

Научная статья
УДК 621.43.038

Разработка комплексного алгоритма управления ТНВД топливной системы дизеля типа Common Rail

Павел Витальевич Душкин¹, Андрей Александрович Савастенко²,
Павел Алексеевич Королёв³, Сергей Сергеевич Ховренко⁴,
Андрей Александрович Башаров⁵

^{1,2,3,4,5}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹dushkin.pavel@gmail.com

²dozentrudn@mail.ru

³p.pavelkorolev@yandex.ru

⁴sergey.hovrenok@yandex.ru

⁵abasharov2005@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки комплексного алгоритма управления топливным насосом высокого давления (ТНВД) аккумуляторной топливной системы типа Common Rail. Особенность алгоритма – использование прогнозирующей модели и функции адаптации, работающих совместно с ПИД-регулятором. Прогнозирующая модель упрощенно описывает рабочий процесс гидравлического аккумулятора, за счёт чего уточняет работу ПИД-регулятора. Функция адаптации представляет собой механизм машинного обучения, позволяющий собирать и использовать статистику работы ПИД-регулятора. В статье приводятся только краткие сведения о функции адаптации. Данный алгоритм управления является новым и позволяет улучшить качество переходных процессов, оказывающих значительное влияние на экологические показатели дизеля. При этом именно сегодня, когда появилась высокопроизводительная микропроцессорная техника, открылась возможность реализации комплексных алгоритмов управления. В связи с этим данный материал актуален и может быть полезен для специалистов по управлению рабочим процессом ДВС. Работоспособность алгоритма проверена экспериментально. Дополнительно в работе приводится информация об испытательном стенде и его автоматике, сделанной при технической поддержке Производственного объединения ОВЕН.

Ключевые слова: ДВС, топливная система, Common Rail, ПЛК, ОВЕН, система управления, топливный стенд, безмоторный стенд, прикладное программирование, ПИД-регулятор.

Для цитирования: Душкин П.В., Савастенко А.А., Королёв П.А., Ховренко С.С., Башаров А.А. Разработка комплексного алгоритма управления ТНВД топливной системы дизеля типа Common Rail // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №3 (37).

Original article

Design of embedded software for controlling the Common Rail high-pressure pump

**Pavel V. Dushkin¹, Andrey A. Savastenko², Pavel A. Korolev³,
Sergey S. Hovrenok⁴, Andrey A. Basharov⁵**

^{1,2,3,4,5}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹dushkin.pavel@gmail.com

²dozentrudn@mail.ru

³p.pavelkorolev@yandex.ru

⁴sergey.hovrenok@yandex.ru

⁵abasharov2005@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of the development of a complex algorithm for controlling the high-pressure fuel pump (HPP) of the Common Rail injection system. The peculiarity of the algorithm is the use of predictive model and adaptation function working together with PID controller. The predictive model simplistically describes the working process of the hydraulic accumulator and specifies the operation of the PID-regulator. The adaptation function is a machine learning mechanism to store and utilise the result of the PID controller. The publication only summarises the adaptation, more detailed material will be presented in new papers. This control technique is new and allows to improve the quality of transient processes that have a significant impact on the environmental performance of the diesel engine. At the same time it is today, when high-performance microprocessor technology has appeared, the possibility of realisation of complex control algorithms has opened up. In this regard, this material is relevant and may be useful for specialists in controlling the working process of internal combustion engines. The efficiency of the algorithm has been verified experimentally. The publication contains: the structure of the whole algorithm of the fuel injector control, description of the PID-regulator, predictive model and brief information about the adaptation function. In addition, the publication provides information about the test bench and its automation, made with the technical support of the Production association OWEN.

Keywords: internal combustion engine, fuel system, Common Rail, PLC, OWEN, control system, ECU, test bench, embedded, PID governor.

For citation: Dushkin P.V., Savastenko A.A., Korolev P.A., Hovrenok S.S., Basharov A.A. Design of embedded software for controlling the Common Rail high-pressure pump. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. № 3 (37).

Введение

Неотъемлемая часть современного двигателя внутреннего сгорания – электронная система управления. Благодаря гибкому электронному управлению удастся обеспечить оптимальную работу систем ДВС и, в частности, системы подачи дизельного топлива. В данной работе представлены результаты создания комплексного алгоритма управления топливным насосом высокого давления (ТНВД) аккумуляторной топливной системы типа Common Rail. Алгоритм целиком формируется в системе графической разработки программного обеспечения (ПО) без необходимости программирования микроконтроллера на языке Си. Экспериментальная проверка осуществляется на специально разработанном топливном стенде, автоматизация измерений и диспетчерского управления стендом сделана при технической поддержке Производственного объединения ОБЕН.

Выбранный в работе объект управления актуален и на сегодняшний день, и в долгосрочной перспективе [1]. При этом представленная технология полезна для многих специалистов, занимающихся различными системами энергетических установок.

Безмоторный топливный стенд

В основе конструкции стенда (рис. 1) находится асинхронный электродвигатель АИР мощностью 7,5 кВт для привода топливного насоса высокого давления (ТНВД) и линия низкого давления топлива. Управление топливным стендом построено на базе промышленного контроллера ОБЕН ПЛК150, подключаемого к SCADA системе для контроля и наблюдения параметров. Регистрируются следующие параметры:

- давление в топливной системе (измерение, контроль аварийных состояний);
- температура топлива, управление теплообменным аппаратом;
- уровень топлива в баке;
- запуск и остановка стенда (главное реле);
- частота вращения вала ТНВД (контроль и управление частотным преобразователем).

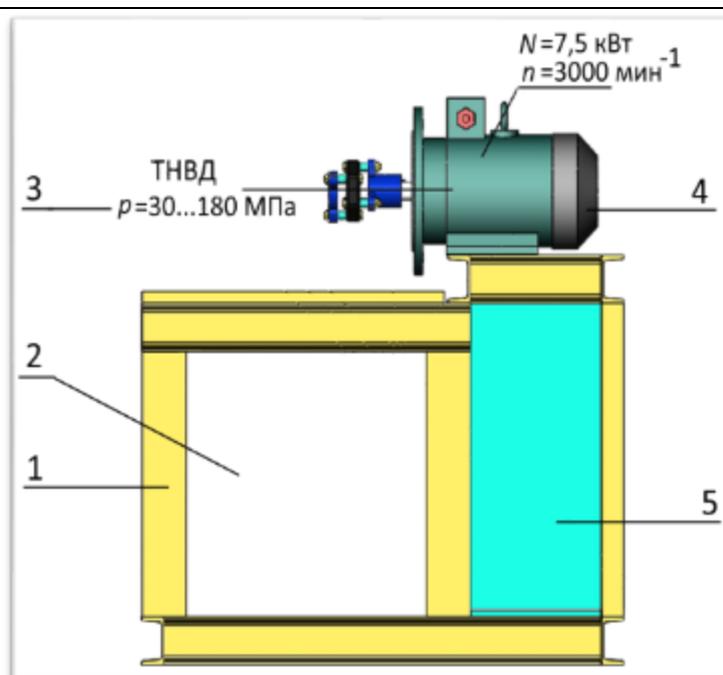


Рис. 1. Базовые элементы топливного стенда:

- 1 – рама,
- 2 – место для линии низкого давления,
- 3 – место для установки ТНВД,
- 4 – асинхронный электродвигатель,
- 5 – место для электрооборудовани

Давление в гидравлическом аккумуляторе регулируется изменением производительности ТНВД с помощью системы управления, работающей по представленному в работе алгоритму.

Более подробно с устройством топливных систем типа Common Rail и подходов к управлению их рабочим процессом можно ознакомиться в [2].

Упрощенная структурная схема топливного стенда представлена на рис. 2. Фотография – на рис. 3.

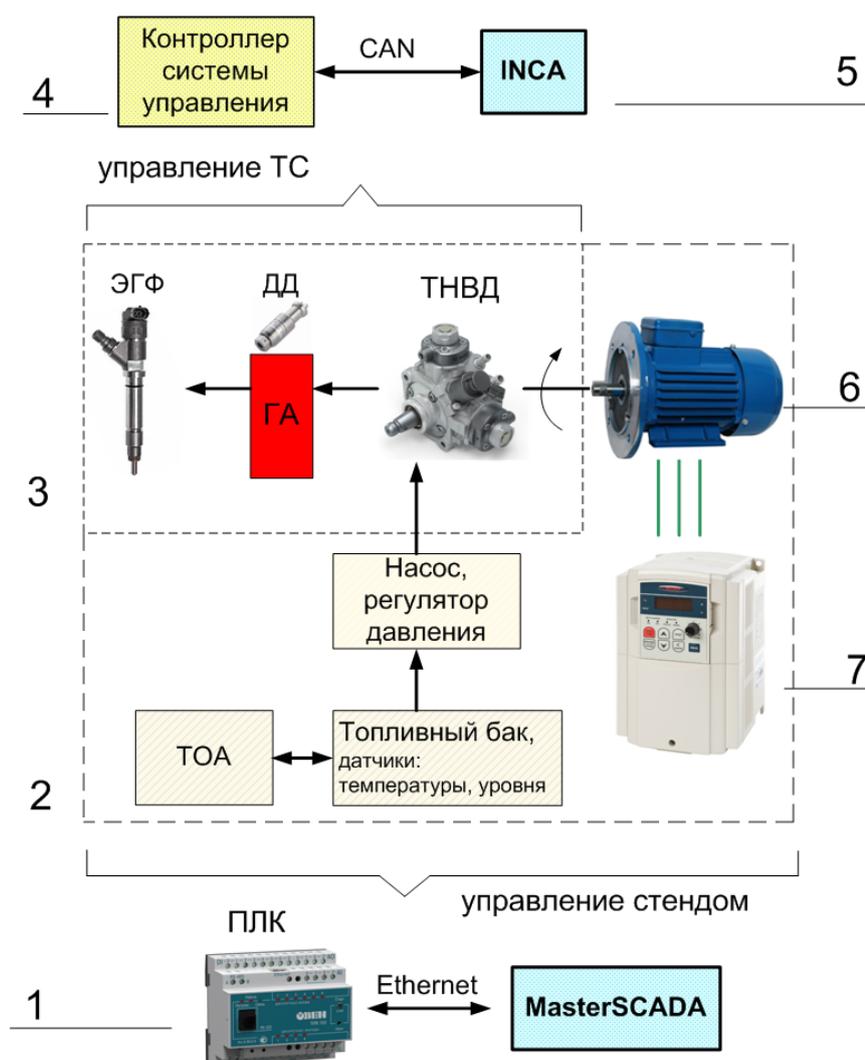


Рис. 2. Упрощенная структурная схема топливного стенда: 1 – промышленный контроллер ОВЕН ПЛК 150, 2 – оборудование под управлением ПЛК, 3 – топливная система, 4 – система управления топливоподающей аппаратурой, 5 – среда для взаимодействия с системой управления, 6 – асинхронный электродвигатель, 7 – частотный преобразователь; ЭГФ – электрогидравлическая форсунка, ДД – датчик давления, ГА – гидравлический аккумулятор, ТНВД – топливный насос высокого давления (Bosch CP3.3), ТОА – теплообменный аппарат.

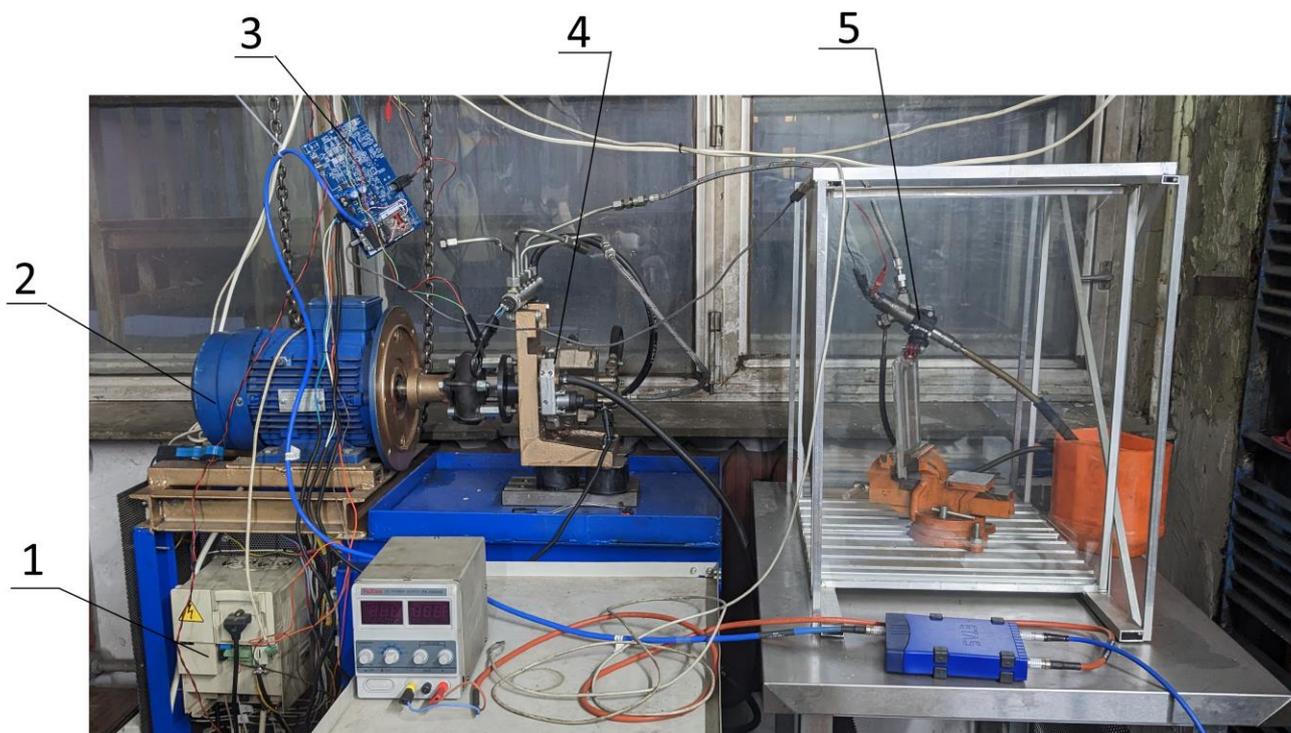


Рис. 3. Фотография топливного стенда: 1 – частотный преобразователь, 2 – электродвигатель, 3 – система управления топливоподающей аппаратурой, 4 – ТНВД, 5 – ЭГФ (электрогидравлическая форсунка)

Структура функции управления ТНВД

Задачу системы управления ТНВД можно сформулировать следующим образом: обеспечение такой скважности ШИМ-сигнала, чтобы производительность ТНВД обеспечивала заданное давление в гидравлическом аккумуляторе.

Функция управления ТНВД состоит из семи подпрограмм – моделей, выполненных в среде визуальной разработки программного обеспечения. Каждая модель имеет название и номер (F101, F102 и т.д.). Схема взаимодействия моделей показана на рис. 4.

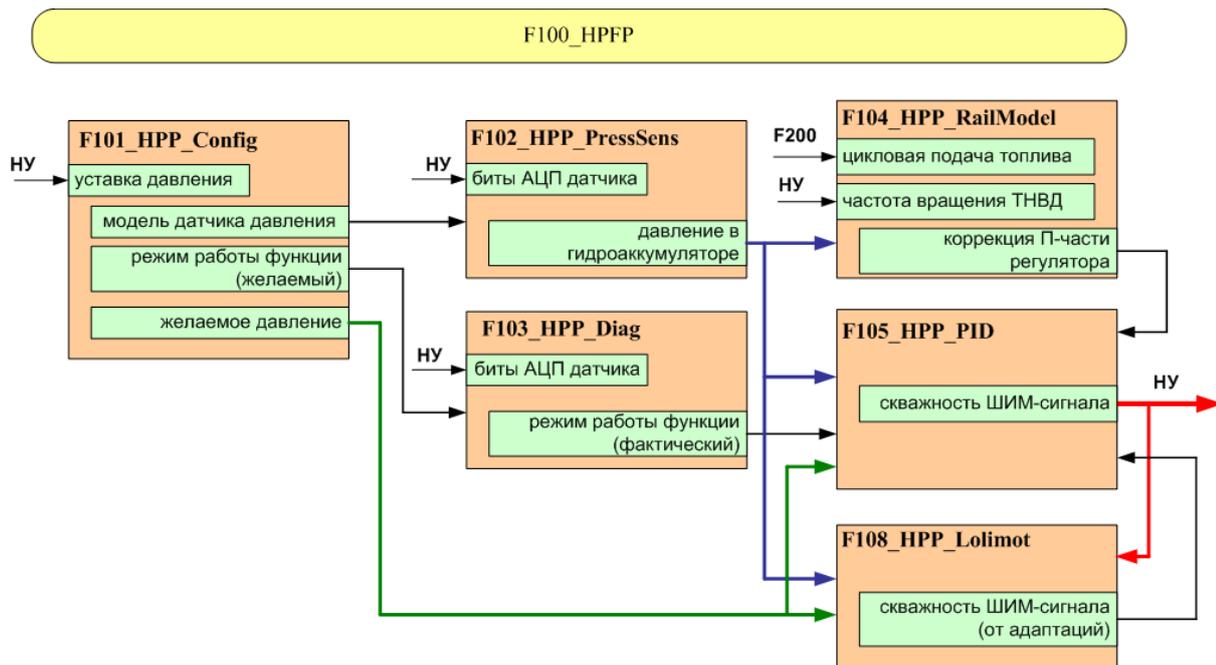


Рис. 4. Структура функции управления ТНВД: НУ – коммуникация с «нижнем уровнем»; F100_HPP, F101_HPP_Config, F102 и т.д. – модели-подпрограммы; F200 – информация о цикловой подаче топлива

Здесь под «нижним уровнем» понимается ПО, разработанное на языке Си и обеспечивающее работу систем микроконтроллера. От нижнего уровня принимается: заданное оператором давление (уставка давления), результат АЦП датчика давления, частота вращения вала ТНВД. Передаётся на нижний уровень необходимая скважность сигнала управления ТНВД.

F100_HPP – диспетчер (или монитор) вызова моделей F101 ... F108.

F101_HPP_Config – конфигурирование функции. Здесь задается модель датчика давления и комплекс параметров, отвечающих за режим управления ТНВД. Например, можно перейти на ручное управление.

F102_HPP_PressSens – формирование информации об измеренном давлении в гидравлическом аккумуляторе.

F103_HPP_Diag – диагностическая модель, определяющая ряд неисправностей. Например, обрыв цепи датчика давления.

F104_HPP_RailModel – коррекция работы ПИД-регулятора на основе модели физических процессов, протекающих в гидравлическом аккумуляторе.

F108_HPP_Lolimot – модель, обеспечивающая процедуру адаптации.

F105_HPP_PID – ПИД-регулятор

Задача данной модели – поддержание заданного давления в гидравлическом аккумуляторе (ГА на рис. 2) с помощью ПИД-регулятора, работа которого в дискретном виде описывается выражением (1) [5]:

$$c = K_p e + \frac{K_i}{\Delta t} \sum_0^{\tau} e + K_d \frac{e_i - e_{i-1}}{\Delta t}, \text{ где} \quad (1)$$

c – управляющее воздействие, формируемое контроллером; $e = p_{ж} - p_{изм}$ – ошибка регулирования давления; $p_{ж}$ – желаемое давление; $p_{изм}$ – измеренное значение; K_p K_i K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты; Δt – период вызова задачи регулятора (в данной работе $\Delta t=5$ мс).

Для надёжной работы дифференциальной части используется дополнительный цифровой фильтр, сглаживающий резкие скачки ошибки регулирования [6]:

$$e_{flt_i} = \alpha \cdot e_i + (1 - \alpha) \cdot e_{flt_i-1}, \text{ где} \quad (2)$$

e_{flt_i} , e_{flt_i-1} – фильтрованная ошибка на текущем и предыдущем шагах фильтрации, e_i – исходное значение ошибки, поступающее в фильтр, α – коэффициент фильтра (принимает значение от 0 до 1).

Дополнительно для улучшения модели ПИД-регулятора, представленного на рис. 5, могут быть добавлены ограничения на предельные значения П, И, Д частей регулятора и предусмотрена инициализация интегральной части регулятора начальным значением.

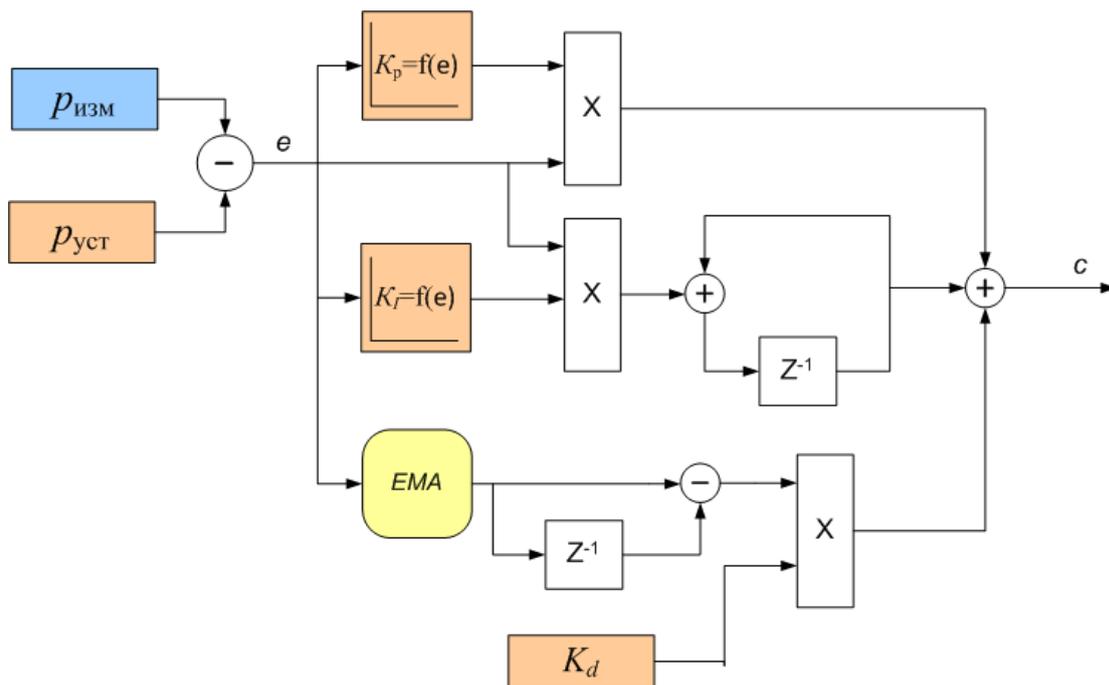


Рис. 5. Упрощенная схема ПИД-регулятора: $p_{уст}$ – уставка давления (желаемое значение); $p_{изм}$ – измеренное значение; K_p , K_I – матрицы (карты) пропорционального и интегрального коэффициентов; K_d – дифференциальный коэффициент; EMA – фильтр экспоненциальное скользящее среднее; z^{-1} – задержка на один шаг

F104_HPP_RailModel – прогнозирующая модель

Данная модель базируется на уравнении объёмного баланса (3) [3] и для своей работы принимает информацию от функции подачи топлива (F200 на рис. 4) о расходе через электрогидравлические форсунки ($q_{в\text{ых}}$ в (3)). Схема объёмного баланса приведена на рис. 6.



Рис. 6. Схема объёмного баланса

$$q_{\text{вх}} = [p_{\text{ж}} - p_{\text{изм}}] \cdot \frac{\alpha V}{\Delta t} + q_{\text{вых}}, \text{ где} \quad (3)$$

$q_{\text{вх}}$ – поступающее от ТНВД топливо, $p_{\text{изм}}$ – измеренное давление, α – сжимаемость, V – объём гидравлического аккумулятора (ГА), $q_{\text{вых}}$ – топливо на выходе из ГА за счёт подачи топлива.

Объём V и характеристика сжимаемости – калибруемые величины (настраиваемые параметры). Типовые значения представлены в [2, 3].

Используя $q_{\text{вх}}$, как коррекцию пропорциональной части регулятора (рис. 5), можно добиться значительного улучшения реакции ТНВД на изменение подачи топлива электрогидравлическими форсунками.

F108_HPP_Lolimot – функция адаптации

Данная модель, построена на базе метода машинного обучения «дерево локально-линейных моделей» или «LOLIMOT», описание которого приводится в монографии [4]. Позволяет собирать статистику о формируемом ШИМ-сигнале управления клапаном ТНВД в зависимости от желаемого давления и использовать её для управления. В текущей версии модели F108 не учитывается частота вращения вала ТНВД, а обучение происходит только при отключенной подаче топлива. Разработанная модель находится в состоянии проверки и будет представлена в будущих публикациях.

Модель позволяет: обеспечивать аварийное регулирование топливной системы при выходе из строя датчика давления и формировать инициализацию (начальное значение) ПИД-регулятора во всем диапазоне давлений.

Реализация всех моделей может осуществляться в любой среде визуальной разработки, например, ASCET или Matlab Simulink. Из отечественных систем наибольший интерес представляют Autogramma [7] и SimInTech [8].

Проверка разработанного алгоритма

Задача проверки – подобрать калибруемые (настраиваемые) параметры так, чтобы обеспечить удовлетворительное протекание переходных процессов и поддержание заданного давления (рис. 5) при отсутствии сбоев.

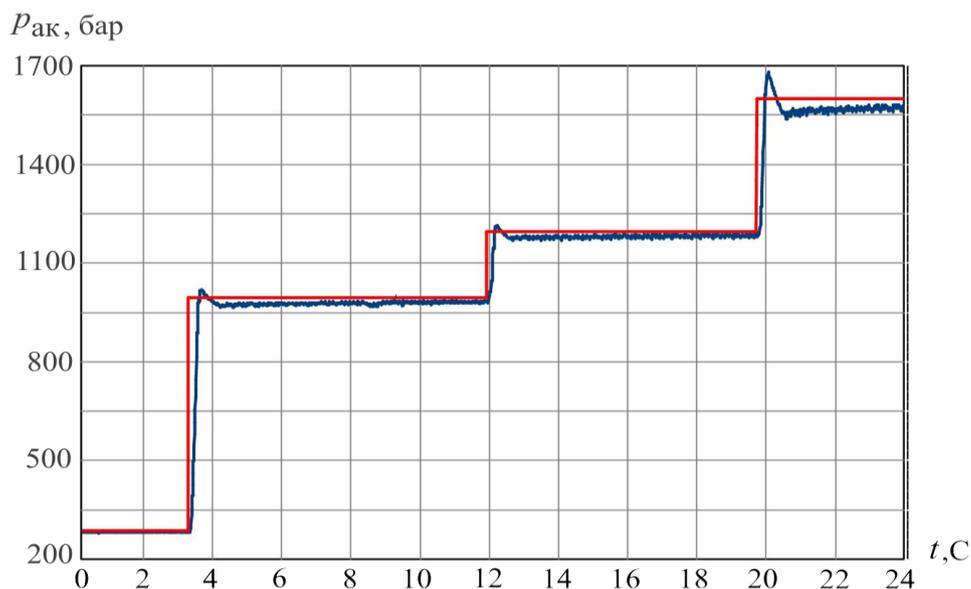


Рис. 6. Результат проверки алгоритма:

p – давление в гидравлическом аккумуляторе, t – время;
красная линия – желаемое давление, синяя линия – измеренное давление

Основную сложность при настройке занимает ПИД-регулятор, настройка которого осуществлялась методом Зиглера и Никольса [9]. Для более глубокой настройки (калибровки) целесообразно использовать более современные и автоматизированные способы, например, метод Нелдера – Мида [10].

Вывод

Разработан комплексный алгоритм управления, отличающийся от существующих подходов применением прогнозирующей модели и функции адаптации.

Текущая версия алгоритма обладает хорошим качеством переходных процессов. В результате проверки удалось обеспечить переход с 30 МПа на 100 МПа за 0,4 с при незначительном перерегулировании. В дальнейшем, благодаря функции адаптации и более глубокой настройке (калибровке), прогнозируется дальнейшее улучшение качества регулирования.

Дополнительно необходимо отметить, что представленный в статье испытательный стенд и система управления могут быть использованы для технического обеспечения дисциплин по управлению энергетическими установками и тепловыми двигателями.

Список источников

1. Перспективы развития электромобилей в России / С.Н. Девянин, В.А. Марков, А.А. Савастенко, Э.А. Савастенко // 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 29 января 2021 года. – М.: МАДИ, 2021. – С. 114-121.
2. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Ивашенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
3. Голубков, Л.Н. Методы расчета топливных систем дизелей / Л.Н. Голубков, Л.П. Музыка, В.И. Трусов. – М.: МАДИ, 1986. – 79 с.
4. Nelles, O. Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models / Oliver Nelles – Berlin: Springer, 2001. – 785 с.
5. Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
6. Ким, Д.В. Сравнение методов фильтрации цифровых сигналов / Д.В. Ким, А.С. Беляев // Молодёжь и современные Информационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 04–07 декабря 2017 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2018. – С. 102-103.
7. Autogramma. Среда визуальной разработки программного обеспечения. – URL: <https://www.autogramma.com/> (дата обращения: 08.05.2023).

8. SimInTech . Среда динамического моделирования SimInTech. – URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения: 08.05.2023).
9. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. – Trans. ASME, vol. 64, pp. 759–768, 1942.
10. Автоматизация настройки ПИ-регулятора системы управления давлением топлива в аккумуляторной топливной системе дизеля / П.В. Душкин, А.А. Савастенко, С.С. Ховренко [и др.] // Двигателестроение. – 2023. – № 1(291). – С. 51-63. – DOI 10.18698/jec.2023.1.51-63.

References

1. Devyanin S.N., Markov V.A., Savastenko A.A., Savastenko E.A. *9-ye Lukaninskiye chteniya. Problemy i perspektivy razvitiya avtotransportnogo kompleksa : sbornik докладов Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Moscow, MADI, 2021. pp. 114-121.
2. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley* (Fuel equipment and control systems of diesel engines), Moscow: Legion-Avtodata, 2005, 344 p.
3. Golubkov L.N., Muzyka L.P., Trusov V.I. *Metody rascheta toplivnykh sistem dizeley* (Methods of calculation of diesel engine fuel systems), Moscow, MADI, 1986, 79 p.
4. Oliver Nelles. *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*, Berlin, Springer, 2001, 785 p.
5. Denisenko V.V. *Komp'yuternoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniyem* (Computer control of technological process, experiment, equipment), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2009, 608 p.
6. Kim D.V., Belyaev A.S. *Molodozh' i sovremennyye Informatsionnyye tekhnologii: sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchonykh*, Tomsk, Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskiy universitet, 2018, pp. 102-103.
7. URL: <https://www.autogramma.com/>.
8. URL: <https://simintech.ru/>.
9. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers, Trans, ASME, vol. 64, p. 759–768, 1942.
10. Dushkin P.V., Savastenko A.A., Khovrenok S.S. [et al.], *Dvigatelistroyeniye*, 2023, no. 1(291), pp. 51-63, DOI 10.18698/jec.2023.1.51-63.

Рецензент: А.Ю. Дунин, д-р техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Душкин Павел Витальевич, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Савастенко Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Королёв Павел Алексеевич, студент, МАДИ.

Ховренко Сергей Сергеевич, аспирант, МАДИ.

Башаров Андрей Александрович, студент, МАДИ.

Information about the authors

Dushkin Pavel V., Ph.D., associate professor, MADI.

Savastenko Andrey A., Ph.D., associate professor, MADI.

Korolev Pavel A., student, MADI.

Hovrenok Sergey S., postgraduate, MADI.

Basharov Andrey A., student, MADI.

Статья поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 18.09.2023.

The article was submitted 04.09.2023; approved after reviewing 15.09.2023; accepted for publication 18.09.2023.