

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-129-133  
УДК 621.316.11+ 621.3.053

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

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЩИТА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛЕДОКОЛА «АРКТИКА»

**Объект и цель научной работы.** Оценка величины емкости кабельных линий электроэнергетической системы (ЭЭС) ледокола «Арктика». Подтверждение выбранного номинала сопротивления в щите заземления нейтрали путем экспериментальных измерений на заказе.

**Материалы и методы.** Расчеты проведены на основании аппроксимирующих и строгих выражений.

**Основные результаты.** Получены численные результаты, на основании которых установлена правомерность рассмотренных подходов и расчетов.

**Заключение.** Величина резистивного сопротивления в щите заземления нейтрали ледокола «Арктика» выбрана верно, что подтверждено результатами измерений.

**Ключевые слова:** резистивное сопротивление нейтрали, емкость кабельных линий и электрооборудования, щит заземления нейтрали, ток замыкания на землю.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-129-133  
UDC 621.316.11+ 621.3.053

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

## SELECTION JUSTIFICATION FOR NEUTRAL GROUNDING SWITCHBOARD OF ELECTRIC POWER SYSTEM ABOARD "ARKTIKA" ICEBREAKER

**Object and purpose of research.** This paper discusses the capacity of power cables aboard "Arktika" icebreaker to confirm selected resistor rating of neutral grounding switchboard through on-site measurements.

**Materials and methods.** Calculations are based on approximate and rigorous expressions.

**Main results.** Numerical results obtained in this study confirmed the correctness of investigated approaches and calculations.

**Conclusion.** Resistor rating for neutral grounding switchboard of "Arktika" icebreaker was selected correctly, which is confirmed by measurement results.

**Keywords:** neutral resistor rating, electric equipment and cabling capacity, neutral grounding switchboard, ground fault current.

*The authors declare no conflicts of interest.*

К настоящему времени в системах 6,3–10,5 кВ предпочтению по способу заземления нейтрали отдается высокоомному резистивному сопротивлению [1, 2]. Этот способ заземления позволяет зафиксировать однофазное замыкание и приступить к незамедли-

тельному обнаружению места замыкания с целью его ликвидации и исключения вероятности возникновения аварийного замыкания в системе.

Как правильно отмечено в [3], фиксация замыкания на землю (корпус) требует в дальнейшем эф-

*Для цитирования:* Григорьев В.В., Цицикян Г.Н. Обоснование выбора сопротивления щита заземления нейтрали для электроэнергетической системы ледокола «Арктика». Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 1(403): 129–133.

*For citations:* Grigoryev V.V., Tsitsikyan G.N. Selection justification for neutral grounding switchboard of electric power system aboard "Arktika" icebreaker. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 1(403): 129–133 (in Russian).

фективных способов обнаружения самого места замыкания. Для локализации замыкания на землю следует отключить неисправный участок и приступить к поиску места повреждения, прерывающего непрерывную работу системы до нахождения места повреждения (это осуществляется, как правило, квалифицированным персоналом), и его последующей ликвидации.

Влиянию способа заземления нейтрали на ток замыкания в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) посвящены работы [4, 5]. В [5] выражение (11) позволяет найти сумму емкостных проводимостей трехфазной системы, если известно отношение напряжения на нейтрали при резистивном сопротивлении  $R_N$  к напряжению на разомкнутой нейтрали.  $\left(\frac{U_N}{U_N^{из}}\right)$  выражение записано в виде:

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

Для отношения  $\frac{U_N}{U_N^{из}} = 0,185$ , как в примере из работы [5] и при  $R_N = 600$  Ом, имеем:

$$\sum_{n=A,B,C} \omega C_n = \frac{1}{600 \sqrt{\left(\frac{1}{0,185}\right)^2 - 1}} = 3,1375 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{Ом}},$$

и тогда при  $f = 50$  Гц

$$\sum_{n=A,B,C} C_n = \frac{3,1375 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 100} = 0,9987 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Для трехфазной линии передачи, проложенной вдоль протяженной массивной металлической оболочки, в среднем емкость на фазу составит  $\approx 0,333 \cdot 10^{-6}$  Ф в рассматриваемом случае, если  $U_N/U_N^{из} = 0,185$  и  $R_N = 600$  Ом.

Из вышесказанного и вытекает способ оценки емкости симметричной трехфазной линии передачи.

Перейдем к оценке тока замыкания. В работе [5] дается упрощенное выражение для указанной оценки, записанное в виде:

$$I_{\text{зам}} = U_{\phi} \sqrt{\frac{1}{R_N^2} + 9\omega^2 C^2}, \quad (2)$$

в соответствии с комплексной формой записи

$$i_{\text{зам}} = \dot{U}_{\phi} \left( \frac{1}{R_N} + 3j\omega C \right). \quad (3)$$

Выбор величины сопротивления  $R_N$  проистекает из условия, записанного в [1] и повторенного в [2], состоящего в том, что

$$R_N \leq \frac{1}{3\omega C}. \quad (4)$$

Если при этом  $R_N = 600$  Ом, то при  $f = 50$  Гц емкость фазы относительно земли или корпуса должна удовлетворять условию:

$$C \leq \frac{1}{3 \cdot 100\pi \cdot 600} \cong 1,768 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Выбор численного значения для  $R_N = 600$  Ом отвечает сопротивлению резистора щита заземления нейтрали (ЩЗН) для синхронного генератора ТПС-36-2М2 электроэнергетической системы ледокола «Арктика» пр. 22220.

Электрическая емкость линии, проложенной вдоль массивного проводящего корпуса на расстоянии  $h$ , длиной  $l$  может быть рассчитана в соответствии с выражением [6]:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \left[ \frac{h}{R} + \sqrt{\left(\frac{h}{R}\right)^2 - 1} \right]}, \quad (5)$$

где  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$  Ф/м,  $R$  – радиус провода.

Полагая в примере  $h = 0,1$  м,  $R = 0,08$  м и  $l = 100$  м, будем иметь оценку для величины емкости  $C$  линии, равную:

$$C = \frac{2\pi \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \cdot 100}{\ln \left[ \frac{0,1}{0,08} + \sqrt{\left(\frac{0,1}{0,08}\right)^2 - 1} \right]} = \frac{\frac{1}{18} \cdot 10^{-7}}{\ln(1,25 + 0,75)} \cong \cong 8,015 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Будем считать для примера, что общее число трехфазных параллельных линий подключенных к генератору, равно 20. Тогда, оценка емкости фазы равна:

$$C_{\phi} = 0,1603 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cong 0,16 \text{ мкФ}.$$

Следует иметь в виду, что общая емкость фазы относительно корпуса, выполняющего роль земли, может быть существенно больше, если учитывать емкость всего силового оборудования, подключенного к генератору. Этот вопрос требует специального рассмотрения для оценки превышения емкости над полученной величиной, включая и методы прямого измерения емкости фазы относительно корпуса. С этим вопросом непосредственно связан и выбор величины резистивного сопротивления.

Преимущества резистивного сопротивления нейтрали перечислены в [1]. К их числу могут быть отнесены: ослабление ожоговых эффектов и эффектов плавления в дефектном оборудовании, в коммутирующих устройствах, в трансформаторах, кабелях и вращающихся электрических машинах; ослабление механических воздействий в линиях и аппаратах; безопасный контроль переходных перенапряжений и др. Высокоомное заземление выбирается исходя из ограничения, чтобы величина тока через заземляющий резистор незначительно превосходила общий ток, текущий через емкости. Величина тока в этом случае ограничена 10 А. Это иллюстрируется формулами (2) и (3). Из вышесказанного вытекает важность оценки емкостей фаз, и, как видно, эта оценка приобретает ключевое значение для последующего выбора резистивного сопротивления нейтрали.

ЭЭС 10,5 кВ ледокола «Арктика» пр. 22220 не относится к сильно разветвленной и содержит ограниченный набор основных потребителей. В связи с этим в период строительства судна было произведено измерение емкостей: поэлементно, при снятом с электрооборудования напряжении, с помо-

щью измерителя типа Е7-21. Результаты измерений (табл.) включают емкости и кабельных линий, и подключенного к ним электрооборудования.

Сравним полученные значения измерений для емкостей электрооборудования с подключенными участками кабелей и результаты расчета емкости фазы кабельной линии по формуле (5). Из соотношения вытекает, что емкость электрооборудования до главного распределительного устройства, отнесенная к одной фазе ( $1,084 \cdot 10^{-6}$  Ф), существенно больше емкости фазы в рассмотренном ранее примере из 20 параллельных кабелей.

Тогда имеем (4):

$$R_N \leq \frac{1}{3 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 1,084 \cdot 10^{-6}} = 978,81 \text{ Ом.}$$

Поэтому выбор резистивного сопротивления в 600 Ом не противоречит условию (4).

Методы измерения емкостей отдельного судового электрооборудования высоковольтной СЭС в целом описаны в [7].

В цитируемой работе [4] приведено выражение (1.17) для тока замыкания в виде:

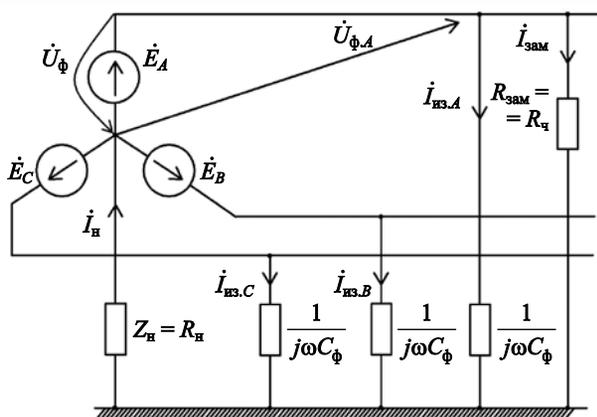
$$i_{\text{зам}} = - \frac{\dot{U}_{\text{ф.А}}}{R_{\text{зам}}} \frac{1 + 3R_n j\omega C_\phi}{1 + \frac{R_n}{R_{\text{зам}}} + 3R_n j\omega C_\phi}. \quad (6)$$

Это основано на предположении, что сопротивление нейтрали является чисто резистивным, т.е.  $Z_n = R_n$ . Сопротивление тела человека, попавшего под напряжение между фазой и корпусом, также резистивное  $R_{\text{зам}} = R_{\text{ч}}$ , предполагается, что емкост-

**Таблица.** Емкость электрооборудования с участками кабелей до выключателей главного распределительного устройства № 1

**Table.** Capacity of electric equipment with cable stretches up to MSB-1 switches

Наименование	Количество	Емкость электрооборудования с трехфазным кабелем, мкФ
Генератор ТПС-36-2М2	1	1,2
Трансформатор силовой сухой согласующий ТРСЗП-6000/10	6	0,235
Трансформатор силовой сухой отбора мощности ТСЗ-2500/10	2	0,107
Электронасосные агрегаты ПЭМА250-80 с трансформатором 10,5/0,69	3	0,053
Кабельная перемычка с ГРУ1 на ГРУ2	1	0,27
Суммарная емкость, полученная измерением: 3,253		



**Рис. 1.** Электрическая схема при замыкании фазы А через сопротивление тела человека

**Fig. 1.** Phase A fault (human-body contact): circuit diagram

ные сопротивления фаз относительно земли (корпуса)  $\frac{1}{\omega C_\phi}$  практически равны.

Заменяя  $U_{\phi,А}$  на  $(-U_\phi)$  (рис. 1), для действующего значения тока замыкания будем иметь:

$$I_{\text{зам}} = \frac{U_\phi}{R_{\text{зам}}} \frac{\sqrt{1 + (R_H 3\omega C_\phi)^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{R_H}{R_{\text{зам}}}\right)^2 + (R_H 3\omega C_\phi)^2}} =$$

$$= U_\phi \frac{1}{\sqrt{\frac{R_{\text{зам}}^2 + 2R_H R_{\text{зам}} + R_H^2 + (R_{\text{зам}} R_H 3\omega C_\phi)^2}{1 + (R_H 3\omega C_\phi)^2}}} =$$

$$= U_\phi \frac{1}{\sqrt{R_{\text{зам}}^2 + \frac{2R_H R_{\text{зам}}}{1 + (R_H / X_C)^2} + \frac{R_H^2}{1 + (R_H / X_C)^2}}}, \quad (7)$$

где  $X_C = \frac{1}{3\omega C_\phi}$ . (8)

Видоизменим выражение (7) следующим образом:

$$I_{\text{зам}} = U_\phi \frac{1}{\sqrt{\left(R_{\text{зам}} + \frac{R_H X_C^2}{R_H^2 + X_C^2}\right)^2 + \frac{R_H^2 X_C^2}{R_H^2 + X_C^2} \left(1 - \frac{X_C^2}{R_H^2 + X_C^2}\right)}} =$$

$$= \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_{\text{зам}} + \frac{R_H X_C^2}{R_H^2 + X_C^2}\right)^2 + \left(\frac{R_H^2 X_C^2}{R_H^2 + X_C^2}\right)^2}}. \quad (8)$$

Выражение (8) для тока замыкания не отличается от выражения для тока замыкания, приведенного в [7, с. 119] с учетом разницы в обозначениях, если  $R_{\text{зам}}$  заменить на  $r_3$ ,  $R_H$  – на  $r_0$  и  $I_{\text{зам}}$  – на  $I_\phi$ . В свою очередь, это служит и подтверждением правильности анализа, приведенного в [4].

Вывод: выбор резистивного сопротивления нейтрали для ЭЭС ледокола «Арктика» отвечает способу высокоомного заземления.

## Список использованной литературы

1. 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.
2. 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.
3. Fault Locating in ungrounded and high-resistance grounded systems / T. Baldwin, F. Renovich, L.F. Saunders, D. Lubkeman // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. Vol. 37, No. 4. P. 1152–1159. DOI: 10.1109/28.936408.
4. Цицкян Г.Н., Антипов М.Ю. Автономные электроэнергетические системы. Вопросы электробезопасности и электромагнитной совместимости. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2017. 106 с.
5. Цицкян Г.Н., Гренчук А.М. Определение емкости электроэнергетической системы с помощью резистора, включенного между нейтральной системы и землей // Судостроение. 2018. № 6. С. 34–36.
6. Теоретические основы электротехники : учеб. : [В 3 т.]. Т. 3 / К.С. Демирчян, Л.П. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. 4-е изд., доп. Санкт-Петербург : Питер, 2003. 277 с.
7. Граве В.И., Романовский В.В., Ушаков В.М. Электропожаробезопасность высоковольтных судовых электроэнергетических систем. Санкт-Петербург : Элмор, 2003. 160 с.

## References

1. 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.
2. 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.

3. Fault Locating in ungrounded and high-resistance grounded systems / *T. Baldwin, F. Renovich, L.F. Saunders, D. Lubkeman* // IEEE Transactions on Industry Applications. 2001. Vol. 37, No. 4. P. 1152–1159. DOI: 10.1109/28.936408.
  4. *Tsitsikyan G.N., Antipov M.Yu.* Autonomous electric power systems. Safety and electromagnetic compatibility. St. Petersburg: Krylov State Research Centre. 2017. 106 p. (in Russian).
  5. *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).
  6. Theoretical fundamentals of electric engineering. In 3 vol. Vol. 3 / *K.S. Demirchan, L.R. Neiman, N.V. Korovkin, V.L. Chechurin*. St. Petersburg: Piter, 2003. 277 p. (in Russian).
  7. *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).
- ный 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>.
- Цицкиан Георгий Николаевич*, д.т.н., профессор, начальник сектора – заместитель начальника отдела филиала «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, TSNII 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, TSNII 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>.

---

#### Сведения об авторах

*Григорьев Владислав Викторович*, начальник сектора филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государствен-

Поступила / Received: 28.10.22  
Принята в печать / Accepted: 03.02.23  
© Григорьев В.В., Цицкиан Г.Н., 2023