

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 681.2.088

doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-6

Исследование влияния параметров критических элементов и параметров Σ T-аналога-цифрового преобразователя на линейность функции преобразования

В. Н. Ашанин¹, А. А. Коротков²

¹Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов, Пенза, Россия

¹ashanin58@yandex.ru, ²lexifer@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Многочисленные исследования показали, что одним из критических элементов малоразрядных интегрирующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) является конденсатор, входящий в состав интегратора, диэлектрическая абсорбция которого ограничивает предельно достижимую линейность функции преобразования. Актуальность исследования его влияния сегодня определяется в связи с разработкой многоразрядных интегрирующих аналого-цифровых преобразователей Σ -архитектуры, в которых осуществляется суммирование результатов преобразования примыкающих частных циклов за полный цикл. Выполнение операции суммирования частных и полного циклов преобразования приводит за счет их асинхронизма к возникновению методической составляющей погрешности от краевых эффектов, что ведет к неравенству интегральных значений преобразуемого и опорного напряжений за полный цикл преобразования. *Материалы и методы.* Эти вопросы исследованы на основе разработанного Σ T-АЦП с помощью имитационного моделирования в среде NI Multisim. Проведено экспериментальное исследование и получены значения среднеквадратического отклонения (СКО) линейности функции преобразования АЦП с применением идеального интегрирующего конденсатора, а также с добавлением в модель схемы замещения интегрирующего конденсатора с рядом значений коэффициента абсорбции. Дана оценка работоспособности алгоритма и проведен анализ влияния коэффициента абсорбции на итоговый результат преобразования при различных количествах частных тактов в полном цикле. *Результаты.* Исследованы погрешности линейности функции преобразования с учетом влияния диэлектрической абсорбции, достигнутой включением элементов схемы замещения интегрирующего конденсатора в модель преобразователя. Рассчитаны значения СКО линейности преобразования при различных количествах частных тактов в пол-

ном цикле преобразования. *Выводы.* Полученные значения СКО указывают на способность предложенного структурно-алгоритмического решения полностью устранить влияние инструментальной составляющей погрешности, вызванной явлениями диэлектрической абсорбции в интегрирующем конденсаторе. При всех значениях количества частных тактов преобразования в полном цикле абсорбционные явления не оказывают влияния на итоговый результат преобразования. При всех значениях коэффициента абсорбции среднеквадратичная погрешность линейности функции преобразования Σ T-АЦП остается неизменной.

Ключевые слова: диэлектрическая абсорбция конденсатора, интегрирующий аналого-цифровой преобразователь, Σ -архитектура, Σ T-АЦП, погрешность линейности

Для цитирования: Ашанин В. Н., Коротков А. А. Исследование влияния параметров критических элементов и параметров Σ T-аналога-цифрового преобразователя на линейность функции преобразования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 67–74. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-6

Studying the influence of critical parameters and elements of the Σ T-analog-to-digital converter on the linearity of the conversion function

V.N. Ashanin¹, A.A. Korotkov²

¹Penza State University, Penza, Russia

²Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

¹ashanin58@yandex.ru, ²lexifer@mail.ru

Abstract. *Background.* Numerous studies have shown that one of the critical elements of low-bit integrating analog-to-digital converters (ADC) is a capacitor included in the integrator, the dielectric absorption of which limits the maximum achievable linearity of the conversion function. The relevance of studying its influence today is determined in connection with the development of multi-bit integrating analog-to-digital converters of the Σ -architecture, in which the summation of the conversion results of adjacent partial cycles is carried out for a full cycle. The execution of the operation of summation of partial and full conversion cycles leads to the emergence of a methodical component of the error from edge effects due to their asynchronism, which can lead to inequality of the integral values of the converted and reference voltages for a full conversion cycle. *Materials and methods.* These issues are investigated based on the developed Σ T-ADC using simulation modeling in the NI Multisim environment. An experimental study was conducted and the values of the root mean square deviation (RMS) of the linearity of the ADC conversion function were obtained using an ideal integrating capacitor, as well as with the addition of an integrating capacitor equivalent circuit with a number of absorption coefficient values to the model. The algorithm performance was assessed and the effect of the absorption coefficient on the final conversion result was analyzed for different numbers of partial cycles in a full cycle. *Results.* The study of the linearity error of the conversion function was conducted taking into account the effect of dielectric absorption achieved by including elements of the equivalent circuit of the integrating capacitor in the converter model. The values of the RMS of the conversion linearity were calculated for different numbers of partial cycles in a full conversion cycle. *Conclusions.* The obtained RMS values indicate the ability of the proposed structural and algorithmic solution to completely eliminate the influence of the instrumental component of the error caused by dielectric absorption phenomena in the integrating capacitor. For all values of the number of partial conversion cycles in a full cycle, absorption phenomena do not affect the final conversion result. For all values of the absorp-

tion coefficient, the mean square error of the linearity of the Σ T-ADC conversion function remains unchanged.

Keywords: dielectric absorption of a capacitor, integrating analog-to-digital converter, Σ -architecture, Σ T-ADC, linearity error

For citation: Ashanin V.N., Korotkov A.A. Studying the influence of critical parameters and elements of the Σ T-analog-to-digital converter on the linearity of the conversion function. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):67–74. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-6

Введение

Интегрирующие аналого-цифровые преобразователи (ИАЦП), обладая высокой помехоустойчивостью и точностью преобразования представляют широкий класс прецизионных преобразователей информации для решения различных инженерных задач [1, 2]. В них применяются различные виды промежуточной импульсной модуляции [3], обладающие определенными достоинствами и недостатками. В частности, в работах [4, 5], рассмотрена целесообразность применения в измерительных многоразрядных ИАЦП промежуточного преобразования в широтно-импульсный модулированный (ШИМ) сигнал, обеспечивающий независимость результата измерения в каждом полном цикле преобразования, получивших название Σ T-АЦП.

Любому измерительному аналого-цифровому преобразователю (АЦП) присущи инструментальная и методическая составляющие погрешности. Методы снижения методической составляющей в Σ T-АЦП описаны в работах [6, 7]. Важной составляющей инструментальной погрешности является абсорбция интегрирующего конденсатора, влияющая на линейность функции преобразования. В работе [3] проведено исследование ее влияния аналитическим способом и представлены алгоритмы и схемотехнические решения малоразрядных ИАЦП, в которых она теоретически отсутствует полностью. Полученные результаты обеспечивают возможность их использования в составе измерительных преобразователей напряжения в многоразрядный код. Один из перспективных предложенных технических решений Σ T-АЦП исследуем с помощью современных технологий компьютерного моделирования и оценим влияние абсорбции интегрирующего конденсатора и количества частных циклов в полном цикле на точность преобразования.

Разработка модели Σ T-аналого-цифрового преобразователя в среде NI Multisim

На основе разработанной функциональной схемы ИАЦП с промежуточным преобразованием напряжения в ШИМ-сигнал [6] (рис. 1) спроектирована компьютерная модель Σ T-АЦП (рис. 2) в программной среде Multisim. Данная среда дает возможность пользователю установить значения большинства параметров элементов модели, что позволяет реализовывать, по своей сути, виртуальный прототип. Это дает возможность манипулировать различными параметрами элементов и тем самым исследовать инструментальную погрешность измерительного преобразователя как от влияния параметров отдельного элемента, так и комплексно.

Используемый алгоритм промежуточного преобразователя напряжения в ШИМ-сигнал основан на равенстве средних (интегральных) значений пре-

образуемого и опорного напряжений за время частного такта преобразования [3], что обеспечивает нулевое значение интегрального значения напряжения на выходе интегратора за время частного цикла преобразования. Это теоретически исключает влияние диэлектрической абсорбции на результат преобразования за время частного такта [3, 7], однако за счет асинхронности начала и конца полного цикла преобразования с началом и концом первого и последнего из суммируемых результатов частных тактов возможно ненулевое интегральное значение напряжения на выходе интегратора за полный цикл преобразования.

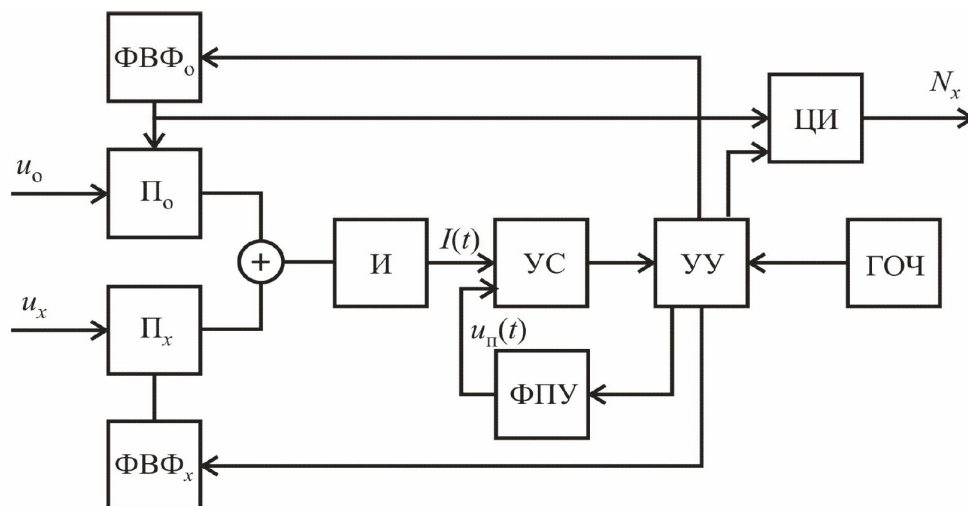


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема ИАЦП; ФВФ_x и ФВФ₀ – формирователи весовых функций для входного u_x и для опорного u_0 напряжений;

Π_x и Π_0 – умножители входного напряжения u_x на весовую функцию $g_x(t)$ и опорного напряжения U_0 на весовую функцию $g_0(t)$; И – аналоговый интегратор;

УС – устройство сравнения по уровню выходного напряжения интегратора с пороговым уровнем $u_{п}$, который формируется блоком ФПУ – формирователем порогового уровня; УУ – устройство управления для формирования полного и частных циклов преобразования; ЦИ – цифровой интегратор, предназначенный для подсчета импульсов цифрового эквивалента информативного сигнала;

ГОЧ генерирует импульсы опорной частоты, которые используются для синхронизации выполняемых операций в ИАЦП и заполнения информативных интервалов времени выходного ШИМ-сигнала

Интегратор реализован по схеме Миллера [8, 9] с использованием элементов $R1$, $R2$, $C1$. Важную роль в модуляторе играет интегрирующий конденсатор $C1$, который накапливает заряд, пропорциональный входному сигналу в течение интервала интегрирования. Диэлектрическая абсорбция данного конденсатора является важным фактором, влияющим на точность и стабильность работы модулятора. Элементы $C2$, $R7$, $R8$ реализуют эквивалентную схему замещения диэлектрической абсорбции интегрирующего конденсатора $C1$ (рис. 3) [10, 11]. Значения этих элементов были рассчитаны в соответствии с имитируемым значением коэффициента абсорбции из ряда – 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1.

Абсорбция в диэлектрике интегрирующего конденсатора приводит к медленному восстановлению заряда конденсатора с постоянной времени,

определяемой C_a и R_a , что может вносить дополнительную погрешность в результаты преобразований при суммировании результатов частных циклов преобразования за полный цикл.

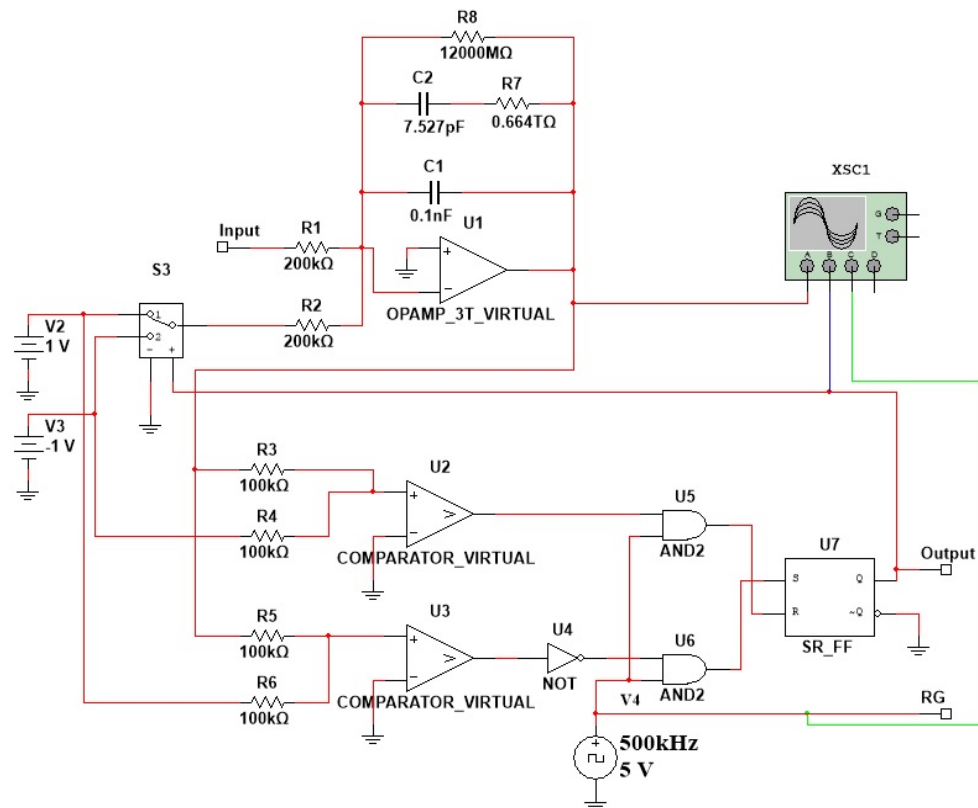


Рис. 2. Модель широтно-импульсного модулятора

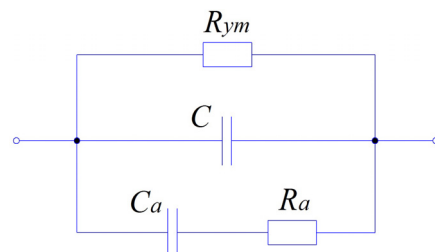


Рис. 3. Схема замещения интегрирующего конденсатора:
 C – емкость идеализированного конденсатора; C_a и R_a – емкость и сопротивление абсорбции; R_{yt} – сопротивление утечек

Для минимизации влияния явлений диэлектрической абсорбции в интегрирующих конденсаторах на итоговый результат преобразования при проектировании различных вариантов АЦП используются следующие методы:

- выбор конденсаторов, содержащих диэлектрические материалы с низкой абсорбцией (полистирол, полипропилен);
- использование малых напряжений заряда/разряда конденсатора;
- применение малогабаритных конденсаторов;

- использование схемных методов компенсации абсорбционных токов;
- термостатирование интегрирующего конденсатора;
- применение специальных методов калибровки АЦП для учета диэлектрической абсорбции.

Отметим, что низким уровнем диэлектрических потерь, высокой стабильностью и низким температурным коэффициентом емкости, что важно для обеспечения высокой точности интегрирования, обладают пленочные конденсаторы, среди которых выделяются:

- полипропиленовые конденсаторы;
- полиэтилентерефталатные конденсаторы;
- полистирольные конденсаторы.

Выбор конкретного типа конденсатора зависит от требований к точности, стабильности, температурному диапазону работы и другим параметрам, предъявляемым к интегрирующему АЦП.

Исследование влияния диэлектрической абсорбции интегрирующего конденсатора

Проведено экспериментальное исследование, в ходе которого получены значения среднеквадратического отклонения (СКО) линейности функции преобразования АЦП в единицах младшего разряда без учета диэлектрической абсорбции интегрирующего конденсатора, а также с добавлением в модель схемы замещения интегрирующего конденсатора с рядом значений коэффициента абсорбции – 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1. Для определения значения СКО линейности ΣT -АЦП были выполнены с помощью логического анализатора измерения показаний выходного кода в заданном диапазоне входного напряжения (минус 1...плюс 1) В с шагом 0,05 В при различных значениях количества частных тактов в полном цикле.

Полученные значения в единицах младшего значащего разряда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения СКО

Коэффициент абсорбции интегрирующего конденсатора	Количество частных тактов модуляции в полном цикле преобразования		
	10	100	1000
	Среднеквадратичная погрешность ΣT -АЦП		
0	2,0311	0,4016	0,1304
0,01	2,0311	0,4016	0,1304
0,03	2,0311	0,4016	0,1304
0,05	2,0311	0,4016	0,1304
0,07	2,0311	0,4016	0,1304
0,1	2,0311	0,4016	0,1304

Реализуемая модель не содержит подсистему коррекции погрешности от краевых эффектов [3] и данная составляющая погрешности с полным весом входит в результат преобразования, что видно из сопоставления результатов преобразования среднеквадратической погрешности при различных значениях количества частных циклов в полном цикле. При использовании предлагаемых методов коррекции этой составляющей погрешности [5, 6] по-

грешность преобразования не зависит от количества частных тактов и ограничивается значением единицы младшего разряда.

Заключение

Приведенные значения СКО указывают на способность данного структурно-алгоритмического решения полностью устранить влияние инструментальной составляющей погрешности, вызванной диэлектрической абсорбцией в интегрирующем конденсаторе. При всех трех установках количества частных тактов преобразования в полном цикле абсорбционные явления не оказывают воздействия на итоговый результат преобразования. При всех значениях коэффициента абсорбции среднеквадратичная погрешность линейности $\Sigma\Delta$ -АЦП остается неизменной и определяется только количеством частных тактов за полный цикл преобразования. Как показали экспериментальные исследования $\Sigma\Delta$ -АЦП, для обеспечения погрешности измерения менее одного младшего значащего разряда необходимо произвести суммирование около 50 частных тактов за полный цикл преобразования.

Список литературы

1. Ашанин В. Н. Analysis and Synthesis Theoretical Problems of the Measurement on Heterogeneous Structure // Датчики и системы. 2011. № 7. С. 2–7.
2. Ашанин В. Н., Коротков А. А., Чувькин Б. В., Сидорова И. А. Анализ состояния и тенденций производства интегральных преобразователей информации $\Sigma\Delta$ -архитектуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 1. С. 26–35.
3. Ашанин В. Н., Чувькин Б. В., Шахов Э. К. Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования : монография. Пенза : ИИЦ ПГУ, 2009. 214 с.
4. Шахов Э. К., Ашанин В. Н., Надеев А. И. Реализация концепций $\Sigma\Delta$ -АЦП в интегрирующих АЦП с другими видами импульсной модуляции // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2006. № 6. С. 226–236.
5. Ashanin V. N., Korotkov A. A. Development of Sigma-T ADC with Analogue Compensation of Error Caused by Edge Effects // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2017). 2017. P. 7998567.
6. Ашанин В. Н. Структурно-алгоритмические методы компенсации погрешности от краевых эффектов в интегрирующих АЦП // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2009. № 4. С. 82–92.
7. Шахов Э. К., Михотин В. Д. Интегрирующие развертывающие преобразователи. М. : Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
8. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М. : Энергия, 1976. 396 с.
9. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л. : Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
10. Берзан В. П., Геликман Б. Ю., Гураевский М. Н. [и др.]. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. М. : Энергоатомиздат, 1987. 656 с.
11. Горячева Г. А., Добромислов Е. Р. Конденсаторы : справочник. М. : Радио и связь, 1984. 88 с.

References

1. Ashanin V.N. Analysis and Synthesis Theoretical Problems of the Measurement on Heterogeneous Structure. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2011;(7):2–7. (In Russ.)
2. Ashanin V.N., Korotkov A.A., Chuvykin B.V., Sidorova I.A. Analysis of the state and production trends of integral transformers of information technologies $\Sigma\Delta$ -

- architectural. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2014;(1):26–35. (In Russ.)
3. Ashanin V.N., Chuvykin B.V., Shakhov E.K. *Teoriya integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya: monografiya* = *Theory of integrating analog-to-digital conversion: monograph*. Penza: IITs PGU, 2009:214. (In Russ.)
 4. Shakhov E.K., Ashanin V.N., Nadeev A.I. Implementation of the concept of $\Sigma\Delta$ -ADC in integrated ADC with other types of pulsed modulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region = University proceedings. Volga region*. 2006;(6):226–236. (In Russ.)
 5. Ashanin V.N., Korotkov A.A. Development of Sigma-T ADC with Analogue Compensation of Error Caused by Edge Effects. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2017)*. 2017:7998567.
 6. Ashanin V.N. Structural-algorithmic methods of error compensation from edge effects in integrating ADCs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki*. = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2009;(4):82–92. (In Russ.)
 7. Shakhov E.K., Mikhotin V.D. *Integriruyushchie razvertyvayushchie preobrazovateli* = *Integrating deploying converters*. Moscow: Energoatomizdat, 1986:144. (In Russ.)
 8. Martyashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M. *Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya* = *Electrical parameter converters for control and measurement systems*. Moscow: Energiya, 1976:396. (In Russ.)
 9. Gutnikov V.S. *Integral'naya elektronika v izmeritel'nykh ustroystvakh* = *Integrated electronics in measuring devices*. Leningrad: Energoatomizdat, 1988:304. (In Russ.)
 10. Berzan V.P., Gelikman B.Yu., Guraevskiy M.N. et al. *Elektricheskie kondensatory i kondensatornye ustanovki* = *Electric capacitors and capacitor units*. Moscow: Energoatomizdat, 1987:656. (In Russ.)
 11. Goryacheva G.A., Dobromyslov E.R. *Kondensatory: spravochnik* = *Capacitors: reference*. Moscow: Radio i svyaz', 1984:88. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Василий Николаевич Ашанин

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электроэнергетики
и электротехники, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ashanin58@yandex.ru

Vasily N. Ashanin

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of electric power engineering and electrical
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Александрович Коротков

кандидат технических наук,
инженер конструктор 2-й категории,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)

E-mail: lexifer@mail.ru

Aleksey A. Korotkov

Candidate of engineering sciences,
design engineer of the 2nd category,
Research Institute of Electronic
and Mechanical Devices (44 Karakozova
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 06.12.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 18.02.2025

Принята к публикации / Accepted 02.03.2025