

Электронное управление топливоподачей дизельного двигателя на основе программного ПИД-регулирования

Докт. техн. наук, доц. А. Г. Баханович¹⁾, канд. техн. наук, доц. В. А. Кусяк¹⁾, магистры техн. наук А. Н. Гурин¹⁾, Ле Ван Нгиа¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Представлена принципиальная схема электронного управления дизельным двигателем внутреннего сгорания стандарта Euro-3, описана программно-аппаратная платформа пневматического привода регулятора топливного насоса высокого давления, позволяющая реализовать электронное управление топливоподачей дизельного двигателя КамАЗ-740. В основу концепции электронного управления положена стратегическая зависимость углового положения рычага регулятора топливного насоса высокого давления от углового перемещения электронной педали акселератора. Реализацию указанной зависимости осуществляли путем подачи модулированного широтно-импульсного сигнала определенной скважности от контроллера на обмотку пропорционального электромагнитного клапана, отвечающего за величину давления сжатого воздуха в рабочей полости силового пневмоцилиндра, шарнирно соединенного с рычагом регулятора топливного насоса высокого давления. При этом в цепь управления вводили обратную связь по положению рычага регулятора топливного насоса высокого давления, а управление оборотами коленчатого вала двигателя осуществляли с использованием программного ПИД-регулятора непрерывного действия. Разработанная стратегия дает возможность в режиме реального времени отследить отклонение регулируемого параметра от заданной величины и практически мгновенно выработать управляющее воздействие на исполнительные механизмы для устранения этого отклонения, обеспечивая минимальное время переходного процесса. Настройку параметров регулятора (пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих) производили эмпирическим путем с использованием классического метода Циглера – Никольса, основанного на анализе запаса устойчивости системы автоматического регулирования. Приведены результаты расчета коэффициентов пропорционального интегрально-дифференциального регулятора, а также осциллограммы полунатурного эксперимента по апробации предложенной стратегии управления топливоподачей дизельного двигателя с использованием средств визуализации CoDeSys V2.3.

Ключевые слова: дизельный двигатель, электронное управление, топливоподача, программно-аппаратная платформа, ПИД-регулирование, обратная связь, ШИМ-сигнал

Для цитирования: Электронное управление топливоподачей дизельного двигателя на основе программного ПИД-регулирования / А. Г. Баханович [и др.] // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 28–37. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37

Electronic Control for Fuel Supply of Diesel Engine on the Basis of Programmable PID-Regulator

A. G. Bakhanovich¹⁾, V. A. Kusyak¹⁾, A. N. Gurin¹⁾, Le Van Ngia¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents a schematic diagram of the Euro-3 diesel engine electronic control and describes hard- and software platform of the high pressure fuel pump pneumatic actuator control that allows to realize the concept of electronic fuel supply control for KamAZ-740 diesel engine. A strategic dependence between an angular position of high pressure fuel pump governor lever and angular displacement of electronic accelerator pedal is taken as a basic principle for an electronic

Адрес для переписки

Кусяк Виктор Анатольевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-82-05
avto_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kusyak Victor A.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-82-05
avto_atf@bntu.by

control concept. Implementation of the indicated dependence has been carried out through supplying a modulated PWM-signal with some impulse ratio from a controller to a coil of proportional solenoid-operated valve which is responsible for compressed air pressure value in the working space of a power pneumatic cylinder pivotally connected with a governor lever of a high pressure fuel pump. In this case a feedback has been introduced in the control circuit according to the position of governor lever in the high pressure fuel pump and engine crankshaft speed control has been carried out while using a programmable PID-regulator of continuous action. The developed strategy provides the possibility to trace deflection of the controlled parameter from a preset value in real-time mode and practically instantly to develop a control action on operating actuators with the purpose to eliminate this deflection while providing a minimum time for transition process. Setting of regulator parameters (proportional, integral and differential components) has been made empirically while using a classical Ziegler – Nichols method which is based on the analysis of a stability factor for an automatic control system. The paper presents results of calculation on coefficients of a proportional integral-differential regulator and an oscillogram of semi-natural experiment according to approbation of the proposed control strategy for fuel delivery in a diesel engine while using CoDeSys V2.3 visualization tools.

Keywords: diesel engine, electronic control, fuel supply, hardware and software platform, PID-regulator, feedback, PWM-signal

For citation: Bakhanovich A. G., Kussyak V. A., Gurin A. N., Ngia Le Van. Electronic Control for Fuel Supply of Diesel Engine on the Basis of Programmable PID-Regulator. *Science and Technology*, 16 (1), 28–37. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-28-37 (in Russian)

Введение

По данным Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, доля эксплуатирующихся транспортных средств, оснащенных дизельными двигателями стандарта Euro-2, все еще довольно велика и составляет приблизительно 55–62 % от общего парка. Поэтому реализация концепции электронного управления таких двигателей принесла бы ощутимый экономический эффект, особенно при автоматизации силового агрегата в комплексе, включая дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС), сухое фрикционное сцепление и механическую коробку передач. Электронное управление дизельным двигателем с механической топливopодачей требует введения в цепь управления обратной связи по оборотам коленчатого вала двигателя или по положению рычага регулятора топливного насоса высокого давления (ТНВД). И в том и другом случае концепция электронного управления предусматривает наличие пропорционального, пропорционально-интегрального или пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования контролируемого параметра.

Основная часть

Для электронного управления ДВС с механической топливopодачей необходимо разорвать механическую связь между педалью и рычагом регулятора ТНВД. При этом в качестве органа управления следует использовать электронную педаль акселератора с датчиком ее углового положения. В этом случае датчик педали «газа», непрерывно регистрирующий изменение угла ее положения и передающий соответствующий сигнал в блок управления

работой двигателя, функционально эквивалентен механической связи.

Исходя из вышеизложенного, пульт управления испытательным стендом [1] был оснащен напольной педалью Global MT 7000 серии Mechatronic с бесконтактным электронным датчиком положения vSENSETM [2], работающим на эффекте Холла. Использование технологии на базе эффекта Холла [3, с. 133; 4, с. 379, рис. 3] для определения углового положения педали управления топливopодачей, а также отсутствие подвижных контактов в паре «ось педали – сенсор» в совокупности обеспечивают высокую точность мониторинга позиционирования и степень надежности измерительного узла. По данным, предоставленным концерном Kongsberg Automation (Германия) и ООО «Кора» (Россия), педаль Global MT 7000 превышает степень защиты IP67 при работе в динамических и статических условиях [2, 5].

Принципиальная схема электронного управления дизельным ДВС КамАЗ-740 с механической топливopодачей представлена на рис. 1. В приведенной мехатронной системе в качестве рабочего тела используется сжатый воздух, что обусловлено наличием автономного источника энергии (компрессора) в пневматической тормозной системе грузовых автомобилей и магистральных автопоездов.

В качестве исполнительного механизма управления топливopодачей используются пневматический силовой цилиндр 11 (рис. 1) серии C85N20-40S, шарнирно соединенный с рычагом регулятора ТНВД 17, и пропорциональный электромагнитный клапан (ПЭМК) 6 модели VER3121-1 [6]. ПЭМК предназначен для непрерывного пропорционального управ-

ления давлением воздуха в рабочей полости силового цилиндра 11 с помощью электрического сигнала. Управление пропорциональным электромагнитным клапаном осуществляется электронным блоком управления (ЭБУ) 15 посредством модулированного широтно-импульс-

ного (ШИМ) сигнала напряжения [3, с. 103, рис. 44]. Потенциметрический датчик 12 угловых перемещений МУ 615-А отслеживает текущее положение рычага регулятора ТНВД, обеспечивая обратную связь в контуре управления топливоподачей.

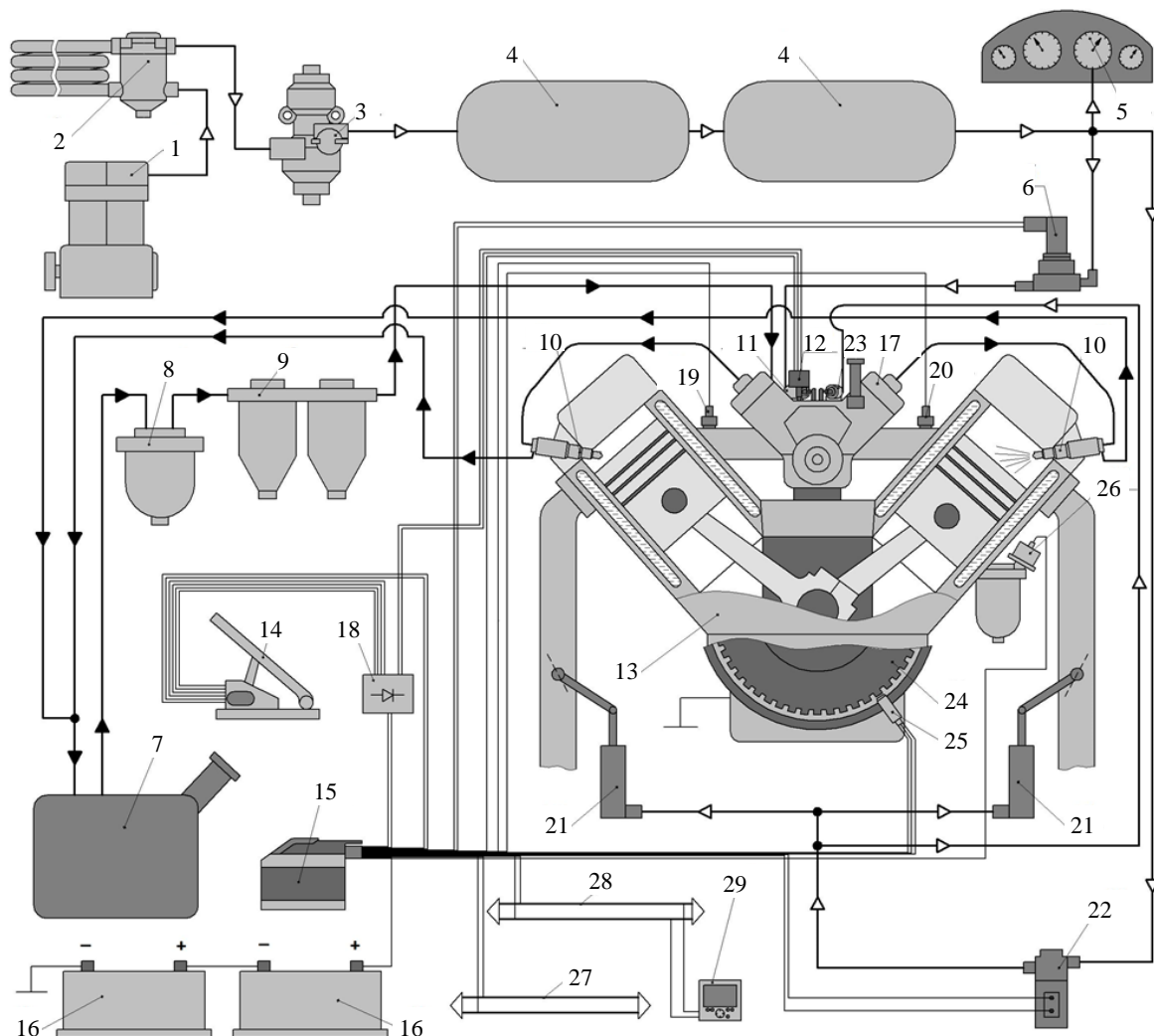


Рис. 1. Структурная схема электронного управления дизельным двигателем внутреннего сгорания с механической топливоподачей: 1 – компрессор; 2 – воздухоосушитель; 3 – регулятор давления; 4 – ресиверы; 5 – приборная панель; 6 – пропорциональный электромагнитный клапан управления двигателем; 7 – топливный бак; 8, 9 – фильтр грубой и тонкой очистки топлива; 10 – форсунка; 11, 21 – пневмоцилиндр; 12 – датчик угловых перемещений; 13 – блок цилиндров; 14 – электронная педаль «газа»; 15 – электронный блок управления; 16 – аккумуляторная батарея; 17 – топливный насос высокого давления; 18 – стабилизатор напряжения; 19 – датчик перегрева; 20 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 22 – клапан моторного тормоза; 23 – пневмоцилиндр выключения топливоподачи; 24 – маховик; 25 – датчик частоты вращения; 26 – датчик давления масла; 27, 28 – шины данных CANOpen и J1939; 29 – ЖК-монитор

Fig. 1. Structural scheme of electronic control for diesel internal combustion engine with mechanical fuel supply: 1 – compressor; 2 – air-drier; 3 – pressure regulator; 4 – receivers; 5 – control panel; 6 – proportional electromagnetic valve for engine control; 7 – fuel tank; 8, 9 – coarse and fine filters for fuel purification; 10 – injector; 11, 21 – pneumatic cylinders; 12 – angular movement sensor; 13 – cylinder block; 14 – electronic accelerator pedal; 15 – electronic control unit (ECU); 16 – accumulator battery; 17 – high-pressure fuel injection pump; 18 – voltage stabilizer; 19 – overheating sensor; 20 – temperature coolant sensor; 22 – engine brake valve; 23 – pneumatic cylinder for fuel shutoff; 24 – flywheel; 25 – RPM sensor; 26 – oil-pressure sensor; 27, 28 – CANOpen and J1939 data bus; 29 – liquid-crystal display

Размещение вышеописанных компонентов мехатронной системы на дизельном двигателе и рабочем месте оператора испытательного стенда проиллюстрировано на рис. 2. Технические характеристики смарт-контроллера Esomat R360 серии CR2500 [7], являющегося основой спроектированной программно-аппаратной платформы, представлены в табл. 1. Распределение датчиков и электромагнитных клапанов управления исполнительными механизмами автоматизированного двигателя КамАЗ-740 по портам смарт-контроллера приведено в [8, с. 47, табл. 1].

Благодаря наличию CAN-интерфейса (табл. 1), ЭБУ дизельного двигателя имеет возможность интеграции в архитектуру бортовой сети автомобиля (рис. 1, поз. 27), что позволяет обрабатывать комплексные алгоритмы взаимодействия между различными мехатронными системами, используя для обмена данными протокол высокого уровня SAE J1939 [9].

Концепция электронного управления дизельным двигателем с механической топливоподачей заключается в обеспечении пропорционального соотношения между положением педали акселератора и рычага регулятора ТНВД [10], определяющего цикловую подачу топлива и, как следствие, частоту вращения коленчатого вала ДВС. Максимальный угол

перемещения электронной педали «газа» составляет 17° , что соответствует диапазону изменения выходного сигнала от 18 до 140 бит (0012...008С HEX) при 10-битном аналого-цифровом преобразователе (АЦП) контроллера и опорном напряжении питания датчика 5 В. Угол перемещения рычага регулятора составляет 40° , что соответствует при тех же параметрах АЦП и опорном напряжении диапазону изменения выходного сигнала датчика от 14 до 122 бит (000E...007A HEX).

Однако ввиду того что на рычаг управления регулятором ТНВД оказывают силовое воздействие пружина насоса и сила от перемещающихся грузов регулятора, возникает проблема согласования начала перемещения педали «газа» и начала перемещения штока силового цилиндра, шарнирно соединенного с рычагом регулятора. Экспериментально при помощи построителя диаграмм CoDeSys [11, с. 6–65] определено, что для отрыва рычага регулятора ТНВД из крайнего положения, соответствующего минимально устойчивой частоте вращения коленвала двигателя, необходим ток на обмотке ПЭМК 1 (рис. 2) $I_{нач} = 0,29$ А. Это значение выходит за пределы неустойчивой работы пропорционального электромагнитного клапана [6], определяемой его технической характеристикой (рис. 3).

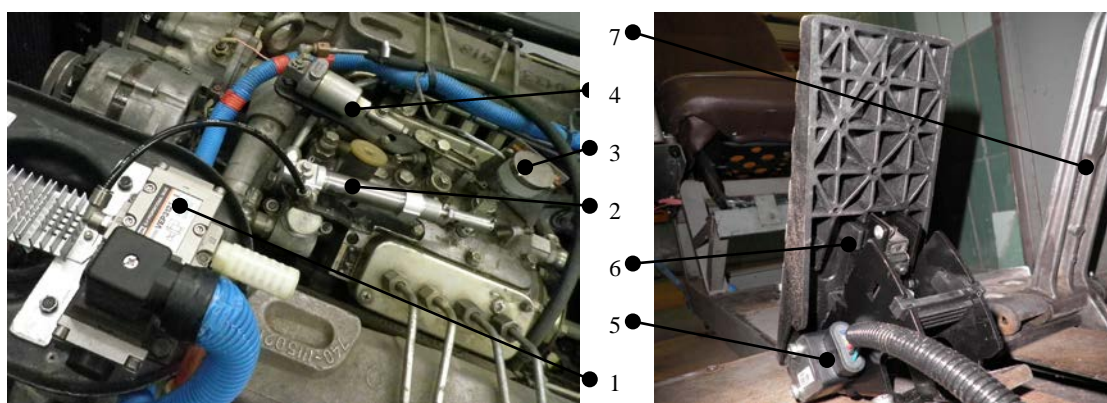


Рис. 2. Размещение компонентов мехатронной системы на испытательном стенде:

1 – пропорциональный электромагнитный клапан; 2 – силовой пневмоцилиндр; 3 – датчик перемещения рычага регулятора топливного насоса высокого давления; 4 – пневмоцилиндр выключения подачи топлива; 5 – датчик углового положения; 6 – педаль управления топливоподачей двигателя внутреннего сгорания; 7 – педаль тормоза

Fig. 2. Component layout of mechatronic system on testing bench:

1 – proportional electromagnetic valve; 2 – actuating pneumatic cylinder; 3 – governor lever position sensor of high-pressure fuel injection pump; 4 – pneumatic cylinder for fuel shutoff; 5 – angular position sensor; 6 – control pedal of fuel engine supply; 7 – brake pedal

Таблица 1

Технические характеристики контроллера CR2500
 Technical characteristics of CR2500 controller

Наименование параметра	Значение (описание)
Процессор	CMOS C167C
Напряжение питания, В	10–32
Разрядность микроконтроллера, бит	16
Частота работы процессора, МГц	20
Количество входов	8: конфигурируются как 4 аналоговых входа, 4 цифровых входа, 2 частотных входа (до 30000 Гц)
Количество выходов	4: конфигурируются как цифровые выходы (до 4 А на канал), PWM-выходы (20–250 Гц)
Диапазон рабочих температур, °С	(–40)–(+85)
Интерфейс	CAN (2), RS232
Память программ, кБ	192
Память данных, кБ	64 – SRAM; 32 – FLASH; 3 – EEPROM

Верхнюю границу токового диапазона определяли исходя из условия упора рычага регулятора в винт ограничения максимальных оборотов двигателя. В этом случае ток, протекающий через ПЭМК, составляет $I_{кон} = 0,74$ А. То есть верхняя граница токового диапазона также попадает в зону устойчивой работы пропорционального клапана (рис. 3).

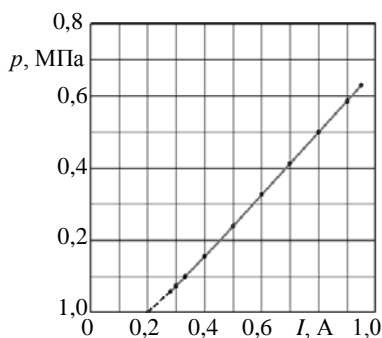


Рис. 3. Характеристика «ток – давление» пропорционального электромагнитного клапана SMC VEP3121-1

Fig. 3. “Current – pressure” characteristic of SMC VEP3121-1 proportional electromagnetic valve

Величина силы тока на обмотках ПЭМК зависит от скважности ШИМ-сигнала, генерируемого таймером-счетчиком и выходным каска-

дом контроллера при инициализации функционального блока PWM [7, с. 9–7]. Коэффициент заполнения площади ШИМ-сигнала задавали на программном уровне входным аргументом Value [7, с. 9–7, табл. 3], принимающим значения от 0 до 65535 (0000...FFFF HEX). При этом эквивалентное напряжение на контактах пропорционального электромагнитного клапана изменялось от минимального 0 (при Value = 65535) до максимального 24 В значений напряжения бортовой сети (при Value = 0), что соответствовало изменению коэффициента заполнения ШИМ-сигнала от 0 до 100 % (рис. 4).

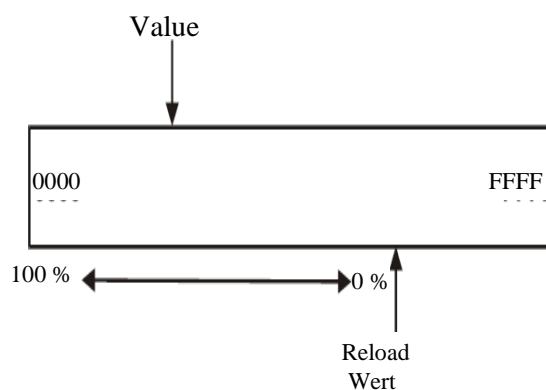


Рис. 4. Принцип формирования широтно-импульсного сигнала

Fig. 4. Generation principle of PWM-signal

С помощью функционального блока Output Current [7, с. 4–16], возвращающего величину силы тока на активном PWM-канале контроллера, определено, что токовому диапазону 290–740 мА на электромагнитном клапане соответствует диапазон 40500–1700 (9E34...06A4 HEX) значений аргумента Value, что составляет 59 % (3–62 %) скважности управляющего ШИМ-сигнала. Таким образом, для управления оборотами двигателя от минимально устойчивых (550–560 об/мин) до максимальных (2600 об/мин) ток на электромагнитном клапане $I_{кл}$ должен изменяться от 0,29 до 0,74 А в зависимости от углового положения педали акселератора.

Программно реализуемые посредством функционального блока NORM [7, с. 11–33] пропорциональные преобразования в среде CoDeSys [11] позволили получить стратегическую зависимость (рис. 5) углового положения рычага регулятора ТНВД ($\alpha_{рег}$) от углового положения электронной педали «газа» ($\alpha_{пед}$).

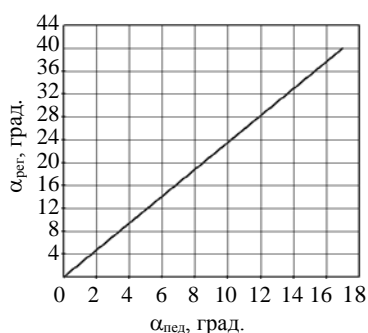


Рис. 5. Зависимость углового положения рычага регулятора топливного насоса высокого давления от положения педали акселератора

Fig. 5. Dependence of governor lever angular position for injection pump on position of electronic accelerator pedal

Реализацию указанной зависимости $I_{кл} = f(\alpha_{пед})$ при электронном управлении топливоподачей осуществляли путем подачи модулированного ШИМ-сигнала определенной скважности от контроллера 15 (рис. 1) на обмотку ПЭМК 6, отвечающего за величину давления сжатого воздуха в рабочей полости силового пневмоцилиндра 11. Осциллограмма вышеописанного процесса управления топливоподачей при неработающем двигателе и давлении $P = 0,65$ МПа в пневмосистеме представлена на рис. 6.

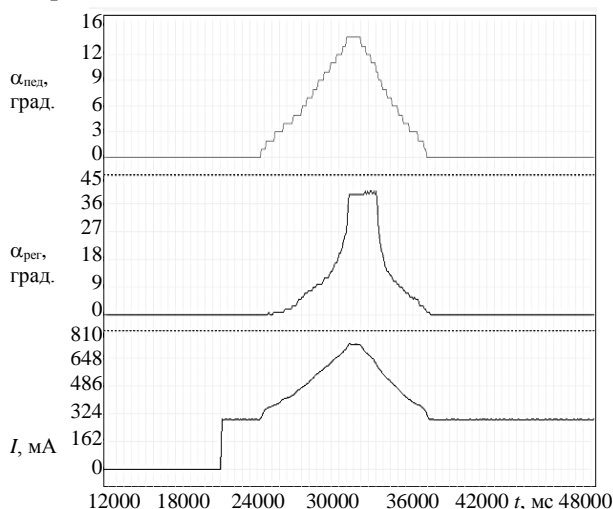


Рис. 6. Осциллограмма процесса электронного управления топливоподачей: $\alpha_{пед}$ – угловое положение педали акселератора; $\alpha_{рег}$ – угловое положение рычага регулятора топливного насоса высокого давления; I – ток на обмотках пропорционального электромагнитного клапана; t – текущее время

Fig. 6. Operational oscillogram of electronic control fuel supply: $\alpha_{пед}$ – angular position of accelerator pedal; $\alpha_{рег}$ – angular position of governor lever angular position of high-pressure fuel injection pump; I – winding current of proportional electromagnetic valve; t – current time

Однако при стендовых испытаниях спроектированной мехатронной системы на определенных нагрузочных режимах двигателя наблюдали потерю устойчивости системы («раскачка двигателя»), выразившуюся в изменении оборотов двигателя при постоянном положении электронной педали «газа». Этот негативный эффект объясняется тем, что пропорциональное управление по положению педали акселератора, в принципе, позволяет выработать управляющее воздействие на исполнительный механизм топливоподдачи для установки требуемых оборотов коленчатого вала, но электронная система не может отследить результат и ввести коррекцию без наличия обратной связи. Поэтому дальнейшие усилия были направлены на выбор параметра обратной связи и переход от пропорционального управления к пропорциональному управлению с регулированием.

Как известно из теории автоматических систем, основным признаком регулирования является замкнутая последовательность действий в пределах рассматриваемого контура. При этом фактическое значение контролируемого параметра постоянно сравнивается с его требуемой величиной, и при обнаружении значимых различий происходит автоматическая коррекция работы исполнительного механизма. Реализация указанной стратегии дает возможность в режиме реального времени отследить отклонение регулируемого параметра от заданной величины и практически мгновенно выработать управляющее воздействие для устранения этого отклонения.

С учетом вышесказанного в цепь управления пропорциональным электромагнитным клапаном была введена обратная связь по положению рычага регулятора ТНВД. Управление оборотами коленчатого вала двигателя осуществляли с использованием программного ПИД-регулятора непрерывного действия, передаточная функция которого описывается уравнением [11, с. 10–58]

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt},$$

где e – ошибка регулирования; K_p , K_i , K_d – пропорциональный, интегральный и дифференци-

альный коэффициент усиления; τ – время с момента, когда отклонение e регулируемой величины стало значимым; t – текущее время.

Вышеописанный регулятор обеспечивает отрицательную обратную связь изменения регулируемого параметра на управляющее воздействие. В частности, регулирование частоты вращения коленчатого вала двигателя (поддержание углового положения $\alpha_{\text{рег}}$ рычага регулятора на заданном уровне) осуществляется с помощью регулирования давления воздуха в силовом цилиндре 7 (рис. 7), величина которого зависит от скважности ШИМ-сигнала, генерируемого контроллером 8 и поступающего на катушку ПЭМК 6.

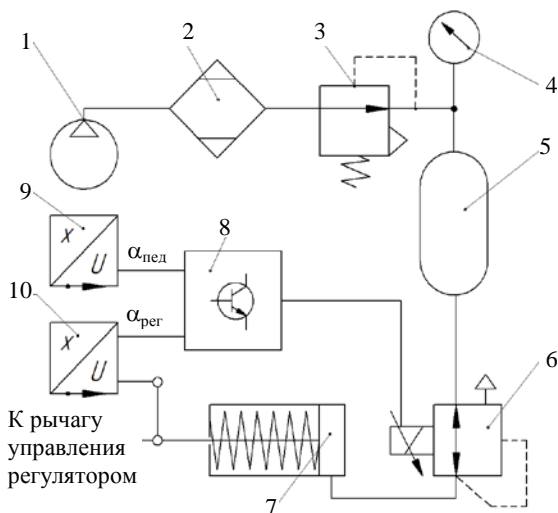


Рис. 7. Структурная схема контура регулирования:

- 1–5 – питающая часть пневмопривода;
- 6 – пропорциональный электромагнитный клапан;
- 7 – пневмоцилиндр; 8 – электронный блок управления;
- 9, 10 – датчик положения педали «газа» и рычага регулятора топливного насоса высокого давления;
- $\alpha_{\text{пед}}$, $\alpha_{\text{рег}}$ – угловое положение педали «газа» и рычага регулятора

Fig. 7. Structural scheme of control loop:

- 1–5 – supply part of pneumatic actuator; 6 – proportional electromagnetic valve; 7 – pneumatic cylinder;
- 8 – electronic control unit (ECU); 9, 10 – accelerator pedal position sensor and governor lever position sensor of high-pressure fuel injection pump; α_{ped} , α_{reg} – angular position of accelerator pedal and governor lever position

При отклонении положения рычага регулятора от заданного значения на некую положительную величину e , т. е. при превышении уставки до уровня $(\alpha_{\text{рег}} + e)$, к текущему входному сигналу эквивалентного напряжения U

пропорционального электромагнитного клапана будет добавлен отрицательный сигнал регулятора u (рис. 8). Таким образом, результирующим сигналом на входе пропорционального электромагнитного клапана будет $(U - u)$, что уменьшит выходную скважность ШИМ-сигнала в катушке ПЭМК и, следовательно, частоту вращения коленчатого вала.

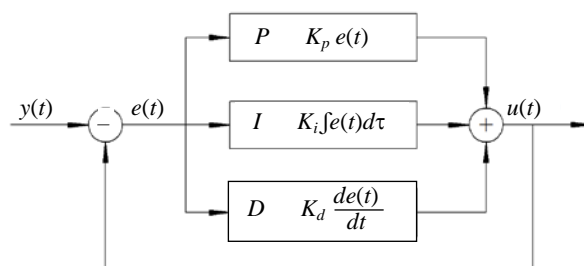


Рис. 8. Структурная схема ПИД-регулирования

Fig. 8. Structural scheme of PID-regulator

Выбор ПИД-регулирования в качестве базового закона обусловлен необходимостью иметь нулевую ошибку регулирования при минимальном времени переходного процесса. Управляющая программа ЭБУ была написана в среде CoDeSys V2.3 на языке ST [12, с. 59] с использованием функционального блока PID1, реализующего функцию ПИД-регулирования [7, с. 7–12].

Настройку параметров регулятора (пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих) производили эмпирическим путем с помощью классического метода Циглера – Никольса [13], основанного на использовании запаса устойчивости системы. Согласно указанному методу пропорциональный коэффициент передачи K_p ПИД-регулятора на программном уровне увеличивался до тех пор, пока на выходе системы не устанавливались колебания с постоянной амплитудой, т. е. система не оказывалась на границе устойчивости. При этом фиксировали коэффициент передачи регулятора ($K_p^* = 60$) и производили запись переходного процесса (рис. 9) с последующим определением периода T^* установившихся в системе колебаний ($T^* = 1$ с).

Значения параметров ПИД-регулятора рассчитывали по формулам [14, с. 197, табл. 4–8]:

$$K_p = 0,6K_p^* = 0,6 \cdot 60 = 36;$$

$$K_i = 0,12 \frac{K_p^*}{T^*} = 0,12 \frac{60}{1} = 7,2;$$

$$K_d = 0,075 K_p^* T^* = 0,075 \cdot 60 \cdot 1 = 4,5.$$

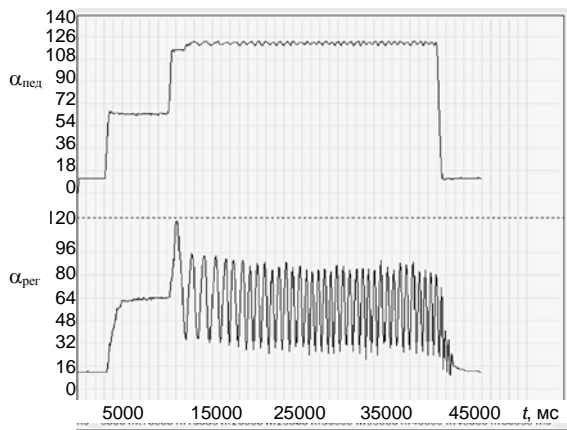


Рис. 9. Осциллограмма автоколебаний системы

Fig. 9. Oscillogram of system self-oscillations

После проведения многочисленных экспериментов с применением интерактивного программного обеспечения на компьютере, вре-

менно включенном в контур управления, в память контроллера в рамках управляющей программы были записаны следующие значения коэффициентов регулятора: $K_p = 34$; $K_i = 7$; $K_d = 5$. Осциллограммы переходного процесса в системе при данных настройках регулятора представлены на рис. 10, 11.

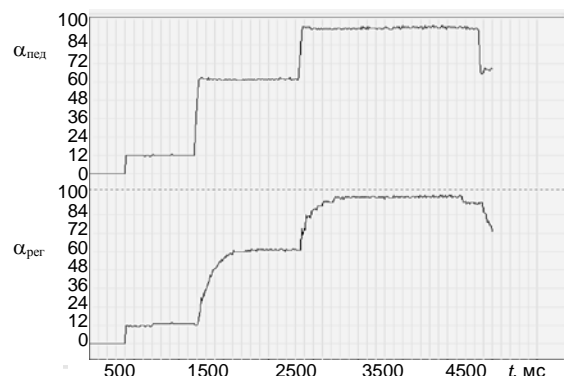


Рис. 10. Осциллограмма процесса управления топливоподачей при неработающем двигателе

Fig. 10. Oscillogram for fuel supply control with non-operated engine

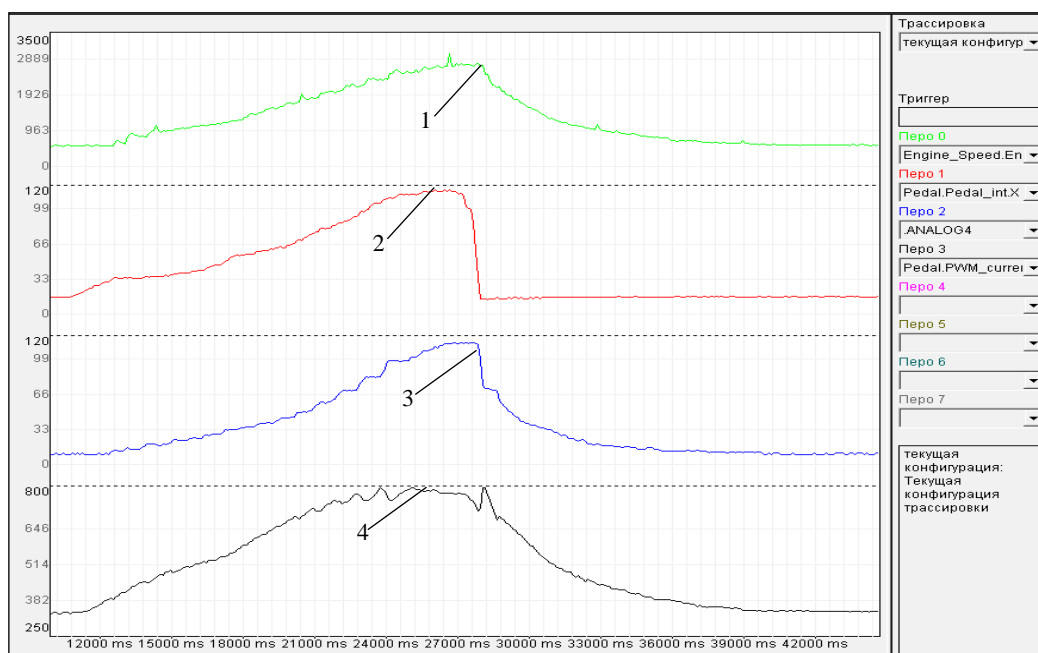


Рис. 11. Осциллограмма процесса управления топливоподачей двигателя внутреннего сгорания:

1 – частота вращения коленвала двигателя, об/мин; 2 – перемещение педали акселератора, бит;

3 – перемещение рычага регулятора топливного насоса высокого давления, бит;

4 – ток на обмотках пропорционального электромагнитного клапана управления топливоподачей, мА

Fig. 11. ICE fuel supply control oscillogram: 1 – engine crankshaft speed, rpm; 2 – accelerator pedal movement, bit;

3 – governor lever movement of high-pressure fuel injection pump, bit;

4 – winding current of proportional electromagnetic valve for fuel supply control, mA

Таким образом, программный ПИД-регулятор с данными настройками позволяет придерживаться выбранной стратегии управления исполнительными механизмами, обеспечивая требуемую частоту вращения коленчатого вала двигателя пропорционально положению педали управления топливоподачей на различных нагрузочных режимах двигателя, а также необходимую устойчивость спроектированной системы автоматического управления и минимальное время переходного процесса.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная программно-аппаратная платформа системы управления позволяет реализовать концепцию электронного управления топливоподачей дизельного двигателя в соответствии с нормами стандарта Euro-3, что значительно расширяет возможности управления силовым агрегатом грузовых автомобилей, уменьшает количество единиц аппаратной части, упрощает процедуру диагностики, а также способствует повышению технического уровня, а следовательно, и конкурентоспособности выпускаемой в Республике Беларусь автотракторной техники.

2. С учетом структуры и специфики проектируемой системы для регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя оптимальным будет использование электронного регулятора непрерывного непрямого действия, реализованного в рамках управляющей программы электронного блока управления и описываемого одним из типовых законов регулирования.

3. Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, программный ПИД-регулятор с коэффициентами усиления $K_p = 34$; $K_i = 7$ и $K_d = 5$ позволяет придерживаться выбранной стратегии управления исполнительными механизмами двигателя внутреннего сгорания, обеспечивая требуемую частоту вращения коленчатого вала дизельного двигателя КамАЗ-740 пропорционально положению педали управления топливоподачей на различных нагрузочных режимах, а также не-

обходимую устойчивость спроектированной мехатронной системы автоматического управления и минимальное время переходного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интеллектуальная система управления стэнда автоматизированного силового агрегата автомобиля / О. С. Руктешель [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2009. № 4. С. 31–36.
2. MT Series Mechatronic Throttle Pedal with vSENSETM Technology [Electronic Resource] // Kongsberg Automation GmbH, 2009. Mode of access: <http://www.controlsandcables.com/assets/Uploads/Throttle-Pedals-MT-Series.pdf>. Date of Access: 20.07.2012.
3. Шило, И. Н. Электронные системы мобильных машин / И. Н. Шило, А. И. Бобровник, В. Г. Левков. Минск: Беларус. гос. аграрный техн. ун-т, 2013. 320 с.
4. Autoelektrik, Autoelektronik / Robert Bosch GmbH. Springer, 2002. 503 p.
5. Электронная педаль Глобал управления подачей топлива серии MT [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://kopa.ru/netcat_files/instr/MT_Series.pdf. Дата доступа: 20.07.2012.
6. Устройства для регулирования давления и расхода [Электронный ресурс] // SMC Corporation – пневматика, гидравлика, вакуумная техника, контроллеры. Mode of Access: <http://www.smc-pneumatik.ru/cat.php?sub=89>. Date of Access: 31.06.2012.
7. System Manual Ecomat Mobile Controller Range R360 for CoDeSys from Version 2.3 and Target Version 04.xx.xx / Ifm Electronics GmbH. Germany, Essen, 28.07.2006.
8. Кусяк, В. А. Исследование динамики дизельного двигателя при электронном управлении моторным тормозом / В. А. Кусяк // Изобретатель. 2014. № 9. С. 45–48.
9. SAE International TM: Surface Vehicle Recommended Practice. J1939-71: Vehicle Application Layer. SAE Truck and Bus Control and Communications Network Subcommittee, 2003. 379 p.
10. Реализация концепции электронного управления при автоматизации дизельного двигателя с механической топливоподачей / А. Г. Баханович [и др.] // Новости науки и технологий. 2015. № 1. С. 11–18.
11. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys V2.3. Смоленск: Пролог, 2008. 452 с.
12. John, Karl-Heinz. IEC 61131-3 Programming Industrial Automation Systems: Concepts and Programming Languages, Requirements for Programming Systems, AIDS to Decision-Making Tools / Karl-Heinz John, Michael Tiegelkamp. New York: Springer, 2001. 376 p.
13. Ziegler, J. G. Optimum Settings for Automatic Controllers / J. G. Ziegler, N. B. Nichols // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 115 (2B), 220–222.

14. Digitale Regelung und Steuerung in der Versorgungstechnik (DDC-GA) / S. Baumgarth [et al.]. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 450 p.

Поступила 26.04.2016

Подписана в печать 30.06.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

REFERENCES

- Ruktshel O. S., Solomakho V. L., Filimonov A. A., Kussyak V. A. (2009) Intellectual Control System for Test Bench of Automobile Automatic Power-Transmission Plant. *Izvestiia Natsionalnoi Akademii Nauk Belarusi. Ser. Fiziko-Tekhnicheskikh Nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], (4), 31–36 (in Russian).
- MT Series Mechatronic Throttle Pedal with vSENSE™ Technology. *Konsberg Automation GmbH, 2009*. Available at: <http://www.controlsandcables.com/assets/Uploads/Throttle-Pedals-MT-Series.pdf>. (Accessed: 20 July 2012).
- Shilo I. N., Bobrovnik A. I., Levkov V. G. (2013) *Electronic Systems of Mobile Machines*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University. 320 (in Russian).
- Robert Bosch GmbH (2002) *Autoelektrik, Autoelektronik*. Springer. 503. DOI: 10.1007/978-3-322-91560-3.
- Electronic Global Pedal for Fuel supply Control, MT Series. Available at: http://kopa.ru/netcat_files/instr/MT_Series.pdf. (Accessed: 20 July 2012) (in Russian).
- Pressure and Consumption Regulating-Devices. *SMC Corporation – Pneumatics, Hydraulics, Vacuum Equipment, Controllers*. Available at: <http://www.smc-pneumatik.ru/cat.php?sub=89>. (Accessed: 31 Juny 2012) (in Russian).
- System Manual Ecomat Mobile Controller Range R360 for CoDeSys from Version 2.3 and Target Version 04.xx.xx. Ifm Electronics GmbH, Germany, Essen, 28.07.2006.
- Kussyak V. A. Investigations on Dynamics of diesel Engine During Electronic Control of Engine Brake. *Izobretatel [Inventor]*, (9), 45–48 (in Russian).
- SAE International TM: Surface Vehicle Recommended Practice. J1939-71: Vehicle Application Layer. SAE Truck and Bus Control and Communications Network Subcommittee, 2003. 379.
- Bakhanovich A. G., Ruktshel O., Kussyak V., Gurin A. (2015) Realization of Conception on Electronic Control During Automation of Diesel Engine with Mechanical Fuel Supply. *Novosti Nauki i Tekhnologii* [News of Science and Technology], (1), 11–18 (in Russian).
- Operating Manual for PLC Programming in CoDeSys V2.3*. Smolensk, Prolog Publ., 2008. 452 (in Russian).
- John Karl-Heinz, Tiegelkamp Michael (2001) *IEC 61131-3 Programming Industrial Automation Systems: Concepts and Programming Languages, Requirements for Programming Systems, AIDS to Decision-Making Tools*. New York, Springer. 376. DOI: 10.1007/978-3-662-07847-1.
- Ziegler J. G., Nichols N. B. (1993) Optimum Settings for Automatic Controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 115 (2B), 220–222. DOI: 10.1115/1.2899060.
- Baumgarth S., Karbach A., Otto D., Schernus G. P., Treusch W. (1993) *Digitale Regelung und Steuerung in der Versorgungstechnik (DDC-GA)*. Berlin, Springer-Verlag. 450 (in German).

Received: 26.04.2016

Accepted: 30.06.2016

Published online: 30.01.2017