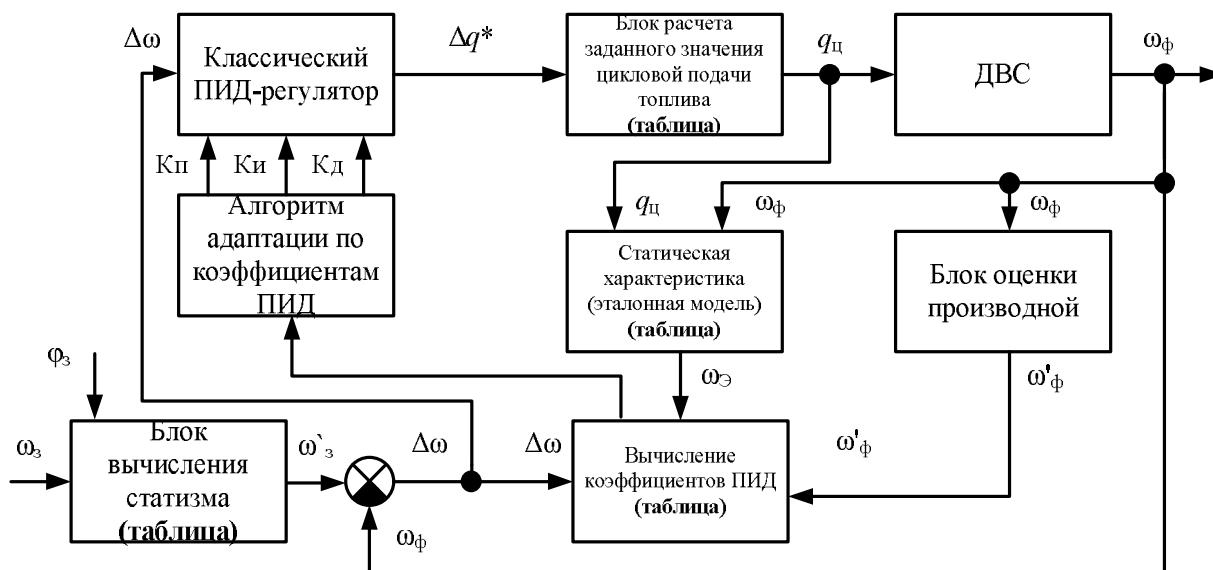


Рис. 2. Структурная схема адаптивного регулятора частоты вращения

В третьей главе показано, что при ограничениях, обусловленных особенностями работы ДВС, оптимальное управление обеспечивается при использовании табличного способа управления, когда текущие значения функций вычисляются путём интерполяции по заранее сформированным таблицам. Рассмотрены основные методы интерполяции, обоснована применимость алгоритма кусочно-линейной интерполяции. Разработаны алгоритмы и вычислитель-

ные структуры для реализации адаптивного регулятора.

На рис. 3 представлен разработанный алгоритм адаптивного управления с изменением коэффициентов ПИД-регулятора ЧВ при скачкообразном изменении нагрузки. Суть работы данного алгоритма состоит в том, что при превышении заданного порогового значения изменения момента нагрузки  $\Delta M_H$  производится изменение коэффициентов ПИД-регулятора ЧВ. По окончании некоторого временного промежутка, характеризующего начало завершающей стадии переходного процесса и определяемого индивидуально для каждого двигателя, производится возврат коэффициентов к исходным значениям.

На рис. 4 изображен разработанный алгоритм изменения статизма регуляторных характеристик, обеспечивающий реализацию оптимального регулирования автомобильным газовым ДВС. Вычисление текущего значения статизма  $S = f(\omega, \varphi)$  производится по таблице при помощи алгоритма интерполяции. Превышение порогового значения частоты вращения  $\omega_{II}$  является условием для передачи управления в алгоритм работы двухрежимного РЧВ.

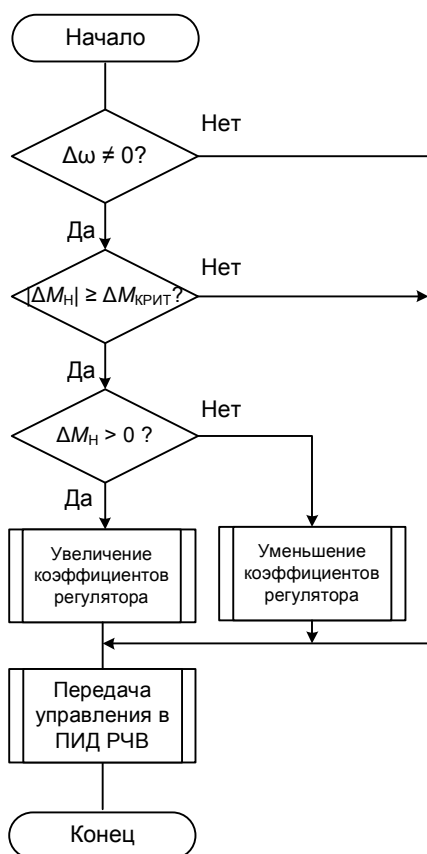


Рис. 3. Алгоритм адаптивного изменения коэффициентов регулятора при скачкообразном изменении нагрузки

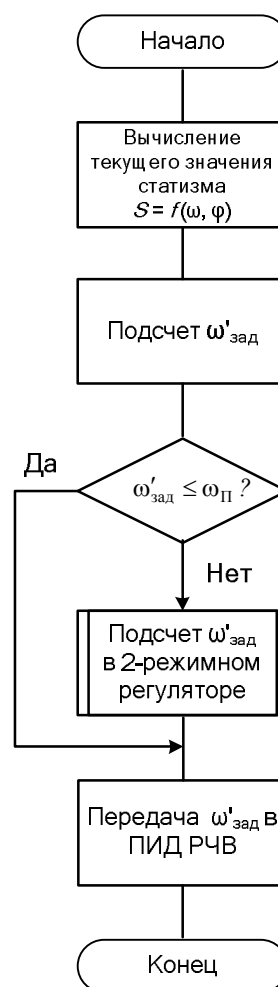


Рис. 4. Алгоритм адаптивного изменения статизма регуляторных характеристик

На рис. 5 приведена структурная схема подсистемы, обеспечивающей оптимальное регулирование газовым ДВС путем изменения статизма его регуляторных характеристик. Значение статизма на каждом цикле работы двигателя вычисляется из таблично заданной функции, отражающей зависимость статизма от заданной частоты вращения  $\omega_3$  и положения педали газа  $S = f(\omega, \varphi)$ .

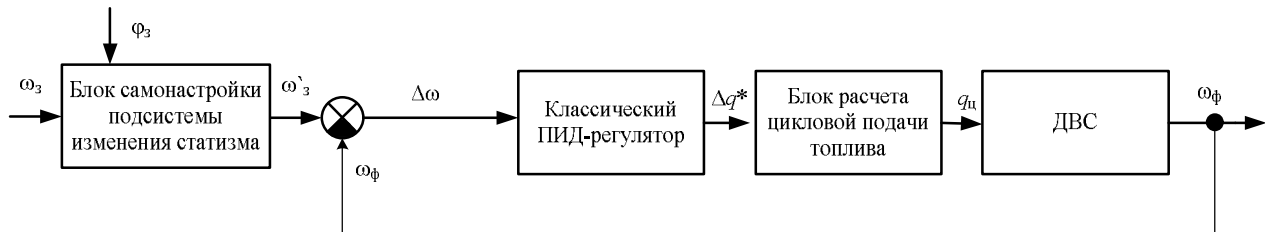


Рис. 5. Структурная схема подсистемы управления статизмом регуляторных характеристик газового двигателя внутреннего сгорания

Новое значение задания частоты вращения КВД  $\omega_3^*$ , вычисленное блоком самонастройки по формуле (1), подаётся на вход ПИД-регулятора частоты вращения. Тем самым достигается изменение статизма без изменения характеристик непосредственно ПИД-регулятора ЧВ.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию полученных теоретических результатов. Основные структуры и алгоритмы проверены на имитаторе газового двигателя, разработанном в данной работе. Полученные в ходе проверки результаты свидетельствуют об адекватности предложенных моделей и устойчивости разработанной системы, что позволяет без значительных корректировок проверить систему непосредственно на газовом ДВС.

На рис. 6 изображены графики переходного процесса при скачкообразном изменении нагрузки, полученные с применением разработанных в данной работе адаптивных алгоритмов РЧВ в ходе моделирования и экспериментально – на электроагрегате АП-100 с газовым двигателем ЯМЗ 831.10. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 5 %.

На рис. 7 изображен график внешней скоростной характеристики (ВСХ) газового двигателя ЗМЗ-40522.10. Пунктирной линией показана характеристика, построенная по математической модели, сплошной – полученная экспериментально.

При использовании разработанных алгоритмов удалось достичь показателей второго класса точности по требованиям стандарта, а именно: заброс ЧВ при ступенчатом изменении нагрузки составляет 5,9 % при сбросе нагрузки и 6,8 % при набросе нагрузки, максимальная длительность переходного процесса составляет 2,9 с. Кроме того, при работе с адаптивными алгоритмами неустойчивость частоты вращения составляет 0,8...1,0 %, что также удовлетворяет требованиям ГОСТ 10511–83 по второму классу точности.

Результаты, полученные при испытаниях разработанных алгоритмов в

МПСУ двигателем ЯМЗ-831.10, показывают, что поставленная задача улучшения качества переходного процесса была решена.

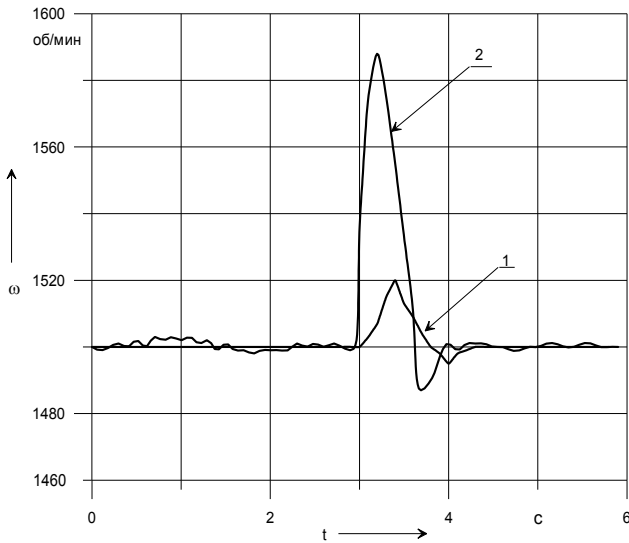


Рис. 6. Переходный процесс при скачкообразном изменении нагрузки с адаптивным регулятором (1 – данные моделирования, 2 – экспериментальные данные)

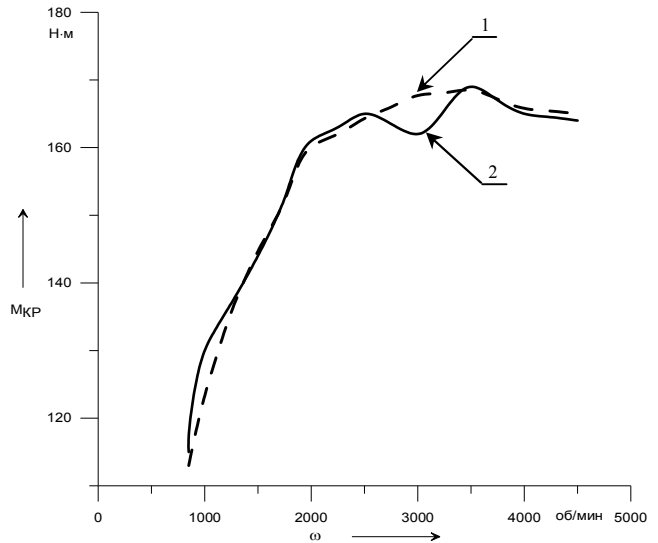


Рис. 7. Внешняя скоростная характеристика газового двигателя (1 – данные моделирования, 2 – экспериментальные данные)

В таблице 3 приведены основные характеристики разработанной системы в сравнении с базовыми системами. Кроме этого, применение разработанных адаптивных алгоритмов на автомобиле «Соболь» с МПСУ двигателем ЗМЗ-40522.10, работающем на смеси метана и водородосодержащего газа, обеспечило сохранение базовых ездовых качеств автомобиля как на основном топливе.

Таблица 3

Основные характеристики разработанной системы управления газовым ДВС

Характеристика	Базовая система	Базовая система с увеличенными коэффициентами	Разработанная система с адаптивными алгоритмами
Нестабильность ЧВ в установившемся режиме	0,8...1 %	2...3 %	0,8...1 %
Заброс ЧВ при ступенчатом изменении нагрузки	15 %	10 %	5...7 %
Длительность переходного процесса	5...6 с	4...5 с	2...3 с
Класс точности	4	3	2

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) На основании системного анализа основных способов управления газовым двигателем разработан новый способ управления, основанный на использовании таблиц оптимальных значений параметров двигателя с применением

методов адаптивного управления, что позволило уменьшить объем вводимой в систему управления информации об объекте управления, получаемой на основе экспериментальных данных.

2) Разработана математическая модель газового двигателя в пространстве состояний, ориентированная на применение алгоритмов адаптивного управления частотой вращения коленчатого вала двигателя.

3) Разработаны структуры и алгоритмы адаптивного управления частотой вращения коленчатого вала газового ДВС, которые позволили реализовать оптимальное регулирование частоты вращения коленчатого вала двигателя путём изменения статизма регуляторных характеристик.

4) Разработан электронный цифровой имитатор газового двигателя с учетом предложенной математической модели газового ДВС.

5) При помощи разработанного интерфейсного прикладного программного обеспечения проведены экспериментальные исследования разработанных структур и алгоритмов адаптивного управления частотой вращения коленчатого вала двигателя на имитаторе и непосредственно на газовом ДВС, которые показали устойчивость системы в рабочем диапазоне нагрузок и частот вращения коленчатого вала двигателя. Сходимость результатов теоретических исследований и экспериментальных данных находится в пределах 8...10 %.

6) Применение разработанных алгоритмов позволило существенно повысить качество управления частотой вращения коленчатого вала двигателя в электроагрегате, а именно: уменьшение длительности переходного процесса до 2...3 с, снижение заброса частоты вращения коленчатого вала двигателя при ступенчатом изменении нагрузки до 5...7 % и неустойчивости частоты вращения в установившемся режиме до 0,8...1 %.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1 **Бурцев, Н. В.** Применение элементов адаптивного управления в системе управления метано-водородным двигателем внутреннего сгорания [Текст] / Н. В. Бурцев, О. Ф. Бризицкий, В. А. Кириллов, В. М. Комаров, В. А. Собянин // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия Информационные технологии. – Том 7, 2009. – № 2. – С. 62–73.

2 **Бурцев, Н. В.** Многотопливные газовые двигатели с элементами адаптивного управления [Текст] / Н. В. Бурцев, В. А. Бурцев // Газовая промышленность. – 2008. – № 13 (626). – С. 68–73.

3 **Бурцев, Н. В.** Применение методов адаптивного управления в газовых электроагрегатах [Текст] // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 1 (13). – С. 46–51.

**Статьи в прочих научных изданиях и материалах конференций:**

4 **Бурцев, Н. В.** Структура микропроцессорной системы управления газовым двигателем [Текст] // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева: Сборник научных трудов. – Рыбинск, 2008. – № 2 (14). – С. 124–130.

5 **Бурцев, Н. В.** Применение бортового генератора синтезгаза на автомобиле под управлением адаптивной микропроцессорной системы [Текст] / Н. В. Бурцев, В. А. Бурцев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 6 (12). – С. 20–25.

6 **Бурцев, Н. В.** Опыт создания и эксплуатации двухтопливного газодородного автомобиля с микропроцессорной многоуровневой системой управления [Текст] / Н. В. Бурцев, В. А. Бурцев // Материалы VII международной конференции GASSUF-2009. - М.: ООО «Газпром экспо», 2010. - С. 78–89.