

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСТРОЙСТВА ПО КОСВЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ

М. А. Савин¹, А. К. Гришко², В. Д. Зуев³, И. И. Кочегаров⁴, Е. М. Соловьева⁵

¹ Мытищинский научно-исследовательский институт
радиоизмерительных приборов, Мытищи, Московская обл., Россия
^{2, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³ Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия
¹ savin@mniirip.ru, ² alexey-grishko@rambler.ru, ³ vdzuev@yandex.ru, ^{4, 5} kipra@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* По результатам анализа отказов электроники, 90 % отказов происходят по весьма ограниченному количеству типов отказавших составных компонентов. Возможные причины отказов этих типов компонентов легко поддаются анализу. В работе рассматриваются широко применяемые в современной аппаратуре элементы – полевые транзисторы. Проводится анализ статистических данных по причинам отказов, направленный на определение работоспособного состояния устройства. *Материалы и методы.* Для решения поставленных задач применяются методы системного анализа, теории надежности, физики полупроводников. *Результаты.* В условиях стабильного режима работы (постоянная частота переключения, скважность, протекающий ток, температура окружающей среды) температура транзистора может использоваться как параметр, отражающий сопротивление канала и другие деградационные процессы (увеличение тока утечки, увеличение длительности процесса переключения). При этом необходимо учитывать зависимость сопротивления канала от температуры. *Выводы.* На основе приведенных в работе данных при разработке устройств целесообразно создавать систему регистрации ключевых параметров, позволяющую в режиме реального времени отслеживать условия эксплуатации и с их учетом прогнозировать остаточный ресурс электронного блока.

Ключевые слова: отказ, надежность, температура, транзистор, ресурс, модель

Финансирование. Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Повышение точности интеллектуального прогнозирования надежности электронной аппаратуры и техники при критических внешних воздействиях факторов» (Соглашение № 22-29-20318) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Для цитирования: Савин М. А., Гришко А. К., Зуев В. Д., Кочегаров И. И., Соловьева Е. М. Анализ отказов полевых транзисторов при контроле работоспособности устройства по косвенным параметрам // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 91–97. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-10

ANALYSIS OF FAILURES OF FIELD-EFFECT TRANSISTORS WHEN MONITORING THE OPERABILITY OF THE DEVICE BY INDIRECT PARAMETERS

M.L. Savin¹, A.K. Grishko², V.D. Zuev³, I.I. Kochegarov⁴, E.M. Solov'eva⁵

¹ Mytishchi Research Institute of Radio Measuring Instruments, Mytishchi, Moscow region, Russia
^{2, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia

³ Scientific and Research Institute of Electronic and Mechanic Instruments, Penza, Russia
¹ savin@mniirip.ru, ² alexey-grishko@rambler.ru, ³ vdzuev@yandex.ru, ^{4, 5} kipra@mail.ru

Abstract. *Background.* According to electronics failure analysis, 90 % of failures occur in a very limited number of failed component types. Possible causes of failures of these types of components are easy to analyze. The paper considers elements widely used in modern equipment – field-effect transistors. The analysis of statistical data on the causes of failures is carried out, aimed at determining the operable state of the device. *Materials and methods.* Methods of system analysis, reliability theory, and semiconductor physics are used to solve the set tasks. *Results.* Under conditions of stable operation (constant switching frequency, duty cycle, flowing current, ambient temperature), the transistor temperature can be used as a parameter reflecting the channel resistance and other degradation processes

(increase in leakage current, increase in the duration of the switching process). In this case, it is necessary to take into account the dependence of the channel resistance on temperature. *Conclusions.* On the basis of the data presented in the work, when developing devices, it is advisable to create a system for recording key parameters that allows real-time monitoring of operating conditions and, taking them into account, predicting the remaining life of the electronic unit.

Keywords: failure, reliability, temperature, transistor, resource, model

Acknowledgments. The article was prepared within the framework of the project "Improving the accuracy of intelligent forecasting of the reliability of electronic equipment and equipment under critical external influencing factors" (Agreement No. 22-29-20318) with the financial support of the Russian Science Foundation.

For citation: Savin M.L., Grishko A.K., Zuev V.D., Kochegarov I.I., Solov'eva E.M. Analysis of failures of field-effect transistors when monitoring the operability of the device by indirect parameters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):91–97. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-10

Введение

Силовой транзистор – ключевой элемент любого импульсного источника питания. Его надежность во многом определяет надежность устройства в целом. Использование транзистора с лучшими параметрами зачастую позволяет в разы уменьшить выделяемую устройством мощность, а следовательно, уменьшить требования к теплоотводу и снизить тепловыделение устройства, что положительно сказывается на надежности. При этом даже незначительное отклонение параметров транзистора за указанные в документации нормы способно привести к катастрофическим последствиям, вплоть до полного выхода устройства из строя.

В настоящее время в силовой электронике широчайшее распространение получили полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) (рис. 1). Их применение позволяет минимизировать потери мощности и повысить эффективность устройства.

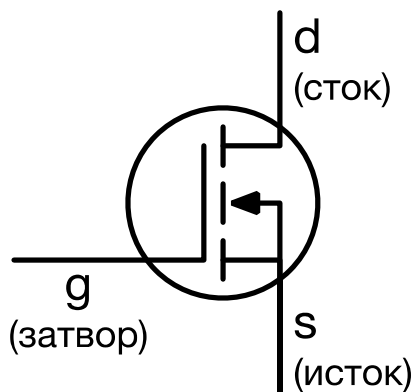


Рис. 1. Условное обозначение *n*-канального полевого транзистора с изолированным затвором

Как было показано в ряде работ, большинство видов постепенных отказов различной природы проявляются одинаково – в виде деградации основных электрических параметров транзистора [1–3]. Выделим параметры, которые возможно использовать в качестве показателей работоспособности компонента.

Анализ отказов транзистора – напряжение пробоя сток-исток V_{ds}

Напряжение пробоя определяется как значение напряжения при закрытом состоянии транзистора, при котором значение тока сток-исток превышает заданную величину, типовое значение – 1 мА. Альтернативный параметр, отражающий те же зависимости, но более подходящий для экспериментальных измерений – ток утечки. Ток утечки – это значение тока сток-исток в выключенном состоянии при фиксированном значении напряжения. Экспериментальные данные показывают, что вследствие процессов деградации в течение срока службы транзистора напряжение пробоя уменьшается, а ток утечки, соответственно, увеличивается. Результаты, полученные в одной из работ, представлены в табл. 1 [4].

Таблица 1

Результаты исследований

Номер образца	Ток утечки I_{ds_leak} при напряжении $V_{ds} = 25$ В, мкА	Сопротивление закрытого перехода, R_{ds_off} , кОм	Продолжительность эксперимента, часов
2	170	120	1750
14	1700	12	1053
16	650	31	1223
17	Короткое замыкание	0	750
20	1700	12	1695
24	32	630	958
25	280	71	962
26	880	23	1099
27	690	29	1210
Новый транзистор	<1	∞	0

Эти данные показывают, что ток утечки во время эксплуатации может значительно увеличиваться относительно указанного в технической документации, а напряжения пробоя, соответственно, значительно уменьшаться. Это приводит к следующему:

- снижается электрическая прочность устройства, что может привести к пробоя даже при номинальных значениях напряжения;
- увеличивается рассеиваемая мощность из-за больших потерь в закрытом состоянии, что приводит к увеличению температуры транзистора.

Анализ отказов транзистора – напряжение включения (пороговое напряжение) V_{gs_on}

Пороговое напряжение – это значение напряжения затвор-исток V_{gs} , при котором ток I_{ds} увеличивается до некоторого фиксированного значения, обычно используется значение 250 мкА. Дegradaция транзистора проявляется в увеличении значения этого напряжения (рис. 2) [5]. Это приводит к увеличению времени включения и, соответственно, к увеличению потерь мощности при переключении, что вызывает увеличение температуры транзистора.

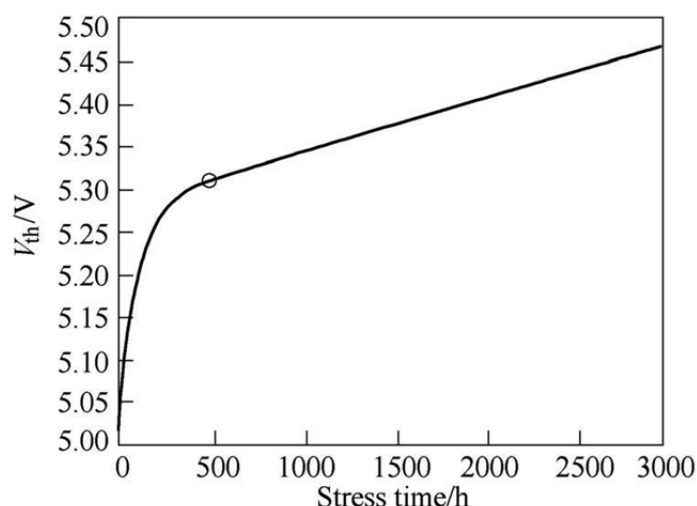


Рис. 2. Увеличение порогового напряжения вследствие деградации

Анализ отказов транзистора – сопротивление открытого канала R_{ds_on}

Сопротивление открытого канала – важнейший параметр полевого транзистора. На него оказывают влияние практически все механизмы отказа [1, 3]:

- повреждение от статического разряда (частичное);
- воздействие тока или напряжения, превышающее допустимые значения;
- нарушение контакта распаянных проводов от кристалла к корпусу из-за температурного или механического воздействия;

- расслоение кристалла из-за температурного или механического воздействия;
- снижение подвижности носителей заряда.

Все механизмы при этом имеют однонаправленное влияние – при деградации R_{ds} увеличивается вне зависимости от воздействующего фактора. Наглядно данная зависимость представлена на рис. 3 для группы из шести тестируемых транзисторов. На рис. 4 представлено измеренное значение канала для образца 36 и построенное на основе экспериментальных данных усредненное значение.

Данный параметр также чрезвычайно важен для правильной работы схемы. Увеличение сопротивления канала приводит к резкому увеличению выделяемой мощности и нагреву транзистора, что приводит к еще более быстрому процессу деградации.

Стоит отметить, что начальное значение сопротивления канала может варьироваться в широких пределах вследствие технологического доступа, однако его максимально допустимое значение является строго определенным в технической документации. Таким образом, для оценки деградации необходимо говорить об изменении сопротивления канала ΔR_{ds} .

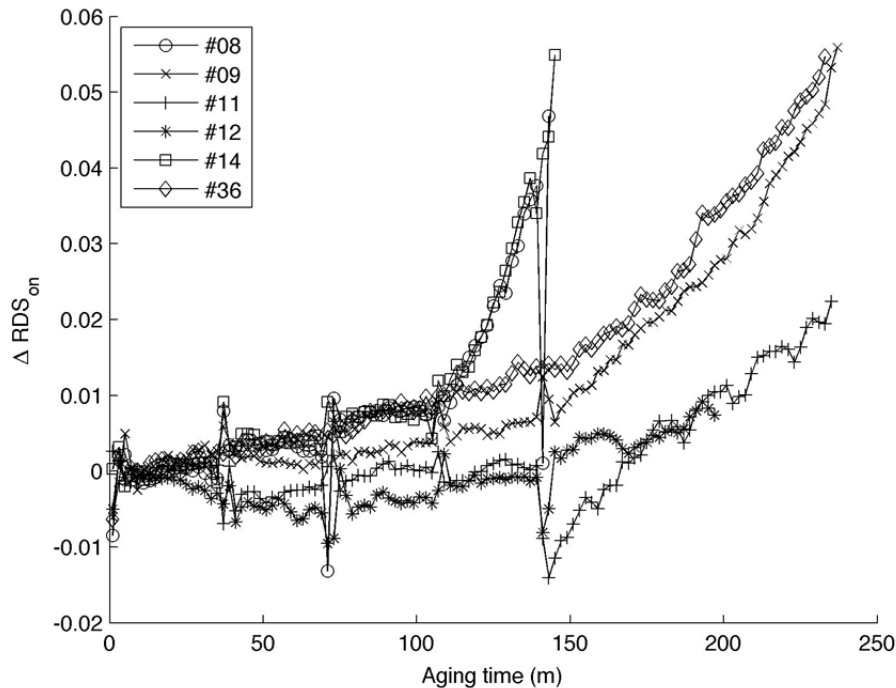


Рис. 3. Изменение R_{ds} вследствие деградации для группы из шести транзисторов

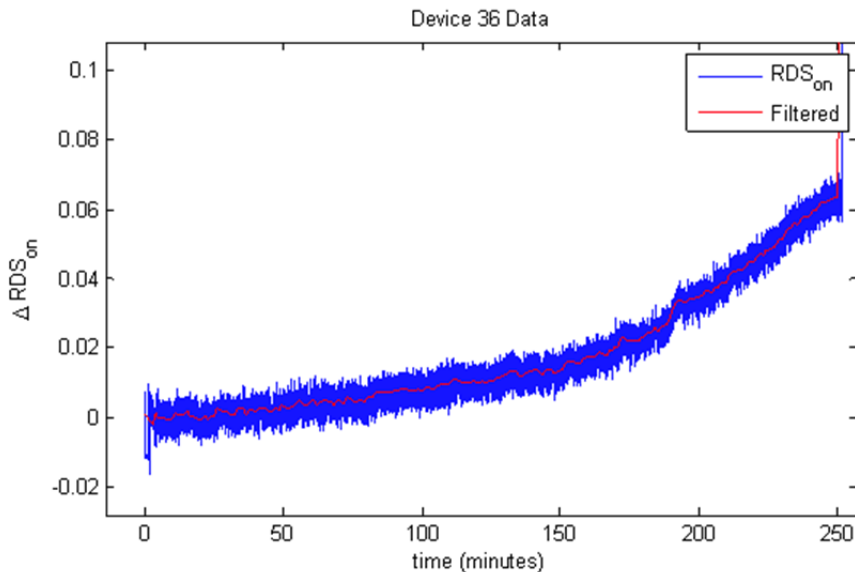


Рис. 4. Изменение R_{ds} вследствие деградации транзистора 36 и усредненное значение

Как видно из рис. 3 и 4, зависимость изменения сопротивления канала ΔR_{ds} от времени при условии постоянства действующих факторов носит экспоненциальный характер и описывается уравнением [3]

$$\Delta R_{ds} = \alpha(e^{\beta t} - 1), \quad (1)$$

где α и β – коэффициенты, которые могут быть заданы заранее по известным лабораторным данным или вычисляться в режиме реального времени на основе измеренных значений. Использование формулы (1) позволяет не только оценить степень деградации компонента, но и рассчитать, когда значение сопротивления выйдет за пределы допустимого.

Рассчитаем ориентировочную температуру кристалла транзистора IRF520NS, который использовался в ходе эксперимента. Транзистор выполнен в корпусе D2Pak и предназначен для поверхностного монтажа. Типовое тепловое сопротивление кристалл-окружающая среда $R_{\Theta JA}$ составляет 40 °C/W. Будем учитывать только кондуктивные потери, вызванные ненулевым сопротивлением канала. Температуру окружающей среды t_A будем считать равной 25 °C. Тогда температуру кристалла можно рассчитать по формуле

$$t_J = t_A + R_{JA}P, \quad (2)$$

где $P = I_{ds}^2 R_{ds}$ – рассеиваемая транзистором мощность, для расчета возьмем типовое значение 2 Вт, а типовое значение сопротивления канала $R_{ds} = 0,2 \Omega$, откуда $I_{ds} = 3,162 A$. Типовое значение температуры составит $t_J = 105 \text{ °C}$.

Согласно рис. 4 изменение сопротивления на момент окончания эксперимента составило примерно +0,06 Ω , или +30 % от допустимого по документации значения. Температура кристалла при этом составила примерно $t_J = 129 \text{ °C}$. Таким образом, $\Delta t_J = +24 \text{ °C}$, или +22,9 % от базовой величины.

Стоит отметить, что сопротивление канала имеет сильную зависимость от температуры [6] (рис. 5).

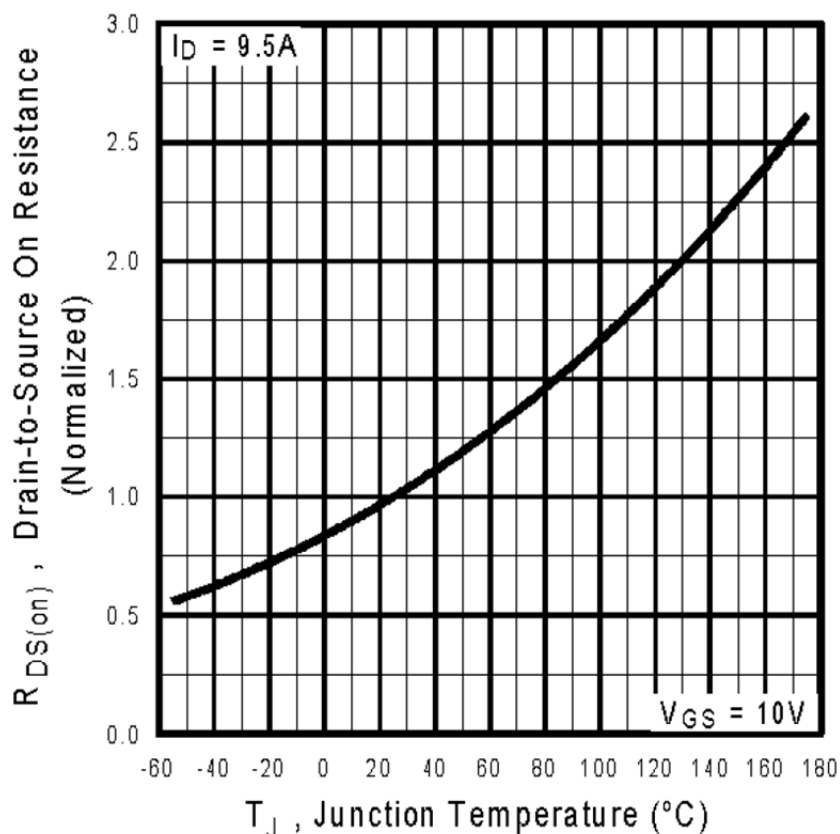


Рис. 5. Зависимость сопротивления канала от температуры

Сказанное выше позволяет сделать следующие выводы:

- 1) сопротивление канала является одним из наиболее репрезентативных параметров для оценки деградации полевого транзистора;
- 2) различные механизмы отказа оказывают одинаковое по знаку действие на сопротивление канала – увеличивают его;
- 3) в условиях стабильного режима работы (постоянная частота переключения, скважность, протекающий ток, температура окружающей среды) температура транзистора может использоваться как параметр, отражающий сопротивление канала и другие деградиационные процессы (увеличение тока утечки, увеличение длительности процесса переключения). При этом необходимо учитывать зависимость сопротивления канала от температуры.

Заключение

В ходе данной работы были рассмотрены современные подходы к определению остаточного ресурса электронных устройств. Отмечены недостатки используемых подходов.

Проведенный анализ статистического распределения отказов по компонентам и причин отказов электронных устройств и электронных компонентов позволил продемонстрировать значимость внешних воздействующих факторов в процессах отказов. Был проведен анализ воздействий факторов на продолжительность службы устройства, на основе которого была разработана методика оценки остаточного ресурса электронного блока на основе математической модели, учитывающей условия эксплуатации.

С учетом полученной математической модели предложена практическая реализация системы регистрации внешних воздействий, позволяющая в режиме реального времени отслеживать условия эксплуатации и с их учетом прогнозировать остаточный ресурс электронного блока.

Предложенная методика и прикладная реализация имеют практическую значимость в таких применениях электроники, отказ которых может приводить к причинению вреда здоровью человека, а также издержкам, многократно превышающим затраты на своевременное техническое обслуживание или замену.

Список литературы

1. Wu Lifeng [et al.]. Research on failure analysis method of the key components in SMPS // *Prognostics and System Health Managment Confernece*. 2011. P. 1–6.
2. Celaya J. [et al.]. Prognostics of power MOSFETs under thermal stress accelerated aging using data-driven and mod-el-based methodologies // *Proc. Int. Conf. Progn. Health Manag. Montr.* 2011. Vol. 2.
3. Yang S. [et al.]. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review // *IEEE Trans. Power Electron.* 2010. Vol. 25, № 11. P. 2734–2752.
4. Vaalasaranta I., Pippola J., Frisk L. Power MOSFET failure and degradation mechanisms in flyback topology under high temperature and high humidity conditions // *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. 2013. P. 16–22.
5. Luo Y. [et al.]. Failure analysis of power electronic devices and their applications under extreme conditions // *Chin. J. Electr. Eng.* 2016. Vol. 2, № 1. P. 91–100.
6. International Rectifier. PD-95749. IRF520NSPbF. 2004.

References

1. Wu Lifeng [et al.]. Research on failure analysis method of the key components in SMPS. *Prognostics and System Health Managment Confernece*. 2011:1–6.
2. Celaya J. [et al.]. Prognostics of power MOSFETs under thermal stress accelerated aging using data-driven and mod-el-based methodologies. *Proc. Int. Conf. Progn. Health Manag. Montr.* 2011;2.
3. Yang S. [et al.]. Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *IEEE Trans. Power Electron.* 2010;25(11):2734–2752.
4. Vaalasaranta I., Pippola J., Frisk L. Power MOSFET failure and degradation mechanisms in flyback topology under high temperature and high humidity conditions. *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. 2013:16–22.
5. Luo Y. [et al.]. Failure analysis of power electronic devices and their applications under extreme conditions. *Chin. J. Electr. Eng.* 2016;2(1):91–100.
6. *International Rectifier. PD-95749. IRF520NSPbF*. 2004.

Информация об авторах / Information about the authors

Максим Леонидович Савин

и. о. директора,
Мытищинский научно-исследовательский институт
радиоизмерительных приборов
(Россия, Московская обл., г. Мытищи,
ул. Колпакова, 2А)
E-mail: savin@mniirip.ru

Алексей Константинович Гришко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Вячеслав Дмитриевич Зуев

кандидат технических наук,
генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: vdzuev@yandex.ru

Игорь Иванович Кочегаров

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Елена Михайловна Соловьева

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Maksim L. Savin

Acting director,
Mytishchi Research Institute of Radio Measuring
Instruments
(2A Kolpakova street, Mytishchi,
Moscow region, Russia)

Aleksey K. Grishko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Vyacheslav D. Zuev

Candidate of technical sciences, general director,
Scientific and Research Institute
of Electronic and Mechanic Instruments
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Igor I. Kochegarov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Elena M. Solovieva

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 09.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2021

Принята к публикации/Accepted 16.11.2021