

УДК 621.43.038.044.7

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ В АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЕ

Королёв Павел Алексеевич, студент,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, p.pavelkorolev@yandex.ru.

Душкин Павел Витальевич, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, dushkin.pavel@gmail.com.

Аннотация. В публикации представлены результаты разработки ПИД-регулятора для управления давлением в аккумуляторе топливной системы типа common rail. Процесс разработки состоит из следующих этапов: разработка алгоритма в среде разработки программного обеспечения ASCET компании ETAS, испытания и предварительная калибровка алгоритма на модели топливного аккумулятора, подготовка алгоритма к его применению в контроллере системы управления топливным стендом.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, система управления, калибровка системы управления, алгоритмы управления, ASCET, ETAS.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR PRESSURE CONTROL IN THE BATTERY FUEL SYSTEM

Korolyov Pavel A., student,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia,, p.pavelkorolev@yandex.ru

Dushkin Pavel V., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, dushkin.pavel@gmail.com

Abstract. The publication presents the results of the development of a PID controller for controlling the pressure in a common rail type fuel system battery. The development process consists of the following stages: algorithm development in the ETAS ASCET software development environment, testing and preliminary calibration of the algorithm on a fuel battery model, preparation of the algorithm for its application in the fuel stand control system controller.

Key words: internal combustion engine, control system, control system calibration, control algorithms, ASCET, ETAS.

Введение

Качество управления давлением в аккумуляторной топливной системе должно отвечать следующим критериям: максимальная динамика переходных режимов при минимальном перерегулировании, высокая точность поддержания заданного давления, ограничение максимального и минимального давления, идентификация срабатывания механического клапана ограничения давления. В данной работе для решения поставленной задачи разработан традиционный ПИД-регулятор, однако, в его состав добавлены фильтры: апериодический фильтр уставки давления и фильтр скользящего среднего для обработки результата АЦП датчика давления.

Отладка и первичная настройка ПИД-регулятора происходит на быстрой модели аккумулятора топливной системы, работающей в режиме реального времени.

Ключевая особенность применяемого метода отладки и настройки алгоритмического программного обеспечения состоит в том, что для моделирования и программирования контроллера системы управления ДВС используется один и тот же программный Си-код, описывающий алгоритм управления давлением. Это обеспечивает соответствие отлаживаемой программы и применяемой в контроллере системы управления ДВС.

Алгоритм управления давлением

Скважность ШИМ-сигнала управления клапаном ТНВД рассчитывается по стандартному выражению ПИД-регулятора [1]:

$$PWM = K_p \Delta + \frac{1}{K_i} \int_0^{\tau} \Delta dt + K_d \frac{d\Delta}{dt}, \text{ где} \quad (1)$$

$\Delta = p_{уст} - p_{изм}$ – ошибка регулирования; $p_{уст}$ – уставка (желаемое значение) давления; $p_{изм}$ – измеренное давление; K_p K_I K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты.

Для обеспечения плавности работы регулятора, уставка давления обрабатывается динамическим уравнением первого порядка [2]:

$$T \frac{dp_{уст_выход}}{dT} + p_{уст_выход} = p_{уст_вход}, \quad \text{где} \quad (2)$$

$p_{уст_выход}$ – сглаженная уставка, $p_{уст_вход}$ – уставка до сглаживания фильтром, T – постоянная времени.

Результаты АЦП датчика давления сглаживаются фильтром скользящего среднего для снижения влияния помех:

$$p_{изм_выход}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} p_{изм_вход}(i+j), \quad \text{где} \quad (3)$$

$p_{изм_выход}$ – сглаженные измерения, $p_{изм_вход}$ – измерения до сглаживания фильтром, N – количество точек для сглаживания.

Выражения 1...3 достаточно трудоёмки для их реализации в виде программного Си-кода, поэтому, в данной работе применяется специальная среда модельно-базированного программирования ASCET-DEVELOPER [3] (рис. 1), позволяющая проводить разработку алгоритмов управления ДВС с помощью блок-диаграмм и на их основе автоматически генерировать Си-код для программирования контроллера системы управления.

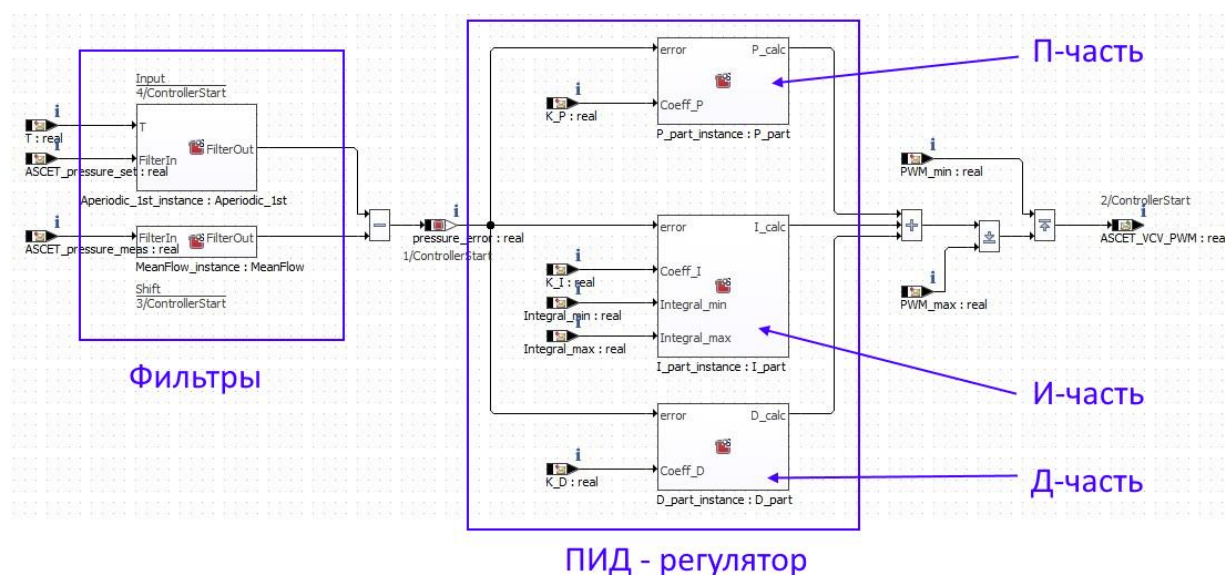


Рис.1. Блок-диаграмма, составленная по уравнениям 1...3

На рисунке 1 показана блок-диаграмма, где слева расположены фильтры (апериодический и фильтр скользящего среднего), в центре находятся составляющие ПИД-регулятора и справа выход алгоритма в виде ШИМ-сигнала.

Внутри каждого из черных прямоугольников располагается новая блок-диаграмма, описывающая соответствующий из элементов программы (фильтр или часть ПИД-регулятора).

Упрощенная модель аккумулятора топливной системы

Для предварительной калибровки и отладки разработанного алгоритма (рис. 1) создана виртуальная модель топливной системы (рис. 2), в основе которого лежит уравнение объемного баланса [4, 5]:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{\alpha V} (q_{in} - q_{out}), \text{ где:} \quad (4)$$

α – сжимаемость топлива, q_{in} – количество топлива, поступающего в гидравлический аккумулятор, q_{out} – количество топлива, покидающего аккумулятор (рис. 2).

Сжимаемость топлива рассчитывается по выражению:

$$\alpha = (a_0 + a_1 \cdot p_0 + a_2 \cdot p_0^2)^{-1}, \text{ где:} \quad (5)$$

$$a_0 = (1053 + 4,7(\rho_{\text{атм}} - 850) - 7,82(t_T - 20)) \cdot 10^6;$$

$$a_1 = 10,497 + 0,0141 \cdot (t_T - 20);$$

$$a_2 = 0,9 \cdot 10^{-10};$$

$\rho_{\text{атм}}$ – плотность топлива при атмосферных условиях, t_T – температура топлива.

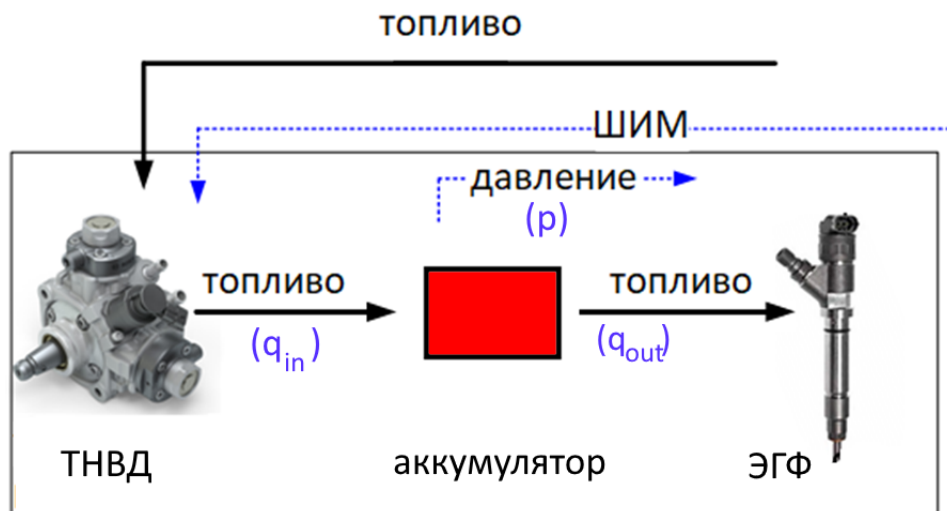


Рис. 2. Структурная схема модели аккумулятора топливной системы: ТНВД – топливный насос высокого давления, ЭГФ – электрогидравлическая форсунка

Особенность разработанной модели аккумулятора топливной системы – высокое быстродействие, позволяющее работать в режиме реального времени.

Взаимодействие алгоритма управления давлением и модели аккумулятора топливной системы

Чтобы отладить алгоритм управления давлением (рис. 1), его необходимо интегрировать в среду, позволяющую осуществлять совместное моделирование (косимуляцию) самого алгоритма и аккумулятора топливной системы. Таким образом алгоритм управления

давлением может принимать от модели «виртуальное» измеренное давление и возвращать скважность ШИМ-сигнала управления клапаном ТНВД.

Процесс взаимодействия с оператором осуществляется с помощью среды калибровки и сбора данных INCA (рис. 3), что позволяет осуществить отладку алгоритма управления давлением и первичный подбор коэффициентов по модели.

Далее разработанный алгоритм управления давлением планируется применить в контроллере системы управления топливным стендом.

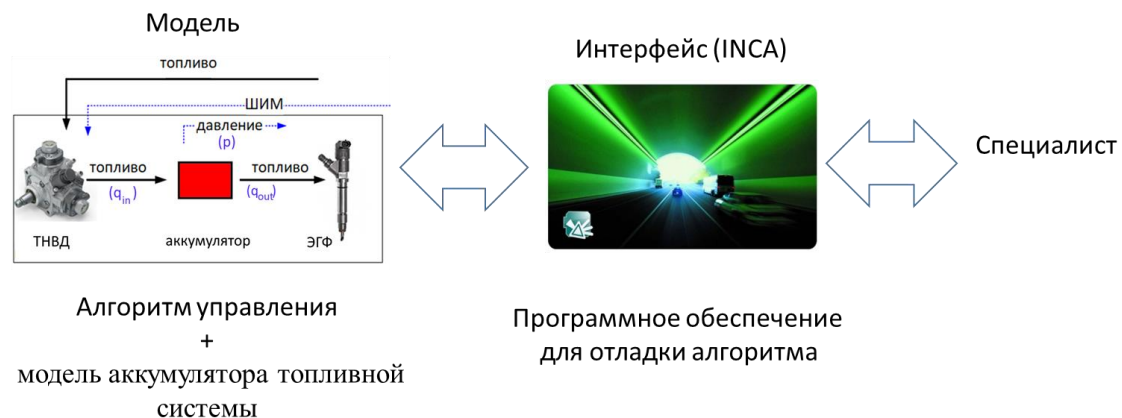


Рис. 3. Схема взаимодействия алгоритма управления и модели аккумуляторной топливной системы с пользователем

Выводы

Разработан алгоритм управления давлением в топливном аккумуляторе и его физическая модель, с помощью которой производится настройка и отладка алгоритма управления.

В дальнейшем разработанный алгоритм будет применен в контроллере системы управления топливным стендом для проведения реальных испытаний.

Список литературы

1. Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
2. Пришвин, С. А. Теплотехнические измерения в ДВС. Динамические измерения: учебное пособие / С. А. Пришвин, П. В. Сафронов, П. В. Душкин. – М.: МАДИ, 2020. – 60 с. – ISBN 9785796202784.
3. ASCET-DEVELOPER – Model-based design and auto c-code generation for embedded systems / Официальный сайт компании ETAS. – URL: <https://www.etas.com/en/products/ascet-developer.php> (дата обращения: 04.05.2021)
4. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2005. – 344 с.
5. Голубков, Л.Н. Математическая модель электрогидравлической форсунки со встроенным топливным аккумулятором и модернизированным управляющим клапаном / Л.Н. Голубков, П.В. Душкин // Вестник МАДИ. – 2015. – № 3(42). – С. 11–18.

References

1. Denisenko V.V. *Komp'yuternoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniyem* (Computer control of technological process, experiment, equipment), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2009, 608 p.
2. Prishvin S.A, Safronov P.V., Dushkin P. V. *Teplotekhnicheskiye izmereniya v DVS. Dinamicheskiye izmereniya* (Thermal measurements in the internal combustion engine. Dynamic measurements), Moscow, 2020, 60 p. – ISBN 9785796202784.
3. ASCET-DEVELOPER - Model-based design and auto c-code generation for embedded systems / Official website of ETAS. URL: <https://www.etas.com/en/products/ascet-developer.php> (accessed: 05/04/2021)
4. Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley* (Fuel equipment and diesel control systems, Moscow, Legion-Avtodata, 2005, 344 p.
5. Golubkov L.N., Dushkin P.V. *Vestnik MADI*, 2015, no. 3(42), pp. 11–18.

Рецензент: А.Л. Яковенко, канд. техн. наук, доц., МАДИ