

В. В. Авсиевич, А. В. Иващенко

**РЕАЛИЗАЦИЯ ДРОБНОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА
В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ
МУЛЬТИТОПЛИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО
СГОРАНИЯ АВТОНОМНОГО ЛОКОМОТИВА**

V. V. Avsievich, A. V. Ivaschenko

**FRACTIONAL PROPORTIONAL-INTEGRAL DIFFERENTIAL
CONTROLLER IMPLEMENTATION IN THE INFORMATION and
control SYSTEM OF THE AUTONOMOUS LOCOMOTIVE
MULTIFUEL ENGINE**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Цель работы состоит в совершенствовании эксплуатационно-технических характеристик двигателя внутреннего сгорания тепловоза, работающего на смеси дизельного топлива и природного газа, путем модернизации информационно-управляющей системы. **Материалы и методы.** Метод исследования основан на реализации алгоритмов дробного пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) управления для повышения устойчивости и качества переходных процессов мультитопливного двигателя. **Результаты.** Результаты работы состоят в реализации предложенной информационно-управляющей системы методом имитационного моделирования и на экспериментальном стенде. Область применения включает модернизацию системы управления двигателя внутреннего сгорания тепловоза. **Выводы.** Выводы заключаются в обосновании преимущества реализации предложенного алгоритма управления по времени переходного процесса и интегральной оценке качества по сравнению с классическим алгоритмом, что позволяет снизить расход топлива.

A b s t r a c t. Background. The paper aims at improving the operational and technical characteristics of the internal combustion engine of a locomotive running on a mixture of diesel fuel and natural gas by modernizing its information and control system. **Materials and methods.** Materials and technologies are based on the implementation of fractional proportional-integral-differential control algorithms to increase the stability and quality of transients of a multi-fuel engine. **Results.** The results of the work consist in the implementation of the proposed information management system by the method of simulation and at the experimental stand. The scope includes the modernization of the control system of an internal combustion engine of a diesel locomotive. **Conclusions.** The conclusions and experimental results prove the benefits of implementing the proposed control algorithm for the transition process time and the integral quality assessment in comparison with the classical algorithm, which allows reducing fuel consumption.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-управляющая система, тепловоз, мультитопливный дизельный двигатель, дробный ПИД-регулятор.

K e y w o r d s: information and control system, diesel locomotive, multi-fuel diesel engine, fractional proportional-integral differential controller.

Введение

В современных условиях эксплуатации двигателей внутреннего сгорания автономных локомотивов к ним предъявляются повышенные требования по мощности, экономичности, надежности и экологичности. Дизельные двигатели широко используются на тепловозах в России и за рубежом [1], в связи с чем одним из основных способов модернизации железнодорожного подвижного состава является внедрение мультитопливных двигательных установок, работающих, например, на смеси дизельного топлива и природного газа.

Совершенствование существующих и разработка новых газодизельных конструкций связано с измерением и контролем параметров газодизельного режима с формированием на этой основе моделей подачи топлива. Адекватный выбор типа управляющего и исполнительного регулирующих устройств позволяет повысить эффективность газодизеля [2–4]. Для управления двигательной установкой такого типа на тепловозе актуальным является применение современных алгоритмов регулирования. В данной статье предлагается реализовать дробный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор [5–8], особенности и преимущества практической реализации которого описаны ниже.

Методы и методология

Электронная информационно-измерительная система (ИИС) управления подачей газа и запальной дозы дизельного топлива в зависимости от уставки и частоты вращения коленчатого вала двухтопливного дизельного двигателя представлена на рис. 1.

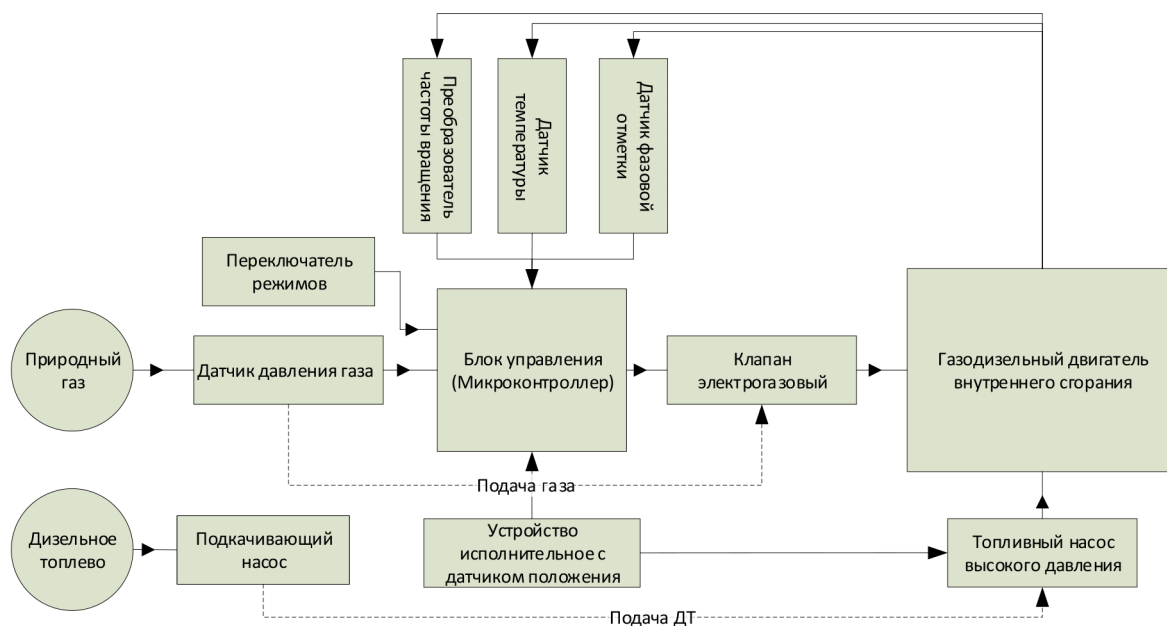


Рис. 1. Схема работы дизельного двигателя, работающего на смеси дизельного топлива и природного газа

Двигатель запускается только на дизельном топливе, для запуска нужно выполнить все операции, предусмотренные для пуска двигателя в соответствии с эксплуатационной документацией. При достижении коленчатым валом двигателя частоты инициализации пуска, блок управления (БУ) выдает на устройство исполнения с датчиком положения (ИУ) ШИМ-сигнал, соответствующий пусковой подаче топлива. После достижения коленчатым валом пусковой частоты вращения (ЧВ) система начинает регулирование ЧВ, и с заданным темпом выводит двигатель на минимальную ЧВ холостого хода.

После запуска двигателя по каналу преобразователя частоты вращения в БУ поступает сигнал о текущем ЧВ коленчатого вала двигателя, который сравнивается с заданным, определяется задатчиком ЧВ. При рассогласовании двух сигналов БУ выдает команду ИУ на изменения подачи топлива. Команда выдается БУ до тех пор, пока текущая ЧВ не сравняется с заданным сигналом.

Работа двигателя в режиме газодизеля осуществляется после пуска и прогрева двигателя. Для перехода необходимо установить тумблер «дизель/газодизель» в положение «газодизель», после этого осуществляется алгоритм автоматического перехода двигателя в газодизельный режим.

Классический ПИД закон управления не позволяет обеспечить высокую скорость переходных процессов без перерегулирования. Для компенсации этого недостатка предлагается использовать дробный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИ_αД_β) регулятор, использующий [6] следующий закон управления:

$$u(t) = \left[K_n + \frac{I_{0t}^\alpha}{T_n} + T_d D_{0t}^\beta \right] e(t), \quad (1)$$

где $e(t)$ – управляющее воздействие; K_n – коэффициент пропорциональности; I_{0t}^α , D_{0t}^β – дробный интеграл и дифференциал Римана – Лиувилля; $u(t)$ – выходное напряжение ПИ_αД_β регулятора.

На основе этого закона был разработан алгоритм дробного ПИ_αД_β управления:

$$u(n) = u(n-1) + q_0 e(n) + q_1 e(n-1) + q_2 e(n-2) + \varepsilon(n), \quad (2)$$

где

$$q_0 = K_n + \frac{h^\alpha}{T_n} + \frac{T_d}{h^\beta}, \quad q_1 = -K_n + \frac{h^\alpha}{T_n \Gamma(\alpha)} (\Gamma(1+\alpha) - \Gamma(\alpha)) - 2 \frac{T_d}{h^\beta},$$

$$q_2 = \frac{T_d}{h^\beta} + \frac{h^\alpha}{T_n \Gamma(\alpha)} (0,5\Gamma(2+\alpha) - \Gamma(1+\alpha)),$$

$\varepsilon(n) = \frac{h^\alpha}{T_n \Gamma(\alpha)} \sum_{k=3}^{n-1} \left(\frac{\Gamma(k+\alpha)}{(k)!} - \frac{\Gamma(k-1+\alpha)}{(k-1)!} \right) e(n-k)$ – уточняющий коэффициент дробной интегральной составляющей; α, β – дробные степени интеграла и дифференциала соответственно $0 < \alpha, \beta < 1$, t – время, $\Gamma()$ – гамма-функция Эйлера, K_n – пропорциональный коэффициент (коэффициент усиления), T_n – постоянная интегрирования, T_d – постоянная дифференцирования, h – шаг квантования, q_0, q_1, q_2 – настроечные параметры цифрового регулятора.

Реализация данного алгоритма в рамках информационно-управляющей системы мультитопливного двигателя внутреннего сгорания тепловоза позволит повысить устойчивость и качество переходных процессов.

Результаты работы и область применения

Предложенный алгоритм был исследован методом имитационного моделирования с помощью специально разработанной модели газодизельной установки в Matlab Simulink, а также на физической системе автоматического управления на базе лабораторного стенда (рис. 2). Для проведения эксперимента на стенде алгоритм работы дробный ПИД регулятора был записан в высокопроизводительный 16-разрядный микроконтроллер фирмы Microchip Technology Inc. Для проведения эксперимента было использовано программное обеспечение, входящее в состав лабораторной установки (рис. 3).

В ходе моделирования ПИ_αД_β алгоритма в составе ДВС ДТПГ были получены переходные характеристики, представленные на рис. 4. При оптимальных коэффициентах $\alpha = 0,5$ и $\beta = 0,9999$ и одинаковых основных коэффициентах классического ПИД и дробного ПИ_αД_β алгоритма

$$K_n = 4, \quad T_n = 0,0250, \quad T_d = 0,5,$$

где K_n – пропорциональный коэффициент; T_n – постоянная интегрирования; T_d – постоянная дифференцирования.



Рис. 2. Экспериментальная установка (стенд СамГУПС)

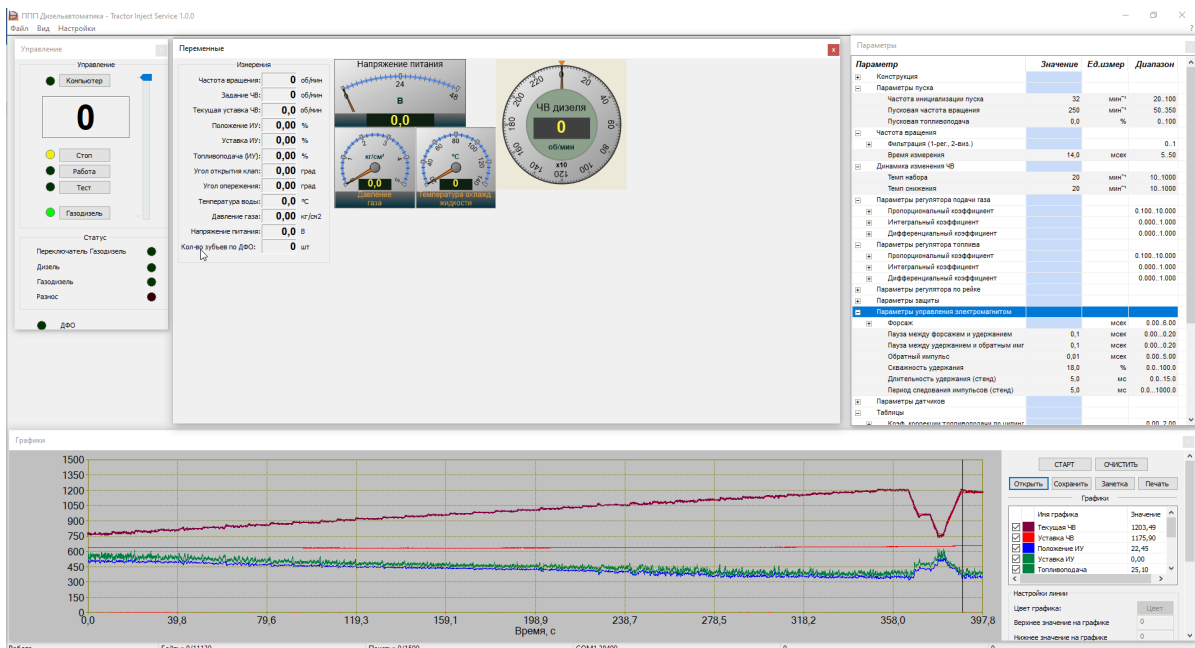


Рис. 3. Программа настройки информационно-управляющей системы

Таким образом, управляя коэффициентами α и β , можно разорвать взаимосвязь между перегулированием и скоростью регулирования.

Выявлено, что преимущество дробного ПИД закона регулирования составляет в среднем по перегулированию на 16 %, по времени переходного процесса – на 47 %, интегральной оценке качества – на 13 %, по сравнению с классическим ПИД законом управления.

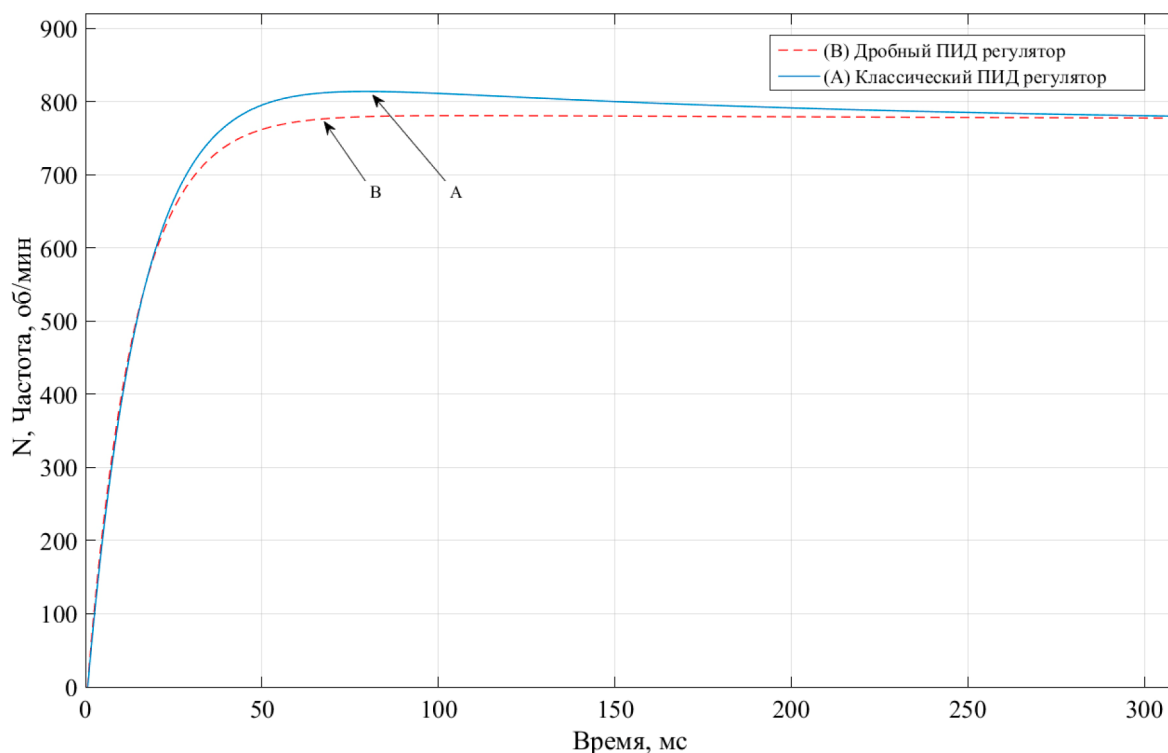


Рис. 4. Результаты моделирования ПИД (А) и ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ (В) алгоритмов управления при частоте 770 об/мин

Результаты экспериментального исследования эффективности дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ алгоритма на базе лабораторного стенда приведены на рис. 5, 6. Экспериментальные данные были получены на одинаковом промежутке времени от $t = 0$ до $t = 3,5 \cdot 10^5$ мс при изменении задания частоты вращения коленчатого вала с интервалом времени 10 с.

В результате установлено преимущество дробного ПИД закона управления в среднем по перегулированию на 15 %, времени переходного процесса – на 42 %, интегральной оценке качества – на 26 %, по сравнению с классическим ПИД законом управления.

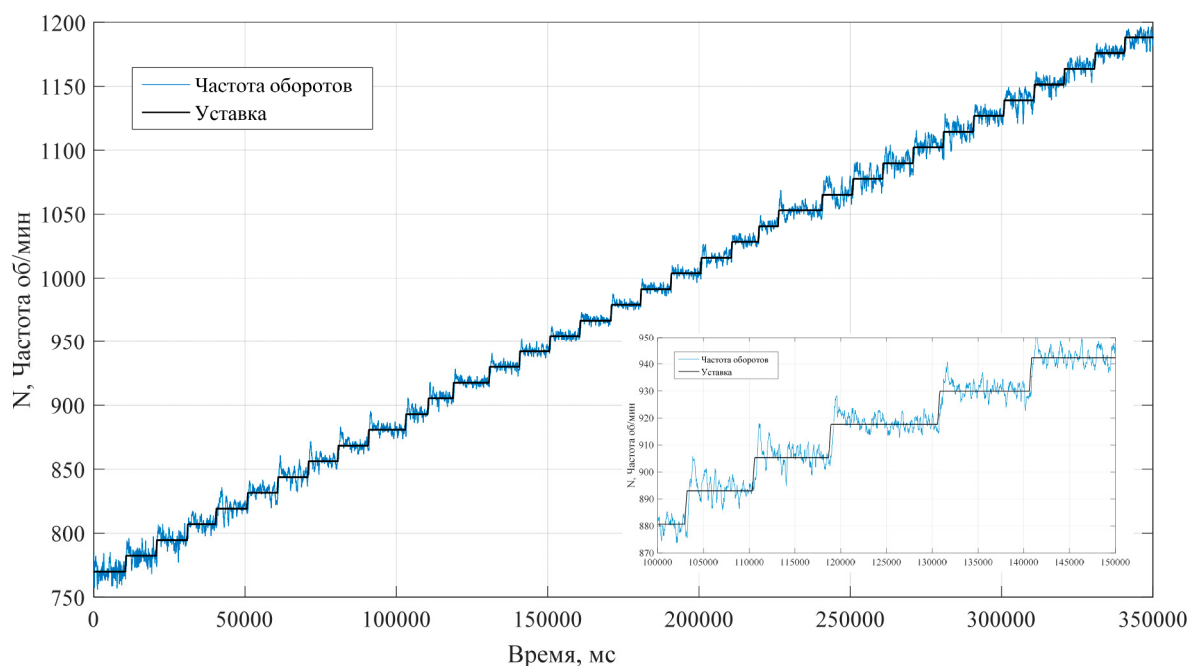


Рис. 5. Результаты исследования эффективности для ПИД алгоритма. Классический ПИД регулятор

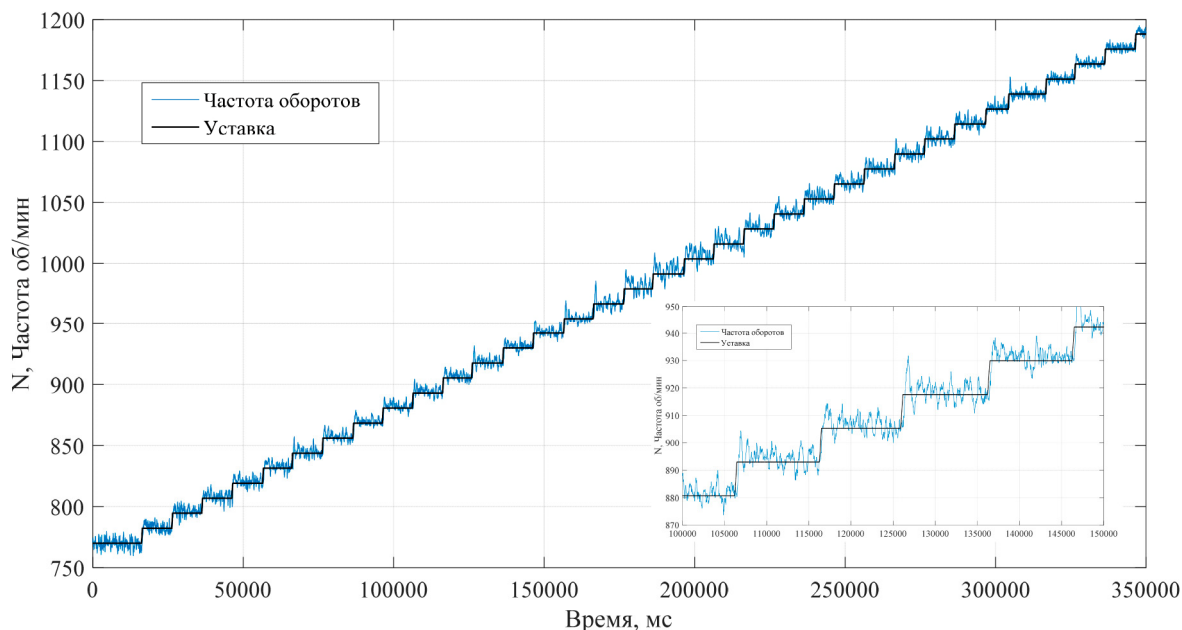


Рис. 6. Результаты исследования эффективности для ПИД-алгоритма. Дробный ПИД регулятор

В результате исследования определен расход топлива с классическим ПИД алгоритмом в среднем по топливоподаче 30,8 % и при использовании дробного ПИД алгоритма 29,2 %. Таким образом, экономия топлива составила 5 %.

Заключение

Основным результатом является то, что при использовании дробного ПИД-алгоритма получена экономия топлива. Таким образом, выявлено преимущество модели с дробным ПИД-алгоритмом по времени переходного процесса и интегральной оценки по сравнению с моделью классического ПИД алгоритма.

Библиографический список

1. *Абрамов, Е. Р.* Локомотивы и моторвагонный подвижной состав с двигателями внутреннего сгорания отечественных железных дорог / Е. Р. Абрамов. – Москва, 2015. – 433 с.
2. Надежность и эффективность МТА при выполнении технологических процессов / А. Т. Лебедев, О. П. Наумов, Р. А. Магомедов, А. В. Захарин, П. А. Лебедев, Р. В. Павлюк. – Ставрополь : АГРУС, 2015. – 332 с.
3. *Гольцяпин, В. Я.* Использование природного газа в качестве моторного топлива в энергетических средствах сельскохозяйственного назначения / В. Я. Гольцяпин. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 40 с.
4. *Ерохов, В. И.* Газодизельные автомобили (конструкция, расчет, эксплуатация) / В. И. Ерохов, А. Л. Карунин. – Москва : Граф-пресс, 2005. – 560 с.
5. *Авсиевич, В. В.* Алгоритм численного дробного ПИД-регулирования / А. В. Авсиевич, В. В. Авсиевич // Сборник трудов Четвертой международной конференции по проблемам управления (Москва, 26–30 января 2009 г.). – Москва, 2009. – С. 164–168.
6. *Авсиевич, В. В.* Моделирование систем автоматического управления с дробным ПИД-регулятором / А. В. Авсиевич, В. В. Авсиевич // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2010. – Вып. 2 (26). – С. 6–12.
7. *Пантелеев, А. В.* Параметрический синтез оптимального в среднем дробного ПИД-регулятора в задаче управления полетом / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова, Е. А. Помазуева // Управление большими системами. – 2015. – № 56. – С. 176–200.
8. *Бабошкина, А. А.* Разработка методики настройки коэффициентов ПИД-регулятора дробного порядка с помощью генетического алгоритма / А. А. Бабошкина, П. А. Ушаков, Г. Д. Бабошкин // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : сб. тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во Ижевского гос. техн. ун-та им. М. Т. Калашникова, 2018. – С. 10–16.

References

1. Abramov E. R. *Lokomotivy i motorvagonnyy podvizhnoy sostav s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya otechestvennykh zheleznikh dorog* [Locomotives and motor car rolling stock with internal combustion engines of domestic railways]. Moscow, 2015, 433 p. [In Russian]
2. Lebedev A. T., Naumov O. P., Magomedov R. A., Zakharin A. V., Lebedev P. A., Pavlyuk R. V. *Nadezhnost' i effektivnost' MTA pri vypolnenii tekhnologicheskikh protsessov* [Reliability and efficiency of MTA when performing technological processes]. Stavropol: AGRUS, 2015, 332 p. [In Russian]
3. Gol'tyapin V. Ya. *Ispol'zovanie prirodnogo gaza v kachestve motornogo topliva v energeticheskikh sredstvakh sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Use of natural gas as a motor fuel in agricultural energy products]. Moscow: FGNU «Rosin-formagrotekh», 2005, 40 p. [In Russian]
4. Erokhov V. I., Karunin A. L. *Gazodizel'nye avtomobili (konstruktsiya, raschet, ekspluatatsiya)* [Gas-diesel cars (design, calculation, operation)]. Moscow: Graf-press, 2005, 560 p. [In Russian]
5. Avsievich V. V., Avsievich V. V. *Sbornik trudov Chetvertoy mezhdunarodnoy konferentsiya po problemam upravleniya (Moskva, 26–30 yanvarya 2009 g.)* [Proceedings of the Fourth international conference on management problems (Moscow, January 26-30, 2009)]. Moscow, 2009, pp. 164–168. [In Russian]
6. Avsievich V. V., Avsievich A. V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara state technical University. Ser.: Technical Sciences]. 2010, iss. 2 (26), pp. 6–12. [In Russian]
7. Panteleev A. V., Letova T. A., Pomazueva E. A. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Administration of large systems]. 2015, no. 56, pp. 176–200. [In Russian]
8. Baboshkina A. A., Ushakov P. A., Baboshkin G. D. *Priborostroenie v XXI veke. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva: sb. tr. XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Instrumentation in the XXI century. Integration of science, education and production: sat. Tr. XIII Intern. science.- tech. conf.]. Izhevsk: Izd-vo Izhevskogo gos. tekhn. un-ta im. M. T. Kalashnikova, 2018, pp. 10–16. [In Russian]

Авсиевич Владимир Викторович

старший преподаватель,
кафедра мехатроники, автоматизации
и управления на транспорте,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 16)
E-mail: avsievichv@gmail.com

Avsievich Vladimir Viktorovich

senior lecturer,
sub-department of transport robotics,
automation and control,
Samara State Transport University
(16 1 Bezymyanny lane, Samara, Russia)

Иващенко Антон Владимирович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой вычислительной техники,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: anton.ivashenko@gmail.com

Ivaschenko Anton Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of computer engineering,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Образец цитирования:

Авсиевич, В. В. Реализация дробного ПИД регулятора в информационно-управляющей системе мультитопливного двигателя внутреннего сгорания автономного локомотива / В. В. Авсиевич, А. В. Иващенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 21–27. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-3.