

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В ЗАДАЧЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

П.М. Шоназаров¹, Ф.Т. Холов², О.О.Евсютин², У.А. Турсунбадалов³

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия,

³ Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Таджикистан

Рассматривается задача фильтрации виброакустических сигналов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с применением адаптивного фильтра Калмана с целью дальнейшего применения отфильтрованного массива для решения задачи технической диагностики ДВС.

Также приведены результаты моделирования адаптивного фильтра в программной среде MATLAB/Simulink реального виброакустического сигнала ДВС автомобиля марки Opel Vectra. Реализовано устройство на базе микроконтроллера Arduino Mega, которое было применено для обработки натуральных наблюдений объекта исследования – ДВС.

Вопросу разработки методов оперативного определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания (ДВС), в первую очередь автомобильных, в настоящее время уделяется особое внимание в связи с обеспечением не только надежности функционирования последнего, но и с все возрастающими требованиями к экономическим и экологическим показателям ДВС.

Эти методы должны позволять проводить диагностику технического состояния ДВС автомобиля и своевременно осуществлять регулировки систем и узлов ДВС, тем самым повысить эксплуатационные показатели и срок службы данного объекта.

Среди разнообразных методов диагностирования технического состояния двигателей внутреннего сгорания особое значение имеет метод, основанный на анализе виброакустических сигналов, позволяющий производить безразборный контроль узлов и сопряжений ДВС. При этом следует отметить, что анализируемые виброакустические сигналы ДВС взаимокоррелированы с точки зрения работы узлов ДВС. Поэтому для адекватного установления и локализации места дефекта ДВС необходимо предварительно выделить полезный сигнал в условиях взаимовлияния нестационарных виброакустических сигналов, создаваемых различными узлами двигателя.

Ключевые слова: адаптивный фильтр, разработка, моделирование, фильтр сигналов, формирование, двигатель, диагностика, регулировки систем, анализ, виброакустический сигнал, оценка.

Одним из эффективных методов фильтрации в условиях нестационарности сигналов является использование фильтра Калмана [1].

При применении этого подхода к задаче диагностики состояния ДВС следует учесть, что в рассматриваемом случае при работе ее виброакустический сигнал, воспроизводимый каждым из узлов этого объекта, имеет взаимокорреляцию друг с другом. Поэтому, исходя из идеологии теории клеточных автоматов [2–4], при решении задачи фильтрации сигналов необходимо производить параллельные измерения и совместную обработку виброакустических сигналов для смежных узлов ДВС. Например, если производятся измерения сигнала на первом блоке цилиндров ДВС, следует регистрировать вибросигнал и на втором блоке цилиндров.

Поэтому с учетом этого, рассматривая ДВС как динамическую систему, с которой снимаются случайные одномерные виброакустические сигналы, можно записать для первого и второго

канала измерений следующую систему стохастических дифференциальных уравнений для фильтра Калмана:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(t)x(t) + r(t), f(0) = f_0; \quad (1)$$

$$z(t) = c(t)x(t) + d(t)n(t); \quad (2)$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = q(t)r(t) + a(t)m(t); \quad (3)$$

$$\mu(t) = g(t) * r(t) + b(t)v(t). \quad (4)$$

Автокорреляционную функцию случайных процессов $r(t), n(t), m(t), v(t)$ можно представить в следующих видах:

$$\left. \begin{aligned} R_{rr}(t, \tau) &= Q(t) * \delta(t - \tau); \\ R_{nn}(t, \tau) &= N(t) * \delta(t - \tau); \\ R_{mm}(t, \tau) &= M(t) * \delta(t - \tau); \\ R_{vv}(t, \tau) &= V(t, \tau) * \delta(t - \tau), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $Q(t), N(t), M(t), V(t)$ – известные детерминированные функции, а $\delta(t - \tau)$ – функция Дирака.

В уравнениях(1) и (4) $f(t)$ и $q(t)$ считаются известными и детерминированными функциями.

В данной задаче приняты следующие условия:

процедура оценки линейная;

оценка несмещенная $M\hat{x} = Mx = \bar{x}$;

оценка \hat{x} – эффективная $D\hat{x} = \min$.

Здесь вектор состояния \bar{x} динамической системы, который является случайным гауссовским процессом, в данном случае вектор состояния \bar{x} , шум измерения являются гауссовскими случайными процессами с нулевым математическим ожиданием. Поэтому примем модель белого шума в системе и в измерениях.

Рассматривая регистрируемый виброакустический сигнал как одномерный дискретный процесс и исходя из выше принятых условий, запишем рекуррентные уравнения для фильтров Калмана. Для первого блока цилиндров ДВС:

$$x(k+1) = F(k)x(k) + r(k); \quad (6)$$

$$z(k) = Cx(k) + n(k) \quad (7)$$

и для второго блока цилиндров ДВС:

$$d(k+1) = D(k)d(k) + m(k); \quad (8)$$

$$\mu(k) = G(k)d(k) + v(k), \quad (9)$$

где $r(k), n(k), m(k), v(k)$ – белые шумы $M[(r(k))] = 0, M[(n(k))] = 0, M[(m(k))] = 0, M[(v(k))] = 0$ и с ковариационными матрицами:

$$\text{cov}[r(k), n(k)] = 0, \text{cov}[m(k), v(k)] = 0, \text{cov}[r(k), r(k)] = R(k) * \delta(t - \tau),$$

$$\text{cov}[n(k), n(k)] = N(k) * \delta(t - \tau), \text{cov}[x(k)x(k+1)] = P_x(k).$$

В данной задаче приняты следующие условия:

процедура оценки линейная;

оценка несмещенная $M\hat{x} = Mx = \bar{x}$;

оценка \hat{x} – эффективная $D\hat{x} = \min$. Так как оба фильтра являются идентичными, поэтому рассмотрим синтез первого фильтра Калмана.

Исходя из этих условий, выбираем структуру первого фильтра в виде

$$\bar{x}(k) = H\bar{x}(k) + Kz(k),$$

где H и K необходимо определить из условия несмещенности оценки \hat{x} .

$$\overline{x(k+1)} = H\overline{x(k)} + K[C\overline{x(k)} + \overline{n(k)}] \rightarrow H\overline{x(k)} + KC\overline{x(k)} + K\overline{n(k)} \rightarrow F(k)\overline{x(k)} + \overline{r(k)}.$$

Краткие сообщения

Откуда

$$H\overline{x(k)} = [F(k) - KC]\overline{x(k)} + K\overline{n(k)} + \overline{r(k)}. \quad (10)$$

Учитывая, что среднее значение входного белого шума $\overline{n(k)}$, $\overline{r(k)}$ равны нулю, имеем $H = F(k) - KC$.

Матрицу H определим из условия эффективности оценки $\hat{x}(k)$, то есть

$$D\hat{x} = \min D(\overline{x(k)} - \hat{x}) \rightarrow \min (trP_e),$$

где $tr()$ – след ковариационной матрицы; P_e – ковариационная матрица ошибки $e(k)$. Для определения минимума trP_e запишем

$$\begin{aligned} \bar{e}(k) = (x - \hat{x}) &= [F(k)x(k) + \bar{r}(k)] - [H\overline{x(k)} + K\overline{z(k)}] = [F(k)x(k) + \bar{r}(k)] - [F(k) - KC]\overline{x(k)} + \\ &+ KCx(k) + K\bar{n}(k) = F(k)[x(k) - \overline{x(k)}] - KC[\overline{x(k)} - x(k)] + r(k) + Kn(k) = F(k)*e(k) - \\ &- KC*e(k) + \bar{r}(k) + K\bar{n}(k). \end{aligned} \quad (11)$$

В результате имеем уравнение Риккати и ковариационную функцию следующего вида

$$\bar{e}(k) = (x - \hat{x}) = [F(k) - KC]*e(k).$$

Следовательно, ковариационная матрица ошибки будет определяться

$$P_e = [F(k) - KC]P_e + P_e[F(k) - KC]^T + K^T + KRK^T. \quad (12)$$

При $\frac{\partial P_e}{\partial K} = 0$ имеем $-C^T P_e - C^T P_e + 2KR = 0$,

тогда коэффициент усиления фильтра рассчитывается следующим образом:

$$K = C^T P_e * R^{-1}. \quad (13)$$

Алгоритм рекурсивного обновления оценки $\hat{x}(k)$ соответствует следующей системе уравнений:

$$\hat{Z}(k) = C(k)F(k)\hat{x}(k-1) - \text{прогнозируемое значение наблюдаемого сигнала};$$

$$\varepsilon(k) = z(k) - \hat{z}(k) - \text{невязка между прогнозируемым и реальным наблюдаемыми сигналами.}$$

Поэтому для дискретного случая измерения наблюдаемого сигнала имеем:

$$K(k) = P_e(k-1)C^T(k) * [C(k) * P_e(k-1)C^T(k) + Q(k)]^{-1} - \text{коэффициент усиления стационарно-}$$

го фильтра Калмана;

$$\hat{x}(k) = F(k)\hat{x}(k-1) + K(k)\varepsilon(k) - \text{обновление оценки процесса } x(k);$$

$P_e(k) = F(k)[P_e(k-1) - K(k)C(k)P_e(k-1)]F^T(k) + Q(k) - \text{обновление ковариационной функции ошибки.}$

Вектор коэффициентов $-w$ фильтра Калмана при адаптивной фильтрации наблюдаемого сигнала не является детерминированным, поэтому матрица перехода $F(k) = I$, а в качестве наблюдаемого сигнала используются сигналы, получаемые с линий задержек фильтра. Выходной сигнал фильтра при этом представляет собой прогнозируемое значение наблюдаемого сигнала, а в качестве образцового сигнала $\mu(k)$ вступает сигнал, поступающий от смежного блока цилиндров ДВС. В этом случае шумом наблюдаемого сигнала является невязка между воспроизводимым сигналом фильтра и образцовым сигналом $\mu(k)$, а матрица шума системы

$$E < \omega_k \omega_i^T \geq \Delta(k-i)Q_k,$$

где Q_k превращается в скалярный параметр.

Величина этого параметра слабо влияет на результат фильтрации, и она, может быть, принята в пределах $-[0,001...0,01]\sigma_\varepsilon^2$ [5].

Следовательно, вышеуказанные формулы принимают следующий вид:

$$y(k) = u^T(k)\hat{w}(k-1) - \text{выходное прогнозируемое значение образцового сигнала};$$

$K(k) = (P_\varepsilon(k)(k-1)u(k)) / (u^T(k)P_\varepsilon(k-1)u(k) + Q_k)$ – коэффициент усиления фильтра;

$\hat{w}(k) = \hat{w}(k-1) + K(k)\varepsilon(k)$ – обновление оценки коэффициентов адаптивного фильтра Калмана;

$P_\varepsilon(k) = P_\varepsilon(k-1) - K(k)u^T(k)P_\varepsilon(k-1)u(k) + Q_k$ – корректировка оценки ковариационной матрицы ошибки.

Классический вариант фильтра Калмана был смоделирован в среде программного продукта MATLAB/Simulink [6] (рис. 1, 2).

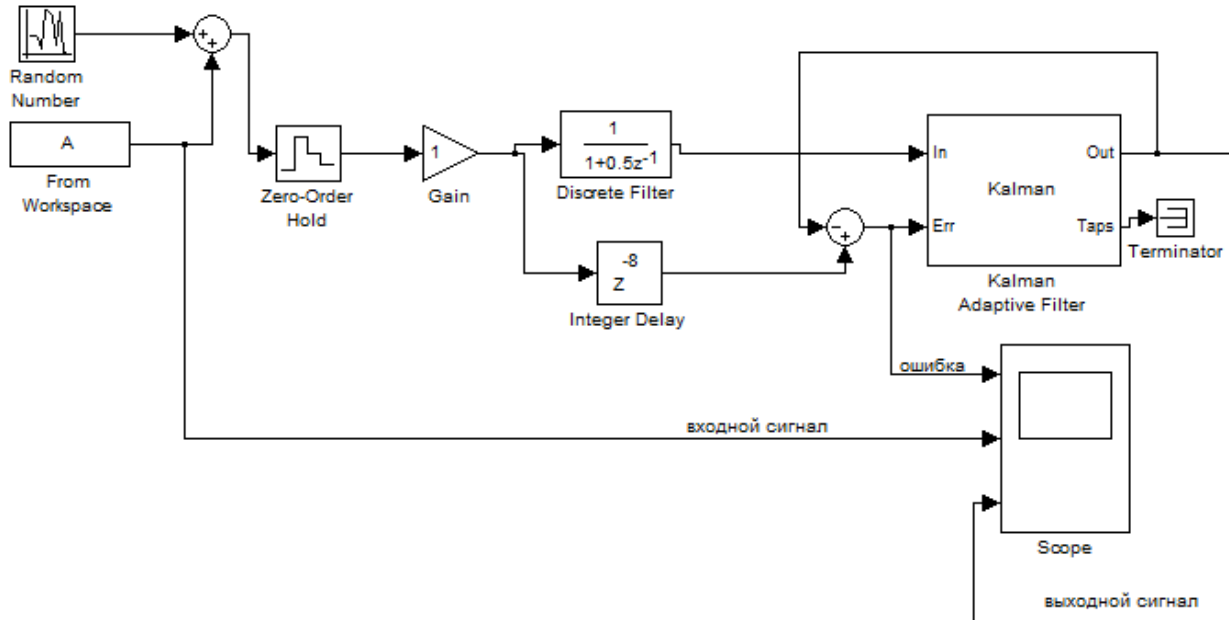


Рис. 1. Структурная схема моделирования фильтра Калмана

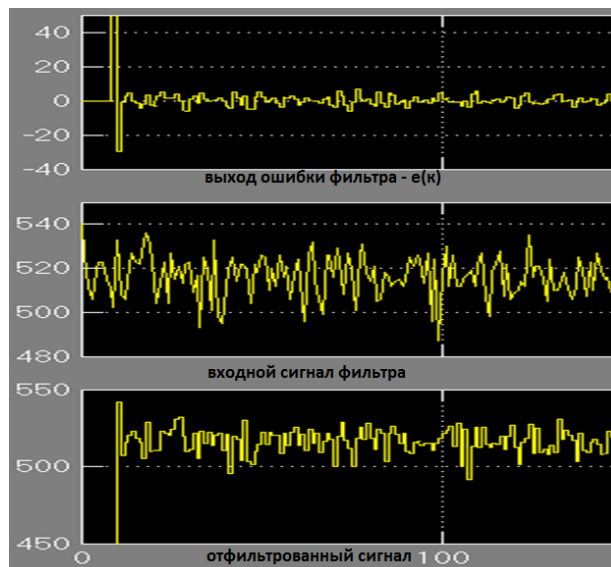


Рис. 2. Результаты моделирования фильтра Калмана

В данной работе также сконструирован прибор на базе микроконтроллера Arduino Mega, включающий в себя виброакустическое измерительное устройство и фильтр Калмана. Так как классическая форма реализации данного фильтра на этом микроконтроллере не представляется возможным, поэтому были использованы следующие алгоритмы:

$$\bar{x}_k = F\bar{x}_{k-1} + r_{k-1},$$

Краткие сообщения

где \bar{x}_k – предсказание состояния системы в текущий момент времени;

\bar{x}_{k-1} – предсказание состояния в предыдущий момент времени.

Прогнозируемое значение ошибки ковариации:

$$P_k = F P_{k-1} F^T + Q_r.$$

Здесь P_k – предсказание ковариации ошибки; P_{k-1} – ковариации ошибки в $k-1$ -м шаге; Q_r – ковариации шума процесса.

Определение коэффициента усиления фильтра:

$$K_k = \frac{P_k * H^T}{H * P_k * H^T + R},$$

где K_k – коэффициент усиления фильтра; H – матрица, отображающая отношения измерений и состояний; R – ковариация шума измерения.

Обновление с учётом измерения текущего значения z_k :

$$x_k = \bar{x}_k + K_k * (z_k - H * \bar{x}_k).$$

Обновление ошибки ковариации:

$$P_k = (I - K_k * H) * P_k,$$

где I – единичная матрица связи.

Чтобы наглядно продемонстрировать эффективность фильтра Калмана, для задачи диагностики ДВС была произведена фильтрация виброакустического сигнала, которая от микроконтроллера Arduino Mega передается через порт UART компьютера (рис. 3) и записывается в программе Excel 2016.

Для чёткого приема сигнала от ДВС виброакустический датчик закреплен к корпусу двигателя автомобиля марки Opel Vectra выпуска 1997 г.



Рис. 3. Экспериментальная система измерения и фильтрации виброакустических сигналов ДВС автомобиля марки Opel Vectra

Было рассчитано среднее квадратическое отклонение для массива значений, измеренных с помощью виброакустического датчика, и оно составило $R = 0,48$. А значение Q в соответствии с рекомендацией [5] равно 0,002.

Из приведённого графика (рис. 4) видно, как среднее квадратическое отклонение ошибки фильтра Калмана в процессе адаптации стремится к нулю, это указывает на то, что отфильтрованный сигнал приближается к своему истинному значению.

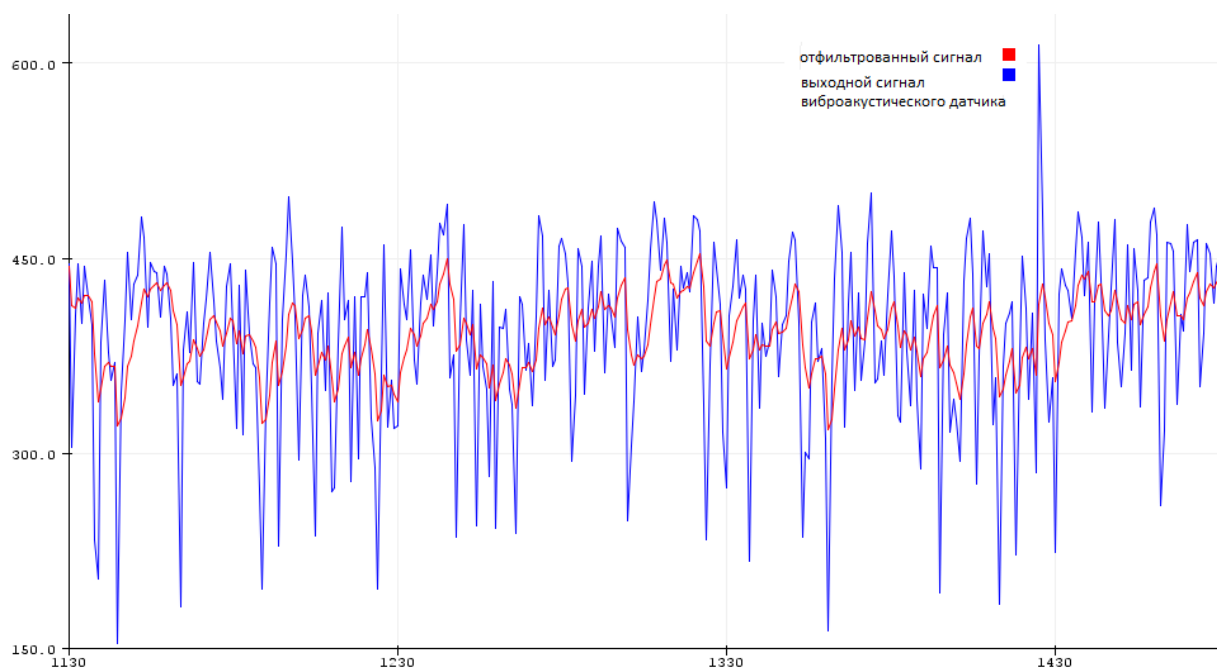


Рис. 4. Графики зашумленных и отфильтрованных виброакустических сигналов ДВС автомобиля марки Opel Vectra

Литература

1. Адаптивные фильтры / под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.
2. Тофолли, Т. Машины клеточных автоматов / Т. Тофолли, Н. Марголюс. – М.: Мир, 1991. – 280 с.
3. Беркович, С.Я. Клеточные автоматы как модель реальности: поиски новых представлений информационных и физических процессов / С.Я. Беркович. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 112 с.
4. Дьяконов, В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.
5. Джалолов, У.Х. Регуляризация задачи идентификации объекта в условиях зашумленности полезного сигнала / У.Х. Джалолов, Р.М. Бандишоева, У.А. Турсунбадалов // Вестник Таджикского технического университета. – 2016. – № 1 (33). – С. 20–26.
6. Компьютерная диагностика многокомпонентных вибрационных машин / Н.И. Юнусов, У.Х. Джалолов, Ш.Ш. Зиёев, У.А. Турсунбадалов // 10-я Международная конференция по компьютерному анализу проблем науки и технологии. МГУ имени М.В. Ломоносова, Филиал МГУ в г. Душанбе, 2015. – С. 124–127.

Шоназаров Парвиз Махмадназарович, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shonazarov1991@gmail.com.

Холов Фозил Толибович, аспирант кафедры комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск; fozil_1990-90@mail.ru.

Евсютин Олег Олегович, канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности информационных систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск; eoo@keva.tusur.ru.

Турсунбадалов Умед Абдумаликович, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Таджикистан; demu-usa@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 ноября 2018 г.

APPLICATION OF THE KALMAN FILTER IN THE PROBLEM OF TECHNICAL DIAGNOSTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

P.M. Shonazarov¹, shonazarov1991@gmail.com,

F.T. Kholov², fozil_1990-90@mail.ru,

O.O. Evsyutin², eoo@keva.tusur.ru,

U.A. Tursunbadalov³, demu-usa@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Tomsk state University of control systems and radioelectronics, Tomsk, Russian Federation,

³ Technical University named after academic M.S. Osimi, Dushanbe, Tazhikistan

The paper deals with the problem of filtering vibroacoustic signals of an internal combustion engine (ICE) using an adaptive Kalman filter in order to further use the filtered array to solve the problem of technical diagnostics of ICE.

The results of the simulation of an adaptive filter in the MATLAB / Simulink software environment of a real vibro-acoustic signal of the engine of an Opel Vectra brand are also given. Implemented a device based on the Arduino Mega microcontroller, which was used to process the field observations of the object of study – ICE.

The development of methods for the operational determination of the technical state of internal combustion engines (ICE), first of all automobiles, is currently being given special attention in connection with ensuring not only the reliability of the latter, but also increasing requirements for the economically and environmentally friendly ICE.

These methods should allow to carry out diagnostics of the technical condition of the vehicle's internal combustion engine and to make timely adjustments to the systems and components of the internal combustion engine thereby increasing the operational performance and service life of the object.

Environments of various methods for diagnosing the technical condition of internal combustion engines of particular importance are the method based on the analysis of vibroacoustic signals, which allows indiscriminate monitoring of components and interfaces of an internal combustion engine. It should be noted that the analyzed vibro-acoustic signals of the internal combustion engine are mutually correlated in terms of the operation of the internal combustion engine assemblies. Therefore, in order to adequately establish and localize the location of a defect in the internal combustion engine, it is necessary to first isolate the useful signal in the conditions of the mutual influence of non-stationary vibro-acoustic signals generated by various engine components.

Keywords: adaptive filter, development, modeling, filtering of signals, formation, engine, diagnostics, adjustments of systems, analysis, vibroacoustic signal, evaluation.

References

1. Kouen K.F.N., Grant P.M. (Ed.). *Adaptivnye fil'try* [Adaptive Filters]. Moscow, Mir Publ., 1988. 392 p.
2. Tofoli T., Margolus N. *Mashiny kletochnykh avtomatov* [Machines of Cellular Automata]. Moscow, Mir Publ., 1991. 280 p.
3. Berkovich S.Ya. *Kletochnye avtomaty kak model' real'nosti: poiski novykh predstavleniy informatsionnykh i fizicheskikh protsessov* [Cellular Automata as a Model of Reality: the Search for New Ideas of Information and Physical Processes]. Moscow, Moscow State Univ. Publ., 1993. 112 p.
4. Dyakonov V., Kruglov V. *MATLAB. Analiz, identifikatsiya i modelirovanie sistem. Spetsial'nyy spravochnik* [Analysis, Identification and Modeling of Systems. A Special Guide]. St. Petersburg, Peter Publ., 2002. 448 p.
5. Dzhalolov U.Kh., Bandishoeva R.M., Tursunbadalov U.A. [Regularization of the Task of Identi-

ifying an Object in the Conditions of the Noise of a Useful Signal]. *Bulletin of the Tajik Technical University*, 2016, no. 1 (33), pp. 20–26. (in Russ.)

6. Yunusov N.I., Dzhahalov U.Kh., Ziyoev Sh.Sh., Tursunbadalov U.A. [Computer Diagnostics of Multicomponent Vibration Machines]. *10-ya mezhdunarodnaya konferentsiya po komp'yuternomu analizu problem nauki i tekhnologii* [10th International Conference on Computer Analysis of the Problems of Science and Technology]. Dushanbe, 2015, pp. 124–127.

Received 28 November 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Применение фильтра Калмана в задаче технической диагностики двигателей внутреннего сгорания / П.М. Шоназаров, Ф.Т. Холов, О.О. Евсютин, У.А. Турсунбадалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 152–159. DOI: 10.14529/ctcr190115

FOR CITATION

Shonazarov P.M., Kholov F.T., Evsyutin O.O., Tursunbadalov U.A. Application of the Kalman Filter in the Problem of Technical Diagnostics of Internal Combustion Engines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 152–159. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190115