

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 (СЭС) 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		

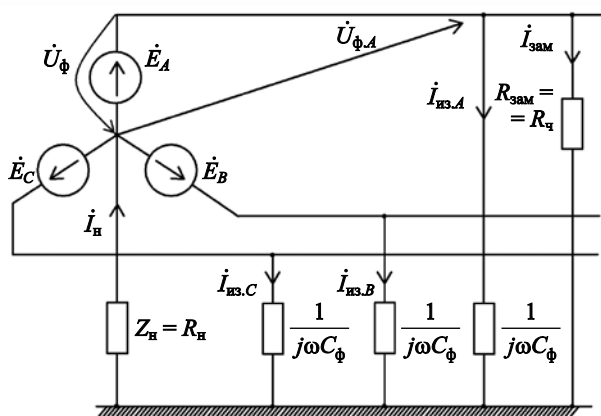


Рис. 1. Электрическая схема при замыкании фазы А через сопротивление тела человека

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

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

Заменяя $U_{\phi,A}$ 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_ϕ . 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, 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>.

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