

В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко, Н.В. Гринченко

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ТОКОВ В ЭКРАНАХ КАБЕЛЕЙ ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ЗАЗЕМЛЕНИИ ТРЕХФАЗНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

В роботі розглянуто задачу розрахунку струмів в екранах одножильних кабелів при двосторонньому заземленні трифазної кабельної лінії. Для випадків прокладання кабелів у площині та трикутником отримано аналітичні вирази для діючих значень струмів в екранах, що дозволяють обмежити похибку розрахунку на рівні 5 %. Проведено аналіз наближених виразів для струмів в екранах кабелів. Представлені графіки залежностей похибки наближених виразів від похідних безрозмірних параметрів кабельної лінії, які визначаються відстанню між осями кабелів, радіусом екранів та їх активним опором. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: кабельна лінія, екран кабелю, струм в екрані, двостороннє заземлення.

В работе рассмотрена задача расчета токов в экранах одножильных кабелей при двустороннем заземлении трехфазной кабельной линии. Для случаев прокладки кабелей в плоскости и треугольником получены аналитические выражения для действующих значений токов в экранах, позволяющие ограничить погрешность расчета на уровне 5 %. Проведен анализ приближенных выражений для токов в экранах кабелей. Представлены графики зависимостей погрешности приближенных выражений от производных безразмерных параметров кабельной линии, которые определяют расстоянием между осями кабелей, радиусом экранов и их активным сопротивлением. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: кабельная линия, экран кабеля, ток в экране, двустороннее заземление.

Введение. При прокладке высоковольтных кабельных линий электропередачи (КЛ) необходимым условием является заземление электропроводящих экранов кабелей, одностороннее или двустороннее. Главное преимущество одностороннего заземления – отсутствие продольных токов в экранах, что не нарушает тепловой режим КЛ и обеспечивает максимальную пропускную способность КЛ. Недостатком является наведенный потенциал на экране и, соответственно, необходимость установки защитных устройств от перенапряжения [1]. При заземлении экранов с обоих концов с транспозицией экранов продольные токи также отсутствуют. Однако сложность и дороговизна выполнения транспозиции ограничивают её повсеместное применение. Более простым является двустороннее заземление экранов кабелей, которое обеспечивает отсутствие импульсных перенапряжений и не требует установки дополнительных защитных устройств [1]. При этом экраны кабелей образуют замкнутые контуры, по которым протекают индуцированные продольные токи [2-4]. С одной стороны это приводит к снижению магнитного поля КЛ и способствует решению задач магнитной экологии, с другой – токи в экранах кабелей могут нарушать тепловой режим КЛ и приводить к уменьшению пропускной способности линии [5, 6]. Поэтому расчет токов в экранах является актуальной задачей.

Анализ литературных источников показал, что для расчета наведенных токов в экранах при их двустороннем заземлении используют различные приближенные выражения. В нормативном документе [7] представлены выражения для расчета токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости и треугольником. Эти приближенные выражения имеют простой вид и используются на практике при проектировании КЛ. В [8] рассматривается задача о тепловых потерях в экранах кабелей, и приводятся выражения для действующих значений токов. Для случая прокладки кабелей треугольником приведенное выражение компактно, но для случая прокладки в плоскости выражения имеют достаточно громоздкий вид. Поэтому для оценки величины токов в экранах при прокладке ка-

белей в плоскости используют компактное выражение для прокладки треугольником, полагая расстояние между кабелями равным среднему геометрическому межфазных расстояний КЛ. В [9] этот подход использовался для анализа индуктивностей трехфазных КЛ при произвольном расположении кабелей.

Приближенные выражения удобны при инженерных расчетах. Однако, как показано ниже, погрешность расчета токов в экранах при помощи приближенных выражений может составлять более 30 %.

Цель статьи – получение выражений для действующих значений токов в экранах кабелей при их двустороннем заземлении, позволяющих ограничить погрешность расчета на уровне 5 % при реальном разбросе параметров КЛ.

Расчет токов в экранах кабелей. В [10] разработана аналитическая модель магнитного поля трехфазной КЛ с двусторонним заземленными экранами одножильных кабелей. Она применима при следующих естественных допущениях: распределение индуцированного тока в экране каждого кабеля равномерно, а толщина экрана много меньше его радиуса. Модель позволяет рассчитывать токи в экранах и распределение магнитной индукции поля, создаваемого КЛ при произвольном расположении её кабелей. Разброс результатов расчета магнитной индукции и экспериментальных данных [3, 4] не превышает 5 %.

В [10] приведены аналитические выражения для комплексных амплитуд токов, индуцируемых в экранах кабелей при их двустороннем заземлении. Вычислив модуль этих выражений, приведя подобные слагаемые и разделив на $\sqrt{2}$, получаем выражения для действующих значений токов в экранах. В качестве переменных удобно использовать следующие безразмерные параметры КЛ:

$$Q = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*}, \quad \Delta = \frac{s}{r},$$

где $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ с}^{-1}$ – частота тока; R^* – сопротивление единицы длины экрана кабеля, Ом/м; s – расстояние

между осями соседних кабелей, м; r – радиус сечения экрана, м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Если кабели проложены в плоскости, а токи в жилах образуют систему прямой последовательности, то выражения для действующих значений токов в экранах при их двустороннем заземлении принимают следующий вид:

$$I_1^{sh} = I \cdot \sqrt{\frac{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} + \sqrt{3} \cdot \ln 2\right)^2 + \ln^2 4\Delta^3}{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \frac{3}{Q}\right)^2 + 4 \cdot \ln^2 2\Delta^3}},$$

$$I_2^{sh} = I \cdot \sqrt{\frac{Q^2 \cdot \ln^2 \frac{\Delta^3}{2}}{9 + Q^2 \cdot \ln^2 \frac{\Delta^3}{2}}},$$

$$I_3^{sh} = I \cdot \sqrt{\frac{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \sqrt{3} \cdot \ln 2\right)^2 + \ln^2 4\Delta^3}{\left(Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \frac{3}{Q}\right)^2 + 4 \cdot \ln^2 2\Delta^3}},$$

где I – действующее значение тока в жилах кабелей.

В случае обратной последовательности токов в жилах в (1) меняются местами выражения для токов в экранах первого и третьего кабелей.

В случае прокладки кабелей треугольником действующие значения токов в экранах при их двустороннем заземлении равны между собой [8, 10]:

$$I^{sh} = I \cdot \sqrt{\frac{Q^2 \ln^2 \Delta}{1 + Q^2 \ln^2 \Delta}}. \quad (2)$$

В [7-9] приведены различные приближенные выражения для расчета действующих значений токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости. Для определения погрешности этих выражений воспользуемся (1). Количественно погрешность определим следующим образом:

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^3 \sqrt{\frac{1}{3} \left(1 - \frac{I_k^{approx}}{I_k^{sh}}\right)^2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где I_k^{sh} – действующее значение тока в экране k -го кабеля, рассчитанное при помощи (1); I_k^{approx} – действующее значение тока в экране, рассчитанное при помощи приближенных выражений из [7-9].

Анализ погрешностей приближенных выражений для токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости. В нормативном документе [7, С. 297] представлено приближенное выражение для расчета токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости. Записывая его через Q , получаем:

$$I_k^{approx} = I \cdot \sqrt{0,75 \cdot \frac{42,5 \cdot Q^2}{\pi^2 + 42,5 \cdot Q^2} + 0,25 \cdot \frac{25 \cdot Q^2}{\pi^2 + 25 \cdot Q^2}}. \quad (4)$$

Воспользуемся (3) для нахождения погрешности расчета токов при помощи (4). На рис. 1 приведены

графики зависимостей относительного отклонения ε от производных параметров КЛ. Кривые построены для интервалов значений Q и Δ , являющихся характерными для КЛ, рассчитанных на напряжения 45÷330 кВ. Отметим, что значения Q равные 0,15 и 0,35 достигаются при значениях сопротивления R^* равных $0,42 \cdot 10^{-3}$ Ом/м и $0,18 \cdot 10^{-3}$ Ом/м, которые в свою очередь характерны для экранов с поперечными сечениями 45 мм² и 105 мм², соответственно.

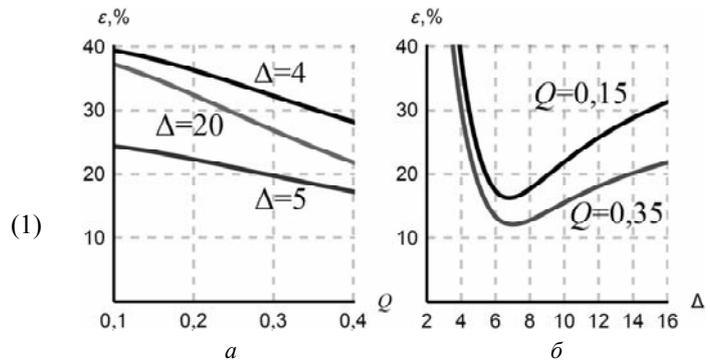


Рис. 1

Из представленных графиков видно, что погрешность ε в целом определяется значением Δ (рис. 1, б), а зависимость ε от Q , т.е. от активного сопротивления экрана, можно не учитывать (рис. 1, а). Из рис. 1, б следует, что погрешность меньше 20 % достигается в достаточно узком интервале при значениях Δ больших 5 и меньших 10-12. Если расстояние между осями соседних кабелей меньше 4 или более 20 радиусов экранов, то погрешность применения (4) для расчета токов в экранах при их двустороннем заземлении может превышать 30 %.

Используя подход, изложенный в [9, С. 180], для расчета токов в экранах при прокладке кабелей в плоскости можно воспользоваться выражением (2) с заменой Δ на $\bar{\Delta} = \bar{s}/r$, где $\bar{s} = s \cdot \sqrt[3]{2}$ – среднее геометрическое расстояние между осями кабелей. Тогда в терминах Q и Δ выражение для определения действующего значения тока в экране каждого кабеля будет иметь следующий вид:

$$I_k^{approx} = I \cdot \sqrt{\frac{Q^2 \cdot \ln^2 \Delta \sqrt[3]{2}}{1 + Q^2 \cdot \ln^2 \Delta \sqrt[3]{2}}}. \quad (5)$$

Погрешность применения этого выражения может быть рассчитана при помощи (3). Результаты расчета представлены на рис. 2.

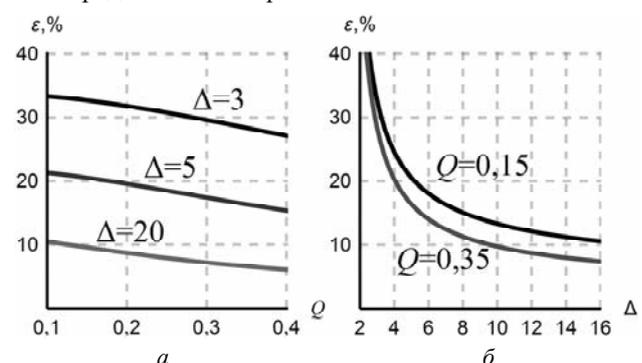


Рис. 2

Как и в предыдущем случае, погрешность слабо зависит от параметра Q (рис. 2,а) и существенно зависит от значения Δ (рис. 2,б). Погрешность 20 % достигается при $\Delta > 5$. При $\Delta < 3$ погрешность применения выражения (5) превышает 30 %.

Выражения для расчета действующих значений токов в двусторонне заземленных экранах при прокладке кабелей в плоскости также приведены в [8, С. 227]. В терминах Q и Δ их можно записать следующим образом:

$$I_1^{approx} = I \cdot \sqrt{0,75 \cdot \frac{Q^2 \ln^2 2\Delta}{1 + Q^2 \ln^2 2\Delta} + 0,25 \cdot \frac{Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}}{1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Q^3 \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}} \cdot \ln 2}{(1 + Q^2 \ln^2 2\Delta) \cdot (1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}})},$$

$$I_2^{approx} = I \cdot \sqrt{\frac{Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}}{1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}}},$$

$$I_3^{approx} = I \cdot \sqrt{0,75 \cdot \frac{Q^2 \ln^2 2\Delta}{1 + Q^2 \ln^2 2\Delta} + 0,25 \cdot \frac{Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}}{1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}}} - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Q^3 \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}} \cdot \ln 2}{(1 + Q^2 \ln^2 2\Delta) \cdot (1 + Q^2 \ln^2 \frac{\Delta}{\sqrt[3]{2}})}}.$$

Исследуем погрешность расчета токов при помощи (6). На рис. 3 представлены зависимости погрешности ε от Q и Δ , рассчитанной согласно (3).

Наибольшая погрешность достигается при $\Delta = 4$, и она не превышает 15 %. В то же время, при $Q > 0,25$ погрешность превышает допустимое при инженерных расчетах значение 10 %.

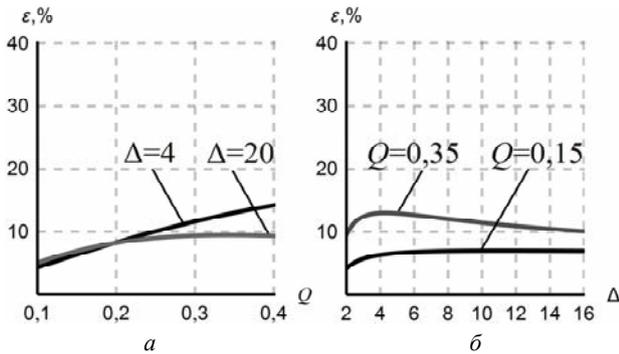


Рис. 3

Анализ погрешности приближенного выражения для токов в экранах при прокладке кабелей треугольником. Отдельно рассмотрим случай прокладки кабелей треугольником. В нормативном документе [7, С. 296] для расчета действующих токов в двусторонне заземленных экранах вместо (2) рекомендуется использовать следующее выражение:

$$I^{approx} = I \cdot \sqrt{\frac{0,0019}{R_{70}^2 + 0,0019}},$$

где R_{70} – сопротивление экрана 1 км кабеля, Ом/км.

Переписывая его через безразмерный параметр Q , получаем:

$$I^{approx} = I \cdot \sqrt{\frac{4,75 \cdot Q^2}{\pi^2 + 4,75 \cdot Q^2}}. \quad (7)$$

Поскольку действующие значения токов в экранах при прокладке треугольником равны, то погрешность применения приближенного выражения (7) определим следующим образом:

$$\varepsilon = \left| 1 - \frac{I^{approx}}{I^{sh}} \right| \cdot 100\%,$$

где I^{sh} рассчитывается согласно (2), а I^{approx} рассчитывается согласно (7).

Графики зависимостей ε от Q и Δ представлены на рис. 4. Как видно из рис. 4,а, погрешность слабо меняется при варьировании Q , что говорит о несущественном влиянии активного сопротивления. Из зависимости, представленной на рис. 4,б, можно сделать вывод, что погрешность приближенной формулы (7) не превышает 20 % только при $\Delta < 2,4$. В то же время, при $\Delta > 5$ погрешность ε превышает 50 %.

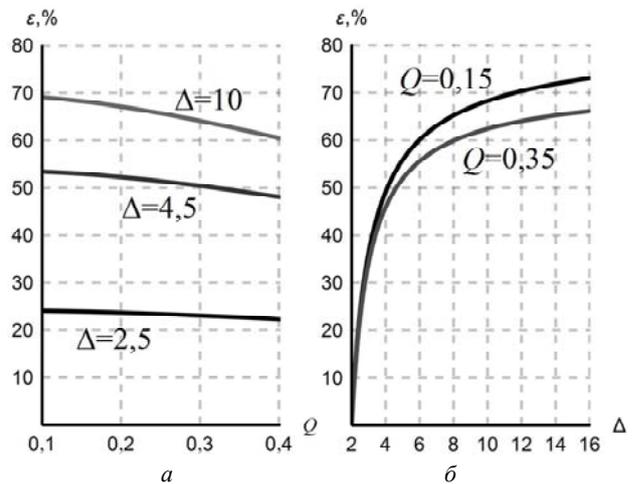


Рис. 4

Таким образом, при расчете действующих значений токов в экранах кабелей при двустороннем заземлении рекомендуется использовать выражения (1) в случае прокладки кабелей в плоскости и выражение (2) в случае прокладки треугольником.

Выводы.

1. Получены аналитические выражения, которые для случаев прокладки кабелей в плоскости и треугольником позволяют с погрешностью 5 % проводить расчет

действующих значений токов в экранах кабелей при их двустороннем заземлении.

2. Установлено, что погрешность расчета действующих значений токов в экранах при помощи приближенных выражений, известных из литературных источников, превышает 30 % в широком диапазоне параметров кабельной линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров А.В. Разработка методики выбора энергоэффективной системы заземления экранов одножильных силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6-500 кВ: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / А.В. Быстров. – Москва, 2014. – 20 с.
2. Гринченко В.С. Підвищення ефективності екранування техногенного магнітного поля високовольтних кабельних ліній // Вісник Національної академії наук України. – 2014. – №8. – С. 71-76.
3. Розов В.Ю., Добродеев П.Н., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Повышение эффективности контурного экранирования магнитного поля высоковольтных кабельных линий // Технічна електродинаміка. – 2016. – №4. – С. 5-7.
4. Розов В.Ю., Квицинский А.А., Добродеев П.Н., Гринченко В.С., Ерисов А.В., Ткаченко А.О. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов // Электротехніка і електромеханіка. – 2015. – №4. – С. 56-61. doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.11.
5. Антонетс Т.Ю., Веприк Ю.М., Щебенюк Л.А. Дослідження нагрівання силових кабелів із зшитого поліетиленовою ізоляцією на напругу до 110 кВ // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №6. – С. 43-46. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.07.
6. Щебенюк Л.А., Антонетс Т.Ю. Дослідження втрат в ізоляції високовольтних силових кабелів з полімерною ізоляцією // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №4. – С. 58-62. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.08.
7. Правила улаштування електроустановок. Вид. 5-те, перероб. й доп. – Х.: Мінерговугілля України, 2014. – 793 с.
8. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.
9. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справ. кн. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 487 с.
10. Розов В.Ю., Ткаченко А.О., Ерисов А.В., Гринченко В.С. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей // Технічна електродинаміка. – 2017. – №2. – С. 13-18.

REFERENCES

1. Bystrov A.V. *Razrabotka metodiki vybora energoeffektivnoi sistemy zazemleniia ekranov odnozhil'nykh silovykh kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena na napriazhenie 6-500 kV*. Autoref. diss. kand. techn. nauk [The development of selection methodology of energy efficient grounding systems of 6-500 kV XLPE insulated single-core power cable shields. Abstracts cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2014. 20 p. (Rus).
2. Grinchenko V.S. Increase of screening efficiency of technogenic magnetic field of underground high-voltage power cables. *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini – Herald of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2014, no.8, pp. 71-76. (Ukr).
3. Rozov V.Yu., Dobrodeyev P.N., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Increasing the efficiency of contour shielding of the magnetic field of high-voltage cable lines. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2016, no.4, pp. 5-7. (Rus).

4. Rozov V.Yu., Kvytsynskiy A.A., Dobrodeyev P.N., Grinchenko V.S., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Study of the magnetic field of three phase lines of single core power cables with two-end bonding of their shields. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.4, pp. 56-61. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.11.

5. Antonets T.Yu., Vepryk Yu.M., Shchebeniuk L.A. Heat tests of power cables with XLPE insulation at direct voltages up to 110 Kv. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.6, pp. 43-46. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.07.

6. Shchebeniuk L.A., Antonets T.Yu. Investigation of losses in insulation of high-voltage power cables with XLPE insulation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.4, pp. 58-62. (Ukr). doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.08.

7. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [Electrical installation regulations]. Kharkiv, Minenergovugillya of Ukraine Publ., 2014. 793 p. (Ukr).

8. Larina E.T. *Silovye kabeli i vysokovoltnye kabelnye linii* [Power cables and high-voltage cable lines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 464 p. (Rus).

9. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. *Raschet induktivnostey* [Inductance calculations]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p. (Rus).

10. Rozov V.Yu., Tkachenko A.O., Erisov A.V., Grinchenko V.S. Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2017, no.2, pp. 13-18. (Rus).

Поступила (received) 18.01.2017

Гринченко Владимир Сергеевич¹, к.т.н.,
Ткаченко Александр Олегович¹, аспирант,
Гринченко Наталья Валерьевна², к.т.н.

¹Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone +380 572 992162, e-mail: vsgrinchenko@gmail.com, oleksandr.tk7@gmail.com

²Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, 61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7, тел/phone +380 57 7301055

V.S. Grinchenko¹, O.O. Tkachenko¹, N.V. Grinchenko²

¹State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

²Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine.

Improving calculation accuracy of currents in cable shields at double-sided grounding of three-phase cable line.

This paper deals with the calculation of currents in shields of single-core cables at double-sided grounding of three-phase cable lines. We consider flat and trefoil cable lines and receive the analytical expressions for RMS currents in the shields of cables. These expressions allow reducing the shield current calculation error to value of 5 %. We analyze the known approximate expressions for RMS currents in the shields of cables and represent dependencies of corresponding calculation errors on cable line dimensionless parameters. These dimensionless parameters are determined by the distance between the axes of the cables, the radius and the resistance of shields. References 10, figures 4.

Key words: cable line, shield of a cable, shield current, double-sided grounding.

This work was supported by the State Fund for Fundamental Research of Ukraine under grant Ф70/18937.