

УДК 621.315.23

Подземная трехфазная линия электропередачи

Т. З. Сиукаев, Б. А. Дудин, Ю. Л. Беньяш, М. В. Шевлюгин, В. В. Варичева

Российский университет транспорта, Российская Федерация, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9ф, ГСП-4

Для цитирования: Сиукаев Т. З., Дудин Б. А., Беньяш Ю. Л., Шевлюгин М. В., Варичева В. В. Подземная трехфазная линия электропередачи // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 49–56. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-49-56

Аннотация

Цель: Рассмотрение конструктивно-технологического решения для компенсации реактивной мощности в кабельной линии, позволяющего снизить потери электроэнергии и повысить надежность системы электроснабжения. **Методы:** Метод аналитического обзора преимуществ и недостатков использования подземных кабельных линий электропередачи; расчетно-аналитическое исследование проводилось с применением теории длинных линий. **Результаты:** Проведены расчеты параметров трехфазной системы электроснабжения при различных межфазных расстояниях: результаты расчетов показывают емкостной характер комплекса входного сопротивления в режиме холостого хода и характер зависимости емкости кабельной линии от межфазного расстояния. **Практическая значимость:** Результаты работы подчеркивают преимущества использования подземных трехфазных линий электропередачи и обосновывают применение предлагаемой конструкции.

Ключевые слова: Подземная кабельная линия электропередачи, емкостной ток, реактивная мощность, трехфазная система электроснабжения, теория длинных линий, потери электроэнергии.

Кабельные линии электропередачи играют важную роль в обеспечении надежного и безопасного электроснабжения в различных условиях. Кабельная линия электропередачи — это система, используемая для передачи электроэнергии с помощью подземных или подводных кабелей. Такие линии обеспечивают надежную и безопасную передачу электроэнергии, особенно в условиях, где воздушные линии не могут быть использованы.

Подземные кабели могут быть одножильными или многожильными, с различными типами изоляции. Подводные кабели имеют дополнительную защиту от влаги и коррозии.

К преимуществам использования подземных кабельных линий относятся отсутствие необходимости в вырубке деревьев для прокладки линий и эстетика их прокладки, позволяющая не портить внешний вид и ландшафт городской среды: например, в природных заповедниках и парках, где важно минимизировать воздействие на окружающую среду. Такие кабельные линии менее подвержены влиянию погодных условий, что снижает риски повреждений от природных явлений, и, соответственно, реже происходят обрывы и повреждения проводов. Подземные линии менее заметны и могут использоваться для электроснабжения объектов, требующих скрытности, таких как военные базы и стратегические объекты [1].

Основным недостатком подземных кабельных линий является большая емкость между проводами кабеля, наличие которой приводит к генерации линейной реактивной мощности даже при отсутствии нагрузки (режим холостого хода) [2, 3]. Это явление называется «емкостной ток», который может вызывать дополнительные потери энергии и снижать общую эффективность системы электроснабжения. Например, в [4] показано, что в кабельной линии длиной 100 км ток холостого хода в начале линии составляет 9 А на 1 кВ питающего напряжения, т. е. при $U_{\text{л}} = 10$ кВ ток линии составит 90 А. Для компенсации, генерируемой емкостью линии реактивной мощности, применяют специальные индуктивные реакторы, устанавливаемые в начале линии [5].

Индуктивные реакторы играют ключевую роль в компенсации реактивной мощности, генерируемой емкостью кабельной линии. Они работают следующим образом [6, 7]:

- индуктивные реакторы потребляют индуктивную реактивную мощность, которая компенсирует емкостную реактивную мощность, потребляемую кабельной линией, что позволяет снизить общий реактивный ток в системе;
- для правильного выбора реактора необходимо провести расчет реактивной мощности, потребляемой кабельной линией, и подобрать реактор с соответствующей индуктивностью;
- компенсация реактивной мощности снижает нагрузку на генераторы и трансформаторы, что повышает надежность всей системы электроснабжения [8, 9].

В связи с вышеизложенным авторами предлагается подземная система электроснабжения объектов, которая представляет собой систему трех одножильных кабелей, расположенных на специальной, удерживающей их по вершинам равностороннего треугольника, конструкции (рис. 1).

Также эта система может быть помещена в пластиковый короб или кабельный канал. Дополнительно в предлагаемой системе предусмотрена прокладка информационных оптоволоконных кабелей.

Авторами были проведены расчеты первичных параметров такой системы электроснабжения при различных расстояниях между проводами трехфазной системы. Каждая фаза рассматривалась как «длинная линия», и расчет производился с применением теории длинных линий, известных из курса теоретических основ электротехники [10].

Для расчета были определены первичные параметры линии:

$R_{\text{л(м)}}$ — продольное активное сопротивление проводов линии на единицу длины (1 метр);

$L_{\text{л(м)}}$ — индуктивность двух противостоящих друг другу участков линии на единицу длины (1 метр);

$C_{\text{л(м)}}$ — емкость, образованная противостоящими друг другу участками линии на единицу длины (1 метр);

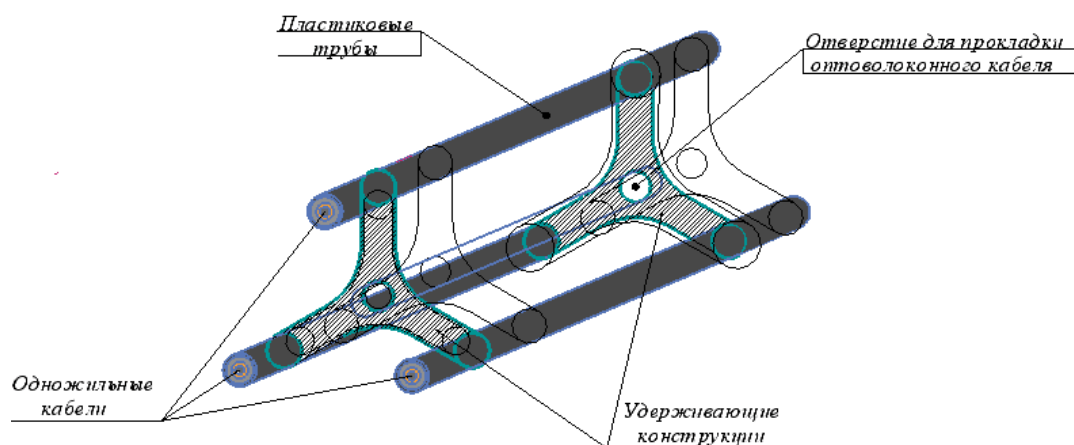


Рис. 1. Предлагаемая модернизация подземной трехфазной системы электроснабжения

$G_{л(м)}$ — поперечная проводимость, появляющаяся вследствие несовершенства изоляции между проводами линии на единицу длины (1 метр), причем она не является обратной величиной продольного активного сопротивления; А также вторичные параметры линии:

– продольное комплексное сопротивление линии на единицу длины (1 метр) на частоте $f(\omega = 2\pi f)$ определяется через $R_{л(м)}$ и $L_{л(м)}$ по формуле:

$$\underline{Z}_{0л(м)} = R_{л(м)} + j\omega \cdot L_{л(м)}. \quad (1)$$

– поперечная комплексная проводимость линии на единицу длины (1 метр) на частоте $f(\omega = 2\pi f)$ определяется через $G_{л(м)}$ и $C_{л(м)}$ по формуле:

$$\underline{Y}_{0л(м)} = G_{л(м)} + j\omega \cdot C_{л(м)}. \quad (2)$$

Непосредственно вторичными параметрами линии являются ее волновое сопротивление и постоянная распространения, которые определяются через продольное комплексное сопротивление и поперечную комплексную проводимость.

Волновое сопротивление:

$$\underline{Z}_{вл} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{0л(м)}}{\underline{Y}_{0л(м)}}}. \quad (3)$$

Постоянная распространения:

$$\underline{\gamma}_{л(м)} = \sqrt{\underline{Z}_{0л(м)} \cdot \underline{Y}_{0л(м)}} = \alpha_{л(м)} + j\beta_{л(м)}, \quad (4)$$

где α — коэффициент затухания, который характеризует собой затухание падающей волны на единицу длины линии;

β — коэффициент фазы, который характеризует изменение фазы падающей волны на единицу длины линии.

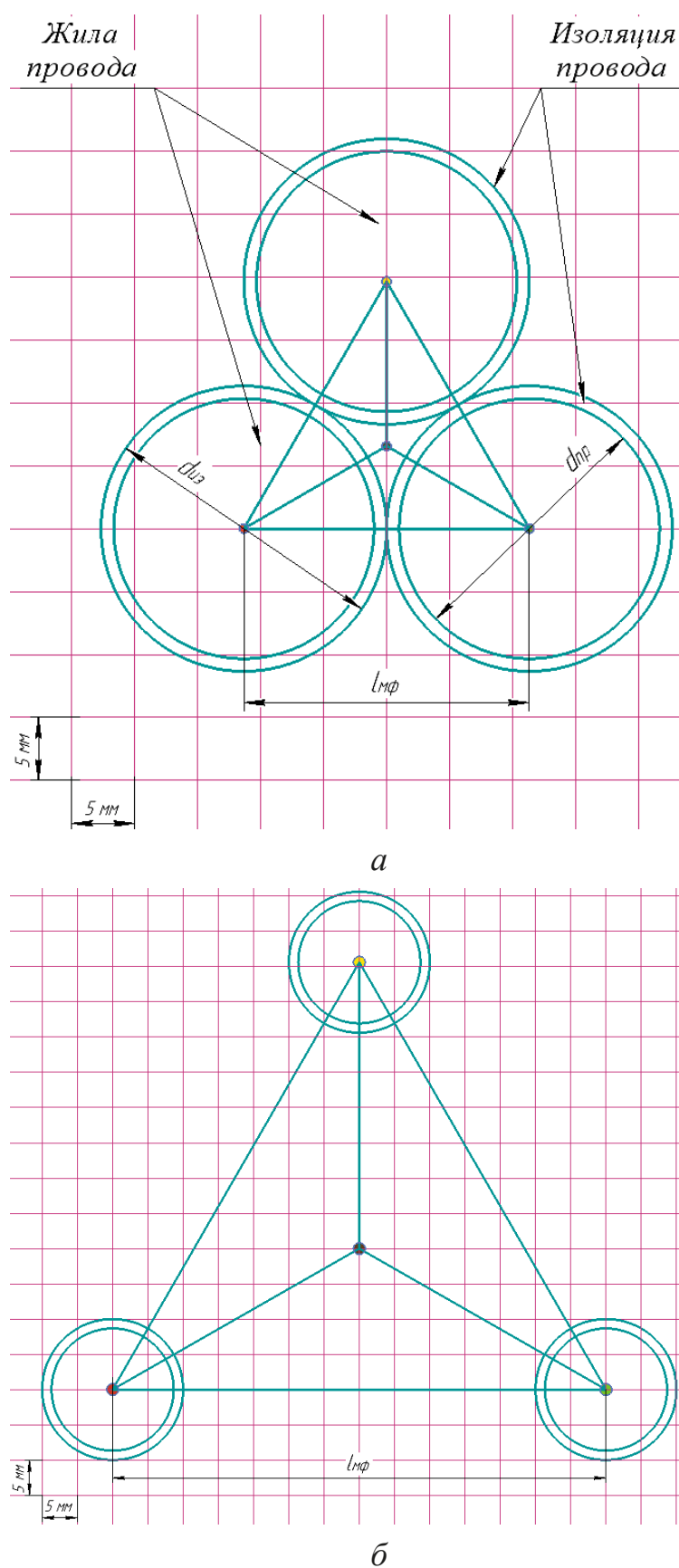


Рис. 2. Положение проводов подземной ЛЭП при различных расстояниях между геометрическими осями проводов: *а* — $l_{мф} = 22,5$ мм; *б* — $l_{мф} = 70$ мм

Для определения распределения напряжений и токов вдоль линии были записаны уравнения линии в гиперболических функциях:

$$\dot{U}(x) = \dot{U}_1 \cdot ch(\gamma_{Л(м)} \cdot x) - \dot{I}_1 \cdot Z_{ВЛ} \cdot sh(\gamma_{Л(м)} \cdot x). \quad (5)$$

$$\dot{I}(x) = \dot{I}_1 \cdot ch(\gamma_{Л(м)} \cdot x) - \frac{\dot{U}_1}{Z_{ВЛ}} \cdot sh(\gamma_{Л(м)} \cdot x). \quad (6)$$

Эта система уравнений, записанная в комплексной форме, применима для каждой пары фаз трехфазной системы напряжений.

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчетов комплексов входного сопротивления, модуля тока в начале и напряжения в конце линии, а также комплексной мощности в режиме холостого хода при различном межфазном расстоянии ($l_{мф}$, см) и при различных длинах линий (табл. 1 при $l_{л} = 100$ км, табл. 2 при $l_{л} = 20$ км). Сечение проводов фаз принималось $S_{пр} = 300$ мм² ($R_{пр} = 9,8$ мм), напряжение на входе линии $U_{л} = 1$ кВ.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетов первичных параметров
подземной трехфазной системы электроснабжения при длине линии $l_{л} = 100$ км

$l_{мф}$, см	$Z_{вх}$, Ом	$ I_1 $, А	$ U_2 $, В	S_1 , В·А	$C_{л}$, мкФ
2,25	$2 - j \cdot 109$	9,1	1061	$172 - j \cdot 9177$	28,4
2,5	$2 - j \cdot 237$	4,2	1031	$37 - j \cdot 4216$	13,2
3,0	$2,1 - j \cdot 403$	2,5	1021	$13 - j \cdot 2483$	7,8
4,0	$2,2 - j \cdot 617$	1,6	1017	$5,8 - j \cdot 1620$	5,1
6,0	$2,4 - j \cdot 910$	1,1	1014	$2,9 - j \cdot 1099$	3,5
10,0	$2,7 - j \cdot 1314$	0,8	1013	$1,6 - j \cdot 761$	2,4
20,0	$3,7 - j \cdot 2124$	0,5	1010	$0,8 - j \cdot 471$	1,5
30,0	$5 - j \cdot 2892$	0,35	1008	$0,6 - j \cdot 346$	1,1
40,0	$7 - j \cdot 3836$	0,26	1007	$0,5 - j \cdot 261$	0,8

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов первичных параметров
подземной трехфазной системы электроснабжения при длине линии $l_{л} = 20$ км

$l_{мф}$, см	$Z_{вх}$, Ом	$ I_1 $, А	$ U_2 $, В	S_1 , В·А	$C_{л}$, мкФ
2,25	$0,5 - j \cdot 562$	1,8	1002	$1,6 - j \cdot 1779$	5,7
2,5	$0,67 - j \cdot 1213$	0,83	1001	$0,45 - j \cdot 824,6$	2,6
3,0	$0,96 - j \cdot 2055$	0,49	1001	$0,23 - j \cdot 486,7$	1,55
4,0	$1,5 - j \cdot 3134$	0,32	1001	$0,15 - j \cdot 319,1$	1,02
6,0	$2,4 - j \cdot 4598$	0,22	1001	$0,11 - j \cdot 217,5$	0,69
10,0	$4,1 - j \cdot 6670$	0,15	1000	$0,09 - j \cdot 149,9$	0,48
20,0	$8,9 - j \cdot 10\,710$	0,09	1000	$0,08 - j \cdot 93,3$	0,3
30,0	$15,3 - j \cdot 14\,540$	0,07	1000	$0,07 - j \cdot 68,8$	0,22
40,0	$25,6 - j \cdot 19\,260$	0,05	1000	$0,07 - j \cdot 51,9$	0,17

Расчеты показывают, что комплекс входного сопротивления в режиме холостого хода носит емкостной характер. Комплекс полной мощности практически чисто реактивный и составляет от 2 до 10 кВА (при $l_{\text{л}} = 20$ км и $l_{\text{л}} = 100$ км соответственно) при минимальных межфазных расстояниях. Также при увеличении расстояния между фазными проводами на удерживающей конструкции до 30–40 см емкостной ток уменьшается в 20–30 раз. Это связано с тем, что зависимость емкости линии от межфазного расстояния ($l_{\text{мф}}$, см) носит ярко выраженный гиперболический характер.

Таким образом, в первом приближении применение предлагаемой системы электроснабжения позволяет сохранить преимущества кабельных линий и исключить недостатки, присущие последним.

Список источников

1. Сюрсин Е. С. Особенности эксплуатации и анализ технического состояния кабельных линий в РВСН: сб. научных трудов 4 ЦНИИ МО РФ / Е. С. Сюрсин, А. С. Верещагин. — Королев, 2018. — Вып. 139. — Т. 1, Ч. 2. — С. 181–185.
2. Иоссель Ю. А. Расчет электрической емкости / Ю. А. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 288 с.
3. Хренков Н. Н. Расчет и измерение емкости двухжильных кабелей / Н. Н. Хренков // Кабели и провода. — 2022. — № 4. — С. 23–29.
4. Дмитриев М. В. Особенности передачи мощности по протяженным КЛ 6–500 кВ переменного напряжения / М. В. Дмитриев // Электроэнергия передача и распределение. — 2017. — № 2(41). — С. 28–34.
5. Грешняков Г. В. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей / Г. В. Грешняков, Г. Г. Ковалев, С. Д. Дубицкий // Кабели и провода. — 2011. — С. 12–16.
6. Белоруссов Н. И. Электрические кабели и провода / Н. И. Белоруссов. — М.: Энергия, 1971. — 512 с.
7. Солуянов Ю. И. Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях на основе анализа их фактических нагрузок / Ю. И. Солуянов, А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин, В. А. Халтурин // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2020. — № 5(62). — С. 68–73.
8. Кучеренко Д. Е. Минимизация потерь электроэнергии / Д. Е. Кучеренко, Р. Е. Кучеренко, И. П. Петрушенко // Энергосбережение и водоподготовка. — 2023. — № 6(146). — С. 27–29.
9. Воротницкий В. Э. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающих организаций / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина, В. Н. Апрыткин // Энергосбережение. — 2000. — № 3. — С. 53–56.
10. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 1. Электрические цепи: учебник для вузов / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — М.: Юрайт, 2023. — 831 с.

Дата поступления: 23.03.2025

Решение о публикации: 15.05.2025

Контактная информация:

СИУКАЕВ Тамерлан Заурович — аспирант; stz777@mail.ru

ДУДИН Борис Алексеевич — канд. техн. наук, доц.; dubodin@mail.ru

БЕНЬЯШ Юрий Леонидович — ст. преподаватель; yurlbe@mail.ru

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — д-р техн. наук, доц.; mx_sh@mail.ru

ВАРИЧЕВА Вероника Владимировна — аспирант; veronicka.varicheva@yandex.com

Underground Three-Phase Power Transmission Line

T. Z. Siukaev, B. A. Dudin, Yu. L. Ben'yash, M. V. Shevlyugin, V. V. Varicheva

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., OCP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Siukaev T. Z., Dudin B. A., Ben'yash Yu. L., Shevlyugin M. V., Varicheva V. V. Underground Three-Phase Power Transmission Line. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 49–56. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-49-56

Summary

Purpose: To consider a design and technological solution for reactive power compensation in a cable line. Firstly, to reduce power losses and, secondly, to increase the reliability of the power supply system. **Methods:** The method of analytical review of the advantages and disadvantages of underground cable transmission lines was employed; the calculation and analytical research was carried out using the theory of long lines. **Results:** The calculations for the three-phase power supply system parameters were conducted at varying interphase distances. The calculation results have demonstrated the capacitive nature of the input resistance complex in the idle mode and the dependence of the cable line capacitance on the interphase distance. **Practical significance:** The research results emphasize the advantages of using underground three-phase power transmission lines and justify the application of the proposed design.

Keywords: Underground power line, capacitive current, reactive power, three-phase power supply system, long line theory, power losses.

References

1. Syursin E. S., Vereshchagin A. S. *Osobennosti ekspluatatsii i analiz tekhnicheskogo sostoyaniya kabel'nykh liniy v RVSN: sb. nauchnykh trudov 4 TsNII MO RF* [Features of operation and analysis of the technical condition of cable lines in the Strategic Missile Forces: collection of scientific papers of the 4th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation]. Korolev, 2018, Iss. 139, vol. 1, part 2, pp. 181–185. (In Russian)
2. Iossel' Yu. A., Kochanov E. S., Strunskiy M. G. *Raschet elektricheskoy emkosti. 2-e izd., pererab. i dop.* [Calculation of electrical capacity. 2nd ed., revised. and additional]. L.: Energoizdat Publ., 1981, 288 p. (In Russian)

3. Khrenkov N. N. Raschet i izmerenie emkosti dvukhzhil'nykh kabeley [Calculation and measurement of the capacity of two-core cables]. *Kabeli i provoda* [Cables and wires]. 2022, Iss. 4, pp. 23–29. (In Russian)
4. Dmitriev M. V. Osobennosti peredachi moshchnosti po protyazhennym KL 6–500 kV peremennogo napryazheniya [Features of power transmission over extended 6–500 kV AC cable lines]. *Elektroenergiya peredacha i raspredelenie* [Electric power transmission and distribution]. 2017, Iss. 2(41), pp. 28–34. (In Russian)
5. Greshnyakov G. V., Kovalev G. G., Dubitskiy S. D. K voprosu o vybore predel'no dopustimyykh tokov silovykh kabeley [On the issue of selecting maximum permissible currents of power cables]. *Kabeli i provoda* [Cables and wires]. 2011, pp. 12–16. (In Russian)
6. Belorussov N. I. *Elektricheskie kabeli i provoda* [Electrical cables and wires]. Moscow: Energiya Publ., 1971, 512 p. (In Russian)
7. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Akhmetshin A. R., Khalturin V. A. Energoberegayushchie resheniya v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh na osnove analiza ikh fakticheskikh nagruzok [Energy-saving solutions in distribution electrical networks based on the analysis of their actual loads]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transmission and distribution]. 2020, Iss. 5(62), pp. 68–73. (In Russian)
8. Kucherenko D. E., Kucherenko R. E., Petrushenko I. P. Minimizatsiya poter' elektroenergii [Minimization of electric power losses]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment]. 2023, Iss. 6(146), pp. 27–29. (In Russian)
9. Vorotnitskiy V. E., Kalinkina M. A., Apriyatin V. N. Meropriyatiya po snizheniyu poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh energosnabzhayushchikh organizatsiy [Measures to reduce electric power losses in electrical networks of energy supplying organizations]. *Energoberezhenie* [Energy saving]. 2000, Iss. 3, pp. 53–56. (In Russian)
10. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. V 2 t. T. 1. Elektricheskie tsepi: uchebnik dlya vuzov. 12-e izd., ispr. i dop.* [Theoretical foundations of electrical engineering. In 2 volumes. Volume 1. Electrical circuits: textbook for universities. 12th ed., corrected. and additional]. Moscow: Yurayt Publ., 2023, 831 p. (In Russian)

Received: March 23, 2025

Accepted: May 15, 2025

Author's information:

Tamerlan Z. SIUKAEV — Postgraduate Student; stz777@mail.ru

Boris A. DUDIN — PhD in Engineering, Associate Professor; dubodin@mail.ru

Yury L. BEN'YASH — Senior Lecturer; yurlbe@mail.ru

Maksim V. SHEVLYUGIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; mx_sh@mail.ru

Veronika V. VARICHEVA — Postgraduate student; veronicka.varicheva@yandex.com