

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-183-195>

## Фильтрация сигнала в нечетком фильтре на основе метода отношения площадей

М. В. Бобырь<sup>1</sup> ✉, М. Ю. Лунев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Цифровая фильтрация сигнала позволяет в режиме реального времени сглаживать шумы, возникающие в электронных устройствах. В настоящее время существует множество различных цифровых фильтров, отличающихся быстродействием, затратами вычислительных мощностей, алгоритмами и ограничениями по условиям использования. Одним из таких фильтров является фильтр Калмана, однако настройка коэффициентов усиления данного фильтра весьма усложнена процессом дополнительных экспериментов и сбором статистической информации. Поэтому в данной работе авторы рассматривают упрощенный алгоритм нахождения коэффициентов регулирования нечеткого цифрового фильтра с дефаззификатором на основе метода отношения площадей и исследуют влияние параметров метода отношения площадей на фильтрацию сигнала, тем самым достигая цель – повышение точности работы нечеткого цифрового фильтра.

**Методы.** Для алгоритма нахождения коэффициентов регулирования цифрового фильтра использовался аппарат нечеткой логики. Коэффициенты регулирования определяются с помощью дефаззификатора на основе метода отношения площадей.

**Результаты.** В ходе экспериментальных исследований проводился расчет среднеквадратической ошибки RMSE для нечеткого цифрового фильтра с использованием метода отношения площадей, метода центра тяжести и фильтра Калмана. На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что у нечеткого фильтра на основе метода отношения площадей RMSE в 5,43 раза меньше чем для фильтра Калмана и в 2,77 раза меньше чем для дефаззификатора на основе метода центра тяжести. Полученные результаты доказывают эффективность использования нечеткого цифрового фильтра с методом отношения площадей.

**Заключение.** В данной статье рассмотрен алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра, проведено моделирование нечеткого цифрового фильтра и фильтра Калмана в системе Simulink, рассчитаны значения RMSE для нечеткого цифрового фильтра с методом отношения площадей и методом центра тяжести, а так же фильтра Калмана.

**Ключевые слова:** нечеткий цифровой фильтр; фильтр Калмана; дефаззификация; коэффициент фильтрации; метод отношения площадей.

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

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ГЗ № 0851-2020-0032.

Для цитирования: Бобырь М. В., Лунева М. Ю. Фильтрация сигнала в нечетком фильтре на основе метода отношения площадей // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(3): 183-195. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-183-195>.

Поступила в редакцию 09.04.2020

Подписана в печать 27.04.2020

Опубликована 30.06.2020

## Filtering a Signal in a Fuzzy Filter Based on the Area Ratio Method

Maksim V. Bobyr<sup>1</sup> ✉, Marina Yu. Luneva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: fregat\_mn@rambler.ru

### Abstract

**Purpose of research.** Digital signal filtering allows real-time noise reduction in electronic devices. Currently, there are many different digital filters, differing in speed, computing power, algorithms and restrictions on the conditions of use. One of these filters is the Kalman filter, but adjusting the gains of this filter is very complicated by the process of additional experiments and collection of statistical information. Therefore, in this paper, the authors consider a simplified algorithm for finding the control coefficients of a fuzzy digital filter with defuzzifier based on the area ratio method and investigate the influence of the area ratio method parameters on signal filtering, thereby achieving the goal of improving the accuracy of the fuzzy digital filter.

**Methods.** For the algorithm for finding the control coefficients of the digital filter, a fuzzy logic apparatus was used. The control factors are determined using a defuzzifier based on the area ratio method.

**Results.** In the course of experimental studies, the mean square error RMSE was calculated for a fuzzy digital filter using the area ratio method, the center of gravity method and the Kalman filter. Based on the results obtained, it was concluded that the fuzzy filter based on the area ratio RMSE method is 5.43 times less than for the Kalman filter and 2.77 times less than for the defuzzifier based on the center of gravity method. The results obtained prove the effectiveness of using a fuzzy digital filter with the area ratio method.

**Conclusion:** This article considers an algorithm for the operation of a fuzzy digital filter, simulates a fuzzy digital filter and a Kalman filter in the Simulink system and calculates the RMSE values for a fuzzy digital filter with the area ratio method and the center of gravity method, as well as the Kalman filter.

**Keywords:** fuzzy digital filter; Kalman filter; defuzzification; filtration coefficient; area ratio method.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding:** The work was carried out within the framework of the state assignment GZ No. 0851-2020-0032.

**For citation:** Bobyr M. V., Luneva M. Yu. Filtering a Signal in a Fuzzy Filter Based on the Area Ratio Method // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(3): 183-195 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-3-183-195>.

Received 09.04.2020

Accepted 27.04.2020

Published 30.06.2020

## Введение

В настоящее время цифровая обработка сигналов имеет широкое применение практически во всех отраслях науки и техники. Системы цифровой обработки сигналов являются неотъемлемой частью следующих областей: телекоммуникация, системы обработки изображений, звукозапись, мобильная связь, различная медицинская аппаратура [1]. Существует много различных фильтров, отличающихся быстродействием, затратами вычислительных мощностей, алгоритмами и ограничениями по условиям использования. Одним из таких фильтров является фильтр Калмана, который применяется для разного рода задач. Например, в исследовании [2] был разработан новый интерфейс человек-манипулятор, который оценивает положение и ориентацию человеческой руки с помощью 3D-камеры и инерциального измерительного устройства (IMU). Здесь используется многочастичный фильтр и фильтр Калмана для оценки ориентации и положения руки человека, и фильтр конечной импульсной характеристики для обнаружения сбоев многочастичного фильтра. В работе [3] используется адаптивный фильтр Калмана для самоадаптации длины дуги и повышения точности процесса газовой вольфрамовой дуговой сварки. Для повышения качества фильтрации оптимальным является использование нейросетевых и традиционных технологий [4-5]. Во многих исследованиях фильтр

Калмана применяется с нечеткой логикой. Например, в работе [6] предлагается нечеткий дополнительный фильтр Калмана для оценки положения беспилотного летательного аппарата. Для управления и навигации автономным подводным аппаратом в работе [7] предлагается использовать нечеткий фильтр Калмана и ансамблевый фильтр Калмана. Однако для оптимальной работы фильтра Калмана требуется точный подбор коэффициентов усиления фильтра. Подбор коэффициентов вызывает сложность, поскольку необходимо провести ряд экспериментов, связанных с предсказанием состояния системы на определенном шаге и определить статистические переменные, что требует дополнительного времени. При этом в работах [8-10] авторы разработали цифровой фильтр, который с помощью нечеткой логики позволяет определить коэффициенты регулирования фильтра. Данная работа является продолжением работы [10]. Авторы описывают алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра с дефазификатором на основе метода отношения площадей и исследуют влияние параметров, представленного метода на фильтрацию сигнала.

## Материалы и методы

Поставим задачу повышения точности работы нечеткого цифрового фильтра. Для этого был разработан алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра, представленный на рис. 1 [11].

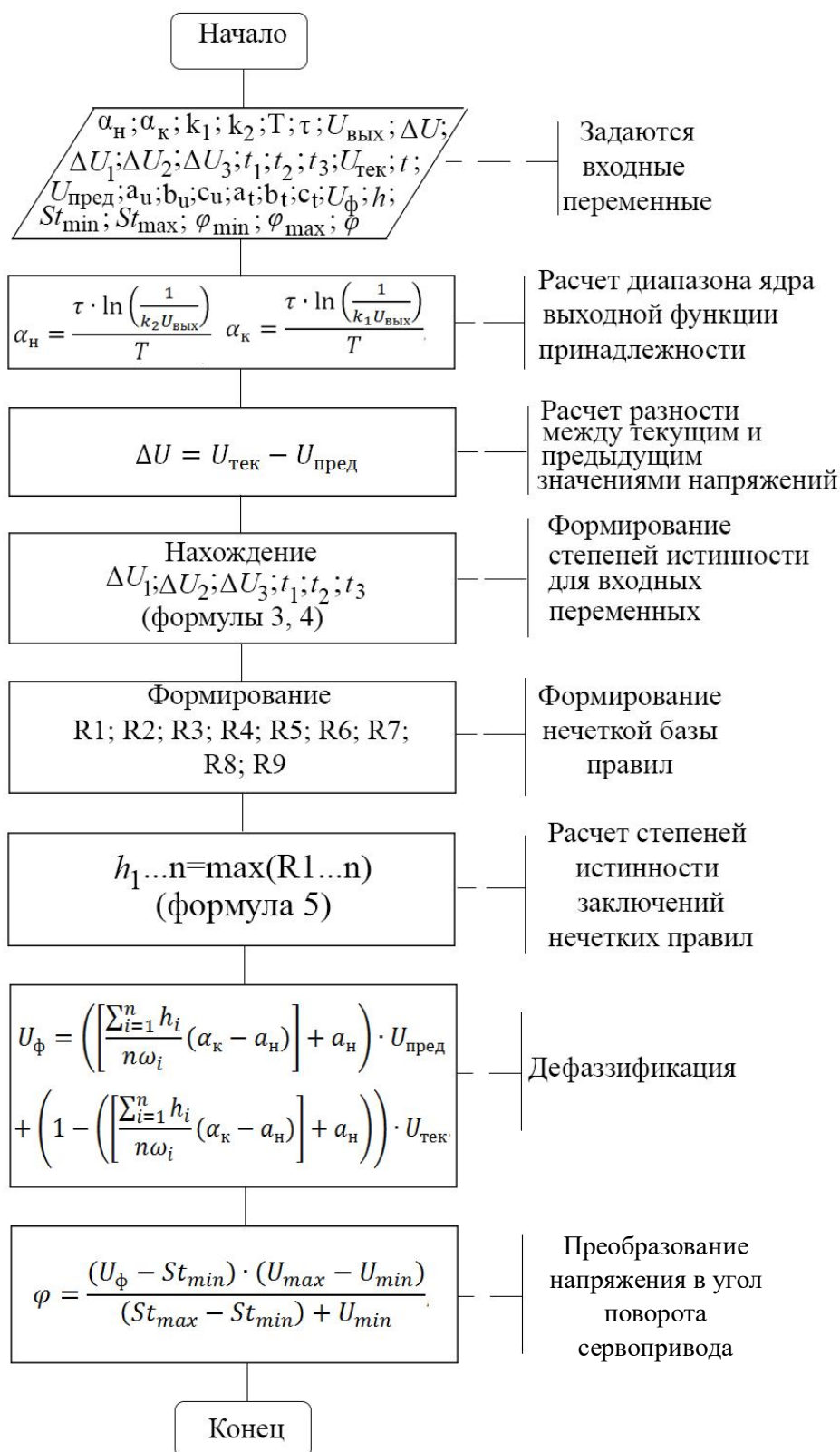


Рис. 1. Алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра

Fig. 1. Fuzzy digital filter operation algorithm

Для определения параметров нечеткого фильтра необходимо сделать следующую последовательность действий.

1. Расчет диапазона ядра выходной функции принадлежности

$$\alpha_H = \frac{\tau \cdot \ln\left(\frac{1}{k_2 U_{\text{ВЫХ}}}\right)}{T}; \quad \alpha_K = \frac{\tau \cdot \ln\left(\frac{1}{k_1 U_{\text{ВЫХ}}}\right)}{T}, \quad (1)$$

где  $T$  – период следования импульса;  $\tau$  – период единичного импульса;  $U_{\text{ВЫХ}}$  –

максимальный выходной сигнал на выходе микроконтроллера ( $U_{\text{ВЫХ}} = 5\text{В}$ );  $k_1$  – коэффициент, учитывающий минимальную точность фильтра (5%);  $k_2$  – коэффициент, учитывающий максимальную точность фильтра (0,01%). На рис. 2 приведен график выходной функции принадлежности, на котором показан диапазон значений  $\alpha_H$  и  $\alpha_K$ , определяющихся по формуле (1).

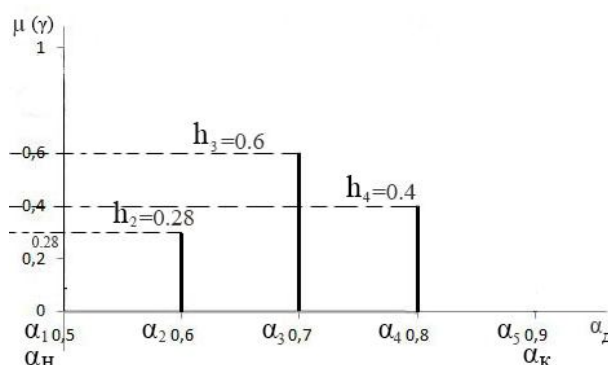


Рис. 2. График выходной функции принадлежности

Fig. 2. Output membership function graph

2. Построение входных функций принадлежности нечеткого фильтра. Первая входная переменная  $\Delta U_p$  – разница между текущим  $U_{\text{тек}}$  и предыдущим  $U_{\text{пред}}$  значениями напряжения, полученного от потенциометра.  $\Delta U_p$  определяется по формуле [10–12]:

$$\Delta U = U_{\text{тек}} - U_{\text{пред}}, \quad (2)$$

Первая входная переменная состоит из трех термов  $\Delta U_{p1} = (\Delta U_1, \Delta U_2, U_3)$ , которые определяются по формуле:

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

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

$$\Delta U_3 = \begin{cases} \frac{\Delta U - b_u}{c_u - b_u}, & b_u \leq \Delta U \leq c_u; \\ 0, & \text{если } a_u < \Delta U < b_u. \end{cases} \quad (3)$$

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 формуле:

$$t_1 = \begin{cases} \frac{b_t - t}{b_t - a_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t; \\ 0, & \text{если } 0 < \Delta U < a_t. \end{cases}$$

$$t_2 = \begin{cases} \frac{t-a_t}{b_t-a_t}, & \text{если } a_t \leq t \leq b_t; \\ \frac{c_t-t}{c_t-b_t}, & \text{если } b_t \leq t \leq c_t. \end{cases} \quad (4)$$

$$t_3 = \begin{cases} \frac{t-b_t}{c_t-b_t}, & b_t \leq t \leq c_t; \\ 0, & \text{если } a_t < \Delta U < b_t. \end{cases}$$

3. Определение базы правил для управления нечеткого цифрового фильтра [13-14].

R1: Если « $\Delta U = \Delta U_1$ » и « $t = t_1$ » То « $\alpha_d = \alpha_5$ »;

R2: Если « $\Delta U = \Delta U_1$ » и « $t = t_2$ » То « $\alpha_d = \alpha_4$ »;

R3: Если « $\Delta U = \Delta U_1$ » и « $t = t_3$ » То « $\alpha_d = \alpha_3$ »;

R4: Если « $\Delta U = \Delta U_2$ » и « $t = t_1$ » То « $\alpha_d = \alpha_4$ »;

R5: Если « $\Delta U = \Delta U_2$ » и « $t = t_2$ » То « $\alpha_d = \alpha_3$ »;

R6: Если « $\Delta U = \Delta U_2$ » и « $t = t_3$ » То « $\alpha_d = \alpha_2$ »;

R7: Если « $\Delta U = \Delta U_3$ » и « $t = t_1$ » То « $\alpha_d = \alpha_3$ »;

R8: Если « $\Delta U = \Delta U_3$ » и « $t = t_2$ » То « $\alpha_d = \alpha_2$ »;

R9: Если « $\Delta U = \Delta U_3$ » и « $t = t_3$ » То « $\alpha_d = \alpha_1$ ».

4. Расчет степеней истинности заключений нечетких правил по формуле:

$$h_1 = \min(\Delta U_1; t_1)$$

$$h_2 = \max(\min(\Delta U_2; t_1); \min(\Delta U_1; t_2)); \quad (5)$$

$$h_3 = \max(\min(\Delta U_3; t_1); \min(\Delta U_2; t_2); \min(\Delta U_1; t_3));$$

$$h_4 = \max(\min(\Delta U_3; t_2); \min(\Delta U_2; t_3));$$

$$h_5 = \min(\Delta U_3; t_3).$$

5. Дефаззификация – расчет четкого значения коэффициента нечеткого цифрового фильтра  $\alpha$  по формуле (6) [15]. Дефаззификация осуществлялась на основе линейного метода отношения площадей [16]. Подробно данный метод рассмотрен в работах [17-18].

$$U_\phi = \left( \left[ \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n \omega_i} (\alpha_k - a_n) \right] + a_n \right) \cdot U_{\text{пред}} + \left( 1 - \left( \left[ \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n \omega_i} (\alpha_k - a_n) \right] + a_n \right) \right) \cdot U_{\text{тек}}. \quad (6)$$

6. Преобразование, полученного напряжения в угол поворота, передаваемого от микроконтроллера на сервоприводы, по формуле:

$$\varphi = \frac{(U_\phi - St_{\min}) \cdot (U_{\max} - U_{\min})}{(St_{\max} - St_{\min}) + U_{\min}}, \quad (7)$$

где  $St_{\min}$ ,  $St_{\max}$  – минимальное и максимальное значения выходного напряжения 0 и 1024, зависит от разрядности аналого-цифрового преобразователя;  $\varphi_{\max}$  и  $\varphi_{\min}$  – максимальное и минимальное значения угла поворота звеньев робота-манипулятора.

Поскольку экспериментальная модель робота-манипулятора имеет четыре звена (левое и правое плечи, платформа основания и захват), то формулы для преобразования напряжения в угол поворота сервопривода для каждого из его звеньев с учетом уравнения (7) будут иметь следующий вид:

– формула для захвата робота-манипулятора

$$\varphi_3 = \varphi_{\min} + \frac{U_\phi \cdot (\varphi_{\max} - \varphi_{\min})}{St_{\max}}, \quad (8)$$

$$\varphi_3 = 105 + U_\phi \cdot 0.034.$$

– формулы для левого и правого плеч робота-манипулятора

$$\varphi_{\text{лп}} = \varphi_{\text{пп}} = \frac{U_\phi \cdot \varphi_{\max}}{St_{\max}},$$

$$\varphi_{\text{лп}} = \varphi_{\text{пп}} = U_\phi \cdot 0.137. \quad (9)$$

– формулы для платформы основания робота-манипулятора

$$\varphi_0 = \frac{U_\phi \cdot \varphi_{\max}}{St_{\max}},$$

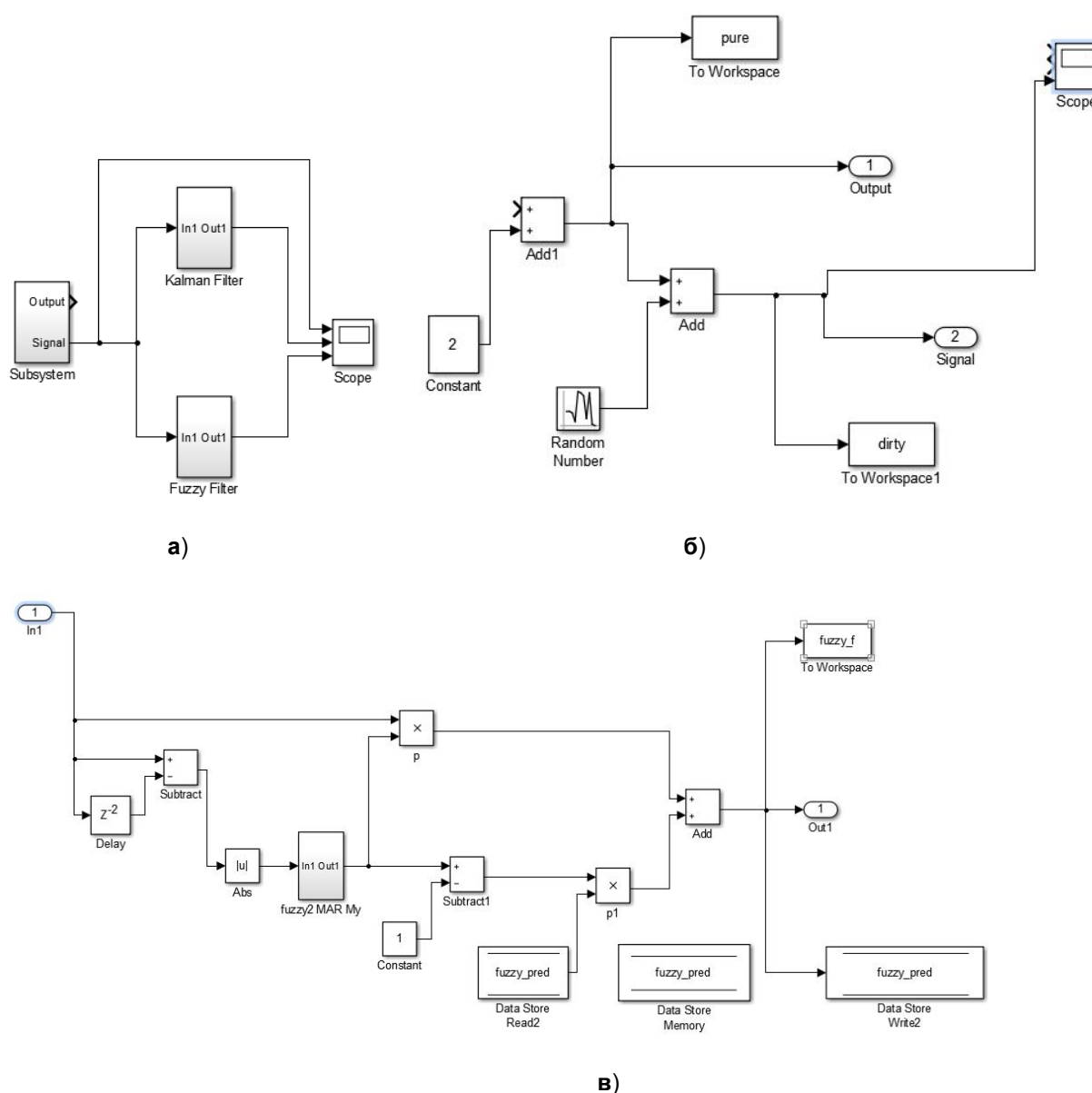
$$\varphi_0 = U_\phi \cdot 0.176. \quad (10)$$

В следующем разделе рассмотрим моделирование работы нечеткого фильтра.

## Результаты и их обсуждение

Во время экспериментальных исследований, проводилось моделирование

нечеткого цифрового фильтра и фильтра Калмана в среде Simulink. На рис. 3 представлена схема разработанной модели [19-20].



**Рис. 3.** Схема разработанной модели: **а** – общая схема; **б** – структура блока «Subsystem»; **в** – структура нечеткого цифрового фильтра

**Fig. 3.** Scheme of the developed model: **a** – general scheme; **b** – the structure of the "Subsystem" block; **v** – structure of a fuzzy digital filter

Блок «fuzzy2 MAR My» реализует дефазификацию на основе линейного метода отношения площадей (формула (6)).

Оценка работы нечеткого фильтра осуществлялась с помощью параметра RMSE (Root Mean Square Error), который определялся по формуле:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=m}^1 (\bar{y}_i - y_i)^2}, \quad (11)$$

где  $m$  – количество измерений в выборке;  
 $\bar{y}_i$  – значение идеального входного значения на данной итерации;  $y_i$  – выходное значение системы на данной итерации.

Расчет RMSE проводился для метода центра тяжести (МЦТ), фильтра

Калмана (ФК) и метода отношения площадей (МОП) при различных значениях весового коэффициента  $\omega$ . Данные сведены в табл. 1.

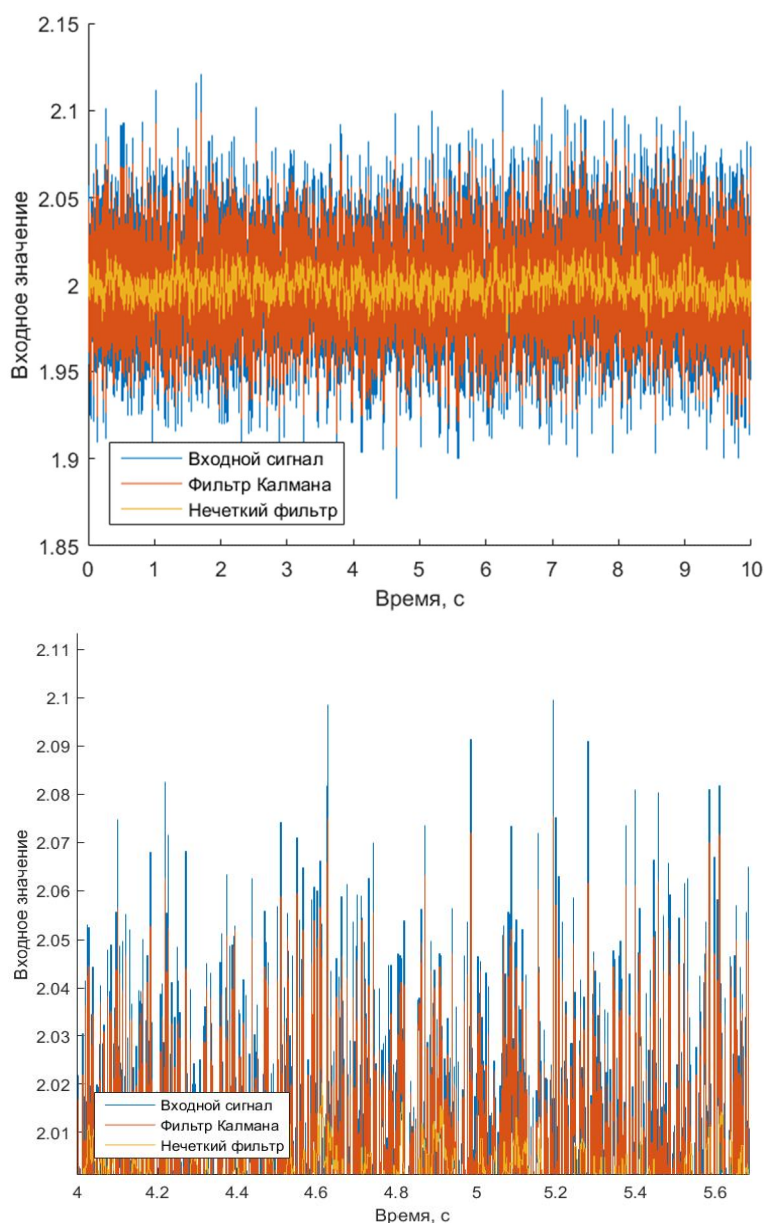
На рис. 4 представлены результаты моделирования нечеткого фильтра и фильтра Калмана с постоянным сигналом с шумом.

**Таблица 1.** Сравнение значений параметра RMSE при варьировании параметра  $\omega$

**Table 1.** Comparison of the RMSE parameter values when the parameter  $\omega$

$\omega$	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3
RMSE МОП	0.0096	0.0092	0.0089	0.0085	0.0082	0.0079	0.0076	0.0073	0.0070
RMSE ФК	0.0261								
RMSE МЦТ	0.0133								
$\omega$	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2
RMSE МОП	0.0067	0.0065	0.0064	0.0063	0.0062	0.0060	0.0055	0.0051	0.0050
RMSE ФК	0.0261								
RMSE МЦТ	0.0133								
$\omega$	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5	
RMSE МОП	0.0049	0.0049	0.0048	0.0049	0.0052	0.0060	0.0078	0.0150	
RMSE ФК	0.0261								
RMSE МЦТ	0.0133								





**Рис. 4.** Результат моделирования фильтра Калмана и нечеткого фильтра с постоянным сигналом с шумом

**Fig. 4.** Simulation result of Kalman filter and fuzzy filter with constant signal with noise

## Выводы

На основании полученных результатов были сделаны выводы:

1. Установлено, что точность нечеткого фильтра на основе оценки параметра RMSE зависит от весового коэффициента  $\omega$  и имеет нелинейную характеристику.

2. Среднеквадратическая ошибка RMSE минимальная при дефаззификации на основе метода отношения площадей. Таким образом, RMSE дефаззификации с методом отношения площадей в 5,43 раза меньше RMSE чем для фильтра Калмана и в 2,77 раза меньше чем для дефаззификатора на основе метода центра тяжести (табл. 1).

3. Наилучшее значение весового коэффициента  $\omega$  при котором средне-квадратическая ошибка RMSE минимальна составляет 4,5 единиц.

4. Использование нечеткого цифрового фильтра сглаживает шумы в электронных устройствах.

В данной статье представлен алгоритм работы нечеткого цифрового фильтра с подробным описанием каждого из этапов алгоритма. Проведено моделирование нечеткого цифрового фильтра

и фильтра Калмана в системе Simulink. Рассчитаны значения RMSE для нечеткого цифрового фильтра с методом отношения площадей и методом центра тяжести, а так же фильтра Калмана. На основании полученных значений был проведен анализ и сделаны выводы об эффективности использования нечеткого цифрового фильтра с дефазификатором, основанном на методе отношения площадей.

### Список литературы

1. Практическое руководство по цифровой обработке сигналов: цифровые фильтры и обработка ЭКГ сигналов / С.Н. Торгаев, И.А. Лежнина, И.Д. Шульга, Е.А. Юрченко, М.В. Тригуб. Томск. 2020. 112 с.
2. Du G., Zhang P., Novel A. Human–Manipulators Interface Using Hybrid Sensors With Kalman Filter and Particle Filter // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016. №38. P. 93-101.
3. Arc Length Stable Method of GTAW Based on Adaptive Kalman Filter / H. Wanga, T. Lei, Y. Ronga, W. Shaoa, Y. Huang // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. P. 1-9. (In Press). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.029>.
4. Амосов О.С. Фильтрация марковских последовательностей на основе байесовского, нейросетевого подходов и систем нечеткой логики при обработке навигационной информации // *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2004. № 4. С. 61–69.
5. Елисеев А.В., Музыченко Н.Ю. Метод адаптивной настройки фильтра Калмана в задаче слежения за динамическим объектом с неизвестным ускорением // *Радиотехника*. 2014. №8 С. 39-44.
6. Yanga Q., SunbL., A fuzzy Complementary Kalman Filter Based on Visual and IMU Data for UAV landing // *Optik*. 2018. №173. P. 279-291.
7. Ngatini, Apriliani E., Nurhadi H. Ensemble and Fuzzy Kalman Filter for Position Estimation of an Autonomous Underwater Vehicle Based on Dynamical System of AUV Motion // *Expert Systems With Applications*. 2017. №68. P. 29-35.
8. 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.
9. Бобырь М.В., Лунева М.Ю., Ноливос К.С.А. Алгоритм функционирования робота-манипулятора // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2018. №7. С. 34-40.

10. 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>.
11. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. №6. С. 21-26.
12. Титов В.С., Бобырь М.В., Милостная Н.А. АСУ прогнозированием точностей обработки деталей // Автоматизация в промышленности. 2008. №4. С. 3-4.
13. Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В. Адаптивный мультисетевой алгоритм нечетко-логического вывода в задачах управления оборудованием с ЧПУ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. №5. С. 18-23.
14. Бобырь М.В., Титов В.С., Милостная Н.А. Прогнозирование работы мехатронных систем на основе мягких нечетких баз знаний // Мехатроника, автоматизация и управление, 2014. №10. С. 8 – 14.
15. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas ratio // Applied Soft Computing. 2017. Vol. 59. P. 19-32.
16. 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. P. 107378.
17. Анализ быстродействующих дефаззификаторов в задаче управления роботом-манипулятором / М.В. Бобырь, Н.А. Милостная, А.Е. Архипов, М.Ю. Лунева // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. Vol.17. №4. P. 18-28.
18. 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.
19. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // Applied Soft Computing. 2020. Vol. 88. P. 106030.
20. 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.

## References

1. Torgaev S.N., Lezhnina I.A., Shulga I.D., Yurchenko E.A., Trigub M.V. *Prakticheskoe rukovodstvo po tsifrovoi obrabotke signalov: tsifrovye fil'try i obrabotka EKG signalov* [A practical guide to digital signal processing: digital filters and ECG signal processing]. Tomsk, 2020. 112 p. (In Russ.).
2. Du G., Zhang P., Novel A. Human – Manipulators Interface Using Hybrid Sensors With Kalman Filter and Particle Filter. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, no. 38, pp. 93-101.

3. Wang H., Lei T., Rong Y., Shao W., Huang Y. Arc Length Stable Method of GTAW Based on Adaptive Kalman Filter. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, pp.1-9 (In Press). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.029>.

4. Amosov O.S. Fil'tratsiya markovskikh posledovatel'nostei na osnove baiesovskogo, neirosetevogo podkhodov i sistem nechetkoi logiki pri obrabotke navigatsionnoi informatsii [Filtration of Markov sequences based on Bayesian, neural network approaches and fuzzy logic systems in the processing of navigation information]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya = Izvestiya RAN. Theory and Control Systems*, 2004, no. 4, pp. 61–69 (In Russ.).

5. Eliseev A.V., Muzychenko N. Yu. Metod adaptivnoi nastroiки fil'tra Kalmana v zadache slezheniya za dinamicheskim ob'ektom s neizvestnym uskoreniem [The method of adaptive tuning of the Kalman filter in the problem of tracking a dynamic object with unknown acceleration]. *Radiotekhnika = Radiotekhnika*, 2014, no. 8, pp. 39-44 (In Russ.).

6. Yanga Q., Sunb L., A Fuzzy Complementary Kalman Filter Based on Visual and IMUD atafor UAV landing. *Optik*, 2018, no. 173, pp. 279-291.

7. Ngatini, Apriliani E., Nurhadi H. Ensemble and Fuzzy Kalman Filter for Position Estimation of an Autonomous Underwater Vehicle Based on Dynamical System of AUV Motion. *Expert Systems With Applications*, 2017, no. 68, pp. 29-35.

8. 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 robot arm]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2019, vol. 40, no. 4, pp. 244 - 250 (In Russ.).

9. Bobyr M.V., Luneva M.Yu., Nolivos K.S.A. Algoritм funktsionirovaniya robota-manipulyatora [Algorithm of functioning of a robotic manipulator]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyer = Industrial ACS and Controllers*, 2018, no. 7, pp. 34-40 (In Russ.).

10. 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> (In Russ.).

11. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Algoritм vysokoskorostnoi obrabotki detalei na osnove nechetkoi logiki [Algorithm for high-speed machining of parts based on fuzzy logic]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2012, no. 6, pp. 21-26 (In Russ.).

12. Titov V.S., Bobyr M.V., Milostnaya N.A. ASU prognozirovaniem tochnosti obrabotki detalei [ACS for predicting the accuracy of parts processing]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*, 2008, no. 4, pp. 3-4 (In Russ.).

13. Titov V.S., Bobyr M.V., Antsiferov A.V. Adaptivnyi mul'tisetevoi algo-ritm nechetko-logicheskogo vyvoda v zadachakh upravleniya oborudovaniem s ChPU [An adaptive multi-network fuzzy inference algorithm in problems of controlling equipment with

CNC]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, 2013, no. 5, pp. 18-23 (In Russ.).

14. Bobyr M.V., Titov V.S., Milostnaya N.A. Prognozirovanie raboty mekhatronnykh sistem na osnove myagkikh nechetkikh baz znaniy [Forecasting 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. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas ratio. *Applied Soft Computing*, 2017, no.59, pp. 19-32.

16. 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, pp. 107378.

17. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Arkhipov A.E., Luneva M.Yu. Analiz bystro-deistvuyushchikh defazzifikatorov v zadache upravleniya robotom-manipulyatorom [Analysis of high-speed defuzzifiers in the problem of controlling a robotic manipulator]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* = *Bulletin of Computer and Information Technologies*, 2020, vol. 17, no.4, pp. 18-28 (In Russ.).

18. Bobyr M.V., Kulabukhov S.A., Milostnaya N.A. Obuchenie neuro-nechetkoi sistemy na osnove metoda raznosti ploshchadei [Teaching 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.).

19. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*, 2020, vol. 88, pp. 106030.

20. Bobyr M.V., Arkhipov A.E., Milostnaya N.A. Metod rascheta karty glubin na osnove myagkikh operatorov [Method for calculating depth maps based on soft operators]. *Sistemy i sredstva informatiki* = *Systems and Means of Informatics*, 2019, vol.29, no. 2, pp. 71-84 (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>

**Лунева Марина Юрьевна**, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: marinok-l@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5774-4487>

**Marina Yu. Luneva**, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: marinok-l@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5774-4487>