

УДК 629.3.064

*В. А. Кусяк*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИАПАЗОНА УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРИРУЕМОГО ШИМ-СИГНАЛА

UDC 629.3.064

*V. A. Kusyak*

## STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE CONTROL RANGE OF A DIESEL ENGINE ACTUATOR ON THE FREQUENCY OF GENERATED PWM-SIGNAL

### **Аннотация**

Для обеспечения качественного управления топливоподачей при трогании с места, маневрировании или переключении передач в автоматическом режиме работы силового агрегата диапазон управления исполнительным механизмом дизельного двигателя должен быть максимально широким. Среди целого ряда факторов, оказывающих влияние на ширину диапазона регулирования, как то: скорость перемещения педали акселератора, напряжение аккумуляторных батарей, согласованность геометрических параметров исполнительного механизма и характеристик электронных компонентов привода – наибольший эффект вызывает изменение частоты управляющего сигнала. Целью работы являлось исследование влияния частоты широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на диапазон управления исполнительным механизмом топливоподачи двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

### **Ключевые слова:**

мехатронная система управления, автоматизированный силовой агрегат, исполнительный механизм, диапазон управления, ШИМ-сигнал.

### **Abstract**

To provide high quality of fuel control during starting-up, maneuvering or gearshifting in the automatic powertrain mode, the control range of a diesel engine actuator should be as wide as possible. Among the factors which influence the control range width, such as the accelerator pedal movement speed, battery voltage, the consistency of the actuator geometric parameters and characteristics of electronic drive components, the change in control signal frequency has the greatest effect. The purpose was to study the influence of pulse-width modulation (PWM) frequency on the control range of the engine fuel actuator.

### **Key words:**

mechatronic control system, automated powertrain, actuator, control range, PWM signal.

### **Введение**

Согласно статистическим данным, в странах СНГ доля грузовых автомобилей и автобусов, оснащенных дизельными двигателями стандарта Euro-2, составляет 62 % от общего парка. Такие двигатели устанавливаются на некоторые модели автомобилей производства ОАО «Минский автомобильный завод»

[1] и пользуются спросом в силу целого ряда преимуществ, связанных с соотношением цена–качество, ремонтпригодностью и простотой обслуживания.

Однако использование двигателей с механической топливоподачей в мехатронных системах управления силовым агрегатом ограничено наличием механической связи между педалью и рыча-

гом регулятора топливного насоса высокого давления (ТНВД). Комплексные алгоритмы трогания с места, маневрирования и переключения передач для автоматического режима предусматривают управление исполнительными механизмами ДВС, сцепления и коробки передач без участия водителя. В частности, при реализации этих алгоритмов ЭБУ необходимо регулировать обороты двигателя независимо от воздействия водителя на педаль акселератора.

### Основная часть

Специалисты кафедры «Автомобили» БНТУ разработали и создали пневматический привод регулятора ТНВД дизельного двигателя с механической топливоподачей. Привод имеет электронное управление и легко интегрируется в мехатронную систему управления силовым агрегатом автомобиля (рис. 1).

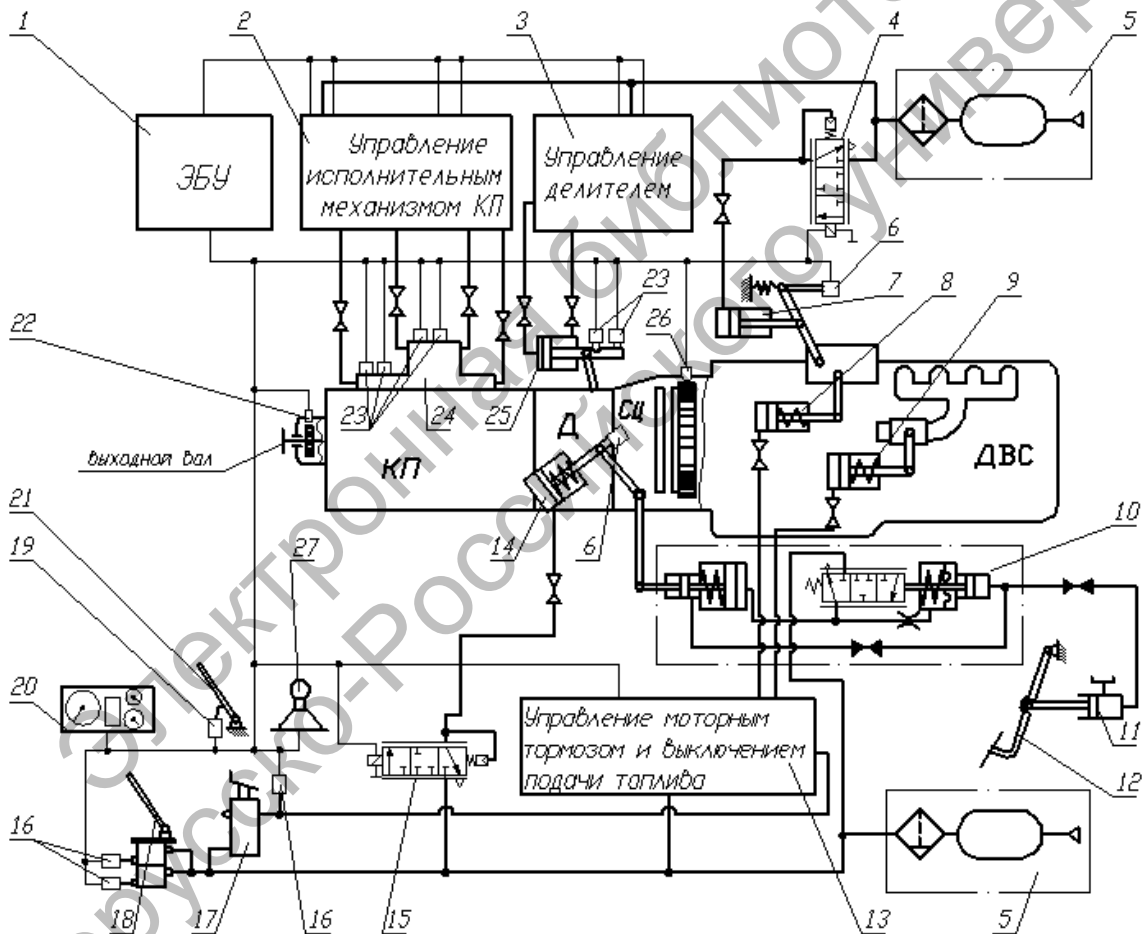


Рис.1. Принципиальная схема мехатронной системы управления силовым агрегатом: 1 – электронный блок; 2, 3, 13 – электромагнитные клапаны управления исполнительными механизмами; 4, 15 – пропорциональные ЭМК управления двигателем и сцеплением; 5 – питающая часть пневмопривода; 6, 19 – датчики перемещения; 7, 8, 9, 14, 24, 25 – исполнительные механизмы; 10, 11, 12 – гидропривод сцепления; 16 – датчики давления; 17 – кран моторного тормоза; 18 – тормозной кран; 20 – панель приборов; 21 – педаль акселератора; 22, 26 – датчики частоты вращения; 23 – концевые выключатели; 27 – селектор режимов

Основными элементами привода являются пропорциональный электро-

магнитный клапан 4 (см. рис. 1) серии VER 3121-1 и силовой пневматический

цилиндр 7 одностороннего действия, установленный на корпусе ТНВД. Шток пневмоцилиндра С85N20-40S шарнирно соединен с рычагом регулятора ТНВД. В качестве органа управления топливоподачей используется педаль 21 с бесконтактным датчиком 19 положения. Механическая связь между педалью и рычагом регулятора отсутствует. Процесс изменения топливоподачи полностью автоматизирован. Управление пропорциональным электромагнитным клапаном 4 осуществляется ЭБУ 1 на основе широтно-импульсной модуляции.

В процессе трогания с места, маневрирования и переключения передач управление топливоподачей двигателя осуществляется контроллером независимо от положения педали 21 «газа» (см. рис. 1), задаваемого оператором. На этих режимах в качестве обратной связи на электронный блок управления используется значение угловой скорости

коленвала двигателя, определяемое датчиком 26 частоты вращения, установленным напротив зубчатого венца маховика ДВС.

Для установившегося движения на определенной передаче ЭБУ необходимо задавать управляющее воздействие на исполнительный механизм топливоподачи таким образом, чтобы обеспечивалась пропорциональность углов поворота педали «газа» и рычага регулятора ТНВД. Пропорциональность между углом поворота педали и перемещением штока силового цилиндра 7 (см. рис. 1) обеспечивается контроллером при подаче широтно-импульсного сигнала на пропорциональный ЭМК 4.

Устройство пневматического пропорционального электромагнитного клапана SMC VEP 3121-1 [2] представлено на рис. 2, а его техническая характеристика приведена в табл. 1.

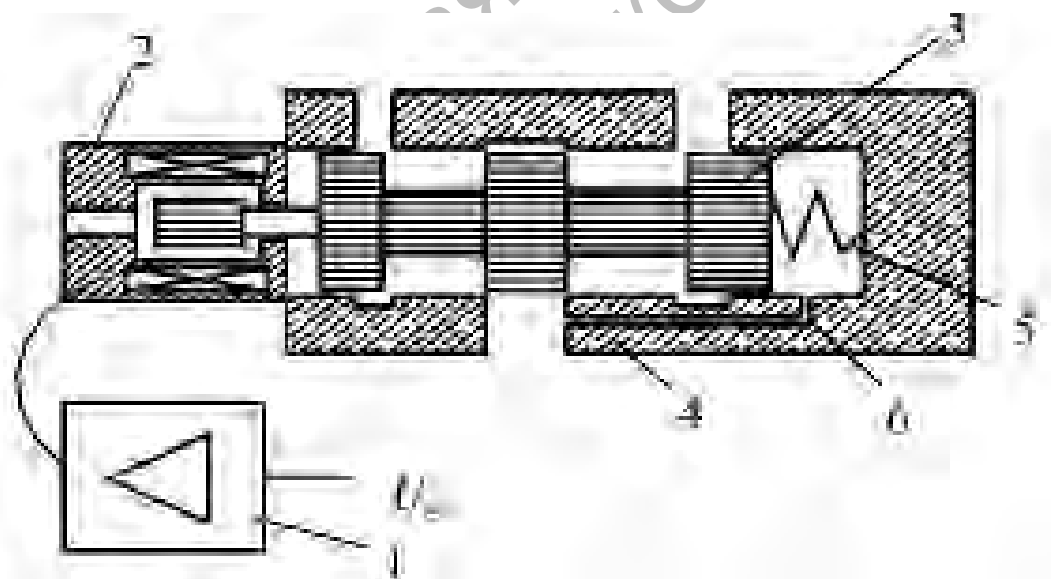


Рис. 2. Устройство ПЭМК давления SMC VEP3121: 1 – управляющая цепь; 2 – пропорциональный электромагнит; 3 – золотник; 4 – корпус клапана; 5 – пружина; 6 – пневматическая цепь обратной связи

Табл. 1. Основные технические характеристики ПЭМК VER3121

Наименование характеристики	Значение
Максимальное рабочее давление, МПа	1,0
Диапазон регулирования давления, МПа	0,05...0,65
Рабочий диапазон температур, °С	0-50
Время срабатывания, мс	≤30
Гистерезис, % от полного диапазона	3
Воспроизводимость, % от полного диапазона	3
Чувствительность, % от полного диапазона	3
Линейность, % от полного диапазона	0,5
Масса, кг	0,9
Усилитель мощности	VEA25
Максимальный ток, А	1
Защита катушки	Класс Н
Максимальная температура катушки, °С	140

Давление на выходе клапана регулируется изменением степени открытия золотника 3 (см. рис. 2) путем сопоставления силы  $F_1$  (рис. 3), создаваемой управляющим электромагнитом 2

(см. рис. 2) и действующей на левый торец золотника, и суммарной силы  $F_2$  противодействующей пружины 5 и выходного давления, приложенных к правому торцу золотника.

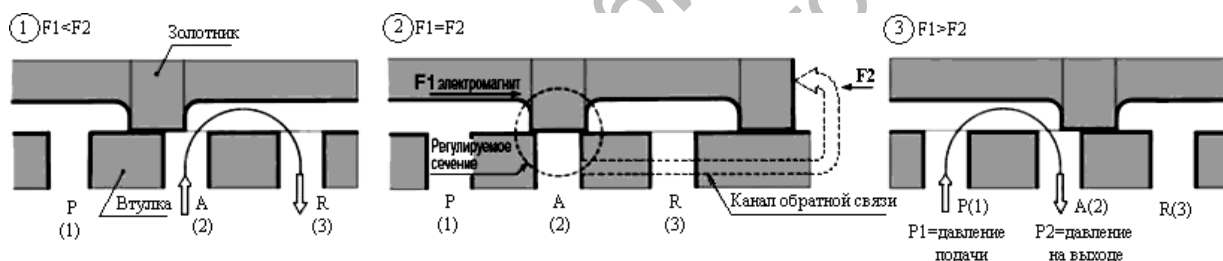


Рис. 3. Упрощенная схема работы пропорционального ЭМК VER3121: Р – питающая магистраль (вход клапана); А – выход клапана (к силовому цилиндру); R – выход в атмосферу

Как видно из рабочей характеристики ток–давление (рис. 4), максимальный ток управления пропорциональным электромагнитным клапаном составляет 0,95 А, что соответствует техническим характеристикам используемого контроллера esomat R360 серии CR2500 (ifm electronic, Германия) [3, с. 56]. Максимальное регулируемое давление на выходе электромагнитного клапана (ЭМК) равно 0,65 МПа, что также соответствует рабочему давлению в пневматической системе большегрузных автомобилей и автопоездов.

Таким образом, пропорциональный ЭМК VER3121-1 в рабочем диапа-

зоне управляющих токов при диаметре поршня пневматического цилиндра 20 мм и номинальном давлении в пневмосистеме 0,65 МПа обеспечивает качественное управление рычагом регулятора ТНВД на всех нагрузочных режимах двигателя.

Для настройки пропорционального управления и определения зоны регулирования управляющего сигнала необходимо иметь обратную связь по перемещению рычага регулятора. В качестве обратной связи использовался сигнал потенциометрического датчика 6 угловых перемещений (см. рис. 1), подвижный элемент которого жестко соединен

с осью рычага регулятора ТНВД. Перемещение подвижных механических контактов датчика вдоль переменного резистора изменяет его сопротивление

пропорционально положению контактов, что индуцируется на выходе пропорциональным аналоговым сигналом постоянного напряжения [4, с. 56].

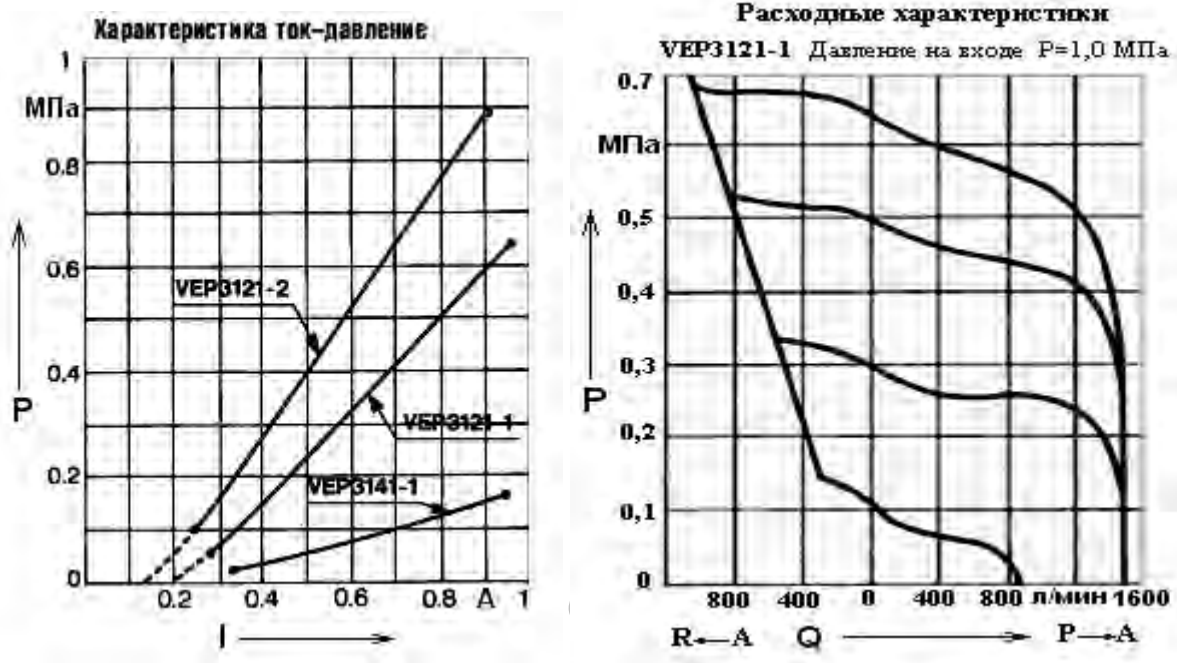


Рис. 4. Рабочие характеристики пропорциональных ЭМК серии VEP

Угол перемещения рычага регулятора равен  $40^\circ$ . Диапазон углового перемещения движка потенциометра датчика МУ-615-А составляет  $60^\circ$ , что перекрывает диапазон углового перемещения рычага регулятора ТНВД, обеспечивая определение его положения на всех нагрузочных режимах двигателя.

Размещение вышеописанных пропорционального электромагнитного клапана давления SMC VEP3121-1, пневматического силового цилиндра C85N20-40S и потенциометрического датчика МУ-615А перемещения рычага регулятора на испытательном стенде проиллюстрировано на рис. 5.

При отладке мехатронной системы особое внимание уделялось оценке диапазона управления ШИМ-сигнала, подаваемого на обмотки пропорционального электромагнитного клапана. Диапазон управления, с одной стороны, ха-

рактеризует оптимальность характеристик выбранных аппаратных средств и рассчитанных геометрических параметров силовой части привода, с другой – от ее величины напрямую зависит качество управления и точность регулирования.

Среди целого ряда факторов, оказывающих влияние на ширину диапазона управления, как то: скорость перемещения педали акселератора, напряжение аккумуляторных батарей, согласованность геометрических параметров исполнительного механизма и характеристик электронных компонентов привода – наибольший эффект вызывает изменение частоты управляющего сигнала.

Для исследования влияния частоты ШИМ-сигнала на диапазон управления было разработано программное обеспечение, позволяющее инициализировать

генератор сигналов и в автоматическом режиме обеспечивать подачу ШИМ-сигнала различной скважности (но определенной частоты) на обмотки пропорционального электромагнитного клапана [5, с. 52], управляющего исполнительным механизмом двигателя. В качестве обратной связи использовалось положение рычага регулятора ТНВД, фиксируемое потенциометрическим датчиком угловых перемещений МУ-615А.

На испытательном стенде [6] была проведена серия экспериментов с записью процесса перемещения рычага регулятора ТНВД в зависимости от величины ШИМ-сигнала при частотах от 150 до 250 Гц. Графическое представление результатов полунатурного эксперимента производилось с помощью средств визуализации CoDeSys V2.3 [7, с. 6–65]. Осциллограмма процесса перемещения рычага регулятора ТНВД

при частоте управляющего сигнала 200 Гц приведена на рис. 6.

Как показали результаты экспериментов, диапазон ШИМ-сигнала при частоте 150 Гц оказался наибольшим и составил 57,9 %. С повышением частоты наблюдается устойчивая тенденция к сужению диапазона регулирования. Так, уже при частоте 200 Гц диапазон регулирования уменьшился на 11,9 % и составил 49,1 % ШИМ, при 250 Гц уменьшился на 18,5 % и составил 39,5 % ШИМ.

Однако при низких частотах наблюдаются повышенные потери энергии, что выражается в нагреве обмоток ЭМК. При высоких частотах характерна периодически неустойчивая работа, выражающаяся в существенном приращении величины перемещения рычага при незначительном (50-битном) изменении ШИМ-сигнала.



Рис. 5. Размещение пневмоцилиндра, ПЭМК и датчика МУ-615А на двигателе: 1 – пропорциональный ЭМК VER3121; 2 – пневмоцилиндр выключения подачи топлива; 3 – датчик МУ-615А перемещения рычага регулятора ТНВД; 4 – силовой пневмоцилиндр

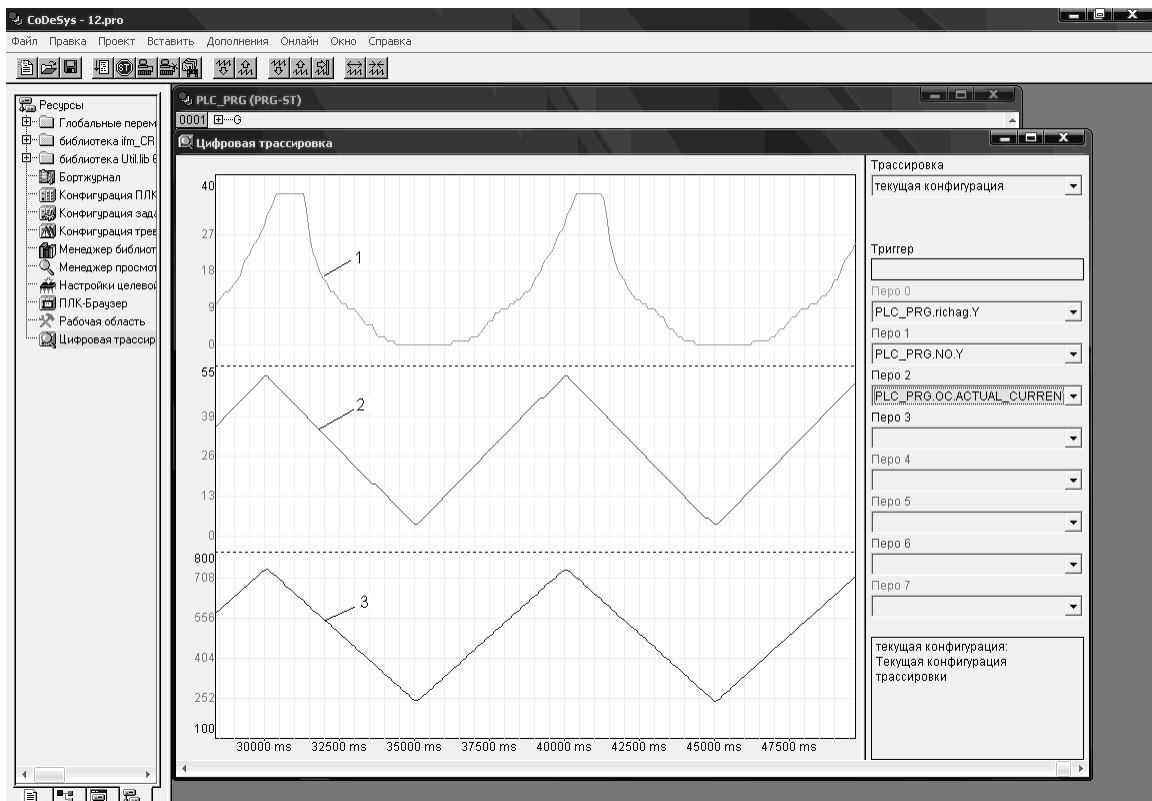


Рис. 6. Осциллограмма процесса управления рычагом ТНВД при частоте 200 Гц: 1 – перемещение рычага регулятора ТНВД; 2 – величина ШИМ-сигнала; 3 – ток в обмотках ПЭМК ДВС

Вышеописанная зависимость изменения диапазона управления от частоты ШИМ-сигнала проиллюстри-

рована на рис. 7. Гистерезис исполнительного механизма двигателя при частоте 200 Гц представлен на рис. 8.

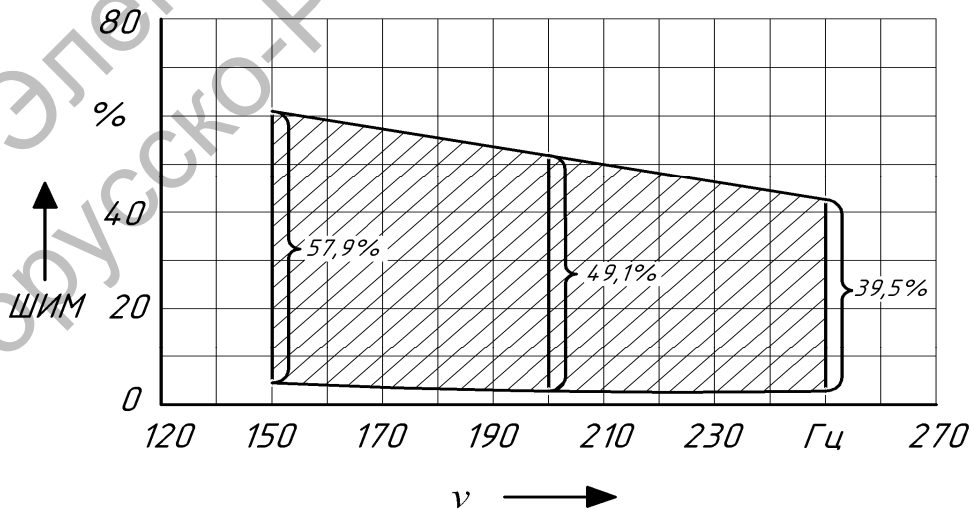


Рис. 7. Зависимость диапазона регулирования от частоты ШИМ-сигнала

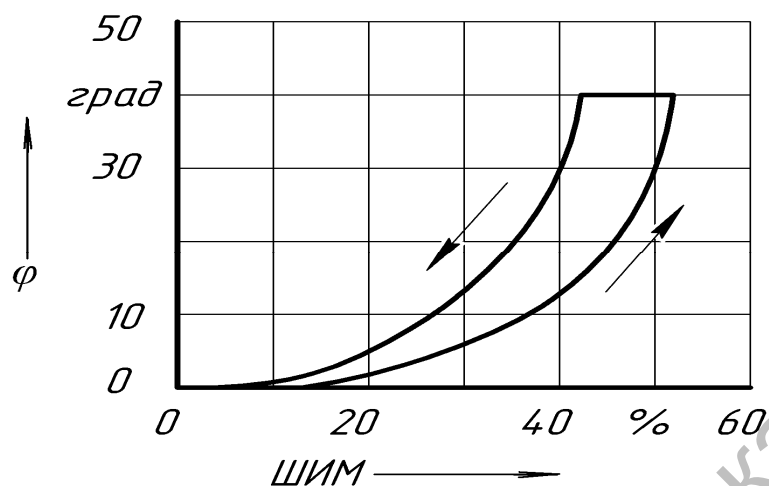


Рис. 8. Гистерезис исполнительного механизма двигателя:  $\varphi$  – угол поворота рычага регулятора ТНВД

Исследования характеристик исполнительного механизма при вариации частоты широтно-импульсной модуляции показали, что величина изменения тока выходного каскада ЭБУ (силовой фактор), подаваемого на обмотку пропорционального электромагнитного клапана управления топливоподачей, остается постоянной и не зависит от частоты ШИМ-сигнала, а следовательно, и от диапазона управления.

Для отрыва рычага регулятора ТНВД из крайнего положения, соответствующего минимально устойчивой частоте вращения коленвала двигателя, необходим ток на обмотке ПЭМК  $I_{нач} = 0,31$  А. При упоре рычага регулятора в винт ограничения максимальных оборотов двигателя ток, протекающий через пропорциональный электромагнитный клапан, составляет  $I_{кон} = 0,74$  А (верхняя граница токового диапазона).

Таким образом, независимо от частоты управляющего сигнала ток выходного каскада ЭБУ (силовой фактор) варьируется от 0,31 до 0,74 А (см. рис. 6), т. е. рабочий диапазон по току составляет 0,43 А. Исходя из рабочей характеристики электромагнитного клапана SMC VER3121-1 и с учетом зоны его устойчивой работы (см. рис. 4), это составляет 66,15 %, что является

достаточным для качественного управления процессом топливоподачи.

### Заключение

1. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность спроектированной мехатронной системы управления дизельным двигателем с механической топливоподачей. При этом рассчитанные параметры силовой части электронного привода регулятора топливного насоса высокого давления (диаметр силового цилиндра – 20 мм; диаметр трубопровода от ПЭМК ДВС к силовому цилиндру – 6 мм; диаметр трубопровода от ресивера до ПЭМК – 10 мм; давление воздуха в контуре – 0,65 МПа) позволяют получить при управлении пропорциональным электромагнитным клапаном диапазон регулирования по току, равный 66,15 % (от 0,31 до 0,74 А) при максимальном токе управления ПЭМК 1 А и зоне устойчивой работы клапана от 0,28 до 0,95 А, что обеспечивает качественное управление процессом топливоподачи на всех режимах движения транспортного средства.

2. Как показали результаты исследования, диапазон управления исполнительными механизмами по ШИМ зависит от частоты генерируемого сиг-



нала. С повышением частоты наблюдается устойчивая тенденция к сужению диапазона управления: изменение частоты на 50 Гц приводит к изменению диапазона управления ШИМ-сигнала приблизительно на 8,5...10 %. Зависимость нелинейная, индивидуальная для конкретной системы, однако общая тенденция соблюдается для любой мехатронной системы с различными аппаратными ресурсами.

3. Определена оптимальная частота ШИМ-сигнала для спроектированной мехатронной системы и диапазон его управления:

- частота сигнала – 200 Гц;
- диапазон управления по ШИМ – 49,1 %;
- диапазон управления по току – 0,43 А.

4. Исследование характеристики исполнительного механизма показало, что с целью увеличения быстродействия системы на фазе перехода от режима максимальной топливоподачи на режим средних нагрузок в алгоритм управления целесообразно ввести фрагмент компенсации гистерезиса исполнительного механизма, что положительно скажется на качестве управления в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог автотехники МАЗ // Минский автомобильный завод [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : [http : // www.maz.by/upload/ public%20html/files/catalogs/shassi.pdf](http://www.maz.by/upload/public%20html/files/catalogs/shassi.pdf). – Дата доступа : 29.01.2013.
2. 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](http://www.smc-pneumatic.ru/seach.php?logic=org.seach=smc&tp). – Date of access : 31.06.2012.
3. 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. – 396 p.
4. **Литвиненко, В. В.** Автомобильные датчики, реле и переключатели : краткий справочник / В. В. Литвиненко, А. П. Майструк. – М. : ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. – 176 с.
5. **Тарасик, В. П.** Исследование характеристик электрогидравлических пропорциональных клапанов / В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, В. С. Савицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 52–64.
6. Интеллектуальная система управления стэнда автоматизированного силового агрегата автомобиля / О. С. Руктешель [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. – 2009. – № 4. – С. 31–36.
7. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys V2.3. – ПК «Пролог», Copyright : 3S-Smart Software Solutions GmbH, 2008. – 452 с.

*Статья сдана в редакцию 20 июня 2014 года*

**Виктор Анатольевич Кусяк**, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет. E-mail: [victor.kusyak@gmail.com](mailto:victor.kusyak@gmail.com).

**Victor Anatolyevich Kusyak**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: [victor.kusyak@gmail.com](mailto:victor.kusyak@gmail.com).