

УДК 681.51.015

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.03

**У.Х. Джалолов<sup>1</sup>, Н.И. Юнусов<sup>1</sup>, У.А. Турсунбадалов<sup>1</sup>,****Ш.Ш. Зиёев<sup>1</sup>, Дж.Р. Хасанов<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими,  
Душанбе, Таджикистан<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследова-  
тельский университет), Челябинск, Россия

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАЗГОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Рассматривается идентификация параметров двигателя внутреннего сгорания на основе его разгонной характеристики с использованием метода интегральной модуляции. Модель ДВС аппроксимирована инерционным звеном первого порядка. Аппроксимация экспериментальной разгонной характеристики линейной моделью позволяет оперативно идентифицировать динамические параметры объекта, такие как постоянная времени и коэффициент чувствительности, на основе которых можно оценить обобщенное состояние ДВС автомобиля путем сравнения этих параметров с их нормативными значениями. **Цель исследования:** оценка, работоспособности рассматриваемой системы идентификации с применением пакета моделирования MatLab/Simulink. **Методы:** показана принципиальная возможность использования параметрической идентификации, основанной на методе интегральной модуляции при функциональном тестировании двигателя внутреннего сгорания. Эффективность использования в системе параметрического метода идентификации на основе интегральной модуляции обусловлена особенностями ядер последнего, которые можно синтезировать из групп материнских функций операторов вейвлет-преобразования, что позволяет проводить не только оценку неизвестных параметров объекта, но вместе с этим осуществить анализ нестационарных переходных процессов, возникающих в ДВС. **Результаты:** важными при создании реальной системы экспресс-диагностики являются вопросы интеграции предлагаемой системы параметрической идентификации разгонной характеристики ДВС в общую бортовую систему автомобиля посредством специального диагностического протокола, такого как k-line. При использовании диагностического протокола значения переменных выдаются в физических величинах. Это упрощает восприятие, в то же время усложняет согласование с электронным блоком управления ЭБУ, поскольку он запрограммирован на получение данных непосредственно с датчиков, соединенных с каналами АЦП. Таким образом, возникает необходимость детального изучения документации датчиков для уточнения их характеристик и уровней сигналов. **Практическая значимость:** предлагаемую методику можно также использовать и для рабочего режима ДВС, рассматривая педаль газа автомобиля как источник, формирующий входной сигнал для данного объекта диагностики.

**Ключевые слова:** ДВС, идентификация, аппроксимация, модель ДВС, разгонная характеристика, блок формирования коэффициентов.

**U.H. Dzhalolov<sup>1</sup>, N.I. Yunusov<sup>1</sup>, U.A. Tursunbadalov<sup>1</sup>,  
Sh.Sh. Ziyoev<sup>1</sup>, Dzh.R. Khasanov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi,  
Dushanbe, Tajikistan

<sup>2</sup>National Research South Ural State University SUSU, Chelyabinsk,  
Russian Federation

## **PARAMETERS' IDENTIFICATION OF ACCELERATION CHARACTERISTIC OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

The paper deals with the parameters identification of an internal combustion engine based on its acceleration characteristics using the integral modulation method. The ICE model is approximated by a first-order inertial link. Approximation of the experimental acceleration characteristic by a linear model allows one to quickly identify the dynamic parameters of the object, such as the time constant and the sensitivity coefficient, on the basis of which the generalized state of the internal combustion engine of a car can be estimated by comparing these parameters with their standard values. **Purpose of the study:** operability assessment of the identification system under consideration, using the Matlab / Simulink simulation package. **Methods:** the fundamental possibility of using parametric identification based on the integral modulation method for functional testing of an internal combustion engine is shown. The efficiency of using the parametric identification method based on integral modulation in the system is due to the peculiarities of the latter nuclei which can be synthesized from the groups of parent functions of the wavelet transformation operators, which makes it possible not only to assess the unknown parameters of the object, but also to analyze the nonstationary transient processes that occur in ICE. **Results:** an important issue when creating a real system of express diagnostics is the integration of the proposed system of acceleration characteristics parametric identification of the internal combustion engine into the general on-board system of a car using a special diagnostic protocol, such as k-line. When using the diagnostic protocol, the variables values are given in physical quantities. This simplifies perception, at the same time, complicates coordination with the electronic control unit of the ECU, since it is programmed to receive data directly from sensors connected to the ADC channels. Thus, there is a need for a detailed study of the documentation of sensors to clarify their characteristics and signal levels. **Practical significance:** the proposed technique can also be used for the operating mode of an internal combustion engine, considering the gas pedal of a car as a source that forms an input signal for a given diagnostic object.

**Keywords:** ICE, identification, approximation, ICE model, acceleration characteristic, coefficient formation block.

Надежность функционирования современного автомобиля, который является сложным техническим объектом, во многом определяется соответствием технических параметров двигателя внутреннего сгорания (ДВС) номинальным значениям [1, 2].

Существуют различные методы диагностики технического состояния двигателя внутреннего сгорания [3], они зачастую требуют разбора данного объекта или сопряжены с применением специальных методов, в том числе и методов вибрационного анализа [4–8], или систем, основанных на интеллектуальных технологиях, таких как нейронные сети и математический аппарат нечеткой логики [9–14].

Модели ДВС, представленные в виде дифференциальных уравнений с учётом термодинамических и кинематических процессов и систем смесеобразования, а также электрического зажигания, оказываются достаточно сложными и требуют большого количества исходных данных, их решение сопряжено с рядом сложных вычислительных процедур [15–21]. Поэтому разработка простых компактных методов предварительной оценки состояния ДВС в режиме реального времени представляет определенный интерес.

В этом плане проведение экспресс-диагностики на основе разгонной характеристики ДВС является предпочтительным.

Аппроксимация экспериментальной разгонной характеристики линейными моделями позволяет оперативно идентифицировать динамические параметры, такие как постоянная времени и коэффициент чувствительности разгонной характеристики ДВС, на основании которых можно определить обобщенное состояние ДВС автомобиля путем сравнения этих параметров с их нормативными значениями.

При проведении процедуры идентификации [22, 23] вышеуказанных параметров ДВС в качестве входного воздействия рассматривается объем бензина, подаваемого в цилиндр ДВС, который, в свою очередь, связан с положением педали газа, расположенной в кабине автомобиля. В качестве выходного сигнала используется массив данных, отображающий разгонную скоростную характеристику двигателя, получаемого от тахометра, установленного на ДВС.

Для разгонного режима работы ДВС принята линеаризованная математическая модель [24], которая представлена на рис. 1, где приняты следующие операторы обобщенной модели ДВС:

– оператор главной цепи передачи сигнала:

$$W(S) = \frac{K_I}{T_I S + 1}; \quad (1)$$

– оператор обратной связи  $W_{oc}(S) = K_{oc}$  и оператор по возмущающему воздействию:  $W_f(S) = K_f$ .

С учетом представленной модели запишем уравнение динамики разгона ДВС в виде следующего дифференциального уравнения:

$$T_d^* \frac{d\bar{v}(t)}{dt} + \bar{v}(t) = K_d^* q, \quad (2)$$

где  $\bar{v}(t)$  – контролируемый выходной сигнал, снимаемый с тахометра.

Параметры, входящие в уравнение (2), определяются следующими соотношениями:

$$T_d^* = \frac{T_I}{1+K_I K_{oc}} ; K_d^* = \frac{K_I}{1+K_I K_{oc}}, \quad (3)$$

где  $q^*(t)$  – функция, определяющая изменение положения дроссельной заслонки газа относительно покоя.

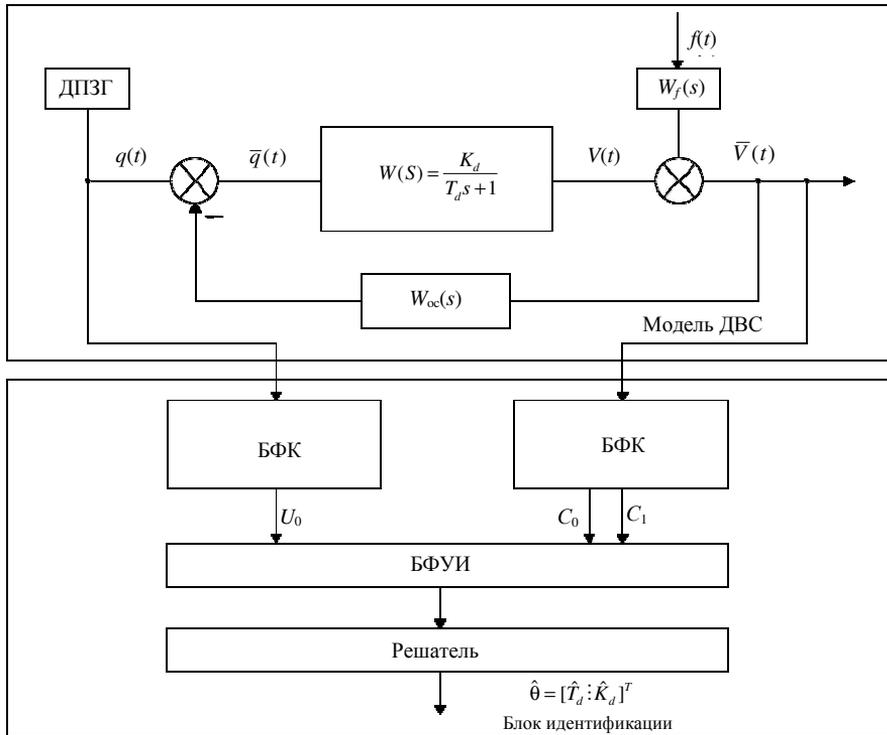


Рис. 1. Структурная блок-схема системы идентификации параметров разгонной характеристики ДВС; ДПЗГ – датчик положения заслонки газа, БФК – блок формирования коэффициентов, БФУИ – блок формирования уравнения идентификации, решатель – устройство решения системы алгебраических уравнений

Используя по отношению к дифференциальным уравнениям метод интегральной модуляции [25, 26], получим следующее уравнение:

$$T_d^* \int_{\tau=t-T}^{\tau=t} \varphi(t, \tau) \bar{V}'(\tau) d\tau + \int_{\tau=t-T}^{\tau=t} \varphi(t, \tau) \bar{V}(\tau) d\tau = K_d^* \int_{\tau=t-T}^{\tau=t} \varphi(t, \tau) q(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где  $\varphi(t, \tau)$  – ядро оператора интегральной модуляции.

Приняв следующие обозначения:

$$C_1(t) = \int_{\tau=t-T}^{\tau=t} \varphi'(t, \tau) \bar{V}(\tau) d\tau; C_0(t) = \int_{\tau=t-T}^{\tau=t} \varphi(t, \tau) \bar{V}(\tau) d\tau; U_0(t) = \int_{\tau=t-T}^{\tau=t} q(\tau) \varphi(t, \tau) d\tau, \quad (5)$$

получим уравнение в виде:

$$T_d^* C_1(t) + C_0(t) = K_d^* U_0(t), \quad (6)$$

где  $\{T_d^*, K_d^*\}$  – параметры разгонной характеристики ДВС, подлежащие идентификации. Вычисление дискретных значений коэффициентов  $C_1(t_i)$ ,  $C_0(t_i)$  и  $U_0(t_i)$  в случае использования метода прямоугольников можно представить с помощью следующих соотношений:

$$C_1^*(k) = \frac{\Delta T_u}{T_u} \sum_{K=0}^{n-1} \bar{V}(k) \left[ \frac{\Delta T_D}{2T_D} (\varphi(k) - \varphi(k-1)) \right], \quad (7)$$

$$C_0^*(k) = \frac{\Delta T_u}{T_u} \sum_{K=0}^{n-1} \varphi(k) \bar{V}(k); U_0^*(k) = \frac{\Delta T_u}{T_u} \sum_{K=0}^{n-1} \varphi(k) q(k).$$

В этом случае уравнение идентификации можно записать в векторно-матричной форме:

$[C_1^*(k) : U_1^*(k)] \begin{bmatrix} T_d^* \\ K_d^* \end{bmatrix} = C_0^*$  или  $\Omega(k) \theta = C_0^*$ , где  $\Omega(k) = [C_1^*(k) : U_0^*(k)]$  – это матрица наблюдения, а  $\hat{\theta} = [\hat{T}_d^* : \hat{K}_d^*]^T$  – вектор неизвестных параметров объекта.

Применив к уравнению метод наименьших квадратов, можно осуществить оценку вектора неизвестных параметров разгонной характеристики ДВС на основе следующего соотношения:

$$\hat{\theta} = (\Omega^T(k) \Omega(k))^{-1} (\Omega^T(k) C_0(k)).$$

Оценка работоспособности рассматриваемой системы идентификации определения параметров динамики ДВС осуществлялась на основе примера, аппроксимирующего разгонную характеристику с помощью линейной модели с использованием пакета моделирования MatLab/Simulink (рис. 2). Эксперимент показал, что данный подход позволяет с достаточной точностью идентифицировать основные параметры разгонной характеристики ДВС.

В частности, в проведенном эксперименте ошибка оценки динамических параметров модели относительно исходных составила в пределах 5–7 % (рис. 3).

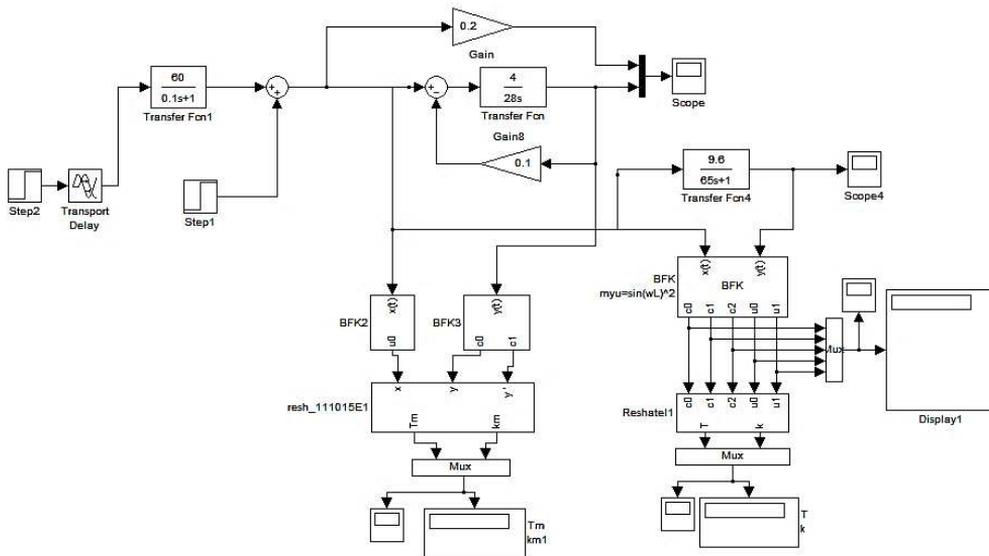


Рис. 2. Схема моделирования системы идентификации параметров разгонной характеристики ДВС в среде MatLab/Simulink

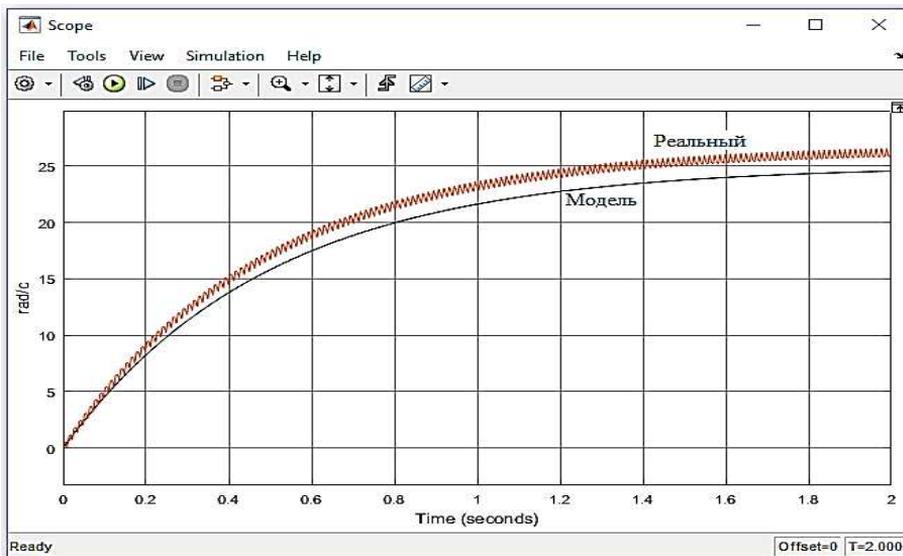


Рис. 3. Переходные временные характеристики разгона исходной (Реальный) и идентифицированной (Модель) моделей ДВС

Разработанная система идентификации параметров разгонной характеристики может быть использована в качестве предварительной оценки качества работы двигателя, а также в бортовом варианте для текущего анализа работы ДВС.

**Выводы.** Разработанная методика экспресс-диагностики на основе применения метода интегральной модуляции позволяет проводить обобщенную оценку технического состояния ДВС по её разгонной характеристике непосредственно в режиме реального времени, которая может быть интегрирована и использована как способ предварительной идентификации технического состояния перед углубленной диагностикой рассматриваемого объекта.

### **Библиографический список**

1. Мигдаль В.Д. Техническая диагностика автомобильных двигателей: учеб. пособие: в 3 т. Т. 1. Объекты и методы диагностирования. – Харьков: Майдан, 2014. – 459 с.

2. Мирошников Л.В., Болдик А.П., Пал В.И. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотракторных предприятиях. – М.: Наука, 1968. – 228 с.

3. Тыманюк К.С., Костенко В.Л. Разработка автоматизированной системы итеративного контроля технического состояния систем двигателя автомобиля // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 1/2(27). – С. 77–82.

4. Лютин К.И., Федянов В.Е. Вибродиагностика систем ДВС с использованием нейронных сетей // Известия Волгоград. гос. техн. ун-та. Сер. Наземные транспортные системы. – 2007. – Т. 2, № 8(34). – С. 88–90.

5. Компьютерная диагностика многокомпонентных вибрационных машин / Н.И. Юнусов, У.Х. Джалолов, У.А. Турсунбадалов, Ш.Ш. Зиёев // Материалы 10-й Междунар. конф. по компьютерному анализу проблем науки и технологии. – Душанбе: Изд-во филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в Душанбе, 2015. – С. 124–127.

6. Bánlaki P., Kulcsár Sz. Monitoring the Operation of Internal Combustion Engines Using Order Analysis of Noise and Vibration Data // Journal of Machine Manufacturing. – 2009. – XLIX. – P. 142–144.

7. Гассельберг В.С. Запорожец А.В. Диагностика двигателей внутреннего сгорания автомобилей по виброакустическим параметрам // Вестник АГТУ. – 2007. – № 2. – С. 72–74.

8. Nagy I. Technical Diagnostics I. – Vibration Analysis, Delta3N, 2007. 10 National Instruments: Understanding Order Analysis and Resampling, 2007. – URL: [www.ni.com](http://www.ni.com)

9. Интеллектуальные системы управления с использованием нейронных сетей / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов, С.С. Валеев, С.В. Жернаков. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 1997.

10. Задачи диагностики и прогнозирования состояния ДДВС на основе принципов нечеткой логики и нейросетевых технологий / Н.И. Юнусов, У.Х. Джалолов, Ш.Ш. Зиёев, У.А. Турсунбадалов // Вестник Таджик. техн. ун-та. – 2015. – 4(32). – С. 66–70.

11. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. – 320 с.

12. Сериков С.А., Дзюбенко А.А. Идентификация математической модели двигателя внутреннего сгорания с использованием системы нечеткого вывода // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 1. – С. 14–18.

13. Палагута К.А., Чиркин С.Ю., Кузнецов А.В. Синтез системы управления двигателем внутреннего сгорания с использованием гибридных и нейронных сетей // Машиностроение и инженерное образование. – 2009. – № 4. – С. 42–49.

14. Злотин Г.Н., Лютин К.И., Федянов Е.А. Применение нейронных сетей для вибродиагностики систем ДВС // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей (посв. 50-лет. ВлГУ): материалы XI Междунар. науч.-практ. конф.; Владимир, 27–29 мая 2008 / Владимир. гос. ун-т. – Владимир, 2008. – С. 160–163.

15. Гребенников А.С., Гребенников С.А., Никитин А.В. Математическая модель внутри циклового изменения угловой скорости коленчатого вала дизеля на холостом ходу // Известия Вологод. ГТУ: межвуз. сб. науч. ст. – 2013. – Т. 5, № 12. – С. 42–45.

16. Разработка компьютерной настраиваемой модели ДВС / И.П. Добролюбов, О.Ф. Совченков, В.В. Альт, С.Н. Ольшевский // Вычислительные технологии. – Новосибирск, 2013. – Т. 18, № 6. – С. 54–61.

17. Апельинский Д.В., Шендеровский И.М., Яхутль Д.Р. Математические модели рабочего цикла ДВС с искровым зажиганием и их численная реализация // Автомобили и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: материалы междунар. науч.-техн. конф. ААИ, посв. 145-лет. МГТУ «МАМИ». – М.: Изд-во МГТУ «МАМИ», 2012. – С. 22–28.

18. Чиркин С.Ю. Моделирование двигателя внутреннего сгорания как объекта управления на основе экспериментальных данных // Естественные и технические науки. – 2010. – № 2. – С. 406–410.

19. Гребенников А.С., Гребенников С.А., Никитин А.В. Математическая модель внутрициклового изменения угловой скорости коленчатого вала дизеля на холостом ходу // Известия. ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. – 2013. – Т. 5, № 12. – С. 42–46.

20. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории / пер. с нем. Т. Кренкель; под ред. А.Г. Кюрктчан. – М.: Техносфера, 2006. – 272 с.

21. Ramos J.I. Mathematical Model of Spark-ignition Engines // Computer simulation for fluid flow, heat and mass transfer, and combustion in reciprocating engines. – New York: Hemisphere, 1989.

22. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления: пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 684 с.

23. Применение фильтра Калмана в задачах технической диагностики двигателей внутреннего сгорания (ДВС) / У.А. Турсунбадалов, О.О. Евсютин [и др.] // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроник. – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 152–159.

24. Джалолов У.Х. Параметрическая идентификация нестационарных динамических объектов // Тезисы докл. IX Всесоюз. совещ. по проблемам управления. – Ереван, 1983. – С. 72–73.

25. Применение метода интегральной модуляции в задаче идентификации технического состояния двигателя внутреннего сгорания / У.А. Турсунбадалов, К.З. Тиллоев [и др.] // I-methods. – 2019. – Т. 11. – № 1. – С. 20–28.

26. Васильев В.В., Симак Л.А., Рыбникова А.М. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MatLab/Simulink: учеб. пособие для студ. и аспирантов. – Киев: Изд-во НАН Украины, 2008. – 91 с.

## References

1. Migdal' V.D. Tekhnicheskaiia diagnostika avtomobil'nykh dvigatelei. Tom 1. Ob'ekty i metody diagnostirovaniia [Technical diagnostics of automobile engines. Vol. 1. Objects and methods of diagnosis]. Khar'kov: Maidan, 2014, 459 p.

2. Miroshnikov L.V., Boldik A.P., Pal V.I. Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoianiiia avtomobilei na avtotraktornykh predpriiatiiakh [Diagnostics of the technical condition of vehicles at automotive and tractor enterprises]. Moscow. Nauka, 1968, 228 p.

3. Tymaniuk K.S., Kostenko V.L. Razrabotka avtomatizirovannoi sistemy iterativnogo kontroliia tekhnicheskogo sostoianiiia sistem dvigatel'ia avtomobilia [Development of an automated system for iterative control of the technical condition of automobile engine systems]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva*, 2016, no. 1/2(27), pp. 77-82.

4. Liutin K.I., Fedianov V.E. Vibrodiagnostika sistem DVS s ispol'zovaniem neironnykh setei [Vibration diagnostics of ICE systems using neural networks]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nazemnye transportnye sistemy*, 2007, vol. 2, no. 8(34), pp. 88-90.

5. Iunusov N.I., Dzhalolov U.Kh., Tursunbadalov U.A., Zieev Sh.Sh. Komp'iuternaia diagnostika mnogokomponentnykh vibratsionnykh mashin [Computer diagnostics of multicomponent vibration machines]. *Materialy 10-i Mezhdunarodnoi konferentsii po komp'iuternomu analizu problem nauki i tekhnologii*. Dushanbe: Filial Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta imeni M.V. Lomonosova v Dushanbe, 2015, pp. 124-127.

6. Bánlaki P., Kulcsár Sz. Monitoring the Operation of Internal Combustion Engines Using Order Analysis of Noise and Vibration Data. *Journal of Machine Manufacturing*, 2009, XLIX, pp. 142-144.

7. Gassel'berg V.S., Zaporozhets A.V. Diagnostika dvigatelei vnutrennego sgoraniia avtomobilei po vibroakusticheskim parametram [Diagnostics of internal combustion engines of cars by vibroacoustic parameters]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, no. 2, pp. 72-74.

8. Nagy I. Technical Diagnostics I. Vibration Analysis, Delta3N, 2007. 10 National Instruments: Understanding Order Analysis and Resampling, 2007, available at, [www.ni.com](http://www.ni.com)

9. Vasil'ev V.I., Il'iasov B.G., Valeev C.S., Zhernakov S.V. Intel'lectual'nye sistemy upravleniia s ispol'zovaniem neironnykh setei [Intelligent control systems using neural networks]. Ufa: Ufinskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet, 1997.

10. Iunusov N.I., Dzhahalov U.Kh., Zieev Sh.Sh., Tursunbadalov U.A. Zadachi diagnostiki i prognozirovaniia sostoianiia DDVS na osnove printsipov nechetkoi logiki i neirosetevykh tekhnologii [Problems of diagnostics and forecasting of the internal combustion engine based on the principles of fuzzy logic and neural network technologies]. *Vestnik Tadzhijskogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, 4(32), pp. 66-70.

11. Rotshtein A.P. Intellektual'nye tekhnologii identifikatsii: nechetkaia logika, geneticheskie algoritmy, neironnye seti [Intelligent identification technologies: fuzzy logic, genetic algorithms, neural networks]. Vinnitsa: UNIVERSUM-Vinnitsa, 1999, 320 p.

12. Serikov S.A., Dziubenko A.A. Identifikatsiia matematicheskoi modeli dvigatelya vnutrennego sgoraniia s ispol'zovaniem sistemy nechetskogo vyvoda [Identification of a mathematical model of an internal combustion engine using a fuzzy inference system]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia*, 2009, no. 1, pp. 14-18.

13. Palaguta K.A., Chirkin S.Iu., Kuznetsov A.V. Sintez sistemy upravleniia dvigatelem vnutrennego sgoraniia s ispol'zovaniem gibridnykh i neironnykh setei [Synthesis of an internal combustion engine control system using hybrid and neural networks]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*, 2009, no. 4, pp. 42-49.

14. Zlotin G.N., Liutin K.I., Fedianov E.A. Primenenie neironnykh setei dlia vibrodiagnostiki sistem DVS [Application of neural networks for vibration diagnostics of ICE systems]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovershenstvovaniia porshnevykh dvigatelei (posviashchaetsia 50-letiiu VIGU). Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Vladimir, 27-29 May 2008. Vladimir: Vladimirsii gosudarstvennyi universitet*, 2008, pp. 160-163.

15. Grebennikov A.S., Grebennikov S.A., Nikitin A.V. Matematicheskaiia model' vnutri tsiklovogo izmeneniia uglovoi skorosti kolenchatogo vala dizelia na kholostom khodu [A mathematical model inside a cyclic change in the angular speed of a diesel engine crankshaft idle]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh statei*, 2013, vol. 5, no. 12, pp. 42-45.

16. Dobroliubov I.P., Sovchenkov O.F., Al't V.V., Ol'shevskii S.N. Razrabotka komp'iuternoii nastroivaemoi modeli DVS [Development of a computer-tuned ICE model]. *Vychislitel'nye tekhnologii*. Novosibirsk, 2013, vol. 18, no. 6, pp. 54-61.

17. Apelinskii D.V., Shenderovskii I.M., Iakhtul' D.R. Matematicheskie modeli rabocheho tsikla DVS s iskrovym zazhiganiem i ikh chislennaia realizatsiia [Mathematical models of the ICE duty cycle with spark ignition and their numerical implementation]. *Avtomobili i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiia i podgotovka kadrov. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii AAI, posviashchennoi 145-letiiu MGTU "MAMI"*. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet "MAMI", 2012, pp. 22-28.

18. Chirkin S.Iu. Modelirovanie dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia kak ob"ekta upravleniia na osnove eksperimental'nykh dannykh [Modeling an internal combustion engine as an object experimental control]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 2, pp. 406-410.

19. Grebennikov A.S., Grebennikov S.A., Nikitin A.V. Matematicheskaia model' vnutritsiklovogo izmeneniia uglovoi skorosti kolenchatogo vala dizelia na kholostom khodu [Mathematical model of cyclic changes in the angular speed of rotation of a crankshaft of a diesel engine idling]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mezhdvuzovskii sbornik nauchnykh statei*, 2013, vol. 5, no. 12, pp. 42-46.

20. Blatter K. Veivlet-analiz. Osnovy teorii [Wavelet analysis. Foundations of Theory]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 272 p.

21. Ramos J.I. Mathematical Modeless of Spark-ignition Engines. *Computer simulation for fluid flow, heat and mass transfer, and combustion in reciprocating engines*. New York: Hemisphere, 1989.

22. Eikkhoff P. Osnovy identifikatsii sistem upravleniia [Fundamentals of identification of control systems]. Moscow: Mir, 1975, 684 p.

23. Tursunbadalov U.A., Evsiutin O.O. et al. Primenenie fil'tra Kalmana v zadachakh tekhnicheskoi diagnostiki dvigatelei vnutrennego sgoraniia (DVS) [Application of the Kalman filter in the problems of technical diagnostics of internal combustion engines (ICE)]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Komp'iuternye tekhnologii, upravlenie i radioelektronik*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 152-159.

24. Dzhalolov U.Kh. Parametricheskaia identifikatsiia nestatsionarnykh dinamicheskikh ob"ektov [Parametric identification of non-stationary dynamic objects]. *Tezisy dokladov IX Vsesoiuznoi soveshchaniia po problemam upravleniia*. Erevan, 1983, pp. 72-73.

25. Tursunbadalov U.A., Tilloev K.Z. et al. Primenenie metoda integral'noi moduliatsii v zadache identifikatsii tekhnicheskogo sostoianie dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia [Application of the method of integral modulation in the problem of identifying the technical state of an internal combustion engine]. *I-methods*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 20-28.

26. Vasil'ev V.V., Simak L.A., Rybnikova A.M. Matematicheskoe i komp'iuternoe modelirovanie protsessov i sistem v srede MatLab/Simulink [Mathematical and computer modeling of processes and systems in MatLab/Simulink environment]. Kiev: Natsional'naia akademiia nauk Ukrainy, 2008, 91 p.

### **Сведения об авторах**

**Джалолов Убайдулло Хабибуллоевич** (Душанбе, Таджикистан) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, тел. 907977330, e-mail: ubaid27@mail.ru.

**Юнусов Низомиддин Исмоилович** (Душанбе, Таджикистан) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, тел: 935000175, e-mail: unizom@hotmail.com.

**Турсунбадалов Умед Абдумаликович** (Душанбе, Таджикистан) – старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, тел. 988689511, e-mail: demu-usa@mail.ru.

**Зиёев Шухрат Шарофидинович** (Душанбе, Таджикистан) – старший преподаватель кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, тел. 918314602, e-mail: zиеev1986@mail.ru.

**Хасанов Джасурджон Рустамджонович** (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Автоматика и управление» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: Jacur@mail.ru).

### **About the authors**

**Jalolov Ubaidullo Khabibulloevich** (Dushanbe, Tajikistan) is a Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Automation of Technological Processes and Production" of the Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi, tel. 907977330, e-mail: ubaid27@mail.ru

**Yunusov Nizomiddin Ismoilovich** (Dushanbe, Tajikistan) is a Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Automation of Technological Processes and Production" of the Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi, tel. 935000175, e-mail: unizom@hotmail.com

**Tursunbadalov Umed Abdumalikovich** (Dushanbe, Tajikistan) is a Senior Lecturer of the Department of "Automation of Technological Processes and Production" of the Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi, tel. 988689511, e-mail: demu-usa@mail.ru

**Ziyoev Shuhrat Sharofidinovich** (Dushanbe, Tajikistan) is a Senior Lecturer of the Department of "Automation of Technological Processes and Production" of the Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi, tel. 918314602, e-mail: zieev1986@mail.ru

**Khasanov Dzhasurdzhon Rustamjonovich** (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Automation and Control of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenin ave., e-mail: Jacur@mail.ru).

Получено 17.08.2020