

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

*А.Г. Кузнецов, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Теплофизика»,  
С.В. Харитонов, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика»,*

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*В.А. Рыжов, д.т.н., заведующий кафедрой ДВС,*

*Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета*

Рассмотрены вопросы разработки и исследования комплексной адаптивной системы управления дизельными двигателями. Комплексный подход к управлению предусматривает формирование регулирующих воздействий не только на топливоподачу, но и на другие системы двигателя. Адаптивность предусматривает гибкую перенастройку системы управления на различных режимах работы двигателя. Описание структуры системы управления дано на базе функциональной схемы. Принята концепция построения электронного блока в виде двух модулей: универсального процессорного модуля и специализированного модуля, ориентированного на конкретный двигатель. Изготовлен экспериментальный образец электронного блока, предназначенный для перспективного дизельного двигателя размерности 26,5/31 производства АО «Коломенский завод». Приведены результаты экспериментального исследования системы управления на одноцилиндровом отсеке двигателя, которые подтвердили работоспособность разработанного электронного блока.

### Направление исследования

К современным комбинированным двигателям на основе дизелей с турбонаддувом предъявляются высокие требования в отношении экономических и, особенно, экологических показателей [1, 2]. Одним из важных направлений удовлетворения этих требований является использование на двигателях перспективных систем автоматического управления (САУ) [3–6]. Перспективные САУ должны обладать рядом свойств, которые направлены на обеспечение требований, предъявляемых к комбинированным двигателям. САУ должны быть комплексными с воздействием на такие основные системы двигателя, как топливоподача, воздухоснабжение (систему впуска и турбонаддув), рециркуляцию отработавших газов, систему охлаждения, систему нейтрализации отработавших газов [7–9]. В комплексной системе управления должна быть предусмотрена диаг-

ностика как двигателя, так и самой системы. САУ должны быть адаптивными в смысле приспособления системы и двигателя к различным режимам и условиям работы. САУ с микропроцессорными контроллерами должны обеспечивать оптимизацию работы дизелей в поле режимов работы по выбранным критериям, включающим показатели экономичности и экологии, прежде всего — по выбросам вредных веществ с отработавшими газами. Оптимизация работы САУ должна осуществляться как на установившихся, так и на неустойчивых режимах.

Для создания перспективной комплексной адаптивной САУ необходимо осуществить набор исследовательских и проектировочных работ. На сегодняшний день накоплен значительный опыт по созданию систем управления двигателями. Развитие систем управления на базе гидромеханических конструкций достигло своего предела, поэтому появилась объективная необходимость использования в САУ программируемых цифровых электронных устройств — микропроцессорных контроллеров. Появились новые подходы к построению алгоритмов управления дизелем, что предоставило разработчикам возможность создания комплексных адаптивных САУ. Сегодня создалось положение, когда возможности САУ с микропроцессорными контроллерами используются в двигателестроении недостаточно полно. Современные САУ представляют принципиально новый уровень развития систем управления, что приводит к необходимости разработки новых подходов при их построении.

Выпуск систем управления с электронными блоками для дизельных двигателей различного типа и назначения уже освоен зарубежными фирмами, среди ведущих мировых производителей можно назвать такие фирмы как «Bosch» [10], «Heinzmann» [11], «Woodward» [12], «Denso» [13] и др. В российском двигателестроении подобные системы находятся пока на стадии разработки, в то же время, потребность в них существует в связи с организацией на отечественных предприятиях производства современных перспективных

двигателей. Сложившееся положение вызвало необходимость интенсифицировать работы по созданию отечественных систем управления, способных обеспечить требуемые показатели работы дизельных двигателей. Процесс разработки САУ содержит следующие основные этапы.

1. Определение структуры САУ и разработка алгоритмов управления.
2. Расчет и моделирование установившихся режимов и переходных процессов двигателя и САУ.
3. Разработка аппаратных и программных средств электронного блока, подбор датчиков и исполнительных устройств.
4. Испытания САУ: физическое моделирование, исследования на безмоторном и моторном стендах.

### Структура системы управления

Для реализации расширенных функций управления дизельным двигателем САУ должна иметь иерархическую структуру с верхним уровнем управления и нижним уровнем регулирования. На уровне управления осуществляется задание режимов работы двигателя и определение настроек контуров регулирования по матрицам оптимизированных параметров и программам коррекции. На нижнем уровне САУ, содержащем разомкнутые и замкнутые контуры регулирования, реализуются настройки, поступающие из верхнего уровня управления. Выбор управляемых параметров определяет состав системы и набор контуров регулирования.

Функциональная схема системы управления двигателем показана на рис. 1. В состав САУ включены следующие элементы:

- дизельный двигатель с турбонаддувом — комбинированный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) с установленными на нем датчиками (Д);
- электронный блок (ЭБ), или микропроцессорный контроллер;
- комплект исполнительных устройств (ИУ), через которые САУ воздействует на регулируемые параметры систем двигателя, являющихся объектами регулирования (ОР).

На двигатель действуют внешние возмущающие воздействия  $f_1, \dots, f_m$ , которые изменяют режим работы двигателя (основное воздействие — характеристика потребителя энергии). На электронный блок от управляющего устройства (УУ) подается сигнал управления  $u$ , задающий режим работы двигателя, и поступают сигналы с датчиков необходимых для регулирования параметров рабочего процесса  $y_1, \dots, y_n$ , а также сигналы с датчиков внешних воздействий, которые используются в алгоритмах управления.

Сигналы с датчиков после прохождения через выходные преобразователи электронного блока

(Вх. пр.) преобразуются в форму, удобную для последующей обработки в процессорной части контроллера. Результаты обработки кодов сигналов датчиков в соответствии с заложенными в программе контроллера алгоритмами  $z_1, \dots, z_k$  поступают на выходные преобразователи (Вых. пр.) электронного блока. Выходные преобразователи формируют сигналы  $U_1, \dots, U_k$ , необходимые для конкретных типов исполнительных устройств контуров регулирования: аналоговые, дискретные, широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Исполнительные устройства устанавливают регулирующие органы в положения  $h_1, \dots, h_k$ , которые соответствуют заданному системой управления режиму работы двигателя.

Устройство управления, контроллер и датчики являются общими элементами САУ. Каждый контур регулирования использует сигналы необходимых для него датчиков. Исполнительные устройства и регулирующие органы различны в каждом контуре регулирования конкретной системы двигателя.

В САУ используются типы систем и контуров управления и регулирования, отличающиеся по структуре и алгоритму работы контроллера. Важнейшим отличительным свойством структуры контура регулирования является использование главной отрицательной обратной связи (ГООС). Применяются как разомкнутые контуры управления и регулирования, без обратной связи, так и замкнутые контуры регулирования, использующие принцип регулирования по отклонению, который реализуется с помощью ГООС.

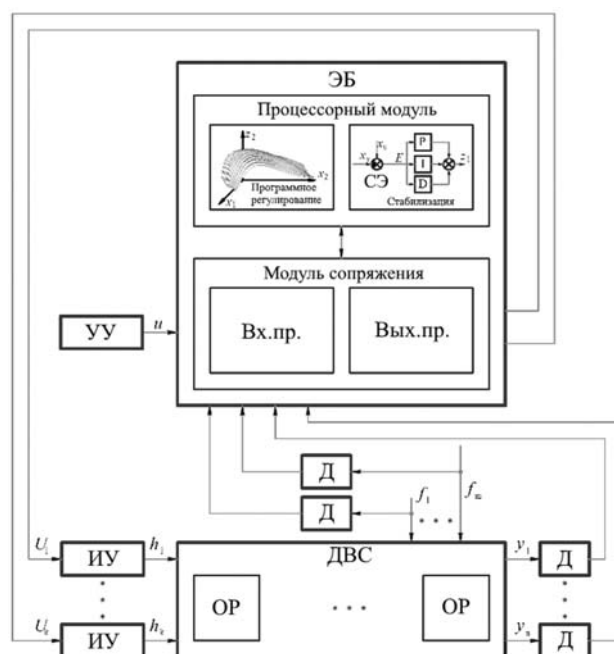


Рис. 1. Функциональная схема системы управления двигателем

Наиболее часто в контурах регулирования дизельных двигателей используется управление со стабилизацией — замкнутый контур, в котором сигнал  $u$  устройства управления задает значение регулируемого параметра  $y_n$ , поддерживаемое регулятором (см. рис. 1). В контроллере на сравнивающем элементе (СЭ) в кодах  $x$  определяется отклонение  $E$  реального значения регулируемого параметра, поступающего по главной отрицательной обратной связи, от заданного сигналом управления значения в виде разности  $E = x_u - x_{yn}$ . Результат обработки отклонения по заданному закону регулирования  $z_k$  поступает на преобразователь выходных сигналов и далее — на исполнительное устройство. На рис. 1 показано пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) преобразование отклонения, которое является стандартным для процессов стабилизации регулируемых параметров.

При программном регулировании параметров двигателя по содержащимся в памяти контроллера матрицам оптимизированных или требуемых значений используются как разомкнутые, так и замкнутые контуры. К программному регулированию относится также формирование необходимых характеристик дизельного двигателя и коррекция его параметров на различных режимах работы.

Наибольшее внимание при создании САУ уделено разработке электронного блока. Разрабатываемый электронный блок системы комплексного адаптивного управления предназначен для установки на дизельные двигатели различного назначения и размерности. Для обеспечения функции наибольшей адаптации оборудования к возможным вариантам использования принята концепция построения электронного блока в виде двух модулей (см. рис. 1).

Один из модулей является универсальным и может устанавливаться в электронные блоки различных двигателей. Он содержит неизменную по аппаратному составу процессорную часть, в которой в соответствии с заложенными алгоритмами реализуются программы управления системами двигателя. При установке на двигатели различного типа изменяются программы управления, записанные в память процессорного модуля, который аппаратно остается неизменным.

Второй модуль электронного блока является специализированным и предназначен для связи универсального процессорного модуля с конкретными датчиками и исполнительными устройствами двигателя, для которого разрабатывается контроллер. Такой специализированный модуль содержит каналы преобразования входных для электронного блока сигналов с датчиков и вы-

ходных сигналов на исполнительные устройства. Схемы и аппаратный состав каналов формирования входных и выходных сигналов определяются необходимыми преобразованиями сигналов с датчиков из физического вида в форму, требуемую для процессорного модуля, а также преобразованиями регулирующих сигналов, вырабатываемых процессором, из двоичного кода в физический вид для исполнительных устройств системы управления.

Для обеспечения связи универсального модуля электронного блока со специализированными модулями различных двигателей программа процессорной части включает соответствующие блоки, содержащие программы обработки входных и выходных сигналов.

Принятая концепция модульного построения контроллеров систем комплексного управления обеспечивает удобство разработки и адаптации электронных блоков для использования на двигателях различного назначения и размерности.

Проектирование электронного блока проводилось, исходя из выполнения следующих требований: необходимое быстродействие; интегральная компактная структура, предусматривающая многослойность печатных плат, конструктивные элементы типа «Surface Mounted Devices», адаптивность интегральных схем (ASIC); электромагнитная совместимость; вибростойкость; надежность эксплуатации, включая устойчивость к перепадам температуры окружающей среды и стойкость к агрессивным средам.

Электронный блок имеет следующие каналы для подключения датчиков: 3 канала датчиков Холла, канал индукционного датчика, 4 канала потенциометрических датчиков, 8 каналов токовых датчиков стандарта (4–20) мА, 5 каналов подключения терморезисторов типа РТ1000, 3 канала подключения терморезисторов типа РТ200, 4 канала аналоговых входов до 5 В.

Кроме внешних датчиков на плате электронного блока установлено два внутренних датчика: датчик атмосферного давления МРХА4250 и технологический датчик температуры ТМР102. Технологический датчик температуры предназначен для оценки качества теплового обмена внутри корпуса электронного блока и предупреждения аварийных ситуаций, связанных с перегревом блока.

Для управления исполнительными устройствами контуров регулирования САУ электронный блок содержит: 20 каналов стабилизированных регулируемых токовых выходов для управления электромагнитными клапанами форсунок, 24 канала ШИМ-регуляторов, 4 канала аналоговых выходов по напряжению с токовой нагрузкой до 15 мА.

**Экспериментальное исследование системы управления**

Экспериментальный образец электронного блока системы управления изготовлен для перспективного среднеоборотного дизельного двигателя Д500 размерности 26,5/31 производства АО «Коломенский завод» [14, 15].

На первом этапе испытаний проводилось исследование работоспособности блока управления по обеспечению подачи топлива в двигатель. В настоящее время на двигателе используется система топливоподачи с индивидуальными одноплунжерными насосами высокого давления и электромагнитными клапанами, установленными в магистралях нагнетания от топливных насосов к форсункам. Система управления влияет на характеристику впрыска топлива через закон движения электромагнитного клапана, который определяется сигналом напряжения, формируемым электронным блоком. После определения первичных калибровок САУ методами расчетного и физического моделирования образец электронного блока прошел испытания на безмоторном стенде завода. Результаты испытаний показали, что блок управления формирует требуемую характеристику впрыска с достижением заданных значений давления топлива.

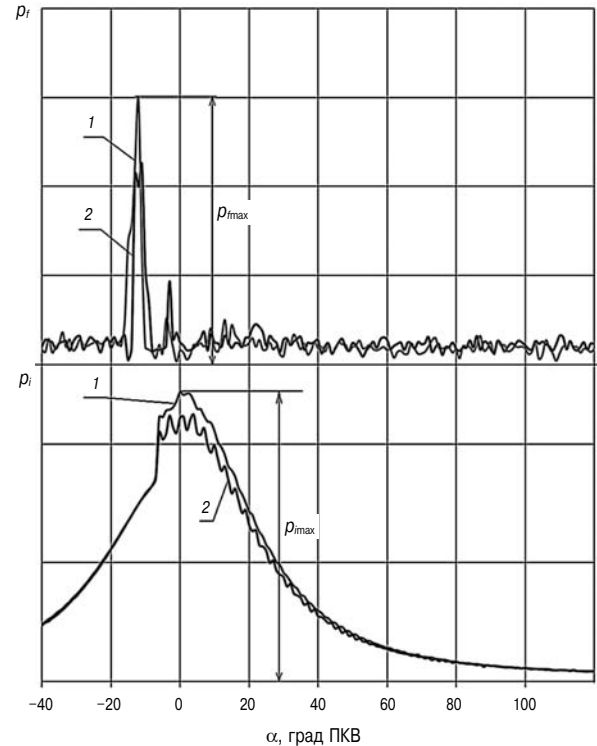
Следующий этап испытаний проведен на одноцилиндровом отсеке двигателя с электрическим тормозом. Стенд с одноцилиндровым отсеком оснащен необходимыми системами питания двигателя и современной системой измерений и регистрации параметров рабочего процесса.

АО «Коломенский завод» имеет опыт успешного использования в системах управления двигателями электронных блоков одной из ведущих зарубежных фирм. В связи с этим было принято решение о проведении на одноцилиндровом отсеке двигателя Д500 сравнительных испытаний разработанного электронного блока и блока данной фирмы. Ниже приведены некоторые результаты сравнительных испытаний при работе одноцилиндрового отсека на четырех режимах тепловозной характеристики. Значения частоты вращения вала двигателя и мощности на исследованных режимах приведены в таблице. На графиках линии под номером 1 соответствуют разработанному блоку управления, под номером 2 — блоку зарубежной фирмы.

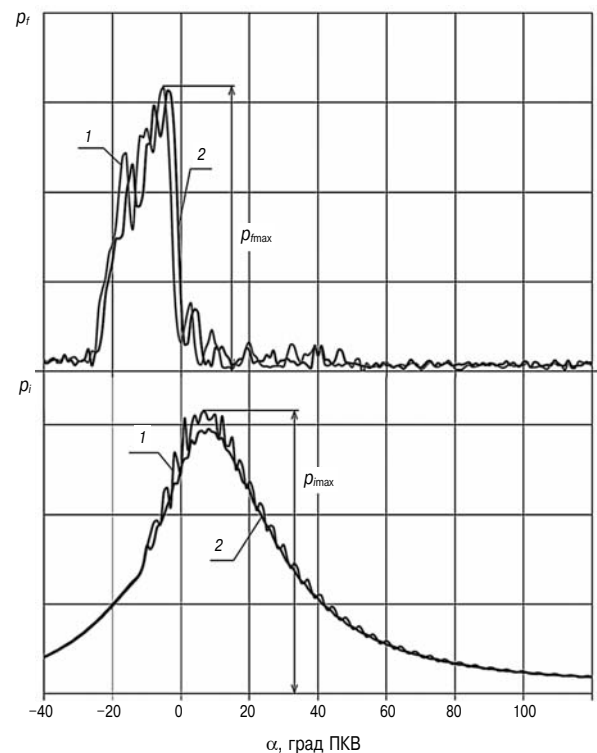
**Параметры двигателя**

№ режима	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт
1	300	0
2	755	122,8
3	875	212,4
4	1000	355,6

На рис. 2–5 приведены диаграммы изменения давления впрыска топлива и давления газов в цилиндре на исследованных режимах. Из приведенных диаграмм видно, что изменения давлений топлива и газов идентичны для обоих исследованных блоков управления.



**Рис. 2. Режим № 1**



**Рис. 3. Режим № 2**

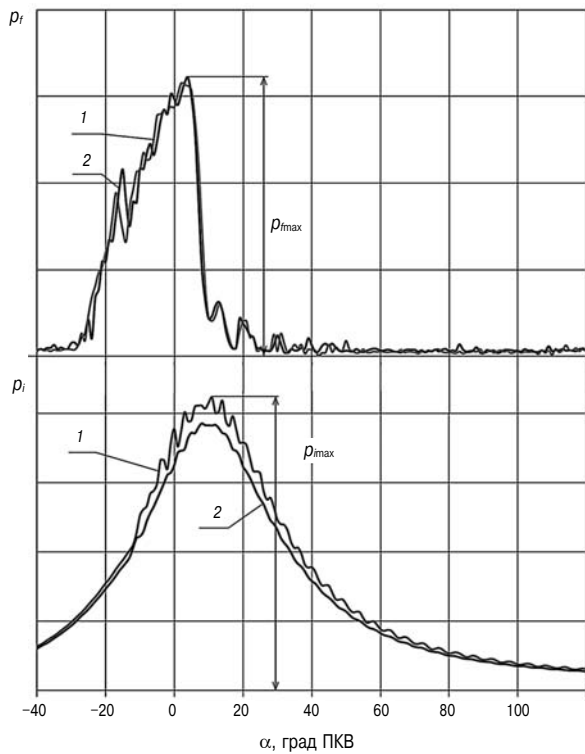


Рис. 4. Режим № 3

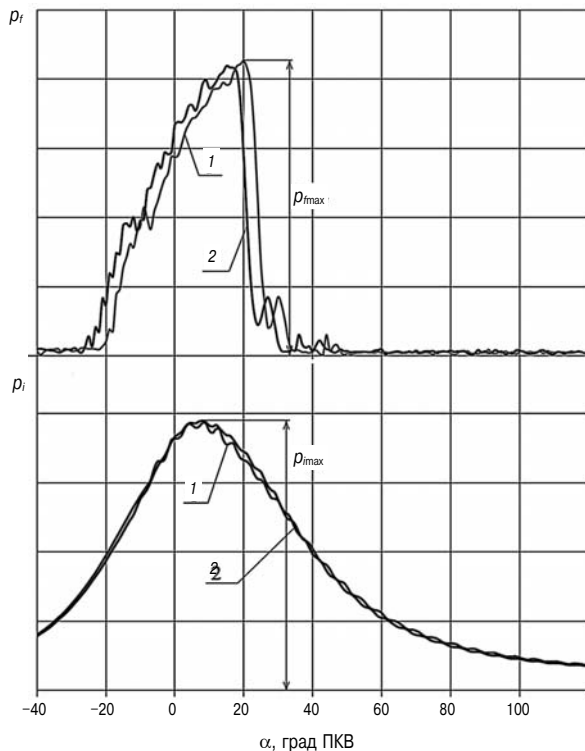


Рис. 5. Режим № 4

На рис. 6 даны осциллограммы изменения частоты вращения вала одноцилиндрового отсека двигателя на установившихся режимах, характеризующие стабильность поддержания системой управления скоростного режима. На стабильность

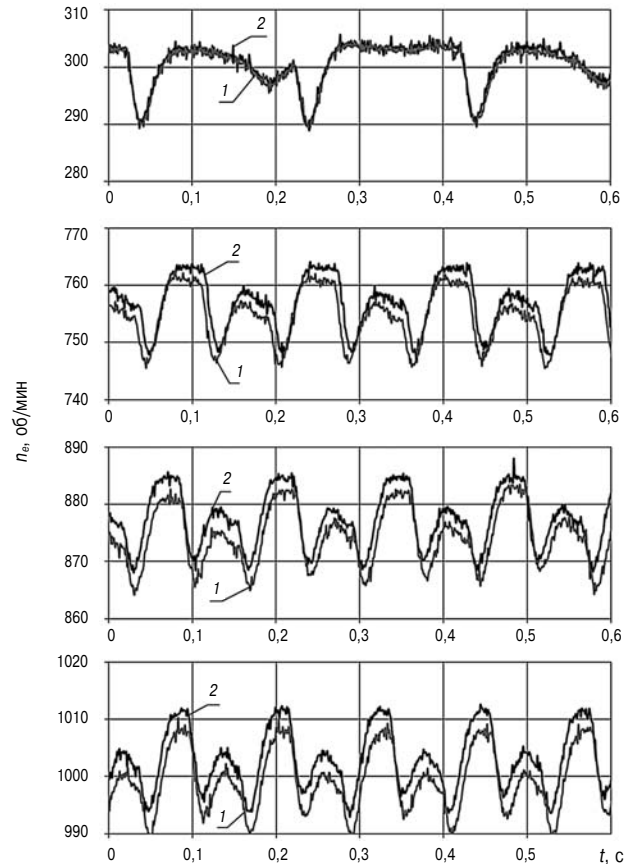


Рис. 6. Стабильность поддержания скоростного режима

частоты вращения влияет настройка коэффициентов ПИД закона регулирования. Размах колебаний частоты вращения для обоих блоков одинаков. При оценке величины отклонений частоты вращения следует учитывать специфику работы одноцилиндрового отсека, в котором подвод энергии к валу производится гораздо реже, чем в многоцилиндровом двигателе, а система управления имеет возможность влиять на процесс топливоподачи только во время сравнительно редких впрысков в одном цилиндре.

Получение типовых переходных процессов на одноцилиндровых отсеках двигателей, обычно, не проводится из-за трудностей с контролируемым процессом изменения во времени нагрузки на двигатель. Для проверки устойчивости работы системы управления были сняты переходные процессы при изменении настройки частоты вращения при неизменной нагрузке. На рис. 7 в качестве примера приведен переходный процесс при изменении настройки частоты вращения холостого хода с 300 до 400 об/мин. В алгоритме работы системы управления реализован заданный темп изменения частоты вращения, характерный для тепловозных дизелей. Показаны процессы изменения во времени следующих параметров: настройки частоты вращения (линия 1), частоты вращения вала двигателя (линия 2), продолжи-

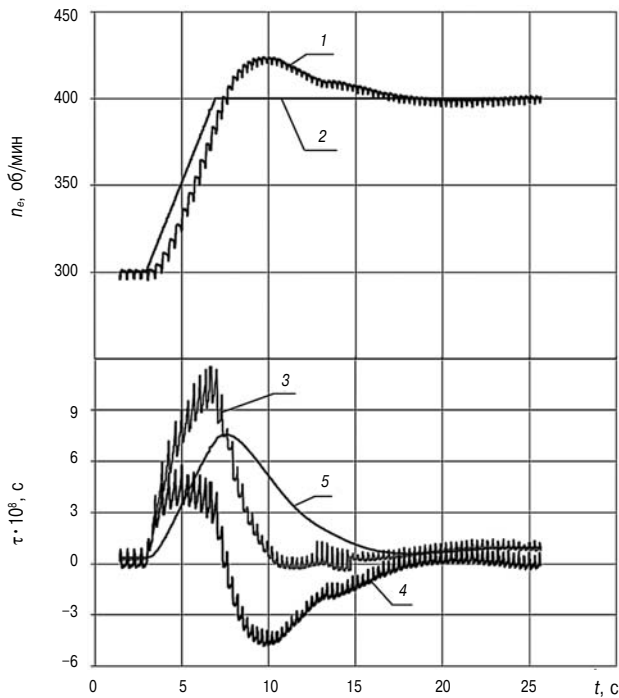


Рис. 7. Переходный процесс

тельность управляющего импульса (линия 3), пропорциональной и интегральной составляющих закона регулирования (линии 4 и 5, соответственно). Характер протекания переходного процесса изменения частоты вращения свидетельствует об устойчивой работе системы управления с разработанным электронным блоком.

#### Выводы

Разработана система управления дизельными двигателями различного назначения, производство которых планируется в настоящее время в Российской Федерации. Для обеспечения современных требований к экологическим и экономическим показателям дизельных двигателей разработанная система управления характеризуется комплексностью и адаптивностью. Комплексность предусматривает реализацию регулирующих воздействий на основные системы двигателя, прежде всего — топливоподачу и воздухоснабжение. Система управления обладает гибкостью и предусматривает адаптацию к двигателям различного назначения и режимам их работы.

Удобство адаптации системы управления к различным двигателям обеспечивается модульным принципом построения электронного блока, который состоит из двух модулей: универсального процессорного модуля и специализированного модуля, содержащего устройства связи процессорного модуля с датчиками и исполнительными устройствами контуров регулирования конкретного двигателя.

Преимуществом разработанной системы управления является возможность осуществления

единым электронным блоком регулирующих воздействий на все системы двигателя, для которых это требуется. Нет необходимости в использовании нескольких отдельных блоков, требующих взаимного согласования.

Экспериментальный образец электронного блока, изготовленный для перспективного дизельного двигателя Д500 производства АО «Коломенский завод», содержит в специализированном модуле набор каналов обработки внешних сигналов, обеспечивающий применение блока на любой модификации двигателя.

При испытаниях разработанной системы управления на одноцилиндровом отсеке двигателя Д500 получены требуемые параметры по топливоподаче, индикаторному давлению, стабильности поддержания частоты вращения, показателям переходных процессов.

#### Литература

1. Кутенев В.Ф., Козлов А.В., Теренченко А.С., Шюте Ю.В. Проблемные вопросы ограничения выбросов CO<sub>2</sub> от автотранспортных средств // Журнал автомобильных инженеров. 2010. № 3 (62). С. 55–59.
2. Haurie A., Sceia A., & Thénie J. [Электронный ресурс]: Inland Transport and Climate Change a Literature Review. University of Geneva. URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2009/wp29/WP29-149-23e.pdf> (дата обращения 09 марта 2021).
3. Energy Technology Perspectives [Электронный ресурс]: URL: <https://www.iea.org/etp/> (дата обращения 09 марта 2021).
4. Saadat M., Esfahanian M., & Saket M. Reducing fuel consumption of diesel-electric locomotives using hybrid powertrain and fuzzy look-ahead control. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2016. №231 (4), 406–418. doi:10.1177/0954409716631010
5. Zhao, D., Winward, E., Yang, Z., Stobart, R., & Steffen, T. Characterisation, control, and energy management of electrified turbocharged diesel engines. Energy Conversion and Management. 2017. № 135. Pp. 416–433. doi:10.1016/j.enconman.2016.12.033
6. Иващенко Н.А. Кузнецов А.Г., Ворнычев Д.С., Фурман В.В. Исследование токсичных показателей отработавших газов дизеля на неустановившихся режимах // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 10, Иннов. деят. 2014. №6. С. 95–103. doi:10.15688/jvolsu10.2014.6.9
7. Nielsen K.V., Blanke M., Eriksson L., & Vejlgard-Laursen M. Adaptive feedforward control of exhaust recirculation in large diesel engines. Control Engineering Practice. 2017. № 65, С. 26–35. doi:10.1016/j.conengprac.2017.05.003
8. Bauer H. Diesel-engine management. Stuttgart, Germany: Robert Bosch. 2004.
9. Langouet H., Metivier L., Sinoquet D. & Tran Q. Engine calibration: Multi-objective constrained optimization of engine maps // Optimization and Engineering. 2011. № 12 (3). Pp. 407–424. doi:10.1007/s11081-011-9140-8
10. Magnetventil-Steuergerate [Электронный ресурс]: DARDANOS. URL: <http://www.heinzmann.com/de/motor-und-turbinen-management/regler/magnetventil-steuergerate> (дата обращения 09 марта 2021).
11. Spicciati, S. [Электронный ресурс]: Diesel Control Systems. URL: <http://www.woodward.com/dieselenines.aspx> (дата обращения 09 марта 2021).
12. Denso ECU Design. Global. [Электронный ресурс]: ECU Design URL: <https://www.denso.com/global/en/products-and-services/electronics/ecu-design> (дата обращения 09 марта 2021).
13. PJSC «Kolomensky Zavod». [Электронный ресурс]: PJSC «Kolomensky Zavod». URL: <http://www.kolomnadiesel.com/> (дата обращения 09 марта 2021).
14. Рыжов В.А. Отечественные двигатели нового поколения Д500. Новый оборонный заказ. Стратегии. 2015. № 5. С. 40–41.