

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-129-134
УДК 621.316.99

В.В. Григорьев , Г.Н. Цицикян 
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ЩИТ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 10,5 КВ ЛЕДОКОЛА «АРКТИКА»

Объект и цель научной работы. Щит заземления нейтрали (ЩЗН) электроэнергетической системы ледокола «Арктика» и оценка тока замыкания при выбранном сопротивлении нейтрали.

Материалы и методы. Технические характеристики щита заземления нейтрали и методы электротехники.

Основные результаты. Оценка тока замыкания в нейтрали щита заземления синхронного турбогенератора ТПС-36-2М2. Конструктивное воплощение щита.

Заключение. Резистивное сопротивление нейтрали электроэнергетической системы ледокола «Арктика» в 600 Ом отвечает системе, именуемой High-Resistance Grounding. ЩЗН электроэнергетической системы ледокола «Арктика» эксплуатируется с 2020 г.

Ключевые слова: щит заземления нейтрали, токи замыкания, резистивное сопротивление нейтрали.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-129-134
UDC 621.316.99

V.V. Grigoryev , G.N. Tsitsikyan 
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

NEUTRAL GROUNDING SWITCHBOARD FOR 10.5 KV ELECTRIC POWER SYSTEM OF ARKTIKA ICEBREAKER

Object and purpose of research. This paper discusses neutral grounding switchboard of electric power system aboard *Arktika* icebreaker and estimates fault current for given neutral resistance.

Materials and methods. The paper relies on the technical specifications of neutral grounding switchboard and follows common methods of electric engineering.

Main results. Fault current estimates for neutral grounding switchboard of TPS-36-2M2 synchronous turbogenerator. Design of the switchboard.

Conclusion. Electric power system aboard *Arktika* icebreaker has neutral resistance rating of 600 Ohm, which corresponds to High-Resistance Grounding class. Neutral grounding switchboard discussed in this paper has been in operation since 2020.

Keywords: neutral grounding switchboard, fault currents, neutral resistance.

The authors declare no conflicts of interest.

Составной частью электроэнергетической системы ледокола «Арктика» является синхронный турбогенератор ТПС-36-2М2, нейтраль которого заземляется через резистивное сопротивление.

Такой характер заземления применяется в ряде электроэнергетических систем, относящихся, в частности, к горнодобывающей и нефтехимической промышленности, а также к судовым электро-

энергетическим системам. Об этом свидетельствуют публикации, перечисленные выборочно в прилагаемом перечне литературных источников [1–9].

Предпочтение по способу заземления нейтрали в электроэнергетических системах 6,3–10,5 кВ отдается высокоомному резистивному сопротивлению нейтрали. Обоснование дано в работах [4–9], в которых изложение этого вопроса носит доста-

Для цитирования: Григорьев В.В., Цицикян Г.Н. Щит заземления нейтрали электроэнергетической системы 10,5 кВ ледокола «Арктика». Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 2(404): 129–134.

For citations: Grigoryev V.V., Tsitsikyan G.N. Neutral grounding switchboard for 10.5 kV electric power system of *Arktika* icebreaker. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 2(404): 129–134 (in Russian).

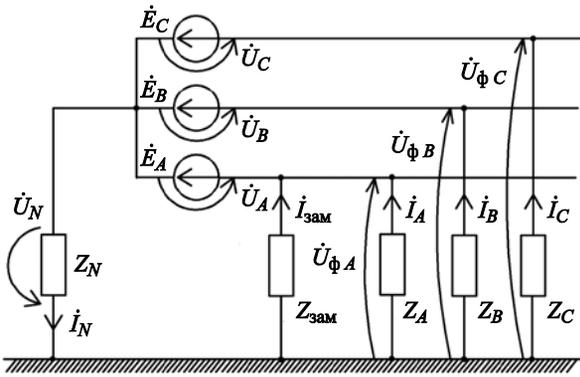


Рис. 1. Схема для определения напряжения на нейтрали

Fig. 1. Layout for neutral voltage determination

точно подробный характер. Для последующего изложения обратимся к схеме на рис. 1.

На основании анализа, данного в [7], комплекс напряжения на нейтрали \dot{U}_N при $\dot{I}_{зам} = 0$ (рис. 1) может быть записан в виде:

$$\dot{U}_N = \dot{U}_N^{из} \frac{Z_N}{Z + Z_N}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_N^{из} = (Y_A \dot{U}_A + Y_B \dot{U}_B + Y_C \dot{U}_C) Z, \quad (2)$$

$$Z = (Y_A + Y_B + Y_C)^{-1}, \quad (3)$$

$$Z_N = \frac{1}{Y_N}, \quad Z_{A,B,C} = \frac{1}{Y_{A,B,C}}, \quad (4)$$

где $U_N^{из}$ – напряжение изолированной нейтрали.

Если пренебречь активной проводимостью изоляции и записать проводимости фаз через $Y_A = j\omega C_A$, $Y_B = j\omega C_B$ и $Y_C = j\omega C_C$, то для \dot{U}_N на основании (1–4) при $Z_N = R_N$ будем иметь следующее выражение:

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= \frac{C_A \dot{U}_A + C_B \dot{U}_B + C_C \dot{U}_C}{\sum_{n=A,B,C} C_n} \cdot \frac{R_N}{j\omega \sum_{n=A,B,C} C_n + R_N} = \\ &= \frac{\sum_{n=A,B,C} C_n \dot{U}_n}{\sum_{n=A,B,C} C_n} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega \sum_{n=A,B,C} C_n} \cdot \frac{1}{R_N}} = \\ &= \frac{\sum_{n=A,B,C} C_n \dot{U}_n}{\sum_{n=A,B,C} C_n - j \frac{1}{\omega R_N}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) для изолированной нейтрали ($R_N \rightarrow \infty$) получаем:

$$\dot{U}_N^{из} = \frac{\sum_{n=A,B,C} C_n \dot{U}_n}{\sum_{n=A,B,C} C_n}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_N}{\dot{U}_N^{из}} &= \frac{\sum_{n=A,B,C} C_n \dot{U}_n}{\sum_{n=A,B,C} C_n - j \frac{1}{\omega R_N}} \cdot \frac{\sum_{n=A,B,C} C_n}{\sum_{n=A,B,C} C_n \dot{U}_n} = \\ &= \frac{\sum_{n=A,B,C} \omega C_n}{\left(\sum_{n=A,B,C} \omega C_n - j R_N^{-1} \right)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что

$$\begin{aligned} \left| \frac{\dot{U}_N}{\dot{U}_N^{из}} \right| &= \frac{\sum_{n=A,B,C} \omega C_n}{\sqrt{\left(\sum_{n=A,B,C} \omega C_n \right)^2 + R_N^{-2}}} = \\ &= \frac{R_N \sum_{n=A,B,C} \omega C_n}{\sqrt{1 + R_N^2 \left(\sum_{n=A,B,C} \omega C_n \right)^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_N^2} \left(\frac{U_N}{U_N^{из}} \right)^2 + \left(\frac{U_N}{U_N^{из}} \right)^2 \left(\sum_{n=A,B,C} \omega C_n \right)^2 &= \\ = \left(\sum_{n=A,B,C} \omega C_n \right)^2, \end{aligned}$$

и, следовательно:

$$\left(\sum_{n=A,B,C} \omega C_n \right)^2 = \frac{\frac{1}{R_N^2} \left(\frac{U_N}{U_N^{из}} \right)^2}{1 - \left(\frac{U_N}{U_N^{из}} \right)^2}. \quad (9)$$

Последнее выражение позволяет находить сумму емкостных проводимостей, когда $Z_{\text{зам}} = 0$:

$$\sum_{n=A,B,C} \omega C_n = \frac{\frac{U_N}{U_N^{1/3}}}{R_N \sqrt{1 - \left(\frac{U_N}{U_N^{1/3}}\right)^2}}. \quad (10)$$

Выражение (10) не отличается от формулы (11) работы [7] для $\sum_{n=A,B,C} \omega C_n$. Теперь можно дать

оценку для тока замыкания $I_{\text{зам}}$ по формуле (13) в [7], которая записана при глухом замыкании в одной из фаз и в предположении равенства емкостей в оставшихся фазах, а именно:

$$I_{\text{зам}} = U_{\phi} \sqrt{\frac{1}{R_N^2} + (3\omega C_{\phi})^2}. \quad (11)$$

Действительно, ток замыкания $I_{\text{зам}}$ определяется в соответствии с выражением в [7]:

$$i_{\text{зам}} = \frac{\dot{U}_{\phi}}{Z_{\text{зам}} + Z_{\text{вх}}},$$

$$\text{где } Z_{\text{вх}} = (Y_A + Y_B + Y_C + Y_N)^{-1} = \frac{ZZ_N}{Z + Z_N},$$

и, в свою очередь, Z определяется по формуле (3) и Z_N – в соответствии с (4), а U_{ϕ} – фазное напряжение относительно земли, бывшее на фазе в отсутствие замыкания (рис. 1).

Будем полагать, что $Z_N = R_N$, $Y_A = Y_B = Y_C = j\omega C$, пренебрегая разбросом в оценке емкости, т.е. исходя из того, что $C_A \cong C_B \cong C_C = C_{\phi}$, а $Y_N = R_N^{-1}$. В итоге получаем выражение (11) при $Z_{\text{зам}} \approx 0$.

Принимая резистивное сопротивление нейтрали $R_N = 600$ Ом, а $\omega C_{\phi} = \pi \cdot 100 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}$ с емкостью, принятой равной $1,5 \cdot 10^{-6}$ Ф, для тока замыкания получим следующую оценку: $I_{\text{зам}} = 13,333$ А, если $U_{\phi} = 6,1$ кВ. При емкости $C = 1,5 \cdot 10^{-6}$ Ф по формуле (11) будем иметь:

$$I_{\text{зам}} = 6,1 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1}{600^2} + 9 \cdot (\pi \cdot 100 \cdot 10^{-6})^2} \cong 11,68 \text{ А}.$$

Подчеркнем, что резистивное сопротивление нейтрали $R_N = 600$ Ом, применяемое для заземления нейтрали синхронного турбогенератора ТПС-36-2М2, конструктивно расположено в щите заземления нейтрали (ЩЗН) с техническими характеристиками, записанными в таблице. Общий вид устройства представлен на рис. 2.

Основным комплектующим изделием в ЩЗН является высокоомный резистор Р31 производства ООО «Болид» (г. Новосибирск), который состоит из 20 элементов, закрепленных в раме из стеклотекстолита (рис. 3).

Электрическая схема соединения резистора – две последовательные электрические цепи по 10 элементов в каждой. Каждый резистивный элемент выполнен из трех последовательно соединенных проводящих элементов на основе композиционного материала «ЭКОМ», которые помещены между изолирующими прокладками из слюдопласта в стальной корпус. Изоляционный каркас из стеклотекстолита крепится к основанию на опорных изоляторах ИОР-10-7,5 с окраской цементных швов изоляторов влагостойким покрытием – эмалями ПФ, ХВ или аналогичных им.

Для операций включения/отключения заземляющего резистора в цепь нейтрали генератора

Таблица. Технические характеристики щита заземления нейтрали

Table. Technical characteristics of neutral grounding switchboard

Наименование параметра	Значение
Номинальное напряжение (фазное), кВ	6,1
Максимальное рабочее напряжение (фазное), кВ	6,9
Ток, А	< 1
Максимально допустимый ток в течение 3 с, А	20
Сопротивление резистора, Ом	600
Номинальное напряжение вспомогательных цепей постоянного тока, В	220
Наличие токоведущих частей	Шины сечением 40×10 мм ²
Степень защиты оболочки	IP32

применен однополюсный разъединитель РЛВОМ производства ООО «Нижнетурицкий электроаппаратный завод» (г. Нижняя Тура), состоящий из рамы с приводным валом, опорных изоляторов, силовых контактов и подвижного контактного ножа. Принцип действия разъединителя следующий: контактный нож удерживается во включенном положении за счет тяги вала. Вращая вал посредством воздействия на ручной привод ПР-10А, установленный на лицевой панели ЩЗН, производят включение или отключение подвижного ножа.

Во избежание случайного отключения разъединителя в ЩЗН установлена электромагнитная блокировка, которая блокирует рукоятку его привода, если генератор подключен к шинам главного распределительного устройства (ГРУ). Включение разъединителя осуществляет квалифицированный персонал при помощи специального

электромагнитного ключа – катушки с подвижным сердечником. Оперировать разъединителем разрешается только в периоды ремонта заказа, когда ГРУ обесточено.

Примечательно, что в [8] условие $R_N \leq \frac{1}{3\omega C_\Phi}$

рекомендовано для выбора сопротивления нейтрали в системах, именуемых High-Resistance Grounding (HRG). Это условие приводит к значительному снижению перенапряжений по сравнению с системой с изолированной нейтралью [8].

Известно, что суммарная емкость электроэнергетической системы 10,5 кВ ледокола «Арктика» пр. 22220, отнесенная к трем фазам, не превосходит 3,253 мкФ, и тогда $R_N \leq 978,81$ Ом, и выбор сопротивления $R_N = 600$ Ом не противоречит записанному условию. Резисторы производства ООО «Болид»

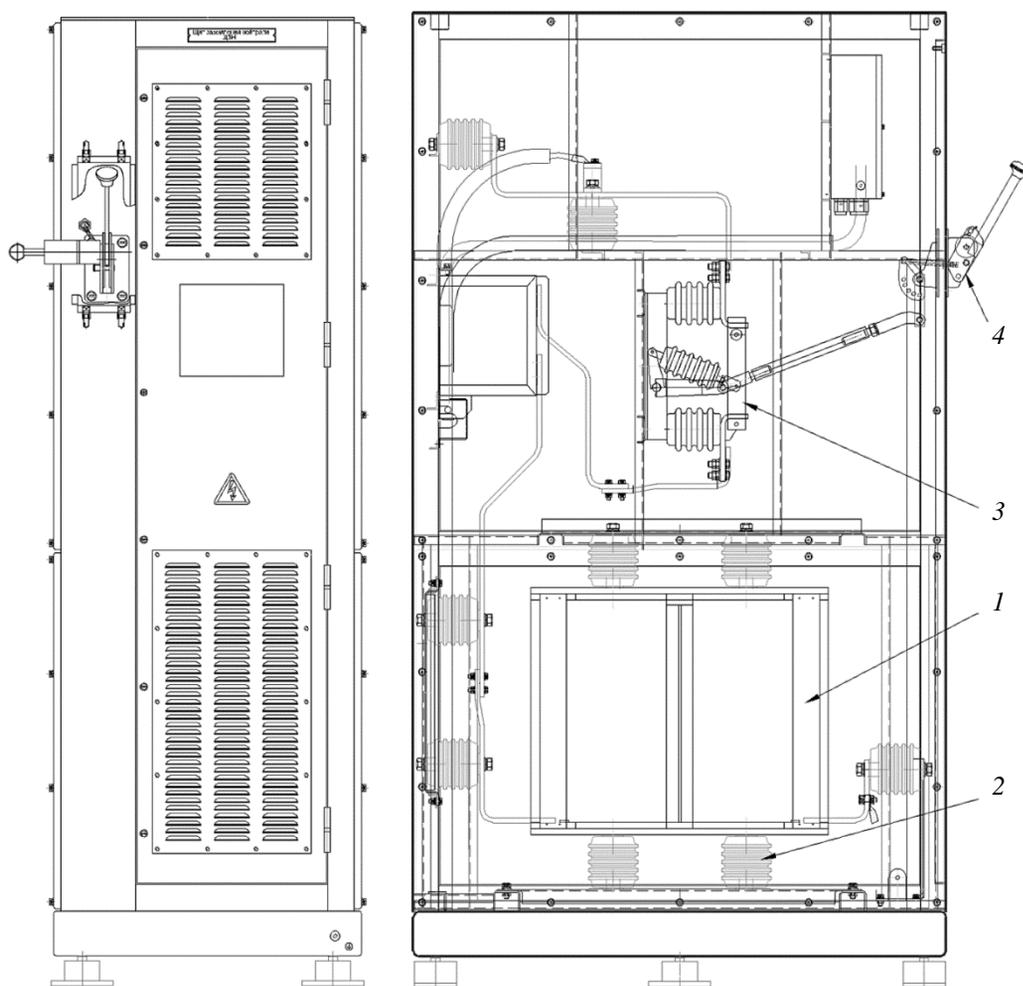


Рис. 2. Общий вид щита заземления нейтрали: 1 – резистор РЗ1; 2 – изолятор ИОР-10-7,5; 3 – разъединитель РЛВОМ; 4 – ручной привод ПР-10А

Fig. 2. General view of neutral grounding switchboard: 1 – RZ1 resistor; 2 – IOR_10-7.5 isolator; 3 – RLVOM breaker; 4 – PR-10A manual drive

хорошо зарекомендовали себя как эффективные средства подавления перенапряжений при однофазных замыканиях на землю в объектах электроэнергетики. Они выгодно отличаются от резисторов традиционных проволочных технологий [9].

В заключение следует отметить, что головной универсальный атомный ледокол «Арктика» эксплуатируется с 2020 г., а серийные ледоколы «Сибирь» и «Урал» введены в эксплуатацию с 2021 и 2022 г. соответственно.

Список использованной литературы

1. *Nelson J.P., Sen P.K.* High-resistance grounding of low-voltage systems: a standard for the petroleum and chemical industry // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1999. Vol. 35, No. 4. P. 941–948. DOI: 10.1109/28.777204.
2. IEEE Std 142-2007. IEEE Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems : Rev. IEEE Std 142-1991. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. VIII, 215 p.
3. *Граве В.И., Романовский В.В., Ушаков В.М.* Электропожаробезопасность высоковольтных судовых электроэнергетических систем. Санкт-Петербург : Элмор, 2003. 160 с.
4. *Paul Dev.* High-Resistance grounded power-system equivalent circuit damage at the line-ground fault location. Part I // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014. Vol. 50, No. 6. P. 4179–4187. DOI: 10.1109/TIA.2014.2346702.
5. *Paul Dev, Sutherland P.E.* High-Resistance grounded power-system equivalent circuit damage at the line-ground fault location. Part II // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014. Vol. 50, No. 6. P. 4188–4196. DOI: 10.1109/TIA.2014.2346691.
6. *Цицикян Г.Н., Баранов Ю.Д.* Влияние способа заземления нейтрали на ток замыкания в судовой ЭЭС // *Морской вестник*. 2017. Вып. 2(62). С. 64–66.
7. *Цицикян Г.Н., Гренчук А.М.* Определение емкости электроэнергетической системы с помощью резистора, включенного между нейтралью системы и землей // *Судостроение*. 2018. № 6. С. 34–36.
8. *Sottile J., Novak T., Tripathi A.* Best practices for implementing high-resistance grounding in mine power systems // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. Vol. 51, No. 6. P. 5254–5260. DOI: 10.1109/TIA.2015.2420632.
9. *Емельянов Н.И., Ширковец А.И.* Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // *Энергоэксперт*. 2010. № 2. С. 44–51.

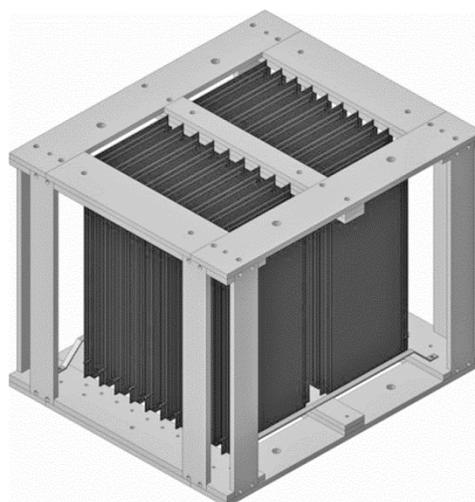


Рис. 3. Модель резистора щита заземления нейтрали
Fig. 3. Model of neutral grounding switchboard resistor

References

1. *Nelson J.P., Sen P.K.* High-resistance grounding of low-voltage systems: a standard for the petroleum and chemical industry // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1999. Vol. 35, No. 4. P. 941–948. DOI: 10.1109/28.777204.
2. IEEE Std 142-2007. IEEE Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems : Rev. IEEE Std 142-1991. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. VIII, 215 p.
3. *Grave V.I., Romanovsky V.V., Ushakov V.M.* Electric fire safety of high-voltage marine power systems. St. Petersburg : Elmor, 2003. 160 p. (*in Russian*).
4. *Paul Dev.* High-Resistance grounded power-system equivalent circuit damage at the line-ground fault location. Part I // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014. Vol. 50, No. 6. P. 4179–4187. DOI: 10.1109/TIA.2014.2346702.
5. *Paul Dev, Sutherland P.E.* High-Resistance grounded power-system equivalent circuit damage at the line-ground fault location. Part II // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014. Vol. 50, No. 6. P. 4188–4196. DOI: 10.1109/TIA.2014.2346691.
6. *Tsitsikyan G.N., Baranov Yu.D.* Neutral grounding methods and fault currents in marine electric power systems // *Morskoy Vestnik*. 2017. No. 2(62). P. 64–66 (*in Russian*).
7. *Tsitsikyan G.N., Grenchuk A.M.* Determination of power system capacity by means of resistor between system neutral and ground // *Sudostroyeniye*. 2018. No. 6. P. 34–36 (*in Russian*).
8. *Sottile J., Novak T., Tripathi A.* Best practices for implementing high-resistance grounding in mine power

- systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51, No. 6. P. 5254–5260. DOI: 10.1109/TIA.2015.2420632.
9. *Yemelyanov N.I., Shirkovets A.I.* Relevant challenges in application of resistive and combined neutral grounding in 6–35 kV grids // *Energoekspert (Energy Expert)*. 2010. No. 2. P. 44–51 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Григорьев Владислав Викторович, начальник сектора филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел. +7 (812) 748-52-40. E-mail: grivlad@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5599-4004>.

Цицикян Георгий Николаевич, д.т.н., профессор, начальник сектора – заместитель начальника отдела фи-

лиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8813-6003>.

About the authors

Vladislav V. Grigoryev, Head of Sector, TSNI SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-40. E-mail: grivlad@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5599-4004>.

Georgy N. Tsitsikyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Sector – Deputy Head of Department, TSNI SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8813-6003>.

Поступила / Received: 14.12.22
Принята в печать / Accepted: 29.05.23
© Григорьев В.В., Цицикян Г.Н., 2023