

УДК 629.03

## РЕАЛИЗАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С МЕХАНИЧЕСКОЙ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ

**А. Г. Баханович,**

профессор кафедры «Техническая эксплуатация автомобилей», декан автотракторного факультета БНТУ,  
д-р техн. наук, доцент

**О. С. Руктешель,**

заведующий кафедрой «Автомобили» БНТУ, д-р техн. наук, профессор

**В. А. Кусяк,**

доцент кафедры «Автомобили» БНТУ, канд. техн. наук, доцент

**А. Н. Гурин,**

инженер-конструктор, конструкторское бюро электронных систем ОАО «УКХ Минский моторный завод»,  
магистр техн. наук

## ELECTRONIC CONTROL CONCEPT IMPLEMENTATION AT THE AUTOMATION OF DIESEL ENGINE WITH A MECHANICAL FUEL SUPPLY

**A. Bakhnovich, O. Rukteshel, V. Kusyak, A. Gurin,**

Belarusian National Technical University

Дата поступления в редакцию — 06.02.2015 г.

В статье представлены принципиальная схема мехатронной системы управления силовым агрегатом автомобиля и аппаратная часть электронной системы управления дизельным двигателем с механической топливоподачей. Предложена стратегия управления исполнительным механизмом топливоподачи с учетом характеристик электронной педали акселератора, пропорционального электромагнитного клапана, выходного каскада контроллера и рабочего диапазона перемещения рычага регулятора ТНВД. Приведены результаты исследования влияния частоты ШИМ-сигнала на диапазон управления исполнительными механизмами, а также результаты полунатурного эксперимента по апробации предложенной стратегии управления исполнительным механизмом топливоподачи с использованием средств визуализации CoDeSys V2.3.

The article presents a schematic diagram of the powertrain mechatronic control system of the vehicle and electronic control hardware of the diesel engine with mechanical fuel supply. The paper proposes the fuel actuator control strategy based on the characteristics of the electronic accelerator pedal, proportional solenoid valve, controller output stage and the pump regulator operating lever range. The results of the PWM signal frequency influence investigation to a control range of actuators, as well as the results of semi-natural experiment for testing the proposed strategy of fuel actuator control using visualization CoDeSys V2.3 are given in activity.

**Введение.**

Оснащение силового агрегата транспортного средства дизельным двигателем внутреннего сгорания (ДВС) имеет ряд преимуществ и, в первую очередь, это на 20–25 % меньший по сравнению с бензиновыми аналогами удельный расход топлива, что связано с более высоким термическим КПД, обусловленным увеличенной степенью сжатия. Именно по этой причине приблизительно 65 % новых автомобилей в Европе оснащены дизельными двигателями.

В Республике Беларусь доля эксплуатирующихся транспортных средств, оснащенных дизельными двигателями, также велика. Согласно статистическим данным [1], 50–55 % от общего парка составляют грузовые автомобили и автобусы, оснащенные дизельными двигателями с механической топливоподачей. Однако использование двигателей с механической топливо-

подачей в мехатронных системах управления силовым агрегатом ограничено наличием механической связи между педалью газа (акселератора) и рычагом регулятора топливного насоса высокого давления (ТНВД), что не позволяет электронному блоку управления (ЭБУ) трансмиссией в процессе трогания, маневрирования и переключения передач регулировать обороты двигателя независимо от воздействия водителя на педаль газа.

Реализация концепции электронного управления дизельным двигателем с механической топливоподачей позволит интегрировать данную систему в общую электронную сеть автомобиля и обеспечить бесперебойную работу узлов, агрегатов и систем на всех возможных режимах движения при отработке комплексных алгоритмов взаимодействия между различными электронными системами транспортного средства.

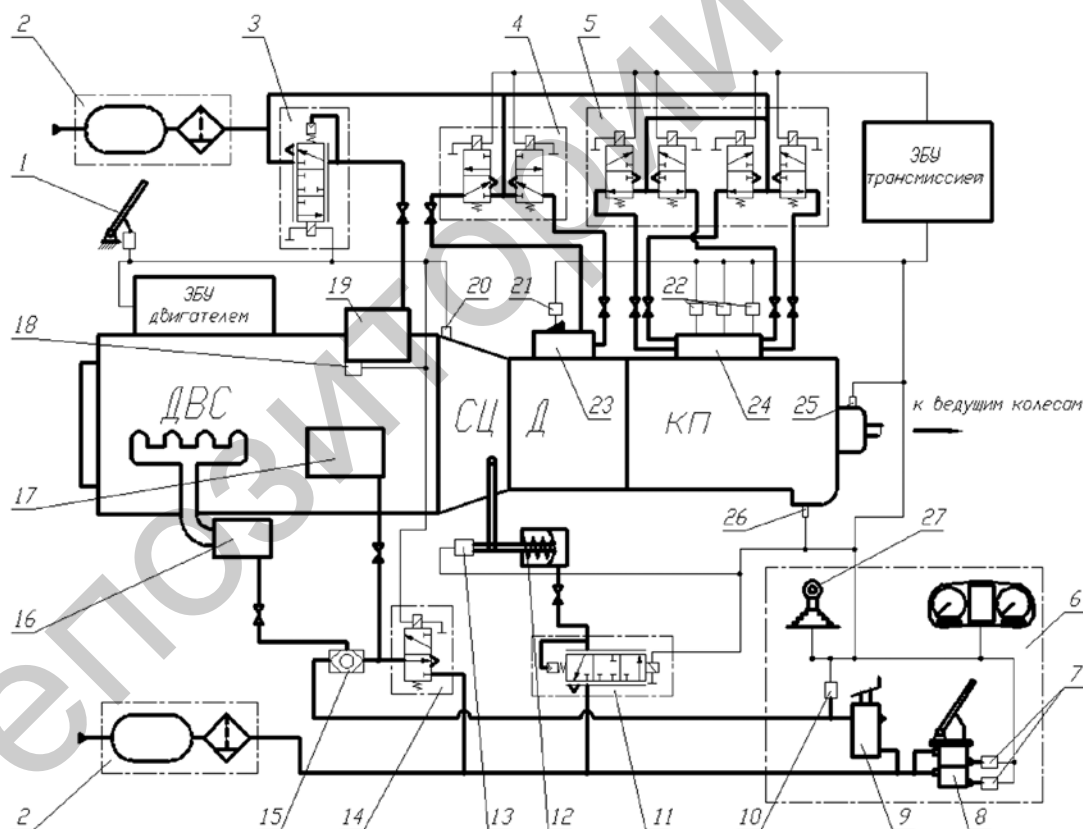


Рис. 1. Принципиальная схема мехатронной системы управления силовым агрегатом: 1 — педаль управления топливоподачей ДВС с датчиком положения; 2 — питающая часть пневмопривода; 3, 11 — пропорциональные ЭМК управления топливоподачей ДВС и сцеплением соответственно; 4 — ЭМК управления делителем; 5 — блок ЭМК управления исполнительным механизмом КП; 6 — органы управления и панель приборов; 7, 10 — датчики давления; 8 — педаль тормоза с двухсекционным тормозным краном; 9 — клапан останова двигателя; 12, 16, 17, 19, 23, 24 — исполнительные механизмы соответственно сцепления, моторного тормоза, выключения подачи топлива, рычага регулятора ТНВД, делителя и основной КП; 13, 18, 21 — датчики перемещения; 14 — ЭМК управления моторным тормозом и выключением подачи топлива; 15 — двухмагистральный клапан; 20, 25, 26 — датчики частоты вращения; 22 — концевые выключатели; 27 — селектор режимов

**Программно-аппаратная платформа электронной системы управления топливоподачей дизельного двигателя.**

Разработанный специалистами Белорусского национального технического университета пневматический привод регулятора ТНВД дизельного двигателя с механической топливоподачей имеет электронное управление и легко интегрируется в мехатронную систему управления силовым агрегатом автомобиля (рис. 1).

Как видно из представленной схемы, данная мехатронная система [2] разработана на базе механической трансмиссии, оснащенной сухим фрикционным сцеплением и многоступенчатой составной коробкой передач. Электронная система управления трансмиссией функционирует в комплексе с дизельным двигателем, имеющим электронное управление топливоподачей и моторным тормозом. При этом ЭБУ двигателем (см. рис. 1) и ЭБУ трансмиссией обмениваются данными по CAN-шине со скоростью 250 кбит/с, используя для этого протокол высокого уровня SAE J1939 [3, с. 37].

Несмотря на тот факт, что тонкое управление пневматическими исполнительными механизмами (ИМ) затруднено ввиду воздуха, в качестве рабочего тела для ИМ 16, 17, 19 управления двигателем (см. рис. 1) и ИМ 12, 23, 24 управления трансмиссией используется сжатый воздух. Выбор энергоносителя обусловлен наличием на борту автомобиля автономного источника энергии (компрессора), относительно невысоким давлением в системе (до 0,65–0,75 МПа), возможностью компенсации утечек и использованием в приводе штатных пневмоаппаратов тормозной системы. Кроме того, немаловажную роль при использовании вышеуказанного энергоносителя сыграл современный технический уровень и, как следствие, технические возможности применяемых в системе электронных компонентов. Современные смарт-контроллеры на программном уровне позволяют реализовать пропорционально-интегральное, пропорционально-дифференциальное или пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование контролируемого параметра и могут сгенерировать модулированный широтно-импульсный сигнал (ШИМ-сигнал) напряжения с нагрузкой по току до 4 А на один канал. В последнее время также усовершенствовалась конструкция и улучшились технические

характеристики пропорциональных электромагнитных пневматических клапанов, которые могут работать как по давлению, так и по потоку энергоносителя [4]. Все это в совокупности позволяет решить проблему управления исполнительными механизмами на качественно новом уровне с использованием пневматики.

Для автоматизации работы дизельного ДВС с механической топливоподачей необходимо разорвать механическую связь между педалью газа и рычагом регулятора ТНВД. В качестве органа управления при этом рационально использовать электронную педаль «газа» с датчиком ее углового перемещения. Исходя из современных тенденций развития автомобильных электронных систем [5, с. 378], в качестве задающего элемента была выбрана напольная педаль «газа» модели 57SD (рис. 2) с бесконтактным датчиком положения, работающем на эффекте Холла [6].

В электронной системе управления топливоподачей дизельного двигателя (рис. 3) датчик 8 положения педали газа принимает на себя функцию механической связи. Он регистрирует изменение угла положения педали и передает соответствующий сигнал в электронный блок 7 управления работой двигателя.

Пропорциональность между углом поворота педали и перемещением штока силового цилиндра 6 (см. рис. 3), который механически связан с рычагом регулятора ТНВД, обеспечивается электромагнитным клапаном (ЭМК) 5. Пропорциональный ЭМК 5 SMC VEP 3121-1 предназначен



Рис. 2. Электронная педаль газа 57SD

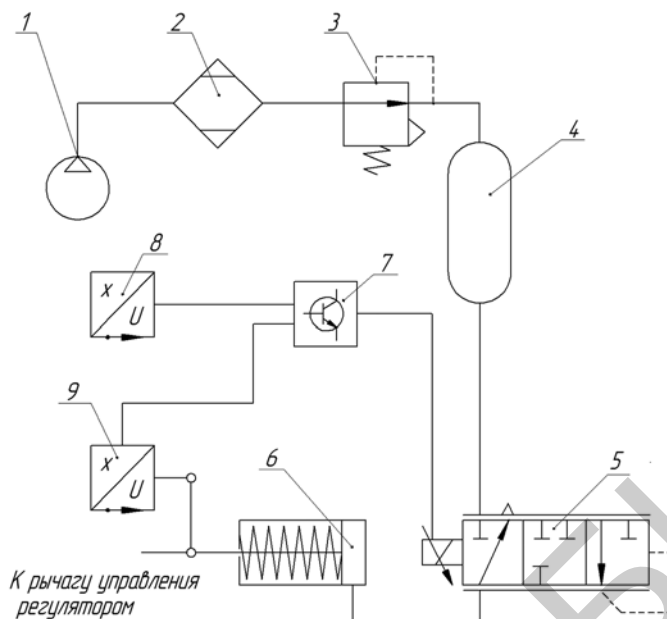


Рис. 3. Принципиальная упрощенная схема электронной системы управления топливоподачей дизельного двигателя: 1 — компрессор; 2 — воздухоосушитель; 3 — регулятор давления; 4 — ресивер; 5 — пропорциональный электромагнитный клапан; 6 — пневмоцилиндр; 7 — ЭБУ; 8 — датчик положения педали акселератора; 9 — датчик положения рычага регулятора ТНВД

для непрерывного пропорционального управления давлением воздуха в рабочей полости силового пневмоцилиндра SMC C85N20-40S с помощью электрического сигнала, генерируемого выходным портом контроллера 7.

Независимо от степени сложности управляющего алгоритма, ЭБУ обеспечивает бесперебойную работу узлов и систем дизельного двигателя на всех возможных режимах движения транспортного средства. Блок управления

Таблица 1

Технические характеристики контроллера Ecomat R360 серии CR2500

Наименование параметра	Значение (описание)
Процессор	C167
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 30 000 Гц)
Количество выходов	4: конфигурируются как цифровые выходы (до 4 А на канал), PWM-выходы (20–250 Гц)
Диапазон рабочих температур, °С	от –40 до +85
Интерфейсы	CAN 1: протоколы обмена CANopen CAN 2: протоколы обмена SAE J1939 RS 232
Память программ	192 кБ
Память данных	64 кБ — SRAM, 32 кБ — FLASH, 3 кБ — EEPROM

принимает сигналы датчиков, обрабатывает их и выдает управляющие воздействия на исполнительные механизмы.

Электронный блок управления 7 (см. рис. 3) получает входные сигналы:

- от датчика 8 положения педали газа;
- датчика 9 положения рычага регулятора;
- датчика 20 частоты вращения коленчатого вала двигателя (см. рис. 1);
- датчика температуры масла;
- датчика температуры охлаждающей жидкости;
- датчика аварийного перегрева левого блока цилиндров.

Выходные порты ЭБУ двигателем (см. рис. 1) подключены к ЭМК управления исполнительными механизмами 16 и 19 топливоподачи ДВС и моторного тормоза.

Программа управления (программное обеспечение) находится в памяти смарт-контроллера Ecomat R360 серии CR2500 (Ifm Electronic GmbH, Германия), полностью удовлетворяющего требованиям, предъявляемым к современным электронным блокам управления. Техническая характеристика смарт-контроллера CR2500 [7, с. 24] представлена в табл. 1.

Таким образом, рассмотренный состав системы управления позволяет реализовать концепцию электронного управления дизельным двигателем с механической топливоподачей. Кроме того, ЭБУ двигателем внутреннего сгорания посредством CAN 2-интерфейса (см. табл. 1) имеет возможность интеграции в архитектуру бортовой сети автомобиля, что позволяет обрабатывать комплексные алгоритмы взаимодействия между различными системами, уменьшить количество единиц аппаратной части и упростить диагностику.

**Выбор стратегии управления исполнительным механизмом топливоподачи.**

Диапазон изменения сигнала, поступающего на пропорциональный электромагнитный клапан 5 (см. рис. 3), в цифровых единицах составляет 0...65535 (0000...FFFF) HEX, что соответствует изменению напряжения на контактах клапана от минимального (0 В) до максимального значения (24 В) либо изменению коэффициента заполнения ШИМ-сигнала от 0 до 100 %.

Характеристика «ток — давление» для пропорционального электромагнитного клапа-

на (ПЭМК), рассчитанного на работу в системах с номинальным напряжением питания 12 В, показывает, что рабочий диапазон по току составляет 0,2–0,9 А [3]. Чтобы ПЭМК не вышел из строя в системе управления топливоподачей с номинальным напряжением питания 24 В, необходимо из диапазона 0...65535 (0000...FFFF) HEX выбрать такой диапазон значений, который обеспечит устойчивую и безопасную работу клапана. Таким образом, рабочий диапазон значений в цифровых единицах составляет 1700...40500 (06A4...9E34) HEX, что соответствует току 0,29–0,74 А.

Диапазон изменения выходного сигнала электронной педали газа [8] в цифровых единицах составляет 18...140 (0012...008C) HEX. Задача управления ПЭМК заключается в пропорциональном соотношении положения электронной педали и рычага регулятора ТНВД. Программно реализуемые пропорциональные преобразования в среде CoDeSys v2.3 [8] приводят к получению стратегической зависимости (рис. 4) углового положения рычага регулятора ( $\alpha_{рег}$ ) от углового положения электронной педали газа ( $\alpha_{пед}$ ).

Таким образом, для обеспечения функциональной работоспособности системы управления угловой диапазон перемещения педали газа (0–17°) должен максимально соответствовать угловому диапазону перемещения рычага регулятора (0–40°). Однако ввиду того, что на рычаг управления регулятором ТНВД оказывает

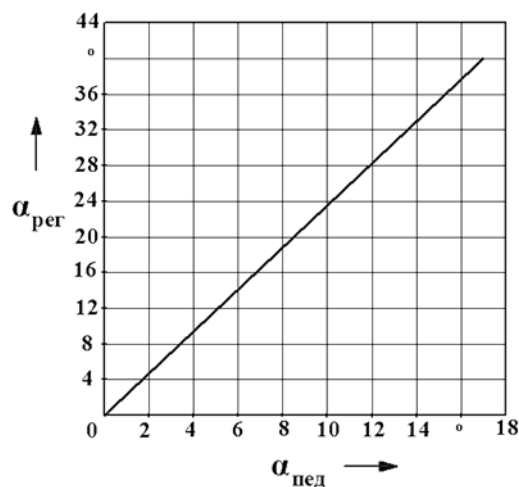


Рис. 4. Зависимость углового положения рычага регулятора от положения педали газа

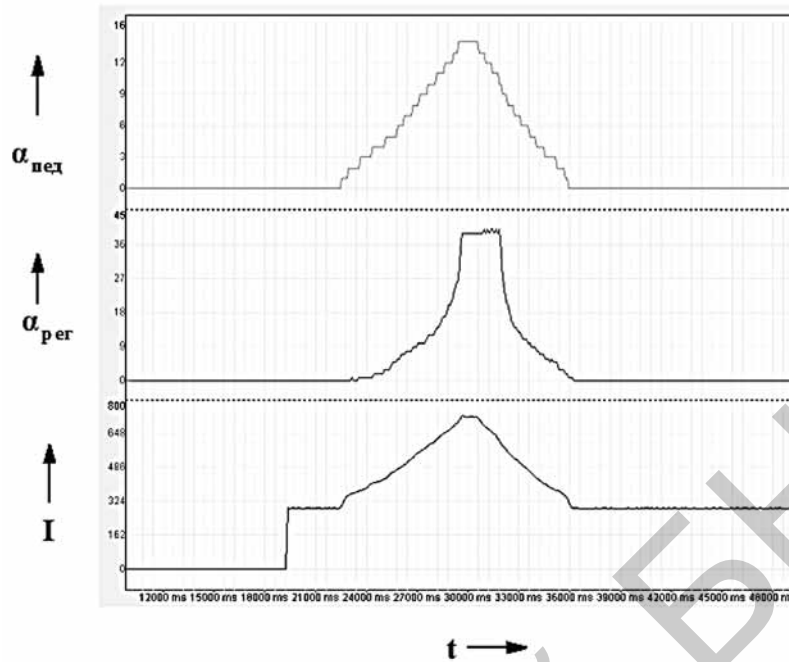


Рис. 5. Осциллограмма процесса электронного управления топливоподачей:  $\alpha_{пед}$  — угловое положение педали акселератора, град;  $\alpha_{рег}$  — угловое положение рычага регулятора ТНВД, град;  $I$  — ток на обмотках пропорционального электромагнитного клапана, мА;  $t$  — время, мс

силовое воздействие пружина насоса и сила от перемещающихся грузов регулятора, возникает проблема согласования начала перемещения педали газа и начала перемещения штока силового цилиндра.

Экспериментально, при помощи построителя диаграмм CoDeSys [9], было определено, что для согласования вышеуказанных параметров через пропорциональный электромагнитный клапан должен протекать начальный ток  $I_{нач} = 290$  мА (нижняя граница токового диапазона). Это значение выходит за пределы неу-

стойчивой работы клапана [4], поэтому работоспособность системы не нарушается.

Верхняя граница токового диапазона определялась исходя из условия упора рычага регулятора в винт ограничения максимальных оборотов двигателя. Экспериментально определено, что ток, протекающий через пропорциональный электромагнитный клапан, составляет  $I_{кон} = 740$  мА, и верхняя граница токового диапазона также попадает в зону устойчивой работы клапана.

Таким образом, программно в среде CoDeSys 2.3 определено, что токовый диапазон

Таблица 2

Влияние частоты ШИМ-сигнала на диапазон управления исполнительными механизмами

Частота ШИМ-сигнала, Гц	Значение частоты ШИМ-сигнала, HEX	Начальный ток ПЭМК, мА	Верхнее значение диапазона ШИМ-сигнала	Нижнее значение диапазона ШИМ-сигнала	Диапазон ШИМ-сигнала
150	FFFF	290	32 500	52 500	20 000
175	DF36	290	28 000	45 800	17 800
200	C350	290	25 500	40 250	14 750
250	9C40	290	20 500	32 200	11 700

290–740 мА, соответствует диапазону 3–62 % ШИМ-сигнала, управляющего пропорциональным электромагнитным клапаном.

Характеристика исполнительного механизма ТНВД двигателя, представляющая собой зависимость  $\alpha_{рег} = f(\alpha_{пед})$ , представлена на осциллограмме «угловое положение педали газа — положение рычага регулятора ТНВД — ток клапана (рис. 5).

**Исследование влияния частоты управляющего ШИМ-сигнала на диапазон управления исполнительным механизмом.**

Для исследования влияния частоты управляющего ШИМ-сигнала на диапазон управления определены следующие экспериментальные значения частот:  $f1 = 150$  Гц,  $f2 = 175$  Гц,  $f3 = 200$  Гц,  $f4 = 250$  Гц. Перед проведением эксперимента установлено, что начальный ток, проходящий через ПЭМК, должен составлять  $I_{нач} = 290$  мА. Это значение является оптимальным с точки зрения согласованности начала перемещения рычага регулятора с перемещением педали газа и их возврата в исходное положение. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Графическое отображение влияния частоты управляющего ШИМ-сигнала ( $f$ ) на диапазон регулирования ( $\Delta$ ) представлено на рис. 6.

Из представленных результатов эксперимента (см. рис. 6, табл. 2) очевидно, что увеличение частоты управляющего ШИМ-сигнала приводит к сужению диапазона регулирования, что отрицательно сказывается на качестве управления исполнительным механизмом топливоподачи дизельного двигателя.

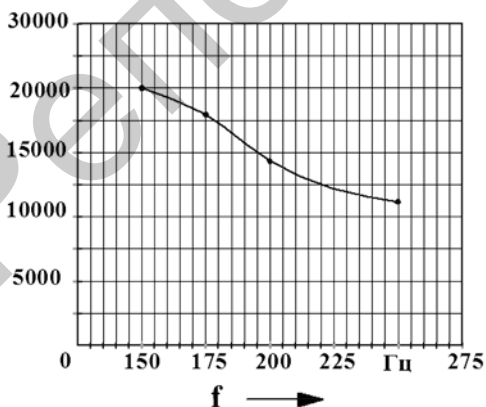


Рис. 6. Зависимость диапазона управления ( $\Delta$ ) от частоты управляющего ШИМ-сигнала ( $f$ )

**Выводы.**

1. Подтверждена работоспособность спроектированной мехатронной системы управления дизельным двигателем с механической топливоподачей, аппаратная часть которой имеет следующие характеристики и геометрические параметры:

- оптимальная частота ШИМ-сигнала — 200 Гц;
- диапазон управления ПЭМК по току — 59 % (от 0,29 до 0,74 А);
- диаметр силового цилиндра — 20 мм;
- диаметр трубопровода от ПЭМК к силовому цилиндру — 6 мм;
- диаметр трубопровода от ресивера до ПЭМК — 10 мм;
- давление воздуха в контуре управления — 0,75 МПа.

2. Частота генерируемого ШИМ-сигнала оказывает существенное влияние на диапазон управления исполнительным механизмом топливоподачи: с уменьшением частоты сигнала диапазон управления расширяется. Изменение частоты на 50 Гц приводит к изменению диапазона управляющего ШИМ-сигнала приблизительно на 6–9 %, причем указанная зависимость не линейна и индивидуальна для конкретной мехатронной системы.

3. Реализация электронного управления дизельным двигателем с механической топливоподачей позволяет:

- упростить процедуру управления двигателем при прогреве;
- осуществить переход на качественно новый уровень по световой и звуковой индикации аварийных состояний двигателя;
- повысить информативность панели приборов за счет введения ЖКИ-монитора;
- обрабатывать комплексные алгоритмы взаимодействия между различными мехатронными системами;
- упростить диагностику неисправностей двигателя.

**Литература:**

1. Баханович, А. Г., Кусяк, В. А., Филимонов, А. А. Электронное управление пневматическим приво-

дом регулятора ТНВД // материалы Международной науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», Белорусско-Российский ун-т. — Могилев, 2013. — С. 46–47.

2. Руктешель, О. С. Интеллектуальная система управления стенда автоматизированного силового агрегата автомобиля / О. С. Руктешель, В. Л. Соломахо, В. А. Кусяк, А. А. Филимонов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2009. — № 4. — С. 31–36.

3. SAE International TM: Surface vehicle recommended practice / J1939-71: Vehicle Application Layer. — SAE Truck and Bus Control and Communications Network Subcommittee. — 2003. — 379 P.

4. SMC Corporation — пневматика, гидравлика, вакуумная техника, контроллеры / Устройства для регулирования давления и расхода [Electronic resource] /© SMC Corp., 2006. — Mode of access: <http://www.smc-pneumatic.ru/seach.php?logic=org.seach=smc&tp>. — Date of access: 31.06.2012.

5. Autoelektrik, Autoelektronik (Systeme und Komponenten): Sensoren / Mikroelektronik // Robert Bosch GmbH, 2002. — 503 p.

6. Сысоева, С. А. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 1. Потенциометры и датчики Холла — лидеры современного рынка / С. А. Сысоева // Компоненты и технологии. — 2005. — № 2. — 8 с.

7. System manual ecomat 100 type R360/ ifm electronics gmbh, Germany, Essen, 1999. — 166 p.

8. MT Series Mechatronic Throttle Pedal with vSENSE TM Technology [Electronic resource] // Kongsberg Automation GmbH, 2009. — Mode of access: <http://www.controlsandcables.com/index.php/Electronic-Foot-Pedal/Mechatronic-Electronic-Foot-Pedal-Systems.html>. — Date of access: 20.07.2012.

9. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys V2.3. — ПК «Пролог», Copyright: 3S — Smart Software Solutions GmbH, 2008. — 452 с.