

Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора

М.В. Бобырь¹ ✉, Н.А. Милостная¹, В.А. Булатников¹, М.Ю. Лунева¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. В процессе работы робота-манипулятора из-за дребезга контактов часто возникают ситуации, которые уменьшают точность позиционирования его звеньев. Одним из вариантов решения этой проблемы является фильтрация сигнала. Современные алгоритмы цифровой фильтрации обладают достаточно сложной математической структурой. На обработку данных в таких фильтрах требуется много времени, поэтому целью данной работы является разработка быстродействующего устройства нечеткого цифрового фильтра, способного устранить проблему дребезга контактов при позиционировании звеньев робота-манипулятора.

Методы. При разработке устройства цифрового фильтра использовалась обобщенная математическая модель, реализуемая с применением теории нечеткой логики. Обобщенная математическая модель нечеткого цифрового фильтра включает модель, определяющую суппорт нечеткой выходной переменной, модель определения коэффициентов нечеткого цифрового фильтра, и модель преобразования выходного напряжения в угол поворота сервопривода робота-манипулятора. В совокупности данная математическая модель позволяет перерассчитать напряжение, которое поступает на вход нечеткого цифрового фильтра с помощью двух коэффициентов регулирования, тем самым улучшая точность позиционирования звеньев робота-манипулятора.

Результаты. В ходе экспериментальных исследований проводился сравнительный анализ разработанного быстродействующего устройства нечеткого цифрового фильтра с фильтром Калмана. Проводился расчет среднеквадратической ошибки RMSE для двух фильтров. При этом среднее значение RMSE у нечеткого цифрового фильтра составило 0,0185, у фильтра Калмана - 0,0193.

Заключение. В статье рассмотрена обобщенная математическая модель устройства нечеткого цифрового фильтра, состоящая из трех моделей. Представлено устройство, реализующее определение суппорта нечеткой выходной переменной, экспериментальная модель робота-манипулятора, экспериментальные исследования предлагаемой математической модели.

Ключевые слова: нечеткий цифровой фильтр; фильтр Калмана; дефаззификация; суппорт нечеткого множества.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №16-19-00186.

Для цитирования: Исследование устройства нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора / М.В. Бобырь, Н.А. Милостная, В.А. Булатников, М.Ю. Лунева // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1): 115-129. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-115-129>.

Поступила в редакцию 19.12.2019

Подписана в печать 11.01.2020

Опубликована 21.02.2020

Fuzzy Digital Filter Device Study for the Robot Manipulator

Maksim V. Bobyr¹ ✉, Natalia A. Milostnaya¹, Valentine A. Bulatnikov¹,
Marina Yu. Luneva¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Abstract

Purpose of research. Situations that reduce the accuracy of links positioning often arise due to the drab of contacts during the operation of robot manipulator. One of this problem solutions is signal filtering. Modern digital filtering algorithms have a rather complex mathematical structure. Data processing in such filters takes long time. So the purpose of this work is to develop fast-acting fuzzy digital filter device capable to eliminate the problem of contact scrapping when positioning the links of robot manipulator.

Methods. Generalized mathematical model was used in the development of digital filter device. This model is implemented by using fuzzy logic theory. Generalized mathematical model of the fuzzy digital filter includes a model determining a support of fuzzy output variable, a model for determining coefficients of fuzzy digital filter and a model for converting the output voltage into a rotation angle of robot manipulator servo drive. This mathematical model makes it possible to recalculate the voltage supplied to the input of fuzzy digital filter using two control coefficients thereby improving the positioning accuracy of robot manipulator links.

Results. During experimental studies, comparative analysis of developed fast-acting device of fuzzy digital filter with Kalman filter was carried out. The RMSE standard error for two filters was calculated. The average RMSE value of the fuzzy digital filter was 0.0185 of Kallman's filter was 0.0193.

Conclusion. Generalized mathematical model of fuzzy digital filter device consisting of three models is described. Device implementing determination of caliper of fuzzy output variable, experimental model of robot manipulator, experimental research and proposed mathematical model are presented.

Keywords: fuzzy digital filter; Kallman's filter; defuzzification; caliper of fuzzy set.

Conflict of Interest: The authors declare no apparent or potential conflict of interest related to the publication of this article.

Funding: This work was supported by the State Assignment and a grant of the Russian Science Foundation No. 16-19-00186.

For citation: Bobyr M. V., Milostnaya N. A., Bulatnikov V. A, Luneva M. Yu. Fuzzy Digital Filter Device Study for the Robot Manipulator. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 115-129 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-115-129>.

Received 19.12.2019

Accepted 11.01.2020

Published 21.02.2020

Введение

Для автоматизации технологических процессов производства применяются роботы-манипуляторы. Точность позиционирования звеньев робота-манипулятора во многом определяет его эксплуатационные возможности [1, 2]. Часто возникают ситуации, когда из-за дребезга контактов – многократных неконтролируемых замыканий и размыканий контактов робот начинает двигаться прерывисто. Этот факт уменьшает точность позиционирования его звеньев. Решением данной проблемы является использование цифровой фильтрации. В настоящее время самым известным является фильтр Калмана. Он применяется для повышения точности позиционирования различных устройств. Например, для улучшения позиционирования мобильной платформы, на которой установлен GPS-сенсор, принимающий геодезические координаты фильтр Калмана корректирует сигнал, полученный от GPS-сенсора [3]. Для управления ориентацией космического аппарата фильтр Калмана корректирует зашумленные показания звездного датчика [4]. Для комплексирования данных от датчиков физических величин мобильного робота используется расширенный фильтр Калмана [5]. Фильтр Калмана имеет достаточно сложную реализацию, благодаря чему требуется много времени на обработку и хранение данных. В связи с этим в работе [6] авторы предлагают нечеткий цифровой фильтр. В данной работе рассматрива-

ется математическая модель устройства нечеткого цифрового фильтра, которая рассчитывает суппорт нечеткой выходной переменной, определять выходное напряжение и преобразовывать его в угол поворота сервопривода. В совокупности математическая модель устройства нечеткого цифрового фильтра позволяет устранить дребезг контактов, тем самым улучшить точность позиционирования звеньев робота-манипулятора.

Материалы и методы

Нечеткий цифровой фильтр применяется для стабилизации перемещения звеньев робота-манипулятора. Подробно принцип работы данного устройства изложен в работе [6]. Обобщенная математическая модель ($M_{\text{НЦФ}}$) устройства нечеткого цифрового фильтра в теоретико-множественном описании задается в виде кортежа по формуле:

$$M_{\text{НЦФ}} = f(M_{\text{СНП}}; M_{\text{РВН}}; M_{\text{ПР}}), \quad (1)$$

где $M_{\text{К}}$ – математическая модель нахождения суппорта нечеткой выходной переменной; $M_{\text{РВН}}$ – математическая модель расчета выходного напряжения; $M_{\text{ПР}}$ – модель преобразования выходного напряжения в угол поворота сервопривода.

Математическая модель $M_{\text{СНП}}$ (формула (2)) позволяет находить суппорт выходной нечеткой переменной:

$$M_{\text{СНП}} = f(\alpha_{\min}; \alpha_{\max}). \quad (2)$$

На рис. 1 представлено устройство определения суппорта нечеткой выходной переменной.

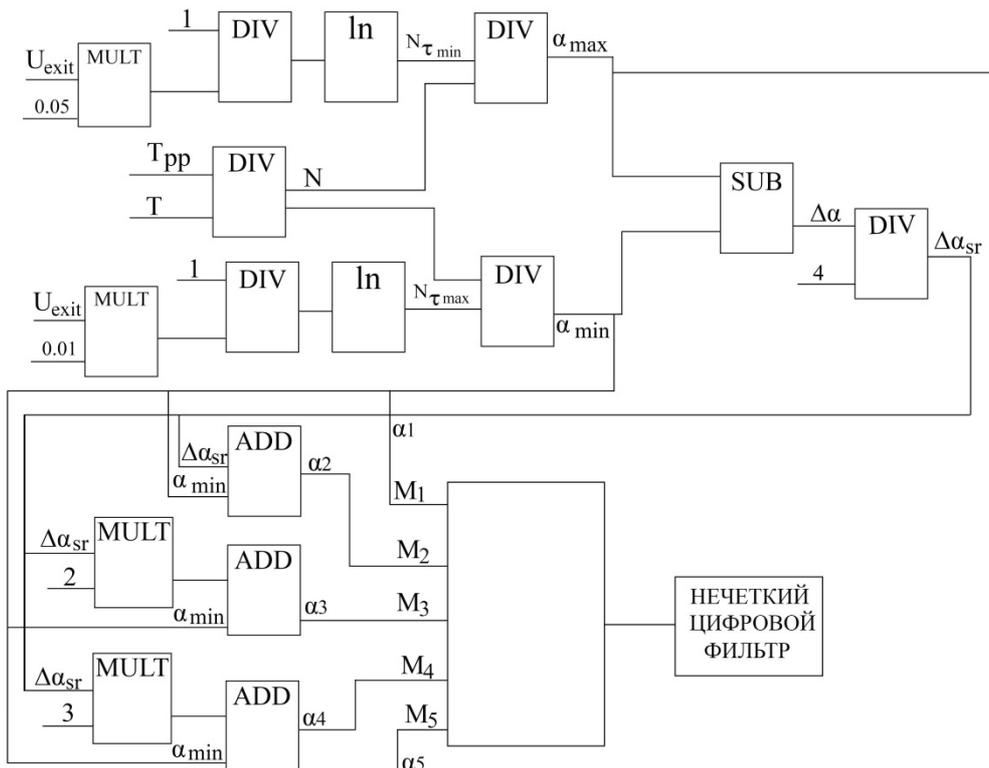


Рис. 1. Устройство нахождения меток выходной переменной

Fig. 1. Device for output variable labels

Математическая модель $M_{\text{СНП}}$ и принцип работы, реализующего ее устройства состоит из 6 шагов.

Шаг 1. Осуществляется нахождение коэффициента выборки N по формуле

$$N = \frac{T_{\text{III}}}{T} = \frac{20,2}{1,44} = 14,028, \quad (3)$$

где T – время одного импульса; T_{III} – период следования импульса (50 Гц). Экспериментально было установлено, что $T=1,44$ мс, $T_{\text{III}}=20,2$ мс (рис. 2).

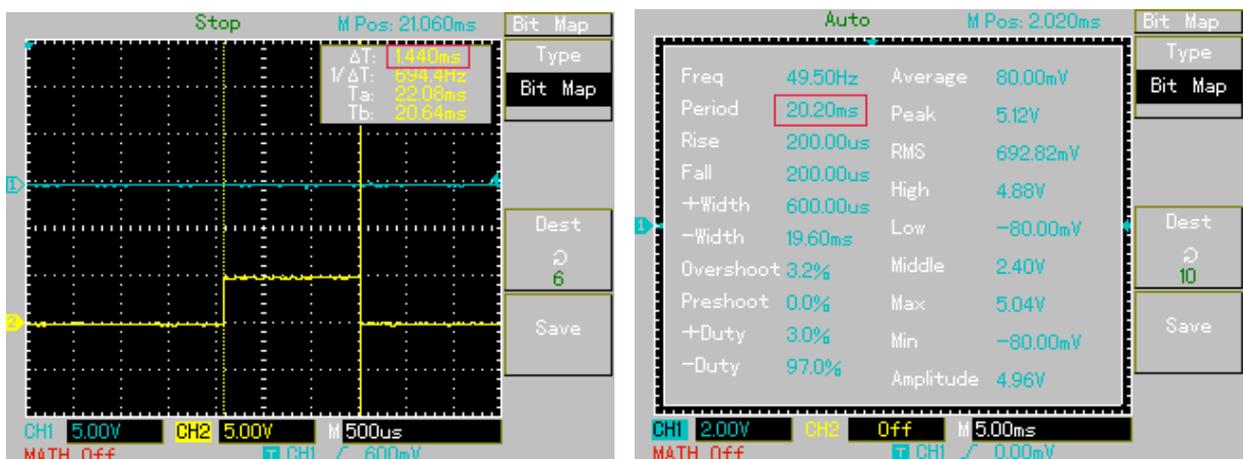


Рис. 2. Показания осциллографа, определяющие параметры T и T_{III}

Fig. 2. Oscilloscope readings determining T and T_{III} parameters

Шаг 2. Расчет минимального и максимального коэффициента точности цифрового фильтра N_{min} и N_{max} по формуле:

$$N_{min} = \ln\left(\frac{1}{5\%U_{ВЫХ}}\right) = 1.386,$$

$$N_{max} = \ln\left(\frac{1}{0.01\%U_{ВЫХ}}\right) = 7.6, \quad (4)$$

где $U_{ВЫХ}$ – максимальный выходной сигнал на выходе микроконтроллера ($U_{ВЫХ} = 5В$).

Шаг 3. Расчет минимального и максимального значения коэффициента α_{min} и α_{max} (5) (рис. 3):

$$\alpha_{min} = \frac{N_{max}}{N} = 0,51;$$

$$\alpha_{max} = \frac{N_{min}}{N} = 0,91; \quad (5)$$

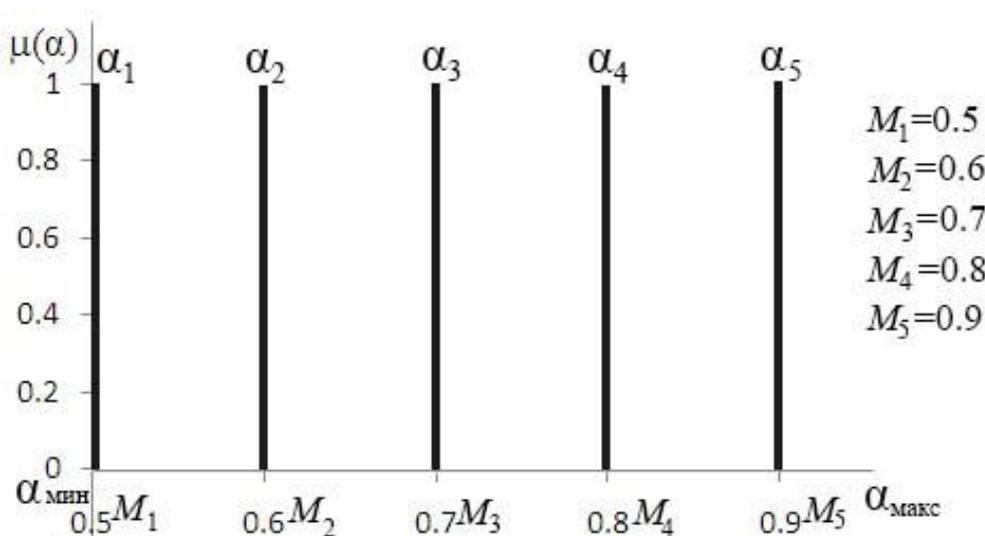


Рис. 3. График выходной функции принадлежности

Fig. 3. Schedule of output membership function

Шаг 4. Нахождение $\Delta\alpha_{sr}$ разности между минимальным и максимальным значениями коэффициента α по формуле

$$\Delta\alpha_{sr} = \frac{\alpha_{max} - \alpha_{min}}{4}. \quad (6)$$

Шаг 6. Расчет меток выходной функции принадлежности по формуле (рис. 3):

$$\alpha_i = n \cdot \Delta\alpha_{sr} + \alpha_{min};$$

$$M_1 = \alpha_{min};$$

$$M_2 = \Delta\alpha + \alpha_{min};$$

$$M_3 = \Delta\alpha \cdot 2 + \alpha_{min};$$

$$M_4 = \Delta\alpha \cdot 3 + \alpha_{min};$$

$$M_5 = \alpha_{max}, \quad (7)$$

где n – номер термина.

Математическая модель расчета выходного напряжения $M_{РВН}$ включает в себя 7 шагов.

Шаг 1. Нахождение α_{min} и α_{max} для формирования суппорта нечеткой выходной переменной по формуле (5) (рис.3).

Шаг 2. Формирование степеней истинности входных переменных. Первая входная переменная ΔU – разница между текущим и предыдущим значениями напряжения, полученного от потенциометра. ΔU определяется по формуле

$$\Delta U = U_{\text{тек}} - U_{\text{пред}}, \quad (8)$$

где $U_{\text{тек}}$, $U_{\text{пред}}$ – текущее и предыдущее значения напряжений, полученные от потенциометров.

Первая входная переменная состоит из трех термов $\Delta U = (\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3)$, которые определяются по формулам (9) (рис. 4) [7-10].

$$\Delta U_1 = \begin{cases} \frac{b_u - \Delta U}{b_u}, & \text{если } a_u \leq \Delta U \leq b_u; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

$$\Delta U_2 = \begin{cases} \frac{\Delta U}{b_u}, & \text{если } a_u \leq \Delta U \leq b_u; \\ \frac{c_u - \Delta U}{b_u}, & \text{если } b_u \leq \Delta U \leq c_u; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

$$\Delta U_3 = \begin{cases} \frac{\Delta U - b_u}{b_u}, & b_u \leq \Delta U \leq c_u; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (9)$$

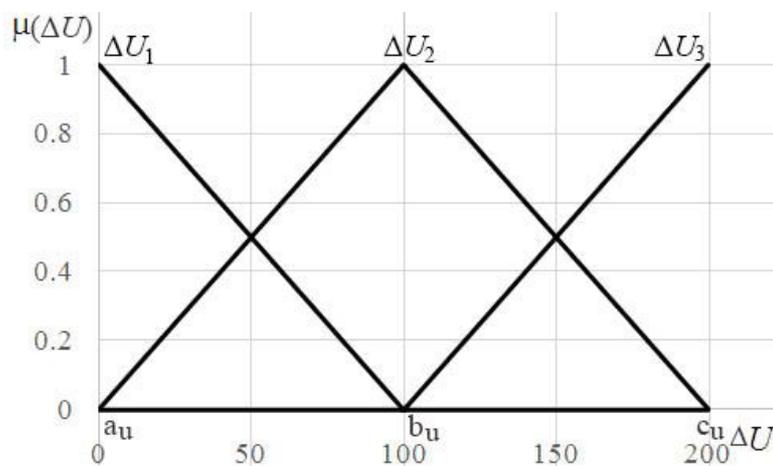


Рис. 4. График функции принадлежности для первой входной переменной

Fig. 4. Membership function graph for the first input variable

Вторая входная переменная – время поворота звеньев робота-манипулятора из минимального положения в максимальное t . Вторая входная переменная состоит из трех термов $t = (t_1, t_2, t_3)$, определяющихся по формулам (рис. 5):

$$t_1 = \begin{cases} \frac{b_t - t}{b_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

$$t_2 = \begin{cases} \frac{t}{b_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t; \\ \frac{c_t - t}{b_t}, & \text{если } b_t \leq t \leq c_t; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

$$t_3 = \begin{cases} \frac{t - b_t}{b_t}, & b_t \leq t \leq c_t; \\ 0, & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (10)$$

Шаг 2. Определение базы правил для управления нечеткого цифрового фильтра (табл. 1).

Шаг 3. Расчет степеней истинности предпосылок нечетких правил по формулам [11-16]:

$$\begin{aligned} R1 &= \min(\Delta U_1; t_1), R2 = \min(\Delta U_1; t_2), \\ R3 &= \min(\Delta U_1; t_3), R4 = \min(\Delta U_2; t_1), \\ R5 &= \min(\Delta U_2; t_2), R6 = \min(\Delta U_2; t_3), \\ R7 &= \min(\Delta U_3; t_1), R8 = \min(\Delta U_3; t_2), \\ R9 &= \min(\Delta U_3; t_3), \end{aligned} \quad (11)$$

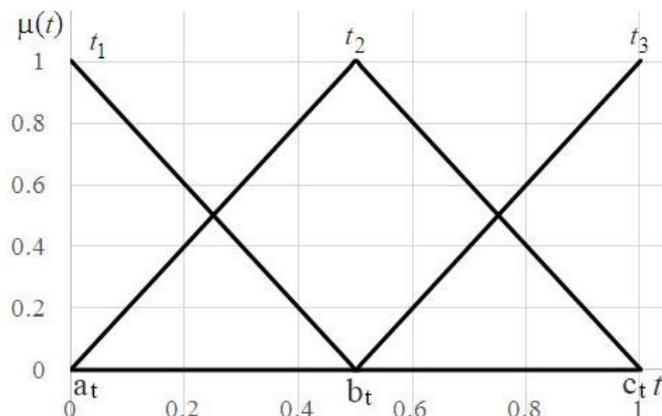


Рис. 5. График функции принадлежности для второй входной переменной

Fig. 5. Membership function graph for second input variable

Таблица 1. Нечеткие правила для работы нечеткого цифрового фильтра

Table 1. Fuzzy rules for the operation of a fuzzy digital filter

	U_1	U_2	U_3
t_1	R1	R4	R7
t_2	R2	R5	R8
t_3	R3	R6	R9

Шаг 4. Нахождение степеней истинности заключений нечетких правил. Определяются с помощью операции нахождения максимумов по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_5 &= R9, \alpha_4 = \max(R8; R6), \\ \alpha_3 &= \max(R7; R5; R3), \\ \alpha_2 &= \max(R4; R2), \alpha_1 = R1. \end{aligned} \quad (12)$$

Шаг 5. Дефаззификация, при которой осуществляется расчет четкого значения коэффициента нечеткого цифрового фильтра α по формуле [17-20]:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} \alpha_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^{n=5} \alpha_i} = \frac{\alpha_1 \cdot M_1 + \alpha_2 \cdot M_2 + \dots + \alpha_n \cdot M_n}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n} \quad (13)$$

Шаг 6. Нахождение коэффициента регулирования β по формуле:

$$\beta = 1 - \alpha. \quad (14)$$

Шаг 7. Расчет выходного напряжения, передаваемого на сервоприводы по формуле:

$$U_{\text{фильтр}} = \alpha \cdot U_{\text{пред}} + \beta \cdot U_{\text{тек}} \quad (15)$$

Математическая модель преобразования выходного напряжения в угол поворота сервопривода $M_{\text{ПР}}$ состоит из 2 шагов:

Шаг 1. Нахождение выходного напряжения $U_{\text{фильтр}}$ по формуле (16).

Шаг 2. Преобразование, полученного напряжения с помощью нечеткого цифрового фильтра в угол поворота передаваемого от микроконтроллера на сервоприводы по формуле:

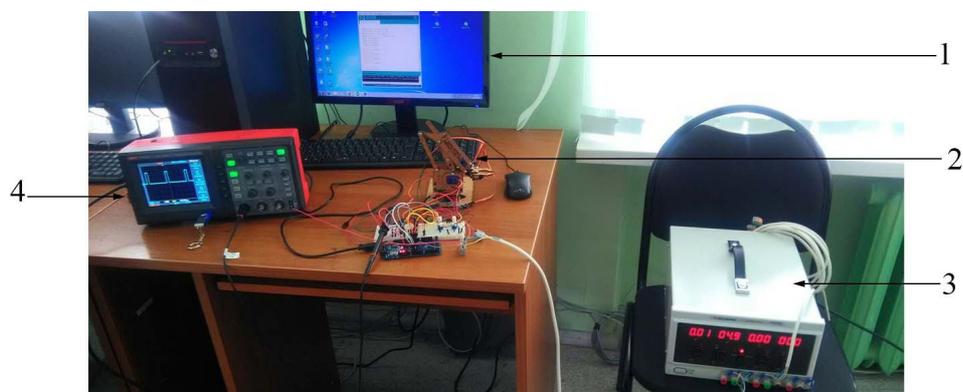
$$\varphi = \frac{(U_{\text{фильтр}} - I_{\text{min}}) \cdot (U_{\text{max}} - U_{\text{min}})}{(I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) + U_{\text{min}}}, \quad (16)$$

где φ – угол поворота сервопривода, $U_{\text{фильтр}}$ – значение выходного напряжения, полученное по формуле (14), I_{min} , I_{max} – минимальное и максимальное значения выходного напряжения 0 и 1024, U_{max} , U_{min} – максимальное и ми-

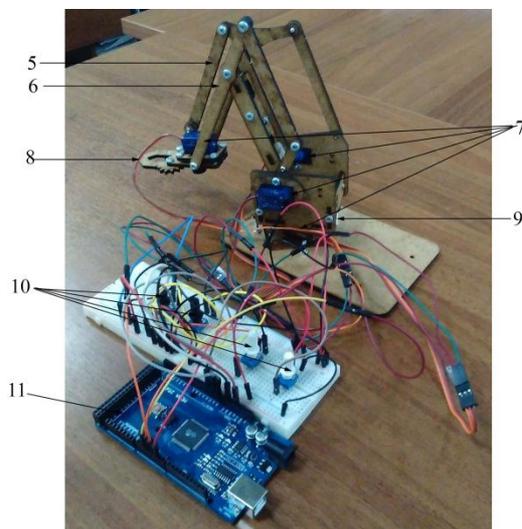
нимальное значения угла поворота основания робота-манипулятора.

Результаты и их обсуждение

Для проведения экспериментальных исследований математической модели нечеткого цифрового фильтра была разработана экспериментальная модель робота-манипулятора, представленная на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Экспериментальная модель робота-манипулятора: **1** – компьютер; **2** – робот-манипулятор; **3** – блок питания; **4** – осциллограф; **5** – правое плечо; **6** – левое плечо; **7** – четыре сервопривода SG-90; **8** – захват; **9** – платформа основания; **10** – четыре потенциометра 10 кОм; **11** – управляющая плата ArduinoMega 2560

Fig. 6. Experimental model of a robotic arm: **1** – computer; **2** – robotic arm; **3** – power supply; **4** – oscilloscope; **5** – right shoulder; **6** – left shoulder; **7** – four servo drives SG-90; **8** – capture, **9** – base platform; **10** – four potentiometers 10 kOhm; **11** – Arduino Mega 2560 control board

Предложенная обобщенная математическая модель устройства нечеткого цифрового фильтра была реализована в системе Simulink. Результат моделирования показал, что предлагаемая модель, позволяет обеспечить требуемый угол поворота звеньев робота-манипулятора (платформа основания должна поворачиваться вокруг своей оси от 0° до 180°, левое и правое плечи должны поворачиваться от 0° до 140°, захват робота-манипулятора раскрывается от 105° до 140°) (рис. 7).

Так же в качестве эксперимента проведено сравнение результатов моделирования нечеткого цифрового фильтра с фильтром Калмана. Сравнение проводилось на основе корня из сред-

неквадратической ошибки RMSE. Полученные данные сведены в табл. 2.

Результаты моделирования приведены на рисунках 8-9, где синий цвет – фильтр Калмана, оранжевый – нечеткий цифровой фильтр.

Еще одним экспериментом было расчет коэффициента RMSE для фильтра Калмана и нечеткого цифрового фильтра при различных значениях Q – ковариация шума процесса и R – ковариация шума измерения. Результаты, полученные для фильтра Калмана сведены в табл. 3. При этом значение RMSE для нечеткого цифрового фильтра составляет 0,0201, что в 1,2 раза меньше представленных в таблице значений.

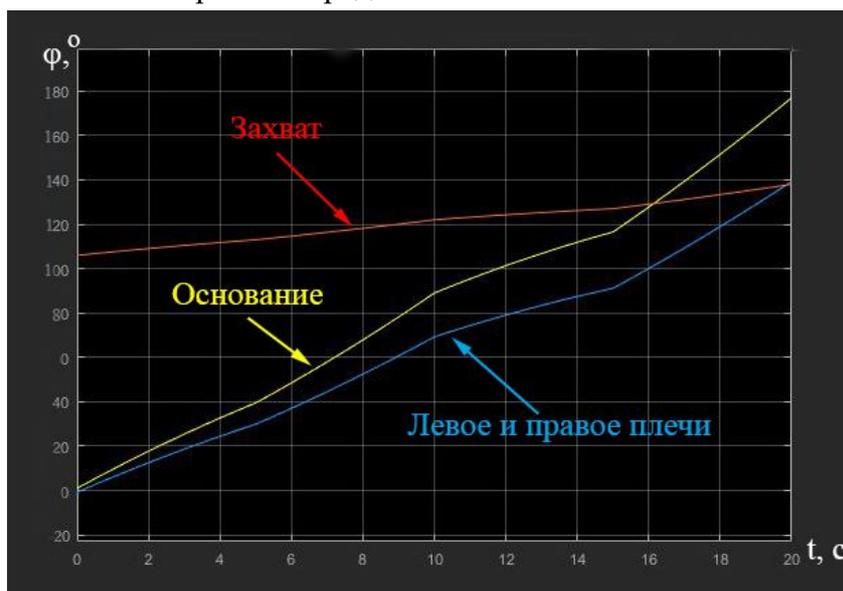


Рис. 7. Результат моделирования устройства нечеткого цифрового фильтра в среде Simulink

Fig. 7. The result of modeling a fuzzy digital filter device in a Simulink environment

Таблица 2. Значения RMSE для нечеткого цифрового фильтра и фильтра Калмана

Table 2. RMSE values for fuzzy digital filter and Kalman filter

	Входной сигнал	Фильтр Калмана	Нечеткий фильтр
Синусоида (2 рад/с)	0,0317	0,0193	0,0185
Синусоида (4 рад/с)	0,0317	0,0207	0,0202

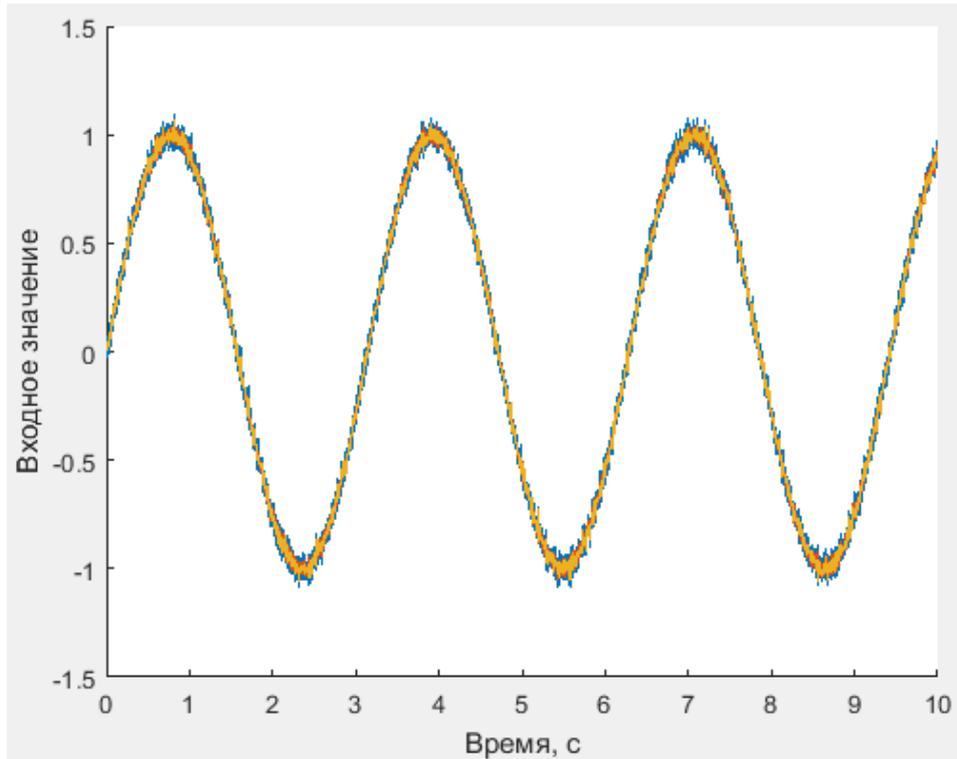


Рис. 8. Результат моделирования с входным сигналом в виде синусоиды со скоростью 2 рад/с

Fig. 8. Simulation result with an input signal in the form of a sine wave at a speed of 2 rad / s

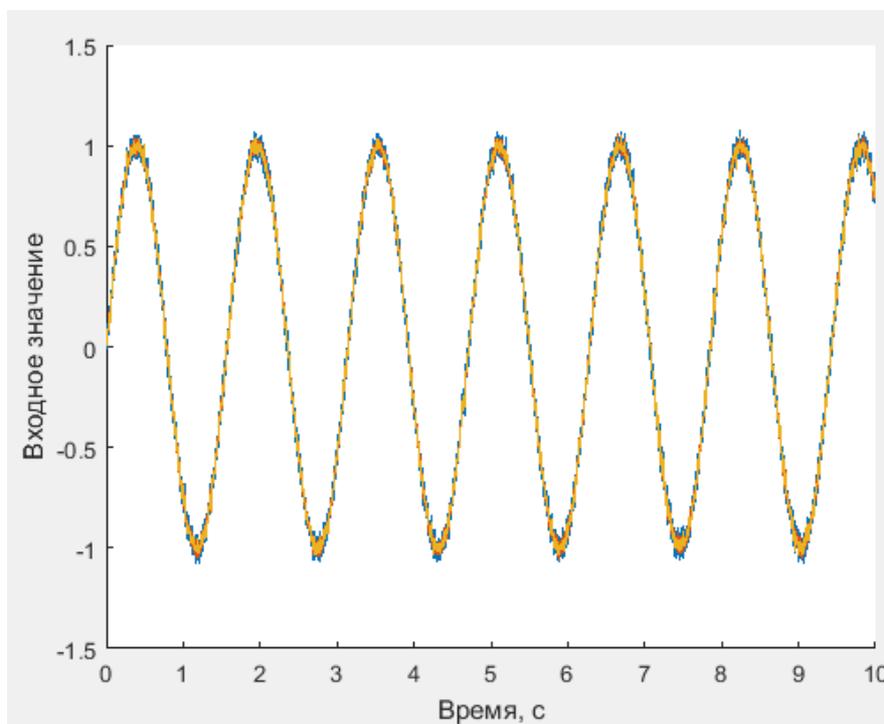


Рис.9. Результат моделирования с входным сигналом в виде синусоиды со скоростью 4 рад/с

Fig. 9. Simulation result with an input signal in the form of a sine wave at a speed of 4 rad / s

Таблица 3. Значения RMSE для фильтра Калмана при различных значениях Q и R

Table 3. RMSE values for the Kalman filter for different values of Q and R

Q	R										
	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
50	0,0219	0,0216	0,0214	0,0212	0,0211	0,0315	0,0208	0,0207	0,0207	0,0206	0,0205
60	0,0222	0,0219	0,0217	0,0215	0,0213	0,0212	0,021	0,0209	0,0208	0,0208	0,0207
70	0,0225	0,0222	0,0219	0,0217	0,0215	0,0214	0,0212	0,0211	0,021	0,0209	0,0209
80	0,0228	0,0224	0,0222	0,0219	0,0217	0,0216	0,0214	0,0213	0,0212	0,0211	0,021
90	0,023	0,0227	0,0224	0,0221	0,0219	0,0218	0,0216	0,0215	0,0214	0,0213	0,0212
100	0,0232	0,0229	0,0226	0,0223	0,0221	0,0219	0,0218	0,0216	0,0215	0,0214	0,0213
110	0,0235	0,0231	0,0227	0,0225	0,0223	0,0221	0,0219	0,0218	0,0217	0,0216	0,0214
120	0,0237	0,0232	0,0229	0,0227	0,0224	0,0222	0,0221	0,0219	0,0218	0,0217	0,0216
130	0,0238	0,0234	0,0231	0,0228	0,0226	0,0224	0,0222	0,0221	0,0219	0,0218	0,0217
140	0,024	0,0236	0,0232	0,023	0,0227	0,0225	0,0224	0,0222	0,0221	0,0219	0,0218
150	0,0242	0,0238	0,0234	0,0231	0,0229	0,0227	0,0225	0,0223	0,0222	0,022	0,0219

Полученные результаты доказывают эффективность использования устройства нечеткого цифрового фильтра.

Выводы

В данной статье рассмотрена обобщенная математическая модель устрой-

ства нечеткого цифрового фильтра, осуществляющая перерасчет выходного напряжения, передаваемого на серво-приводы робота-манипулятора, экспериментальная модель робота-манипулятора, сравнительный анализ нечеткого цифрового фильтра и фильтра Калмана.

Список литературы

1. Колтыгин Д.С., Седельников И.А., Павлюк Е.Ю. Определение точности позиционирования роботов-манипуляторов DELTA и OMEGA // Труды БрГУ. 2016. №2. С. 121-126.
2. Мархадаев Б.Е., Никифоров С.О., Улаханов Н.С. Методология оценки анализа характеристик точности мехатронных манипуляторов по кинематическим моделям // Вестник БГУ. 2016. №4. С. 50-60.
3. Малинин Д.Д., Шарапов А.Е. Повышение точности позиционирования мобильной платформы путем коррекции GPS-сигнала фильтром Калмана // Надежность и качество сложных систем. 2014. №3. С. 44-49.
4. Галкин Д.И. Алгоритм оценки параметров ориентации космического аппарата с использованием фильтра Калмана // Вестник МГТУ им. Баумана. 2013. С.1-11.
5. Безмен П.А. Комплексирование данных системы управления мобильным роботом с использованием расширенного фильтра Калмана // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(2): 53-64.

6. Бобырь М.В., Лунева М.Ю., Ноливос К.С.А. Нечеткий цифровой фильтр для управления роботом-манипулятором ARMinO // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 40. №4. С. 244 – 250.
7. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the cnc machine implemented on fpga // Measurement. 2020. Vol. 152.
8. Bobyr, M.V., Milostnaya, N.A., Kulabuhov, S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio // Applied Soft Computing Journal. 2017. №10. P. 19-32.
9. Бобырь М.В., Кулабухов С.А., Милостная Н.А. Обучение нейро-нечеткой системы на основе метода разности площадей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 4. С. 15-26.
10. Бобырь М.В. Метод нелинейного обучения нейро-нечеткой системы вывода // Искусственный интеллект и принятие решений. 2018. №1. С.66-74.
11. Shah R., Pandey A.B. Concept sorting robotic arm // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 20. P.400-405.
12. Long J., Shuai L., Jiguo Y. Robot manipulator control using neural networks: A survey // Neurocomputing. 2018. Vol. 000. P. 1-12.
13. Varshney A., Agarwal B., Behera L. Manipulator control using human arm imitation // IFAC Proceedings Volumer. 2014. Vol. 47. P. 109-114.
14. Бобырь М.В., Титов В.С., Милостная Н.А. Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний // Мехатроника, автоматизация и управления. 2014. №10. С. 8 – 14.
15. Ho Pham Huy Anh, Kyoung Kwan Ahn Hybrid control of a pneumatic artificial muscle (PAM) robot arm using an inverse NARX fuzzy model // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2011. №24. P. 697-716.
16. Бобырь М.В., Архипов А.Е., Милостная Н.А. Метод расчета карты глубин на основе мягких операторов // Системы и средства информатики. 2019. Т. 29. №2. С. 71-84.
17. Бобырь М.В., Титов Д.В., Кулабухов С.А. О некоторых свойствах мягкого алгоритма нечетко-логического вывода // Известия Юго-Западного государственного университета. 2015. № 2 (59). С. 39-51.
18. Белов А.В. Формирование классификатора с нечеткими границами на основании кривых, заполняющих дискретное признаковое пространство // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 71-73.
19. Халин Ю.А., Сизов А.С., Игнатенко А.Н. Нечётко-множественная модель многокритериальной оценки конкурентоспособности предприятия // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 5-1 (38). С. 53-57.
20. Абрамова Т.В. Проектирование нейро-нечеткого дерева решений // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 8-14.

References

1. Koltygin D.S., Sedelnikov I.A., Pavlyuk E.U. Opredelenie tochnosti pozitsionirovaniya robotov-manipulyatorov DELTA i OMEGA [Determination of positioning accuracy of DELTA and OMEGA robotic manipulators]. *Trudy BrGU = Transactions of BrSU*, 2016, no. 2, pp. 121-126 (In Russ.).
2. Markhadaev B.E., Nikiforov S.O., Ulakhanov N.S. Metodologiya otsenki analiza kharakteristik tochnosti mekhatronnykh manipulyatorov po kinematicheskim modelyam [Methodology for assessing the analysis of accuracy characteristics of mechatronic manipulators according to kinematic models]. *Vestnik BGU = Bulletin of BSU*, 2016, no. 4, pp. 50-60 (In Russ.).
3. Malinin D. D., Sharapov A.E. Povyshenie tochnosti pozitsionirovaniya mobil'noi platformy putem korrektsii GPSSignala fil'trom Kalmana [Improving the accuracy of positioning a mobile platform by correcting a GPS signal with a Kalman filter]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*, 2014, no. 3, pp. 44-49 (In Russ.).
4. Galkin D.I. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem [An algorithm for estimating the orientation parameters of a spacecraft using the Kalman filter]. *Vestnik MGTU im. Bauman = Vestnik MGTU im. Bauman*, 2013, pp. 1-11 (In Russ.).
5. Bezmen P.A. Kompleksirovanie dannykh sistemy upravleniya mobil'nym robotom s ispol'zovaniem rasshirennogo fil'tra Kalmana [Integration of Mobile Robot Control System Data Using the Extended Kalman Filter]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(2): 53-64 (In Russ.).
6. Bobyr M.V., Luneva M.Yu., Nolivos K.S.A. Nechetkii tsifrovoy fil'tr dlya upravleniya robotom-manipulyatorom ARMino [Fuzzy digital filter for controlling the ARMino robotic arm]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2019, no. 4, pp. 244 - 250 (In Russ.).
7. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the cnc machine implemented on fpga. *Measurement*, 2020, no. 152.
8. Bobyr, M.V., Milostnaya, N.A., Kulabuhov, S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio. *Applied Soft Computing Journal*, 2017, no.10, pp. 19-32.
9. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A., Milostnaya N.A. Obuchenie neuro-nechetkoi sistemy na osnove metoda raznosti ploshchadei [Training a neuro-fuzzy system based on the area difference method]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii = Artificial Intelligence and Decision Making*, 2016, no. 4, pp. 15-26 (In Russ.).
10. Bobyr M.V. Metod nelineinogo obucheniya neuro-nechetkoi sistemy vyvoda [The method of nonlinear training of a neuro-fuzzy inference system]. *Iskusstvennyi intellekt i*

11. Shah R., Pandey A.B. Concept sorting robotic arm. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp.400-405.

12. Long J., Shuai L., Jiguo Y. Robot manipulator control using neural networks: A survey. *Neurocomputing*, 2018, vol. 000, pp. 1-12.

13. Varshney A., Agarwal B., Behera L. Manipulator control using human arm imitation. *IFAC Proceedings Volumer*, 2014, vol. 47, pp. 109-114.

14. Bobyr M.V., Titov V.S., Milostnaya N.A. Prognozirovanie raboty mekhatronnykh sistem na osnove myagkikh nechetkikh baz znanii [Prediction of the operation of mechatronic systems based on soft fuzzy knowledge bases]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravleniya = Mechatronics, Automation and Control*, 2014, no. 10, pp. 8-14 (In Russ.).

15. Ho Pham Huy Anh, Kyoung Kwan Ahn Hybrid control of a pneumatic artificial muscle (PAM) robot arm using an inverse NARX fuzzy model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2011, no.24, pp. 697-716.

16. Bobyr M.V., Arkhipov A.E., Milostnaya N.A. Metod rascheta karty glubin na osnove myagkikh operatorov [The method of calculating the depth map based on soft operators]. *Sistemy i sredstva informatiki = Systems and means of computer science*, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 71-84 (In Russ.).

17. Bobyr' M.V., Titov D.V., Kulabuhov S.A. O nekotorykh svoistvakh myagkogo algoritma nechetko-logicheskogo vyvoda [On Some Properties of Soft of Fuzzy Logical Deduction]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2015, no. 2 (59), pp. 39-51 (In Russ.).

18. Belov A.V. Formirovanie klassifikatora s nechetkimi granicami na osnovanii krivyh, zapolnjajushhih diskretnoe priznakovoe prostranstvo [Qualifier Formation with Fuzzy Borders on the Basis of the Curves Filling Discrete Attribute Space]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4-2 (43), pp. 71-73 (In Russ.).

19. Halin Ju.A., Sizov A.S., Ignatenko A.N. Nechetko-mnozhestvennaja model' mnogokriterial'noj ocenki konkurentosposobnosti predpriyatija [Fuzzy-Sets Model Multicriteria of Estimation of Competitiveness of Enterprise]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 53-57 (In Russ.).

20. Abramova T.V. Proektirovanie nejro-nechetkogo dereva reshenij [Design of Neuro-Fuzzy Decision Tree]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016, no. 1 (64), pp. 8-14 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бобырь Максим Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: fregat_mn@rambler.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5400-6817>

Милостная Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nat_mil@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

Natalia A. Milostnaya, Cand. of Sci. (Engineering), Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nat_mil@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3779-9165>

Булатников Валентин Альбертович, аспирант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rb465687@gmail.com

Valentine A. Bulatnikov, Post-Graduate Student, Department of Computer Engineering, Southwest State University, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rb465687@gmail.com

Лунева Марина Юрьевна, аспирант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: marinok-l@yandex.ru

Marina Yu. Luneva, Post-Graduate Student, Department of Computer Engineering, Southwest State University, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: marinok-l@yandex.ru