

**Н. В. Бурцев<sup>1</sup>, О. Ф. Бризицкий<sup>2</sup>, В. А. Кириллов<sup>3</sup>, В. М. Комаров<sup>1</sup>, В. А. Собянин<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Рыбинская государственная авиационная технологическая академия (РГАТА) им. П. А. Соловьева  
ул. Пушкина, 53, Рыбинск, Ярославская обл., 152934, Россия  
E-mail: v\_burtsev@mail.ru; vmkomarov@mail.ru

<sup>2</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский институт  
экспериментальной физики  
ул. Силкина, д.13, Саров, Нижегородская обл., 607188, Россия  
E-mail: brizitski@aven.visa44.vniief.ru

<sup>3</sup> Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН  
пр. Акад. Коптюга, 5, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: vak@catalysis.ru

<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: sobyanin@catalysis.nsk.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОТОПЛИВНЫМ ДВС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕЗГАЗА**

Одним из перспективных вариантов автомобильного топлива является водород или водородсодержащие газовые смеси, получаемые при конверсии углеводородных топлив. В статье рассматривается применение методов адаптивного управления при разработке мультипроцессорной системы управления газовым двигателем внутреннего сгорания, работающего на смеси метана и синтезгаза, используемого в качестве иницилирующей добавки к газовому топливу. При выполнении работы по разработке данной системы проанализирована базовая микропроцессорная система управления газовым двигателем, определены направления необходимой доработки данной системы. Разработан адаптивный регулятор частоты вращения газового ДВС, обеспечивающий достижение оптимальных характеристик двигателя и устойчивую работу в различных режимах. Спроектирована и реализована система совместного управления МПСУ газовым двигателем и МПСУ генератором синтезгаза. Практическая реализация разработанных схем и структур проведена на автомобиле «Соболь» с газовым двигателем 3М3-40522 с бортовым генератором синтезгаза. Результаты испытаний данного комплекса на моторном стенде и в дорожных условиях показывают значительное снижение вредных выбросов и расхода топлива.

*Ключевые слова:* адаптивный контроль, математические модели, микропроцессорные системы, двигатель внутреннего сгорания, синтезгаз, экология, топливная эффективность.

### **Постановка задачи**

Истощение запасов углеводородного топлива и ухудшение экологии ставят перед человечеством серьезные задачи по поиску эффективных технологий использования этого сырья, а также поиска нового альтернативного топлива. Одним из перспективных вариантов такого топлива является водород или водородсодержащие газовые смеси, получаемые при конверсии углеводородных топлив.

Поскольку основную долю углеводородного топлива на сегодня потребляет транспорт, то удобнее всего вопросы рационального использования водорода рассмотреть в этой области. Отметим, что попытки перевести двигатели внутреннего сгорания (ДВС) на чисто водородное топливо ведутся давно, но заметных результатов не достигнуто, что связано со следующими причинами: автомобиль с водородным ДВС имеет малый пробег, плохую динамику при выполнении требований по экологии, повышенную опасность и высокую стоимость, а самое главное – не создана инфраструктура водородных заправок [Бризицкий и др., 2004. С. 17]. Выход из этой ситуации можно найти, используя водород в составе синтезгаза как иницилирующую добавку, улучшающую качество сгорания моторного топлива. Синтезгаз можно получать непосредственно на борту транспортного средства, конвертируя часть ос-

нового топлива и используя его затем в качестве добавки к топливу, подаваемому в двигатель [Бризицкий, Терентьев, 2007].

Практическая реализация двигателя, работающего на сжатом природном газе с добавлением фактически второго топлива – синтезгаза, требует создания принципиально новой многоуровневой микропроцессорной системы управления рабочим процессом много-топливного двигателя. В данной статье рассматриваются общие вопросы создания такой системы и варианты ее практической реализации на примере автомобиля «Соболь» с газовым двигателем ЗМЗ 40522, оборудованных бортовым генератором синтезгаза.

### Микропроцессорная система адаптивного управления ДВС

Задача разработки системы адаптивного управления ДВС сводится к разработке компактной, дешевой, динамичной системы, способной работать совместно с ДВС и бортовым генератором синтезгаза, адаптируя параметры управления двигателем и генератором синтезгаза при изменении частоты вращения и нагрузки на двигатель, внешних условий и т. п. [Ким, 2004].

На рис. 1 представлена структурная схема базовой микропроцессорной системы управления (МПСУ) газовым двигателем, реализованной на автомобиле «Соболь». В состав МПСУ входят электронный блок, исполнительные электрохимические элементы и датчики. Во впускном коллекторе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) установлена электронно-управляемая ЭП дроссельная заслонка ДЗ, оснащенная датчиком положения ДПЗ. Регулирование расхода воздуха при холостом ходе ДВС (при полностью закрытой дроссельной заслонке) обеспечивается регулятором добавочного воздуха РДВ, управляемым от привода регулятора добавочного воздуха ПрРДВ. Кроме того, во впускном коллекторе установлены датчик массового расхода воздуха ДМРВ и датчики давления воздуха  $P_k$  и его температуры  $T_k$ . Для определения теплового состояния ДВС в системе охлаждения установлен датчик температуры охлаждающей жидкости  $T_{ож}$ .

Управление цикловой подачей газа в каждый цилиндр двигателя осуществляется электромагнитными газовыми клапанами ЭГК, на входы которых поступает газ с давлением, регулируемым электромагнитным газовым редукционным клапаном ЭГРК.

Измерение частоты вращения коленчатого вала ДВС  $\omega$  осуществляется датчиком частоты вращения ДЧВ. Фаза поворота коленчатого вала  $\Phi$  определяется датчиком фазы ДФ, установленным на распределительном валу ДВС. Регулирование состава смеси на холостом ходе ДВС обеспечивается по сигналам датчика избыточного кислорода в отработавших газах  $\lambda$ , установленного в выпускном коллекторе. Для воспламенения газозооной смеси на ДВС установлены катушки зажигания КЗ и свечи зажигания (на схеме не показаны). Остальные блоки структуры реализованы программным способом в электронном блоке управления.

Управление МПСУ производится при помощи электронной педали управления ПУ, выходным сигналом которой является относительное положение педали  $\Psi_n$ , которое подается в блок расчета частичных характеристик. На входы блока расчета пусковых характеристик БРПХ поступают сигналы датчиков температуры охлаждающей жидкости (ОЖ)  $T_{ож}$ , температуры воздуха во впускном коллекторе  $T_k$  и частоты вращения  $\omega$ . В зависимости от измеренных переменных на выходах БРПХ формируются: заданное пусковое значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha_3^n$ ; пусковое значение угла опережения зажигания  $\beta^n$ ; заданное значение давления газа при пуске  $P_r^n$ ; заданное пусковое положение дроссельной заслонки  $\Theta_3^n$  и заданное пусковое положение регулятора добавочного воздуха  $\Theta_{рДВ}^n$ , а также относительное расчетное положение педали управления при прогреве ДВС  $\Delta\Psi_{пр}$  [Барков, Бурцев, 2001. С. 34].

Блок расчета внешней скоростной характеристики БРВСХ обеспечивает ограничение максимального значения крутящего момента газового ДВС в функции нескольких переменных. Выходной переменной блока является значение максимального расхода воздуха  $G_B^{max}$ . В качестве основной внешней скоростной характеристики (ВСХ) принята зависимость макси-

мального расхода воздуха от частоты вращения и абсолютного давления воздуха во впускном коллекторе ДВС, описываемая функцией двух переменных  $G_B^{max}(\omega; P_k)$ . В системе управления эта функция представляется линейным интерполятором функции двух переменных, исходные данные для которого задаются в табличной форме.

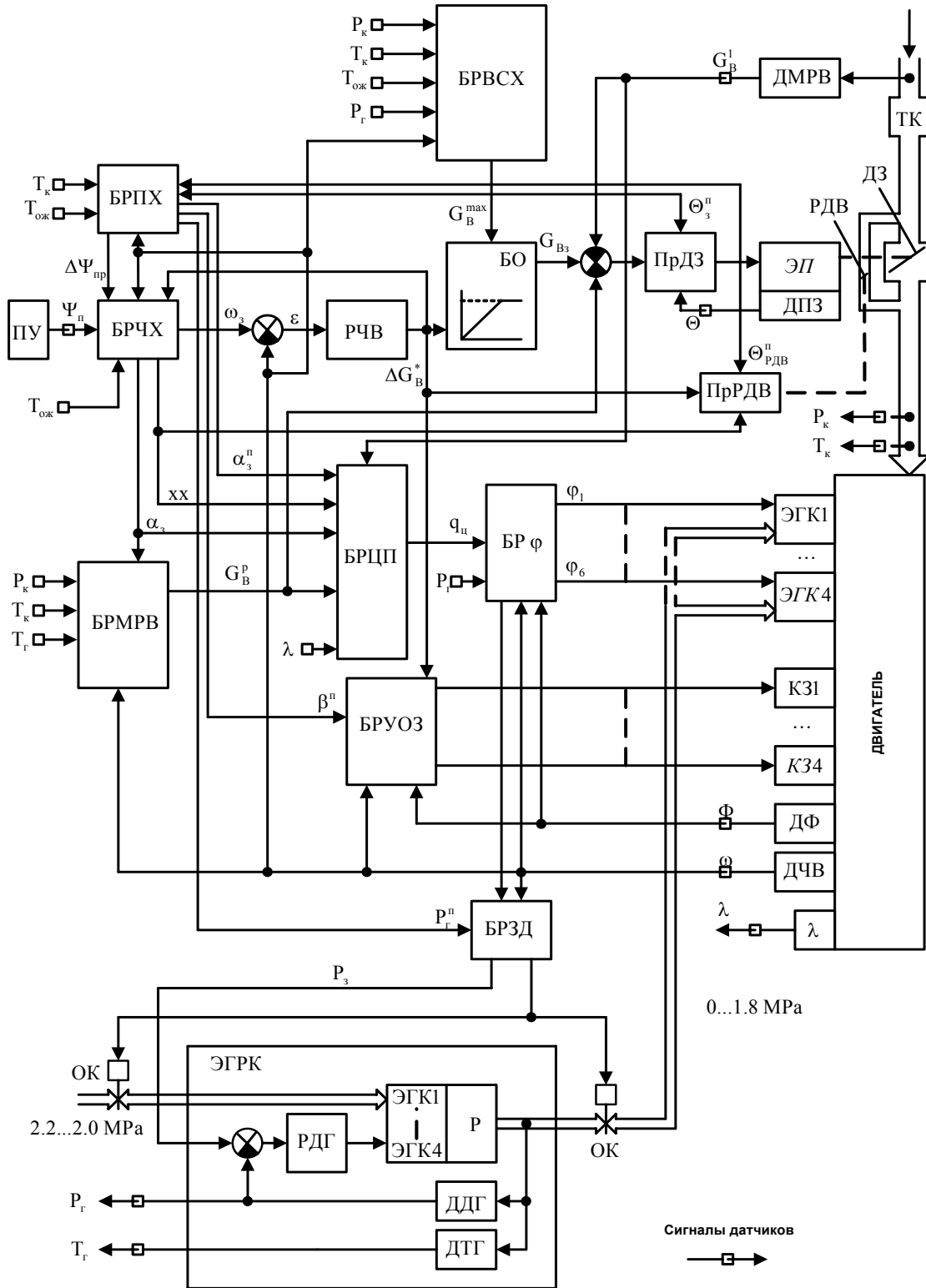


Рис. 1. Структурная схема МПСУ газовым двигателем

На вход регулятора частоты вращения РЧВ поступает ошибка регулирования частоты вращения  $\varepsilon = \omega_3 - \omega$ , выходной сигнал РЧВ  $\Delta G_B^*$  пропорционален моменту нагрузки, приведенному к валу ДВС, и определяет положение ДЗ и РДВ.

При  $\Delta G_B^* = 0$  ДВС работает в режиме холостого хода и положение РДВ изменяется около значения  $\Theta_{РДВ}^{xx}$ , обеспечивающего крутящий момент ДВС, расходуемый на преодоление сил трения и привод собственных агрегатов. По мере увеличения нагрузки, приведенной к валу ДВС, РДВ увеличивает сечение воздушного канала, что приводит к росту крутящего момента, дальнейшее управление крутящим моментом ДВС производится ДЗ. Снижение момента нагрузки вызывает пропорциональное уменьшение  $\Delta G_B^*$ , что приводит к закрытию ДЗ. При нажатии на педаль управления РДВ фиксируется.

По своим динамическим свойствам РЧВ представляет собой пропорционально-интегрально-дифференцирующее звено, описываемое передаточной функцией [Крутов, 1979]:

$$W_{РЧВ}(p) = \frac{\Delta G_B^*(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{K_0 \cdot (1 + T_1 \cdot p)}{1 + T_2 \cdot p},$$

где  $\Delta G_B^*(p)$  – изображение (по Лапласу) выходного сигнала РЧВ;

$\varepsilon(p)$  – изображение ошибки по частоте вращения;

$p$  – оператор дифференцирования;

$K_0$  – статический коэффициент передачи РЧВ;

$T_1; T_2$  – постоянные времени РЧВ.

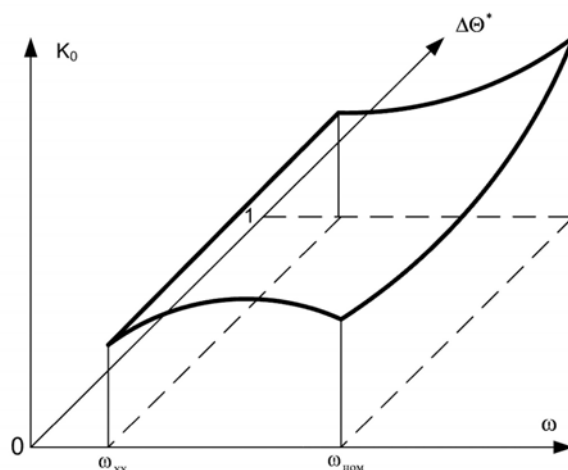


Рис. 2. Зависимость параметров ПИД-регулятора РЧВ по нагрузке и частоте вращения вала двигателя

Динамические свойства ДВС как объекта управления автоматической системы регулирования частоты вращения существенно зависят от частоты вращения его вала, момента нагрузки и момента инерции, приведенных к валу. Для обеспечения удовлетворительных показателей качества переходных процессов в системе регулирования частоты вращения параметры передаточной функции РЧВ нелинейно изменяются в функции частоты вращения ДВС и относительной нагрузки на его валу, как это условно показано на рис. 2. При адаптации системы управления к ДВС эти зависимости записываются в память блока управления.

Определение массового расхода воздуха в МПСУ производится расчетным способом и по сигналу датчика массового расхода воздуха ДМРВ  $G_B^1$ . Для расчета расхода воздуха в программном обеспечении предусмотрен блок расчета массового расхода воздуха БРМРВ, который по измеренным переменным  $\omega, P_k, T_k, T_r$  и заданному значению коэффициента избытка воздуха  $\alpha_3$  определяет расчетное значение массового расхода воздуха  $G_B^p$ . Определение расхода воздуха двумя методами позволяет исключить погрешность ДМРВ при возникновении

волновых явлений движения воздуха во впускном коллекторе и обеспечивает дополнительную возможность работы ДВС при отказе ДМРВ.

Алгоритмы работы блока расчета массового расхода воздуха БРМРВ приведены ниже.

Объемный расход газозвоздушной смеси вычисляется БРМРВ как [Гириявец, 1997]

$$Q_{см} = 3600 \cdot \eta_v \cdot \frac{\pi \cdot D_{п} \cdot L_{п}}{4} \cdot \frac{\omega}{60} \cdot \frac{i}{2} \cdot \frac{P_k}{101,3},$$

где  $\eta_v$  – коэффициент наполнения цилиндров;  $D_{п}$  – диаметр цилиндра;  $L_{п}$  – ход поршня;  $i$  – число цилиндров.

Объемный расчетный расход воздуха, заключенный в этом объеме  $Q_{см}$ :

$$Q_{в\ расч} = \frac{9,55 \cdot \alpha_3 \cdot K_t \cdot Q_{см}}{1 + 9,55 \cdot \alpha_3 \cdot K_t},$$

где  $K_t = \frac{273,15 + T_k}{273,15 + T_r}$  – коэффициент температурной коррекции.

Расчетный массовый расход воздуха:

$$G_B^p = \rho_v \cdot Q_{в\ расч}, \text{ где } \rho_v = \frac{3,485 \cdot P_k}{273,15 + T_k} \text{ – плотность воздуха.}$$

Расчет цикловой подачи газа  $q_{ц}$  производится блоком расчета цикловых подач БРЦП. На вход этого блока в режиме холостого хода ДВС поступает признак холостого хода ХХ, формируемый, как это уже отмечалось, БРЧХ, при этом  $\alpha_3 = 1$  и регулирование цикловой подачи происходит по сигналам датчика избыточного кислорода  $\lambda$ . При работе на частичных нагрузках и на внешней скоростной характеристике (ВСХ) БРЧХ задает оптимальные для каждой области работы ДВС значения  $\alpha_3$ , по которым рассчитывается  $q_{ц}$ . Для расчета цикловой подачи газа на входы БРЦП кроме описанных переменных поступают сигналы  $G_B^p$  (или  $G_B^1$ ) и  $P_r$ . Цикловая подача газа при пуске ДВС определяется по заданному пусковому значению  $\alpha_3^n$ . По расчетному значению  $q_{ц}$  блоком расчета угла открытого состояния ЭГК БРФ определяется угол открытого состояния ЭГК  $\phi$  и угол начала подачи газа. Для этих расчетов на соответствующие входы блока поступают сигналы с датчиков частоты вращения  $\omega$  и фазы поворота коленчатого вала  $\Phi$ . Выходные сигналы БРФ через усилители управляют включением обмоток ЭГК в соответствии с диаграммой работы ДВС.

Алгоритмы работы блока расчета цикловой подачи БРЦП приведены ниже.

Расчетный цикловой массовый расход воздуха

$$G_{в\ расч}^{ц} = \frac{G_B^p \cdot 10^5}{3 \cdot i \cdot \omega}.$$

Цикловой массовый расход воздуха, определяемый по ДМРВ

$$G_{в\ ДМРВ}^{ц} = \frac{G_B^1 \cdot 10^5}{3 \cdot i \cdot \omega}.$$

Цикловой массовый расход воздуха

$$G_B^{ц} = \begin{cases} G_{в\ расч}^{ц} & \text{при работе по расчетному значению;} \\ G_{в\ ДМРВ}^{ц} & \text{при работе по сигналу ДМРВ.} \end{cases}$$

Расчетная цикловая подача газа:

$$q_{ц} = K_k^{ц} \cdot \frac{G_B^{ц}}{17,1 \cdot \alpha_3},$$

где  $K_k^{ц} = 0,963 + 1,70 \cdot 10^{-3} \cdot T_r$  – коэффициент температурной коррекции цикловой подачи газа.

При решении задачи расширения алгоритмов функционирования МПСУ газовым двигателем для работы двигателя на синтезгазе потребовалось ввести в систему новые элементы,

основанные на теории адаптивного управления, с целью реализации динамического изменения коэффициентов регулятора частоты вращения для достижения оптимальных характеристик работы двигателя [Ким, 2004] и отработки реакции на скачкообразные изменения возмущающих и управляющих воздействий. Работа двигателя на бедных смесях в значительной степени снижает его быстродействие при резких изменениях нагрузки, поэтому, чтобы обеспечить необходимую приемистость двигателя при работе на синтезгазе в режиме разгона в алгоритмы МПСУ ввели возможность кратковременного обогащения рабочей топливной смеси или переход на работу только на метане. На рис. 3 приведена структурная схема адаптивного регулятора частоты вращения двухтопливного двигателя (метан с добавками синтезгаза), позволяющего оперативно изменять состав топливо-воздушной смеси и коэффициенты передачи ПИД-регулятора без потери устойчивости системы.

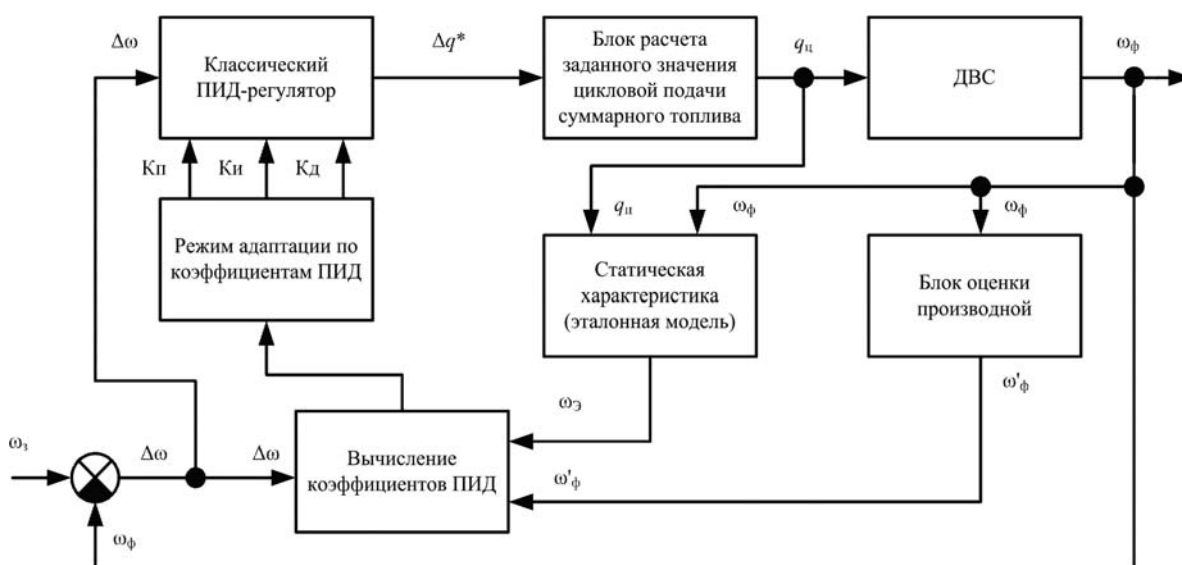


Рис. 3. Структурная схема адаптивного регулятора частоты вращения

Адаптивный регулятор состоит из двух подсистем – оценки и управления. Оценивающая часть регулятора непрерывно измеряет входной и выходной сигналы процесса, по этим данным алгоритм адаптации вычисляет и обновляет параметры регулятора. В сущности, адаптивный регулятор состоит из двух контуров управления – быстрого для непосредственного регулирования объекта и медленного, осуществляющего оценку параметров объекта и настройку регулятора.

При разработке регулятора задача была сведена к нахождению алгоритма адаптации для динамической модели ошибки с измеряемым состоянием [Бризицкий, Терентьев, 2007]. Базовый алгоритм адаптации имеет вид

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma \omega h^T P e, \tag{1}$$

где  $\gamma > 0$  – коэффициент адаптации, а матрица  $P$  является решением уравнения  $A_M^T P + P A_M = -Q$ ,  $Q = Q^T > 0$ .

Модель ошибки слежения для адаптивной системы может быть представлена выражением

$$\dot{e} = A_M e + b_0 h \omega^T \tilde{\theta}, \tag{2}$$

где  $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ .

Устойчивость данного алгоритма определяется методом функций Ляпунова. Возьмем функцию

$$V(e, \tilde{Q}) = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{b_0}{2\gamma} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} \tag{3}$$

и произведем ее дифференцирование, учитывая, что:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_M e + b_0 h \omega^T \tilde{\theta}, \\ \dot{\tilde{\theta}} &= -\gamma \omega h^T P e. \end{aligned} \quad (4)$$

В результате получим

$$\dot{V} = -e^T Q e \leq 0.$$

Данное неравенство показывает, что нулевое состояние равновесия модели ошибки (4) устойчиво, а также выполняется равенство

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0.$$

Обобщенная структурная схема газового двигателя с бортовым генератором синтезгаза представлена на рис. 4.

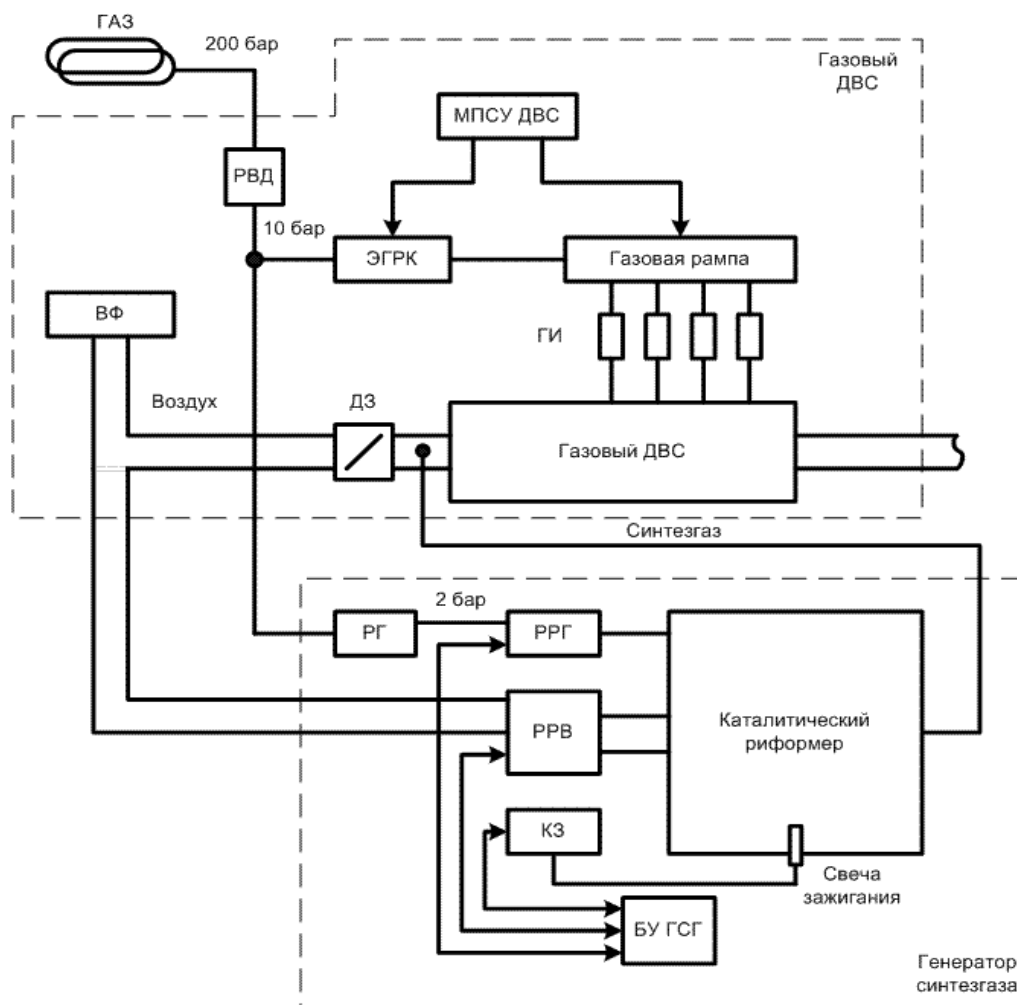


Рис. 4. Обобщенная структурная схема газового двигателя с бортовым ГСГ

Часть газового топлива подается непосредственно в газовый двигатель, а часть – на генератор синтезгаза (ГСГ), где метан преобразуется на катализаторе методом парциального окисления в синтезгаз, состоящий из 34 % водорода, 16 % CO (остальное – азот N и немного оставшегося метана (2,5 %), а также CO<sub>2</sub> (2,8 %)). Охлажденный синтезгаз подается в воздушный ресивер ДВС как второе топливо или как иницирующая добавка к основному топливу. Величина замещения основного топлива синтезгазом, в общем случае, является величиной переменной и зависит от нагрузки на двигатель, режима его работы, частоты вращения коленчатого вала двигателя (КВД) и прочих других факторов.

Компримированный природный газ поступает из баллонов, установленных на автомобиле, на редуктор высокого давления РВД, снижающего давление газа до 10 бар. Далее газ поступает на электроуправляемый газовый редуктор ЭГРК, давление на выходе которого регулируется электронным блоком управления газовым ДВС БУ ДВС. Подача газа в двигатель дозируется четырьмя газовыми форсунками, обеспечивающими распределенную фазированную подачу газа индивидуально в каждый цилиндр ДВС. Дроссельная заслонка ДС регулирует подачу воздуха в ДВС, а следовательно, и величину крутящего момента, развиваемого двигателем. Все необходимые вычислительные операции, управление зажиганием, подачей количества топливоздушной смеси в ДВС управляет электронный блок МПСУ ДВС.

Часть газового топлива из РВД поступает на дополнительный газовый редуктор РГ, еще раз снижающий давление газа до 2 бар, а затем через регулятор расхода газа РРГ поступает на вход каталитического риформера КР. На второй вход КР через регулятор расхода воздуха РРВ поступает необходимое количество воздуха для уверенного протекания каталитической реакции. В режиме розжига каталитического риформера в начале работы воздушно-газовая смесь поджигается принудительно электроискровым способом. После достижения в риформере рабочей температуры (около 600 °С) принудительное зажигание выключается и реакция окисления идет за счет собственного тепловыделения. Количество синтезгаза, поступающего в двигатель, регулируется блоком управления ГСГ.

Для реализации связанного управления в структуру газового ДВС был введен широкодиапазонный лямбдамер, который обеспечивает измерение суммарного значения соотношения воздух–топливо в диапазоне от 0,5 до 2,0. Кроме того, в состав обоих электронных блоков управления были введены новые программно-аппаратные средства, обеспечивающие информационный обмен необходимой информацией между двумя электронными системами. В качестве информационной среды был выбран современный быстродействующий CAN-интерфейс, с помощью которого МПСУ имеет возможность в автоматическом режиме не только управлять параметрами рабочего режима ДВС, но и изменять параметры ГСГ в связи с потребностями ДВС во всех режимах работы (рис. 5).

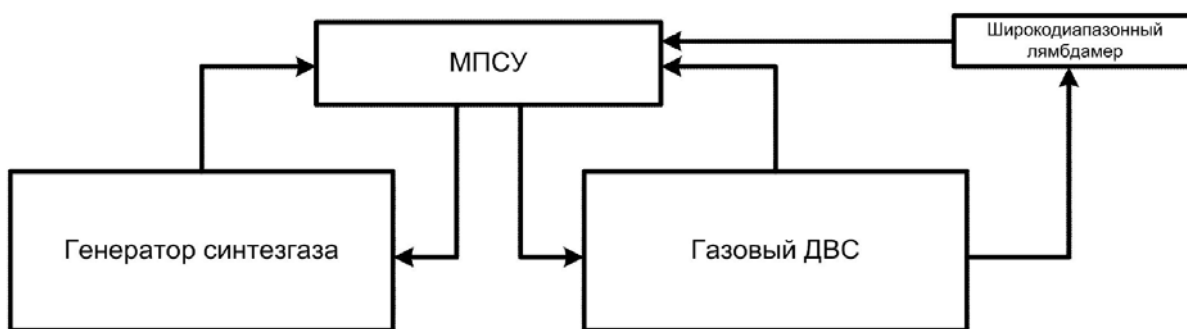


Рис. 5. Структурная схема совместного управления ДВС и ГСГ

Для практической реализации двигателя, работающего на метане с добавлением синтезгаза, необходимо было экспериментально определить следующие зависимости:

- 1) степень замещения метана синтезгазом –  $K_{\text{зам}} = f(M_{\text{нагр}}, \omega, T_{\text{двиг}})$ ;
- 2) суммарную рабочую величину альфа  $\alpha_{\text{сумм}} = f(M_{\text{нагр}}, K_{\text{зам}})$ ;
- 3) динамику переходных режимов:
  - ускорение – нелинейный коэффициент замещения метана синтезгазом;
  - в режиме ПХХ – выключение подачи топлива, в том числе и синтезгаза;
- 4) углы опережения зажигания, по  $\alpha_{\text{сумм}}$  и  $M_{\text{нагр}}$ .

В ходе экспериментальных работ на моторном стенде на ОАО «ЗМЗ» выявлены определенные закономерности, для реализации которых потребовалась разработка адаптивного совместного управления ранее не связанных электронных систем управления ДВС и ГСГ:

- рабочий состав газовой смеси (метан+синтезгаз) по условиям наиболее эффективной работы двигателя является переменной величиной, которая зависит от нагрузки на



двигатель и его частоты вращения, а также от теплового состояния двигателя (работа с переменными значениями альфа от 0,95 до 1,8);

- коэффициент замещения метана синтезгазом является нелинейным и зависит от множества факторов;
- углы опережения зажигания ДВС при работе на смеси метана и синтезгаза также отличается от углов, адаптированных для работы ДВС на метане;
- на переходных режимах (ускорение, торможение, принудительный холостой ход, работа ДВС на оборотах холостого хода) также требуется коррекция параметров работы ДВС.

### Реализация схемы на ТС

На рис. 6 приведен реальный состав микропроцессорной системы управления ГСГ с датчиками и исполнительными механизмами, на рис. 7 – каталитический риформер.

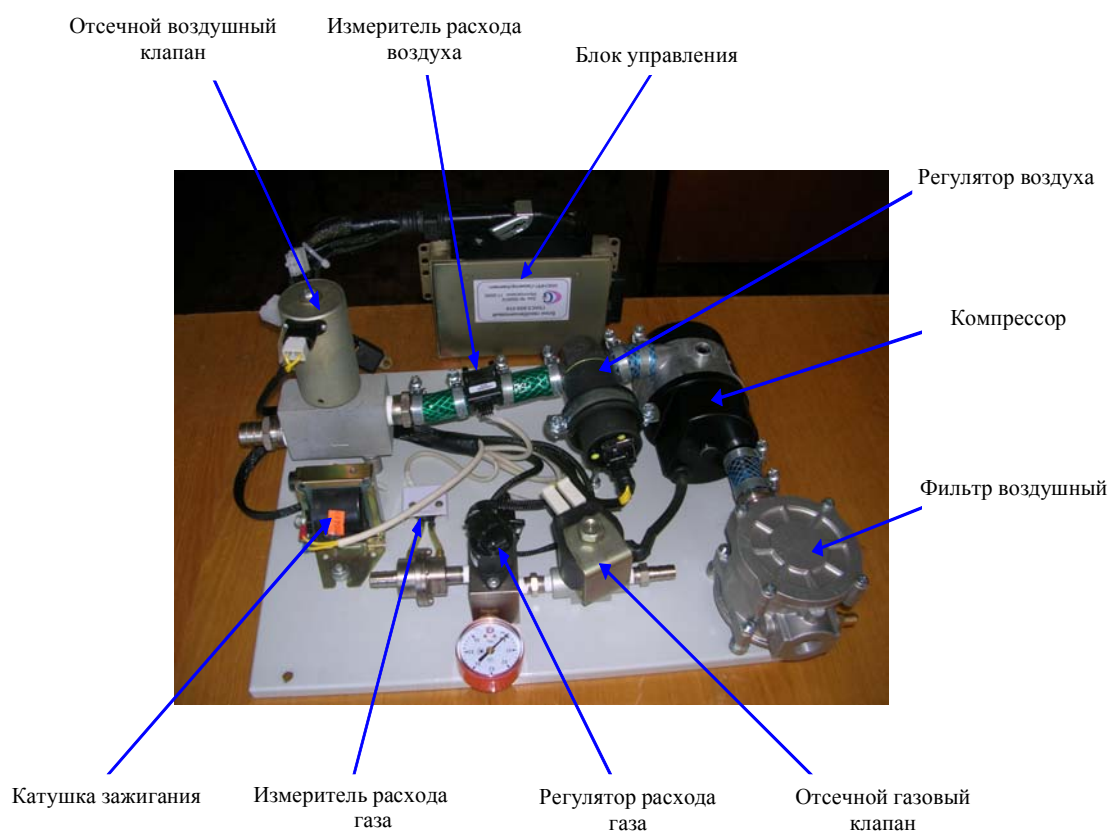


Рис. 6. Микропроцессорная система управления ГСГ (без риформера)



Рис. 7. Каталитический риформер

Расположение ГСГ в подкапотном пространстве автомобиля «Соболь» приведено ниже на рис. 8, 9.

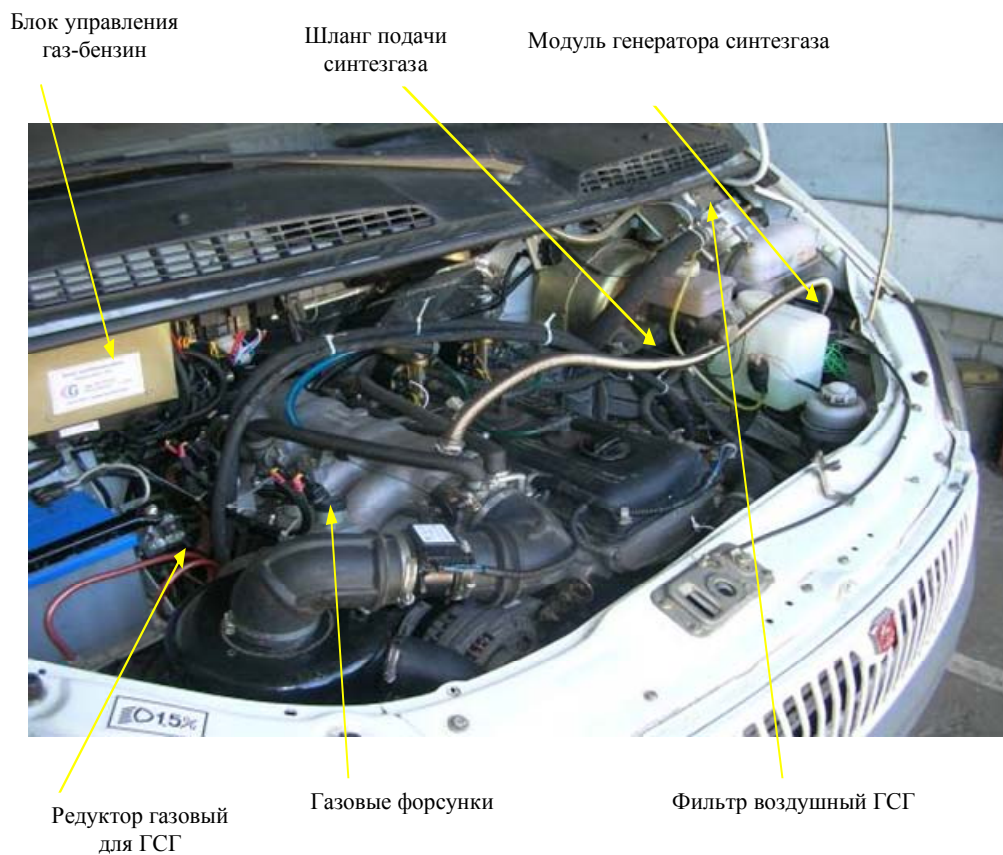


Рис. 8. Расположение ГСГ в подкапотном пространстве а/м «Соболь»



Рис. 9. Расположение МПСУ в подкапотном пространстве а/м «Соболь»

### Результаты испытаний схемы на ТС

Сравнительные данные, характеризующие эффективность работы ДВС с интегрированным ГСГ, созданным на базе двигателя ЗМЗ-40522.10, по результатам стендовых и дорожных испытаний, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Показатели эффективности применения синтезгаза в ДВС при испытаниях на моторном стенде (бензин плюс синтезгаз)

Режим работы ДВС, об./мин	Снижение выбросов CO	Снижение выбросов CH + NO <sub>x</sub>	Снижение расхода топлива, %
<i>n</i> = 1088	13,6 раза	13 раз	16,7
<i>n</i> = 1861	19,2 раза	215 раз	12,5
<i>n</i> = 2886	6,5 раза	36 раз	15,8
<i>n</i> = 3694	7,5 раза	6,9 раза	4,3

Таблица 2

Показатели эффективности применения синтезгаза в ДВС при дорожных испытаниях

Двигатель – ЗМЗ-40522.10	Вид топлива		
	Бензин	КПГ	КПГ + синтезгаз
Контрольный пробег, км	2235	2235	2235
Номинальная мощность, лс (на моторном стенде)	123	103	103
Максимальная скорость, км/час	120	120	120
Время разгона, с:			
0–100 км/ч (1–5 передачи)	32	34	42
60–100 км/ч (3 передача)	12	14	16
60–100 км/ч (4 передача)	17	21	27
80–120 км/ч (5 передача)	42	42	55
Единица измерения топлива	л	куб. м	куб. м
Вместимость заправочных емкостей	50	39	39
Стоимость топлива, руб.	24	8	8
Расход на 100 км пробега (движение в колонне с $V = 75$ км/ч)	11,5	10,5	8–9
Затраты на 100 км пробега, руб.	276	84	72
Пробег на одной полной заправке одним топливом, км	434	371	433

### Заключение

Разработанная микропроцессорная система управления ДВС, интегрированного с генератором синтезгаза на автомобиле «Соболь», обеспечивает устойчивую и эффективную работу двигателя на метане с добавками синтезгаза, адаптируя рабочий процесс двигателя в широком диапазоне изменяющихся параметров как топливной смеси, так и нагрузки на двигатель в рабочем диапазоне скоростных характеристик. Она продемонстрировала преимущества этой технологии по сравнению с серийными образцами транспортных средств, работающих на природном газе:

- полностью используются потенциальные возможности природного газа с высоким (25 %) содержанием водорода, высоким (130 ед.) октановым числом и способностью легко реформироваться в синтезгаз;
- не требуется изменение инфраструктуры снабжения топливом транспортного средства как при применении водорода в качестве моторного топлива;
- не требуется на борту дистиллированная вода и электролизер;

- не требуется многокомпонентный нейтрализатор выхлопных газов на драгметаллах, который заменяется на дешевый однокомпонентный катализатор для дожига углеводородов;
- резко снижаются вредные выбросы в отработавших газах ДВС, в том числе и  $\text{CO}_2$ ;
- реализуется возможность работать на бедных смесях ( $\alpha$  до 1,8), что невозможно на традиционном топливе, благодаря чему за счет снижения насосных потерь экономится основное топливо;
- не применяются драгметаллы, что значительно упрощает массовое применение этой технологии;
- разработанная микропроцессорная система управления ДВС с элементами адаптивного управления обеспечивает наибольшую эффективность от добавок синтезгаза в ДВС по сравнению с постоянной долей водорода к метану (гайтановые смеси).

### Список литературы

*Барков А. Н., Бурцев В. А.* Особенности применения микропроцессорных систем управления рабочим процессом в двигателях внутреннего сгорания, в том числе в газовых двигателях // Автотракторное электрооборудование. 2001. № 3–4. С. 34–41.

*Бризицкий О. Ф., Терентьев В. Я.* Водородная энергетика и транспорт // Промышленные ведомости. 2007. № 10.

*Бризицкий О. Ф., Терентьев В. Я., Христолюбов А. П. и др.* Разработка компактных устройств для получения синтезгаза из углеводородного топлива на борту автомобиля в целях повышения топливной экономичности и экологических характеристик автомобилей //Альтернативная техника и экология. 2004. № 11. С. 17–22.

*Гириявец А. К.* Теория управления автомобильным бензиновым двигателем. М.: Стройиздат, 1997. 173 с.

*Ким Д. П.* Теория автоматического управления: Учеб. пособие М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. Т. 2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 464с.

*Крутов В. И.* Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1979. 615 с.

*Материал поступил в редколлегию 22.04.2009*

**N. V Burtsev, O. F. Brizitskii, V. A. Kirillov, V. M. Komarov, V. A. Sobyenin**

### APPLICATION OF ADAPTIVE CONTROL METHODS IN DESIGNING OF MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM FOR MULTI-FUEL COMBUSTION ENGINE WITH THE USE OF SYNTHESIS GAS

Hydrogen or hydrogen-containing gas mixture, obtained during the conversion of hydrocarbon fuels, is one of the promising versions of automobile fuel. We used methods of adaptive control to develop multiprocessor control system for gas engine with synthesis gas used as a initiator addition to the gas fuel. We analysed the basic gas engine microprocessor control system and figured out directions of necessary revision of this system. We developed the adaptive rotation frequency regulator of gas engine which ensures optimum parameters of working process and stable work in different modes. We developed microprocessor shared control system for gas engine and on-board synthesis gas generator. The system developed was applied on the automobile «Sobol» with the gas engine «ZMZ-40522» with on-board generator of synthesis gas. The results of the tests of this complex on the motor stand and under the road conditions show significant reduction in the harmful ejections and fuel consumption.

*Keywords:* adaptive control, mathematical models, microprocessor systems, internal combustion engine, synthesis gas (syngas), ecology, fuel efficiency.