

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.436, 681.51

doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-52-62

Система электронного управления топливоподачей газодизельного двигателя

В.В. Фурман¹, В.А. Марков², С.В. Плахов¹¹ ООО «ППП «Дизельавтоматика»² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Electronic Fuel Control System of a Gas-Diesel Engine

V.V. Furman¹, V.A. Markov², S.V. Plakhov¹¹ ООО PPP Dizelavtomatika² Bauman Moscow State Technical University

Замещение традиционных углеводородных топлив нефтяного происхождения топливами, получаемыми из других энергетических ресурсов, становится все более актуальной задачей. В качестве перспективного альтернативного топлива рассмотрен природный газ. Показаны преимущества использования природного газа в качестве газомоторного топлива в двигателях внутреннего сгорания. Рассмотрены основные проблемы, возникающие при адаптации двигателей внутреннего сгорания к этому виду топлива, и пути их решения. Отмечена возможность улучшения показателей топливной экономичности и токсичности отработавших газов при конвертировании двигателя внутреннего сгорания на природный газ. Сделан вывод о перспективности использования газодизельных двигателей, работающих на природном газе, который воспламеняется от запальной дозы нефтяного дизельного топлива. Описана система электронного управления топливоподачей, разработанная для газодизельных двигателей. Приведена методика расчета топливоподачи, осуществляемой разработанной системой электронного управления топливоподачей.

Ключевые слова: газодизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, природный газ, система электронного управления топливоподачей, показатели топливной экономичности, показатели токсичности отработавших газов

Relevance of the article is caused by the need to replace petroleum diesel fuel with fuels produced from alternative raw materials. Natural gas is considered as a promising alternative fuel. Advantages of using natural gas as the gas motor fuel in the internal combustion engines are shown. Main problems are considered that arise when adapting internal combustion engines to this type of fuel and ways to solve them. Possibility of improving indicators of the fuel efficiency and the exhaust gases toxicity when converting an internal combustion engine to the natural gas is indicated. It is concluded that using the gas-diesel engines running on natural gas and igniting by an ignition dose of the petroleum diesel fuel is a promising solution. The electronic fuel supply control system developed for the gas-diesel engines is described. The technique for calculating the fuel supply by the developed electronic fuel supply control system is provided.

Keywords: gas-diesel engine, petroleum diesel fuel, natural gas, electronic fuel supply control system, fuel efficiency indicators, exhaust gas toxicity indicators

В связи с надвигающимся энергетическим кризисом, ужесточением требований к экологическим показателям двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и с перспективой введения углеродного налога все более актуальной становится задача замещения традиционных углеводородных топлив нефтяного происхождения топливами, получаемыми из других энергетических ресурсов [1–4].

В качестве одного из самых перспективных видов альтернативного моторного топлива выступает природный газ (ПГ) [5–8], доля которого в мировом балансе газовых альтернативных моторных топлив непрерывно растет и к 2035 г. должна увеличиться до 25 % [9].

Применение ПГ в первую очередь целесообразно на транспорте, потребляющем большую часть моторных топлив. Этот вид топлива используют в автомобильном и железнодорожном транспорте, сельском хозяйстве, судовых дизелях, дизель-генераторных и компрессорных установках и других стационарных двигателях [10–14].

Особенность применения ПГ заключается в том, что он находится в одном агрегатном состоянии с окислителем — воздухом. Это облегчает смесеобразование, позволяет получить однородную топливовоздушную смесь, обеспечить ее полное сгорание, высокие экономические и экологические показатели ДВС.

Причем при конвертации ДВС на ПГ предпочтительнее использовать дизельные двигатели (далее дизели), имеющие высокую степень сжатия и работающие с увеличенным по сравнению с бензиновыми ДВС коэффициентом избытка воздуха. Это позволяет повысить эффективность сжигания ПГ, получить улучшенные показатели топливной экономичности и токсичности отработавших газов (ОГ).

К основным преимуществам ДВС, использующих в качестве газомоторного топлива ПГ, перед ДВС, работающими на нефтяных моторных топливах [5], относятся:

- пониженная цена;
- меньшие выбросы сажи с ОГ;
- уменьшенный выброс с ОГ (примерно на 20 %) основного парникового газа — диоксида углерода (углекислого газа);
- пониженный расход моторного масла и износ деталей.

Вместе с тем при переводе дизелей на газообразные топлива возникает проблема обеспечения надежного воспламенения газозвдушной

смеси в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов транспортного ДВС. Это обусловлено тем, что температура самовоспламенения нефтяных дизельных топлив (ДТ) составляет 230...300 °С (в зависимости от марки топлива), а ПГ — метан — имеет температуру самовоспламенения 540 °С. Поэтому в газовых ДВС температура конца сжатия может оказаться недостаточной для самовоспламенения рабочей смеси.

Одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы является использование газодизельных двигателей (далее газодизели), в которых воспламенение газозвдушной смеси осуществляется от запальной дозы ДТ [1, 5]. Теплота, выделяемая при сгорании запальной дозы ДТ, существенно выше, чем получаемая от искры свечи зажигания. К тому же струя запального ДТ охватывает большее пространство камеры сгорания по сравнению с областью, в которой происходит разряд от свечи зажигания.

К важнейшим параметрам газодизеля относится запальная доза ДТ. В автомобильных и тракторных ДВС, работающих в номинальном режиме, она обычно составляет 5...10 %, в отдельных случаях — 20...25 % энергоемкости общей подачи топлива [1, 5]. Это связано с необходимостью охлаждения распылителей форсунок ДТ для предотвращения закоксовывания и выхода из строя. В то же время с точки зрения более полного замещения нефтяного ДТ его запальную дозу желательно уменьшать.

Альтернативой газодизелям с воспламенением рабочей смеси от запальной дозы ДТ являются газовые двигатели с воспламенением смеси от постороннего источника — свечи зажигания. Такая организация рабочего цикла требует значительного увеличения энергии для искрообразования по сравнению с традиционными бензиновыми ДВС.

Следует отметить возможность улучшения показателей топливной экономичности и токсичности ОГ при конвертировании ДВС на ПГ. Эти показатели в значительной степени зависят от организации рабочего процесса ДВС — способов подачи ПГ в его цилиндры, состава рабочей смеси, способа ее воспламенения и т. д.

В качестве примера рассмотрим указанные показатели дизеля ЯМЗ-236 (6Ч13/14), переоборудованного в газодизель, в котором применено качественное регулирование мощности путем изменения подачи газообразного ПГ — газового

топлива (ГТ) — с помощью дозатора ПГ при нерегулируемом поступлении воздуха [1].

При работе этого дизеля в режиме с частотой вращения коленчатого вала (далее ЧВ) $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$ и снижении нагрузки (эффективной мощности N_e) от полной ($N_e = 125 \text{ кВт}$) до $N_e = 60 \text{ кВт}$ запальная доза ДТ оставалась неизменной и равной 32 мг (38 % полной цикловой подачи), а затем снижалась до 20 мг при $N_e = 15 \text{ кВт}$. Такой же характер изменения запальной дозы ДТ реализуется и при других скоростных режимах.

При исследованиях установлено улучшение основных показателей токсичности ОГ в случае перевода дизеля на газодизельный цикл. В первую очередь это относится к дымности ОГ, уменьшающейся во всем диапазоне нагрузочных режимов. Так, в режиме с эффективной мощностью $N_e = 122 \text{ кВт}$ при ЧВ $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$ дымность снижается с 70 до 20 % по шкале Хартрижда.

В номинальном режиме наблюдается жесткое сгорание топлива и, как следствие, увеличение выброса оксидов азота. В других нагрузочных режимах газодизеля содержание NO_x в ОГ меньше, чем у дизеля, работающего только на ДТ.

В то же время отмечен рост эмиссии углеводородов C_nH_m и монооксида углерода CO. Большие выбросы C_nH_m особенно характерны для режимов газодизеля с малыми нагрузками и большим коэффициентом избытка воздуха. Это объясняется неполнотой сгорания ГТ в газодизеле при работе на бедных смесях. В этих режимах отмечено и ухудшение топливной экономичности.

Испытания показали целесообразность перехода ДВС на дизельный цикл в режимах малых нагрузок и холостого хода для уменьшения выбросов углеводородов и расхода топлива. Также установлено, что для улучшения показателей работы ДВС по газодизельному циклу необходимы оптимизация состава горючей смеси во всех режимах, управление углом опережения впрыска топлива, запальной дозой ДТ и другие мероприятия, связанные с управлением топливоподачей газодизеля.

Цель исследования — разработка системы электронного управления топливоподачей тепловозного газодизеля.

Система электронного управления топливоподачей газодизеля. В некоторых отечествен-

ных организациях проведены работы по адаптации тепловозных дизелей к ПГ [10, 15, 16]. В них показано, что реализация указанных потенциальных преимуществ газодизелей невозможна без точного управления параметрами топливоподачи — цикловыми подачами ГТ и ДТ, фазами и давлением топливоподачи.

Эти параметры должны быть оптимальными для каждого эксплуатационного режима работы ДВС. Такое многофункциональное взаимосвязанное управление параметрами топливоподачи газодизеля целесообразно осуществлять с использованием современных электронных систем автоматического управления (САУ) и систем автоматического регулирования.

Такие системы разработаны для газодизелей различного назначения [17–20]. Проектно-производственное предприятие ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) спроектировало несколько систем электроуправляемой подачи ПГ и ДТ для дизелей, работающих по газодизельному циклу [21, 22].

Одной из первых систем электронного управления топливоподачей являлась СЭРГ-500, разработанная для газодизелей автотракторной техники и автомобильных газодизелей семейств КамАЗ, МАЗ и ЯМЗ. В этой системе предусмотрена подача ПГ во впускной трубопровод через газовый дозатор и подача запального ДТ штатным топливным насосом высокого давления (ТНВД) со штатным регулятором.

В ДВС, работающем на газе с САУ типа СЭРГ-500, на подачу ПГ газовым дозатором к впускным клапанам оказывает влияние объем полости всасывания (впускной трубопровод), угол перекрытия клапанов в процессе продувки и сжатия газа. Поэтому ПГ попадает в цилиндры с некоторым запаздыванием, что ухудшает смесеобразование и регулирование ЧВ. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению показателей топливной экономичности и токсичности ОГ.

Для улучшения этих показателей ДВС, работающих на ПГ, в ООО «ППП Дизельавтоматика» проведены работы по созданию электроуправляемых систем импульсной подачи ПГ к впускным клапанам на такте впуска посредством быстродействующего электромагнитного клапана. Влияние объема всасывания и угла перекрытия клапанов в процессе продувки сведено к минимуму, что значительно уменьшает запаздывание подачи ПГ.

Одна из них — система электронного управления топливоподачей СУДМ.01, разработан-

ная для газодизелей ЯМЗ-238. В ней реализована индивидуальная по цилиндрам подача ПГ во впускной трубопровод и подача запального ДТ штатным ТНВД, оснащенным электронной системой управления с электрическим исполнительным устройством ЭРУС-18.

На базе этой САУ разработана система электронного управления топливоподачей СУДМ.02 для автотракторного газодизеля Д242, реализующая индивидуальную подачу ПГ во впускной трубопровод и подачу запального ДТ штатным ТНВД с электронной системой управления и исполнительным устройством типа ЭРУС-18.

Для тепловозных дизелей Д50 создана система электронного управления топливоподачей СУДМ.03, состоящая из двух подсистем. Первая — подсистема с индивидуальной по цилиндрам подачей ПГ с электрогазовыми клапанами 2ЭГК.02 и 4ЭГК.01, установленными возле каждого цилиндра и подающими ПГ в область перед впускными клапанами. Вторая — подсистема электронно-управляемой подачи запального ДТ с использованием электронно-управляемых ТНВД с быстродействующими клапанами, расположенными в линии высокого давления.

Одной из последних систем этого ряда является СУДМ.03 — система электронного управления подачей ПГ и ДТ для тепловозных газодизелей, структурная схема которой приведена на рисунке. Здесь введены следующие обозначения: ОГК и СГК — отсечной и свечной газовые клапаны; Ф — форсунка топливная; ФГ — фильтр газовый; КПК — клапан продувки коллектора; РВ и КВ — распределительный и колеччатый валы.

Основной функцией этой электронной системы управления подачей ПГ и ДТ является регулирование ЧВ путем управления подачей ДТ в дизельном цикле и ГТ с зажиганием его от запального количества (дозы) ДТ в газодизельном цикле.

Управление процессом подачи ДТ осуществляется с помощью быстродействующих электрогидравлических клапанов электроуправляемых ТНВД типа 4ЭТН.03, установленных в линии высокого давления ТНВД (в надплунжерной полости). Быстродействующие электрогидравлические клапаны обеспечивают точное дозирование и начало подачи ДТ.

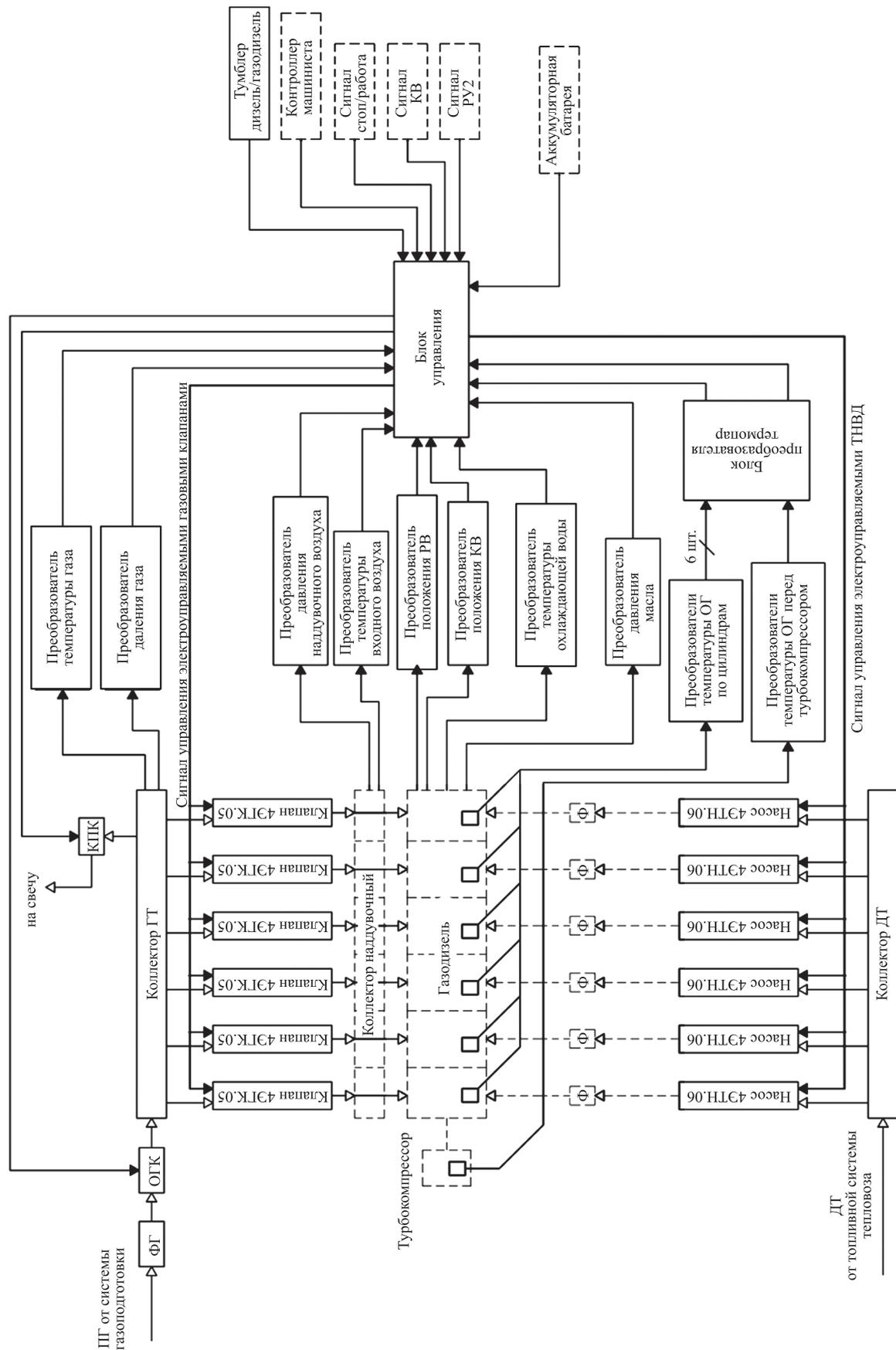
Настройку характеристики управления углом опережения впрыска топлива при эксплуатационных режимах в дизельном цикле осу-

ществляют в процессе проведения безмоторных испытаний и оптимизируют по показателям топливной экономичности с ограничениями по давлению сгорания в цилиндрах и температуре. Расход ДТ измеряют весовым методом с помощью расходомера РТТ. Степень замещения ДТ в газодизельном цикле рассчитывают по показаниям расходомера.

Блок управления двигателем системы СУДМ.03 выполнен с применением двух идентичных модулей управления, работающих в режиме главный — подчиненный. Главным является модуль управления подачей ДТ, а подчиненным — модуль управления подачей ГТ. Связь между модулями осуществляется по интерфейсу CAN2.0В.

Блок управления двигателем системы СУДМ.03 выполняет следующие функции:

- обработку импульсных сигналов от преобразователей положения КВ и РВ с контролем их достоверности;
- определение положения КВ и РВ, их синхронизацию;
- расчет ЧВ по сигналам от преобразователей положения КВ и РВ;
- всережимное регулирование ЧВ по пропорционально-интегральному или пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону регулирования;
- формирование следующих характеристик:
 - подачи ДТ во время пуска;
 - подачи ДТ в дизельном цикле с ограничением по давлению наддувочного воздуха и ЧВ (с ограничением по дымности ОГ);
 - подачи запальной дозы ДТ в газодизельном цикле;
 - подачи ГТ в газодизельном цикле с ограничением по давлению наддувочного воздуха и защитой по температуре ОГ перед турбиной турбокомпрессора;
 - управления углом опережения впрыска топлива до верхней мертвой точки (ВМТ) в такте сжатия в соответствии с тепловозной характеристикой и циклом работы дизеля/газодизеля;
 - управления углом начала подачи ГТ после ВМТ в такте впуска;
 - по началу и длительности управления электрогидравлическими клапанами с учетом индивидуальных настроек по каждому из них; коррекцию длительности управления в режиме балансировки цилиндров по температуре ОГ;



Структурная схема системы СУДМ.03 для электронного управления подачей ПГ и ДТ типа

- формирование сигналов управления электрогидравлическими клапанами электроуправляемых ТНВД;

- защиту ДВС по предельным значениям давления масла и ЧВ отключением сигналов управления электрогидравлическими клапанами электроуправляемых ТНВД;

- защиту ДВС по предельной средней температуре ОГ по цилиндрам снижением ЧВ;

- обработку аналоговых сигналов с контролем их достоверности от преобразователей давления масла, давления и температуры наддувочного воздуха, температуры охлаждающей жидкости;

- обработку дискретных входных сигналов от электрической схемы, определение признака разрешения работы дизеля/газодизеля, его заданной ЧВ, цикла и режима работы (холостой ход/нагрузка);

- формирование дискретных выходных сигналов управления электромагнитными клапанами по командам главного модуля: ОГК, КПК;

- обмен данными по интерфейсу CAN2.0В с подчиненным модулем управления и блоком измерения температуры ОГ;

- обмен данными по интерфейсу RS-232 с персональным компьютером для параметрирования и сбора данных.

Подчиненный модуль управления ДВС системы СУДМ.03 выполняет следующие функции:

- обработку импульсных сигналов от преобразователей положения КВ и РВ с контролем их достоверности;

- определение положения КВ и РВ, их синхронизацию;

- расчет ЧВ по сигналам от преобразователей положения КВ и РВ;

- формирование характеристик по началу и продолжительности управления электроуправляемыми газовыми клапанами по полученной от главного модуля информации о характеристике подачи ГТ с учетом индивидуальных настроек по каждому клапану; коррекцию длительности управления в режиме балансировки цилиндров по температуре ОГ;

- формирование сигналов управления электроуправляемыми газовыми клапанами;

- обработку аналоговых сигналов с контролем достоверности от преобразователей давления и температуры ГТ в газовом коллекторе;

- обмен данными по интерфейсу CAN2.0В с подчиненным модулем управления и блоком измерения температур ОГ.

ДТ поступает в топливный коллектор от штатного тепловозного топливного насоса под давлением 0,4 МПа, газообразный ПГ — в газовый коллектор от системы газоподготовки под давлением 0,1...0,3 МПа с температурой 5...35 °С.

Подсистема обработки импульсных сигналов от преобразователей положения КВ и РВ выполнена по схеме резервирования и осуществляет контроль достоверности сигналов с целью своевременного переключения между каналами при наличии недостоверности в сигнале одного из каналов. В основной канал измерения от преобразователя положения КВ поступает 120 импульсов за один цикл, а в резервный канал от преобразователя положения РВ — 6 импульсов за один цикл.

Высокая точность работы подсистемы формирования сигналов управления электрогидравлическими и электроуправляемыми газовыми клапанами достигается за счет работы основного канала. При работе на резервном канале снижается точность в переходных процессах разгона/торможения ДВС, поэтому этот режим не предназначен для штатного функционирования и служит для обеспечения возможности возврата тепловоза в депо. Для обеспечения безопасности при работе на резервном канале работа ДВС в газодизельном режиме заблокирована.

Расчет топливоподачи, осуществляемой рассматриваемой САУ, осуществляется в двух режимах — пуска ДВС и регулирования ЧВ. Величина топливоподачи рассчитывается в процентах от максимальной при максимальном крутящем моменте.

В режиме пуска ДВС в диапазоне ЧВ устанавливается заданное фиксированное значение топливоподачи, соответствующее пусковому значению крутящего момента, корректируемое по температуре ДВС исходя из показаний преобразователя температуры охлаждающей жидкости, и формально описывается функцией

$$trq_{\text{пуск}} = f(n_{\text{изм}}, t_{\text{дв}}),$$

где $trq_{\text{пуск}}$ — пусковое значение топливоподачи, %; $n_{\text{изм}}$ — измеренная ЧВ, мин⁻¹; $t_{\text{дв}}$ — температура охлаждающей жидкости ДВС, °С.

В режиме регулирования ЧВ в качестве закона регулирования используют ПИД-закон регулирования, который описывается выражением

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right],$$

где $u(t)$ — величина на выходе регулятора, %; K — коэффициент усиления, %/мин⁻¹; $e(t)$ — ошибка регулирования, мин⁻¹; T_i и T_d — постоянная времени интегрирования и дифференцирования, с.

В главном модуле управления ПИД-закон реализован в дискретной форме с шагом квантования T для времени $t = kT$ в соответствии со следующей формулой:

$$u(k) = K_n e(k) + K_i \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)],$$

где $u(k)$ — топливоподача на шаге k , %; K_n — пропорциональный коэффициент, $K_n = K$; $e(k)$ — ошибка регулирования на шаге k , мин⁻¹; K_i и K_d — интегральный и дифференциальный коэффициенты,

$$K_i = \frac{KT}{T_i}; \quad K_d = K \frac{T_d}{T}.$$

В качестве шага квантования T используют время измерения ЧВ.

Для достижения высокой точности регулирования ЧВ во всем диапазоне тепловозной характеристики значения статических коэффициентов ПИД заданы в виде зависимости от уставки ЧВ n_y :

$$K_{\text{ПИДст}} = f(n_y).$$

Для достижения высокого качества переходных процессов значения статических коэффициентов ПИД корректируются множителем $k_{\text{мн}}(e(t))$, зависящим от ошибки регулирования $e(t)$, по следующей функции:

$$K_{\text{ПИД}} = f\{K_{\text{ПИДст}}, k_{\text{мн}}(e(t))\}.$$

Ошибка регулирования $e(k)$ на шаге k по ЧВ определяется выражением

$$e(k) = n_y - n_{\text{изм}}.$$

Уставка ЧВ, определяемая исходя из ее текущего заданного значения n_3 и заданных допустимых темпов разгона или торможения ДВС при переходе на новый скоростной режим работы, описывается функцией

$$n_y = f(n_3, dn_{\text{pos}}, dn_{\text{neg}}, T),$$

где n_{pos} и n_{neg} — положительный и отрицательный темпы изменения ЧВ, мин⁻¹/с.

Задание ЧВ, устанавливаемой контроллером машиниста (КМ), определяется по комбинации дискретных входных сигналов от электрической схемы тепловоза и соответствует скоростному режиму тепловозной характеристики:

$$n_3 = f(\text{КМ}).$$

Рассчитанное по ПИД-закону значение топливоподачи, соответствующее требуемому крутящему моменту, ограничено (по дымности) заданными значениями топливоподачи в зависимости от давления наддувочного воздуха и ЧВ:

$$trq_{\text{огр}} = f(trq_{\text{рег}}, trq_{\text{огр.возд}}, trq_{\text{огр.ЧВ}}),$$

где $trq_{\text{рег}}$ — топливоподача по ПИД-закону, %; $trq_{\text{рег}} = u(k)$; $trq_{\text{огр}}$ — топливоподача после ограничения, %; $trq_{\text{огр.возд}}$ — ограничение топливоподачи по давлению наддува, %; $trq_{\text{огр.ЧВ}}$ — ограничение топливоподачи по ЧВ, %.

В дизельном и газодизельном режимах значение топливоподачи по ДТ определяется из условия текущего режима работы ДВС: пуск, дизель, газодизель:

$$trq_{\text{диз}} = f(trq_{\text{пуск}}, trq_{\text{огр}}, trq_{\text{диз.зап}}),$$

где $trq_{\text{диз.зап}}$ — запальная топливоподача ДТ, являющаяся функцией позиции КМ и соответствующая нагрузочному режиму тепловозной характеристики,

$$trq_{\text{диз.зап}} = f(\text{КМ}), \text{ \%}.$$

Значение топливоподачи по дизельному топливу преобразуется в цикловую подачу ДТ

$$qMV_{\text{диз}} = f(trq_{\text{диз}}), \text{ мм}^3/\text{цикл}.$$

По заданной характеристике электроуправляемого ТНВД цикловая подача ДТ $qMV_{\text{диз}}$ преобразуется в длительность управления (по углу поворота коленчатого вала — ПКВ) электрогидравлическими клапанами

$$dMV_{\text{диз}} = f(qMV_{\text{диз}}, n_{\text{изм}}, \varphi, t_{\text{ДТ}}), \text{ град ПКВ},$$

где φ — угол опережения впрыска топлива, град ПКВ; $t_{\text{ДТ}}$ — температура ДТ в коллекторе, °С.

Подсистема формирования сигналов управления электрогидравлическими клапанами преобразует длительность управления $dMV_{\text{диз}}$ в продолжительность $tiMV_{\text{диз}i}$ (по времени) с учетом индивидуальных заводских настроек по каждому i -му электроуправляемому ТНВД и корректирующего воздействия $facExhTBal_i$ по

каждому цилиндру от подсистемы балансировки цилиндров по температуре ОГ, активной в дизельном режиме:

$$tiMV_{диз\ i} = f(dMV_{диз}, i, facExhTBal_i).$$

В газодизельном режиме составляющая топливоподачи по ГТ определяется выражением

$$trq_{газ} = trq_{огр} - trq_{диз.зап}, \%$$

Составляющая топливоподачи по ГТ преобразуется в его подачу

$$qMV_{газ} = f(trq_{газ}), \text{ нм}^3/\text{ч}.$$

По заданной характеристике электроуправляемого газового клапана подача ГТ $qMV_{газ}$ преобразуется в длительность управления (по времени) электроуправляемыми газовыми клапанами

$$dMV_{газ} = f(qMV_{газ}, p_{ГТ}, t_{ГТ}), \text{ с},$$

где $p_{ГТ}$ и $t_{ГТ}$ — давление и температура ГТ в коллекторе, МПа и °С.

Подсистема формирования сигналов управления корректирует длительность управления электроуправляемыми газовыми клапанами $dMV_{газ}$ с учетом индивидуальных заводских настроек по каждому i -му клапану и корректирующего воздействия $facExhTBal_i$ по каждому цилиндру от подсистемы балансировки цилиндров по температуре ОГ:

$$tiMV_{газ\ i} = f(dMV_{газ}, i, facExhTBal_i).$$

Алгоритм газодизельного режима. При наличии дискретного входного сигнала от тумблера «Дизель/Газодизель» от электрической схемы тепловоза формируется команда на включение ОГК и выполняется проверка условий на разрешение работы ДВС в режиме газодизеля.

Основными условиями для разрешения работы ДВС в режиме газодизеля являются:

- давление ГТ $p_{ГТ} = 0,1...0,3$ МПа;
- температура ГТ $T_{ГТ} = 5...35$ °С;
- синхронизация по положениям КВ и РВ у главного и подчиненного модулей;
- активный канал по преобразователю положения КВ у главного и подчиненного модулей;
- температура охлаждающей жидкости более 50 °С;
- отсутствие ошибок связи между главным и подчиненными модулями.

При наличии признака разрешения работы в режиме газодизеля и при условии превышения

текущего значения топливоподачи запальной топливоподачи начинается процесс замещения топливоподачи по ДТ топливоподачей по ГТ. Запальная топливоподача в процессе замещения и при смене нагрузочных режимов по тепловозной характеристике изменяется с темпом $dtrq_{диз.зап}$.

В начальный момент замещения топливоподачи $trq_{огр}$ сохраняется в текущее значение запальной топливоподачи $trq_{диз.зап}$ и с темпом изменения запальной топливоподачи $dtrq_{диз.зап}$ снижается до значения, соответствующего текущему нагрузочному режиму по тепловозной характеристике. Благодаря работе регулятора происходит компенсация значения топливоподачи $trq_{огр}$ и появления составляющей топливоподачи по ГТ $trq_{газ}$.

Изменение нагрузки сопровождается изменением составляющей топливоподачи по ГТ $trq_{газ}$ при фиксированной запальной топливоподаче $trq_{диз.зап}$. Если при снижении нагрузки составляющая топливоподачи по ГТ $trq_{газ}$ достигает нуля, то происходит переход в режим дизеля.

Такой переход осуществляется при исчезновении признака разрешения работы в режиме газодизеля. При этом запальная топливоподача $trq_{диз.зап}$ с темпом изменения запальной топливоподачи $dtrq_{диз.зап}$ увеличивается до достижения нуля составляющей топливоподачи по ГТ $trq_{газ}$.

При нарушении связи между модулями главный из них формирует команду на отключение ОГК и переводит в режим дизеля.

В процессе останова ДВС формируются команды на отключение ОГК и на временное включение КПК для сброса избыточного давления ГТ из коллектора.

Выводы

1. При конвертировании ДВС на ПГ предпочтительнее использовать двухтопливные газодизели, в которых воспламенение подаваемого в цилиндры ПГ осуществляется от запальной дозы нефтяного ДТ.

2. Теплота, выделяемая при сгорании запальной дозы ДТ существенно выше, чем получаемая от искры свечи зажигания. К тому же струя запального ДТ охватывает большее пространство камеры сгорания по сравнению с областью, в которой происходит разряд от свечи зажигания.

3. В системе электронного управления топливоподачей СУДМ.03, разработанной для тепловозных газодизелей, подача ПГ осуществляется индивидуально по цилиндрам электрогазовыми клапанами, установленными возле каждого цилиндра и подающими ПГ в область перед впускными клапанами, а подача запального ДТ выполняется с использованием элек-

тронно-управляемых ТНВД с быстродействующими клапанами, установленными в линии высокого давления.

4. Разработана методика расчета подачи ПГ и запального ДТ, осуществляемой системой электронного управления топливоподачей СУДМ.03 тепловозных газодизелей.

Литература

- [1] Александров А.А., Марков В.А., ред. *Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания*. Москва, ООО НИЦ Инженер. ООО О니ко-М. 2012. 791 с.
- [2] Ерохов В.И. Экологические показатели современных наземных транспортных средств. *Грузовик*, 2020, № 9, с. 16–27.
- [3] Мельник Г.В. Альтернативные топлива (материалы конгресса СИМАС-2016). *Двигателестроение*, 2019, № 4, с. 38–57.
- [4] Марков В.А., Бебенин Е.В., Поздняков Е.Ф. Сравнительная оценка альтернативных топлив для дизельных двигателей. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2013, № 5, с. 24–29.
- [5] Гайворонский А.И., Марков В.А., Илатовский Ю.В. *Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях*. Москва. ООО ИРЦ Газпром. 2007. 478 с.
- [6] Пискунов И.В., Глаголева О.Ф., Голубева И.А. Альтернативные виды топлив для устойчивого развития транспортного сектора. Часть I. Газомоторное топливо. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2021, № 4, с. 68–77.
- [7] Галышев Ю.В., Магидович Л.Е. Перспективы применения газовых топлив в ДВС. *Двигателестроение*, 2001, № 3, с. 31–35.
- [8] Марков В.А. Проблемы использования природного газа в качестве моторного топлива для городского автотранспорта, *Грузовик*, 2015, № 4, с. 6–12.
- [9] Пронин Е.Н. Мировой рынок: наступила эпоха метана. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2011, № 6, с. 9.
- [10] Фофанов Г.А., Григорович Д.Н., Нестрахов А.С. *Альтернативные виды топлива на подвижном составе железнодорожного транспорта*. Москва. Интекст. 2008. 144 с.
- [11] Мельник Г.В. Развитие газовых двигателей (по материалам конгресса СИМАК). *Двигателестроение*, 2001, № 4, с. 31–53.
- [12] Моргунов Б.А., Зинин В.Л., Тавдидишвили А.Е. Проблемы использования газомоторного топлива сельскохозяйственной техникой. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2022, № 2, с. 50–56.
- [13] Моргунов Б.А., Зинин В.Л., Тавдидишвили А.Е. Внедрение природного газа на речном и морском транспорте России. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2022, № 3, с. 30–34.
- [14] Хачиян А.С. Использование природного газа в качестве топлива для автомобильного транспорта. *Двигателестроение*, 2002, № 2, с. 8–9.
- [15] Загорский М.В., Фофанов Г.А., Поляков В.И. Газодизель-генератор ГДГ-50 на газотепловозе ТЭМ18Г производства ОАО «БМЗ». *Двигателестроение*, 2001, № 4, с. 40–42.
- [16] Калининченко В.В., Буров С.В., Кондаков К.В. Создание газового двигатель-генератора 9ГМГ для маневрового газотепловоза. *Двигателестроение*, 2021, № 4, с. 3–7.
- [17] Плотников С.А. Регулирование топливоподачи газодизелей. *Двигателестроение*, 2000, № 1, с. 25–26.
- [18] Ефремов Б.Д., Рок Д.М. Система управления двигателем при питании сжиженным газом. *Двигателестроение*, 2013, № 3, с. 33–35.
- [19] Андрусенко С.Е., Фролов М.В., Фофанов А.В. Адаптивная система управления рабочим процессом газопоршневого двигателя внутреннего сгорания. *Двигателестроение*, 2021, № 4, с. 22–27.

- [20] Долганов К.Е., Лисовал А.А., Поляков А.П. Система питания для газодизеля с двухрежимным регулятором частоты вращения. *Двигателестроение*, 2001, № 3, с. 29–31.
- [21] Марков В.А., Фурман В.В., Иванов В.А. и др. Системы электронного управления топливоподачей газовых и газодизельных двигателей. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2012, № 4, с. 14–18.
- [22] Марков В.А., Фурман В.В., Иванов В.А. и др. Системы топливоподачи для газодизельных и газовых двигателей. *Грузовик*, 2013, № 4, с. 38–45.

References

- [1] Aleksandrov A.A., Markov V.A., red. *Alternativnye topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Alternative fuels for internal combustion engines]. Moscow, OOO NITs Inzhener Publ., OOO Oniko-M Publ., 2012. 791 p. (In Russ.).
- [2] Erokhov V.I. Environmental indicators of modern land vehicles. *Gruzovik*, 2020, no. 9, pp. 16–27. (In Russ.).
- [3] Melnik G.V. Alternative fuels (based on CIMAC-2016 papers). *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2019, no. 4, pp. 38–57. (In Russ.).
- [4] Markov V.A., Bebenin E.V., Pozdnyakov E.F. Comparative evaluation of alternative fuels for diesel engines. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2013, no. 5, pp. 24–29. (In Russ.).
- [5] Gayvoronskiy A.I., Markov V.A., Ilatovskiy Yu.V. *Ispolzovanie prirodnogo gaza i drugikh alternativnykh topliv v dizelnykh dvigatelyakh* [Using natural gas and other alternative fuels in diesel engines]. Moscow. OOO IRTs Gazprom Publ., 2007. 478 p. (In Russ.).
- [6] Piskunov I.V., Glagoleva O.F., Golubeva I.A. Alternative fuels for sustainable development of the transport sector. Part 1. Gas engine fuel. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2021, no. 4, pp. 68–77. (In Russ.).
- [7] Galyshev Yu.V., Magidovich L.E. Internal combustion engines to operate on gaseous fuels. *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2001, no. 3, pp. 31–35. (In Russ.).
- [8] Markov V.A. Problems of using natural gas as motor fuel for urban auto transport. *Gruzovik*, 2015, no. 4, pp. 6–12. (In Russ.).
- [9] Pronin E.N. World market: methane epoch has come. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2011, no. 6, p. 9. (In Russ.).
- [10] Fofanov G.A., Grigorovich D.N., Nestrakhov A.S. *Alternativnye vidy topliva na podvizhnom sostave zheleznodorozhnogo transporta* [Alternative fuels on a railroads rolling stock]. Moscow. Intekst Publ., 2008. 144 p. (In Russ.).
- [11] Melnik G.V. Development of gas engines (based on CIMAC proceedings). *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2001, no. 4, pp. 31–53. (In Russ.).
- [12] Morgunov B.A., Zinin V.L., Tavdidishvili A.E. Problems of the use of gas motor fuel by agricultural machinery. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2022, no. 2, pp. 50–56. (In Russ.).
- [13] Morgunov B.A., Zinin V.L., Tavdidishvili A.E. Implementation of natural gas in river and sea transport in Russia. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2022, no. 3, pp. 30–34. (In Russ.).
- [14] Khachiyan A.S. Natural gas as car engine fuel. *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2002, no. 2, pp. 8–9. (In Russ.).
- [15] Zagorskiy M.V., Fofanov G.A., Polyakov V.I. Dual fuel generator set to power series TEM18G locomotive made by Bryansk Engineering Works. *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2001, no. 4, pp. 40–42. (In Russ.).
- [16] Kalinichenko V.V., Burov S.V., Kondakov K.V. Engine-generator type 9GMG for shunting locomotives. *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2021, no. 4, pp. 3–7. (In Russ.).
- [17] Plotnikov S.A. Fuel control in dual fuel engines. *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2000, no. 1, pp. 25–26. (In Russ.).
- [18] Efremov B.D., Rok D.M. Control system for engine firing liquefied gas. *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2013, no. 3, pp. 33–35. (In Russ.).
- [19] Andrusenko S.E., Frolov M.V., Fofanov A.V. Adaptive control system for operation of gas reciprocating engine. *Dvigatellestroenie* [Engines Construction], 2021, no. 4, pp. 22–27. (In Russ.).

- [20] Dolganov K.E., Lisoval A.A., Polyakov A.P. Fuel supply system for dual- fuel engine featuring two-speed governor. *Dvigatelistroenie* [Engines Construction], 2001, no. 3, pp. 29–31. (In Russ.).
- [21] Markov V.A., Furman V.V., Ivanov V.A. et al. Electronic systems of fuel supply control in gas and diesel-gas engines. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2012, no. 4, pp. 14–18. (In Russ.).
- [22] Markov V.A., Furman V.V., Ivanov V.A. et al. Fuel supply systems for gas-diesel and gas engines. *Gruzovik*, 2013, no. 4, pp. 38–45. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 11.10.2022

Информация об авторах

ФУРМАН Виктор Владимирович — доктор технических наук, генеральный директор. ООО «ППП «Дизельавтоматика» (410017, Саратов, Российская Федерация, ул. Чернышевского, д. 109, e-mail: dizavt@overta.ru).

МАРКОВ Владимир Анатольевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

ПЛАХОВ Сергей Валентинович — кандидат технических наук, зам. генерального директора, главный программист. ООО «ППП Дизельавтоматика» (410017, Саратов, Российская Федерация, ул. Чернышевского, д. 109, e-mail: plahov@overta.ru).

Information about the authors

FURMAN Viktor Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), General Director. ООО PPP Dizelavtomatika (410017, Saratov, Russian Federation, Chernyshevskogo St., Bldg. 109, e-mail: dizavt@overta.ru).

MARKOV Vladimir Anatolyevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Combined Engines and Alternative Power Plants. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya Str., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vladimir.markov58@yandex.ru).

PLAKHOV Sergei Valentinovich — Candidate of Science (Eng), Deputy General Director, Chief Programmer. ООО PPP Dizelavtomatika (410017, Saratov, Russian Federation, Chernyshevskogo St., Bldg. 109, e-mail: plahov@overta.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Фурман В.В., Марков В.А., Плахов С.В. Система электронного управления топливopодачей газодизельного двигателя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 1, с. 52–62, doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-52-62

Please cite this article in English as:

Furman V.V., Markov V.A., Plakhov S.V. Electronic Fuel Control System of a Gas-Diesel Engine. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 1, pp. 52–62, doi: 10.18698/0536-1044-2023-1-52-62