

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-111-127>

УДК 621.311.1

Потери энергии в конструктивных элементах электрооборудования при нарушении симметрии параметров режима электропередачи

Н. Л. Новиков¹⁾, Р. А. Нечитаев²⁾, М. А. Кашин³⁾

¹⁾Россети Научно-технический центр (Москва, Российская Федерация),

²⁾Научно-исследовательский институт энергетических сооружений
(Москва, Российская Федерация),

³⁾Белэнергосетьпроект (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Исследована несимметрия параметров режима электропередачи при возникновении индукционного тока в конструктивных элементах электрооборудования. Вращающееся магнитное поле, производимое трехфазным переменным током, влияет на симметричность системы электропередачи, при нарушении которой появляется индукционный ток, вызывающий дополнительные нагревы электрооборудования. При нахождении потোকосцепления с объектом исследования, обусловленного нескомпенсированным магнитным полем, расчет выполнен с помощью уравнения Пуассона для векторного магнитного потенциала. Приведены основные соотношения для расчета несимметричного режима с учетом потерь в земле с помощью метода симметричных составляющих. Для расчета и верификации индукционных нагревов предложен параметрический синтез баланса энергии в конструктивных элементах электрооборудования, расположенного на открытом воздухе, учитывая процессы естественной конвекции, излучения и теплопроводности. На термограммах силового трансформатора и порталной опоры на оттяжках показаны дополнительные потери энергии от индукционных токов. Расчет электропередачи по воздушной линии электропередачи (ВЛ) с учетом взаимной индукции несущей конструкции проводится в трехфазной системе векторов и в преобразованной системе по методу симметричных составляющих для случая продольной несимметрии. Учет сопротивления земли ведет к изменению соотношения активной и реактивной составляющих – активные потери мощности возрастают, а реактивные становятся меньше, соответственно угол нагрузки уменьшается. Дополнительные потери электроэнергии, возникающие в несбалансированном и несимметричном режиме работы электроустановки, не учтены в нормативных документах Российской Федерации. Предложены мероприятия по снижению потерь энергии в приведенных примерах и выполнен технико-экономический расчет для ВЛ. Результат работы может быть полезен при проектировании и модернизации силовых трансформаторов и воздушных линий электропередачи.

Ключевые слова: баланс энергии, параметрический синтез, векторный магнитный потенциал, несимметрия, напряжение смещения нейтрали, метод симметричных составляющих, несущая конструкция, индукционный ток, индукционный нагрев, уравнение теплопроводности, сопротивление земли, верификация, магнитный шунт, управляемые самокомпенсирующиеся воздушные линии, снижение потерь энергии

Для цитирования: Новиков, Н. Л. Потери энергии в конструктивных элементах электрооборудования при нарушении симметрии параметров режима электропередачи / Н. Л. Новиков, Р. А. Нечитаев, М. А. Кашин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 111–127. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-111-127>

Адрес для переписки

Нечитаев Роман Александрович
Научно-исследовательский институт
энергетических сооружений
Строительный проезд, дом 7А, корпус 29,
125362, г. Москва, Российская Федерация
Тел. +7 495 727-36-05 #3114
mangerok@mail.ru

Address for correspondence

Nechitaev Roman A.
Scientific Research Institute
of Energy Structures
Stroitelny proezd, 7A/29,
125362, Moscow, Russian Federation
Tel. +7 (495) 727-36-05 #3114
mangerok@mail.ru

Structural Elements Energy Losses of Electrical Equipment due to a Violation of Symmetry of Power Transmission Mode Parameters

N. L. Novikov¹⁾, R. A. Nechitaev²⁾, M. A. Kashin³⁾

¹⁾Rosseti R&D Center (Moscow, Russian Federation),

²⁾Scientific Research Institute of Energy Structures (Moscow, Russian Federation),

³⁾Belenergonetproject (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The asymmetry of power transmission mode parameters due to the induction current effect on structural elements of electrical equipment is investigated. Three-phase AC current produces a rotating magnetic field that affects the power transmission system symmetry, and when it is violated, the induction current appears that causes additional heating of the electrical equipment. To find the flux linkage with research object caused by uncompensated magnetic field, a calculation was performed using the Poisson equation for vector magnetic potential. The symmetrical components method is used to calculate power losses in the asymmetric mode, taking into account losses in the ground. There is proposed a parametric synthesis of energy balance in structural elements of outdoors electrical equipment to calculate and verify the induction heating, taking into account the processes of natural convection, radiation and thermal conductivity. There are shown the thermograms of power transformer and gantry pillars on guy rods to open the additional energy losses caused by induction currents. Calculation of power transmission via overhead line taking into account the mutual induction of supporting structure was carried out in a three-phase vector system and in a transformed system using the symmetrical component method for the case of longitudinal asymmetry. Accounting the earth's resistance leads to a change in the ratio of active and reactive components, i.e. active power losses increase, and reactive ones become smaller, and, correspondingly, the load angle decreases. There are proposed the solutions in above examples to reduce additional energy losses and a technical and economic benefits for overhead line is performed. The result of the work can be useful in the design and modification of power transformers and overhead power transmission lines.

Key words: energy balance, parametric synthesis, vector magnetic potential, symmetrical component method, magnetic field asymmetry, neutral bias voltage, supporting structure, induction current, induction heating, heat equation, earth resistance, verification, magnetic shunt, controlled self-compensating overhead lines, energy losses reduction

For citation: Novikov N. L., Nechitaev R. A., Kashin M. A. (2025) Structural Elements Energy Losses of Electrical Equipment due to a Violation of Symmetry of Power Transmission Mode Parameters. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 111–127. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-111-127> (in Russian)

Введение

После утверждения ведомственного документа [1] обоснование и расчет нормативов технологических потерь электроэнергии по инструкции [2] на основе нормативных характеристик по классическим законам электротехники потеряли роль управления на технико-экономическом уровне, что фактически упразднило актуальность проблемы снижения технических потерь энергии (ПЭ). Совершенствование методики расчетов и повышения объективности нормирования технологических потерь необходимо для определения приоритета и расхода финансовых и материальных ресурсов на снижение потерь [3]. Так, например, для предотвращения вихревых токовых нагревов арматура воздушной линии электропередачи (ВЛ) должна выполняться из немагнитных материалов, для предотвращения ПЭ в грозотросовых контурах применяется одностороннее заземление. Однако осталось

без внимания, что в несущих конструктивных элементах электрооборудования (ЭО) тоже индуцируются токи, которые приводят к нарушению симметрии параметров режима и дополнительным ПЭ [4], что и должно учитываться как составляющая технических потерь.

Важнейшее значение в организации, проведении исследований и решении проблем повышения эффективности передачи электроэнергии на большие расстояния по ВЛ принадлежит коллективам Московского энергетического института, института «Энергосетьпроект» и его отделений, Санкт-Петербургского политехнического университета (ЛПИ), Новосибирского государственного технического университета (бывший НЭТИ), Белорусского национального технического университета, Института энергетики Академии наук Молдовы, НТЦ Электроэнергетики и Сибирского института энергетики (СибНИИЭ) Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы, предприятия «Союзтехэнерго» (ОРГРЭС), Всероссийского научно-исследовательского института энергетики (ВНИИЭ). Большой вклад внесли работы В. А. Веникова, В. К. Щербакова, М. Л. Левинштейна, К. П. Кадомской, В. М. Чебана, С. С. Рокотяна, Г. Е. Поспелова, Т. Г. Поспеловой, В. М. Постолатий, Е. В. Быковой, Г. Н. Александрова, Ю. С. Железко, Ю. Г. Шакаряна, В. Э. Воротницкого, Л. В. Тимашовой и др.

Методика расчета мощности в несбалансированном и несимметричном режиме определена в зарубежном стандарте IEEE [5], проблемы качества функционирования воздушных линий электропередачи высокого напряжения при возникновении кондуктивных электромагнитных помех и способы повышения энергоэффективности электросетевых конструкций рассмотрены в [6]. В [7] показан пример вычисления потерь электроэнергии в несимметричном режиме программным методом по данным измерений параметров электросети на действующей линии электропередачи. История применения управляемых гибких линий электропередачи в электрических сетях энергосистем опубликована в [8].

Параметрический синтез баланса энергии в конструктивных элементах электрооборудования

Баланс электрической энергии. На схеме замещения трехфазная электроустановка представляется в виде источника электродвижущей силы (ЭДС) и полного сопротивления элемента каждой фазы. При этом необходимо учитывать взаимное влияние вращающегося магнитного поля в окружающем пространстве с несущими конструктивными элементами, как показано на рис. 1.

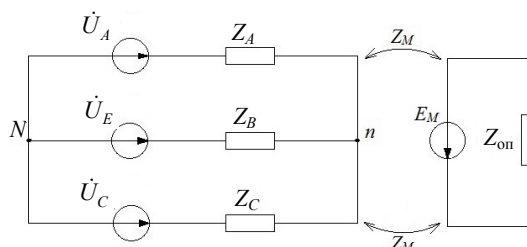


Рис. 1. Схема замещения трехфазной электроустановки с несущей конструкцией

Fig. 1. Equivalent circuit of a three-phase installation with supporting structure

При математическом моделировании переменное магнитное поле записывается как дифференциальное уравнение 2-го порядка (неоднородное дифференциальное уравнение Лапласа или уравнение Пуассона) относительно векторного магнитного потенциала $\vec{A}$ [9]

$$\Delta \vec{A} = -q_0, \quad (1)$$

где Δ – векторный лапласиан; q_0 – функция источника неоднородности вращающегося магнитного поля (несимметрия).

Комплексное взаимное сопротивление Z_M между электроустановкой (ЭУ) и несущей конструкцией с внутренним сопротивлением $Z_{\text{оп}}$ (рис. 1) определяется по коэффициенту взаимоиנדукции и величине потокосцепления Ψ

$$E_M(t) = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -M \frac{\partial i}{\partial t} = -j\omega M \dot{I}. \quad (2)$$

Для нахождения магнитного потока Φ , производимого током i , рассчитывается двойной интеграл магнитной индукции $\vec{B}$ в площади взаимодействия S или криволинейный интеграл вдоль контура взаимодействия длиной l от векторного магнитного потенциала $\vec{A}$

$$\Phi = \iint_S \vec{B} d\vec{S} = \iint_S \text{rot} \vec{A} d\vec{S} = \oint_l \vec{A} d\vec{l}. \quad (3)$$

Задача расчета магнитного потока сквозь замкнутый контур сводится к нахождению величины векторного магнитного потенциала на границах этого контура:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{\delta}}{r} dV = \frac{\mu i}{4\pi} \int \frac{[d\vec{y}, \vec{r}_0]}{r} = \frac{\mu i}{4\pi} \int_m^{r_n} \frac{d\vec{r}}{\text{tg} \alpha \cdot r}, \quad (4)$$

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{\mu i \cdot \cos \alpha}{4\pi \cdot \text{tg} \alpha} \sum_{m=1}^{n=\infty} \int_{l_m}^{l_n} \int_{r_m}^{r_n} \frac{d\vec{l} \cdot d\vec{r}}{r}, \quad (5)$$

$$M = \frac{\mu \cos^2 \alpha}{4\pi \sin \alpha} \sum_{m=1}^{n=\infty} \int_{l_m}^{l_n} \int_{r_m}^{r_n} \frac{d\vec{l} d\vec{r}}{r}, \quad (6)$$

где $d\vec{y}$ – элемент длины проводника, м; $\vec{r}_0$ – единичный вектор, проведенный от $d\vec{y}$ к точке, в которой подсчитываем векторный потенциал; r – расстояние от элемента длины проводника до точки расчета векторного магнитного потенциала, м; α – угол между направлением векторного магнитного потенциала элемента тока и контуром потокосцепления; m, n – границы участков интегрирования контура потокосцепления; M – коэффициент взаимоиנדукции между ЭУ и объектом исследования, Гн.

Введение дополнительного сопротивления в схему замещения ЭУ ведет к продольной несимметрии [10]. Одним из определяющих параметров, характеризующих (не)симметрию электропередачи переменного тока и напряжения, является напряжение смещения нейтрали, определяемое из соотношения

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (7)$$

где $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$ – комплексные фазные напряжения ЭУ; Y_A , Y_B , Y_C – комплексные фазные проводимости ЭУ.

В таком случае при неравенстве одного из сопротивлений фазы $Z_A = Z_C \neq Z_B$ уравнение (7) преобразуется в следующее:

$$\dot{U}_{nN} = \dot{U}_\phi e^{j\varphi} \frac{Z_B - Z_{A,C}}{Z_{A,C} + 2Z_B}, \quad (8)$$

где Z_A , Z_B , Z_C – комплексные фазные сопротивления ЭУ.

Для освобождения от электродинамической линейной зависимости трехфазной системы токов и напряжений, показанной на рис. 1, в расчетах применяют метод симметричных составляющих. В таком случае падение напряжения на ЭУ запишется в виде алгебраической суммы компонентов прямой, обратной и нулевой последовательностей фаз [11]

$$\Delta \dot{U}(\dot{I}_{л\text{ЭП}}) = \dot{I}_A(Z_A - Z_M) + \dot{I}_B Z_B + \dot{I}_C(Z_C - Z_M) = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_0 Z_0, \quad (9)$$

где $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ – комплексные фазные токи ЭУ; Z_A , Z_B , Z_C – комплексные фазные сопротивления ЭУ; $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_0$ – комплексные токи прямой, обратной и нулевой последовательностей ЭУ; Z_1 , Z_2 , Z_0 – комплексные сопротивления ЭУ прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Так как сопротивления фаз оказываются различными вследствие электромагнитного влияния несущей конструкции и перемещаются друг относительно друга, например из-за транспонировки в случае ВЛ, сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей также будут различными (коэффициенты связи – переменные величины (рис. 2)):

$$Z_1 = Z_\phi; \quad (10)$$

$$Z_2 = Z_{\text{оп}}/N; \quad (11)$$

$$Z_0 = R + 3r_3 + j0,435 \lg \frac{D}{\sqrt[3]{d^2 p}}, \quad (12)$$

$$Z_M = r_3 L + j\omega M L, \quad (13)$$

где Z_ϕ – комплексное сопротивление фазы ЭУ, Ом; $Z_{\text{оп}}$ – комплексное сопротивление несущей конструкции ЭУ, Ом; N – количество единиц электрообо-

рудования с несущей конструкцией (число опор ВЛ), ед.; R – активное сопротивление фазы, Ом; r_3 – сопротивление земли на частоте 50 Гц, Ом/км; L – длина ВЛ, км; D – глубина залегания линии обратного тока, м; d – среднегеометрическое расстояние между фазами, м; p – эквивалентный радиус провода, м.

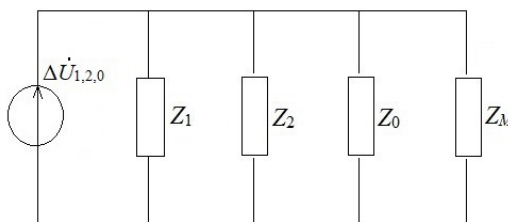


Рис. 2. Трансформация схемы замещения ЭУ с помощью метода симметричных составляющих

Fig. 2. Three-phase alternative current installation transformation by the symmetrical components' method

Симметричные составляющие падений напряжений в соответствии с (9):

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{1}{3} (\Delta \dot{U}_A + a \cdot \Delta \dot{U}_B + a^2 \cdot \Delta \dot{U}_C); \quad (14)$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \frac{1}{3} (\Delta \dot{U}_A + a^2 \cdot \Delta \dot{U}_B + a \cdot \Delta \dot{U}_C); \quad (15)$$

$$\Delta \dot{U}_0 = \frac{1}{3} (\Delta \dot{U}_A + \Delta \dot{U}_B + \Delta \dot{U}_C). \quad (16)$$

Когда появляется продольная несимметрия электропередачи вследствие увеличения сопротивления в одной из фаз на величину Z_M , ток прямой последовательности для системы симметричных составляющих определяется с учетом эквивалентного суммарного сопротивления [12]

$$\dot{I}_1 = \frac{\Delta \dot{U}_1}{Z_1 + Z_\Delta}, \quad (17)$$

где Z_Δ – результирующее сопротивление относительно точки несимметрии, определяемое по формуле

$$\frac{1}{Z_\Delta} = \frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_2} + \frac{3}{Z_M}. \quad (18)$$

Токи обратной и нулевой последовательностей определяются по следующим соотношениям:

$$\dot{I}_2 = -\frac{Z_\Delta}{Z_2} \cdot \dot{I}_1; \quad (19)$$

$$\dot{I}_0 = -\frac{Z_\Delta}{Z_0} \cdot \dot{I}_1. \quad (20)$$

Определяющим параметром по току обратной последовательности (19) становится характеристика Z_2 или комплексное полное сопротивление несущей конструкции.

Потери мощности в таком случае складываются из составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей [5]:

$$\Delta S_{ABC} = |\Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + j(\Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_C)|; \quad (21)$$

$$\Delta S_1 = 3\Delta U_1 I_1 \cos \varphi_1 + 3\Delta U_1 I_1 \sin \varphi_1 = |\Delta P_1 + j\Delta Q_1|; \quad (22)$$

$$\Delta S_2 = 3\Delta U_2 I_2 \cos \varphi_2 + 3\Delta U_2 I_2 \sin \varphi_2 = |\Delta P_2 + j\Delta Q_2|; \quad (23)$$

$$\Delta S_0 = 3\Delta U_0 I_0 \cos \varphi_0 + 3\Delta U_0 I_0 \sin \varphi_0 = |\Delta P_0 + j\Delta Q_0|; \quad (24)$$

$$\Delta S_{120} = |\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_0 + j(\Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_0)|. \quad (25)$$

При записи приведенных уравнений баланса электрической энергии в ЭУ не учитывались поперечные составляющие тока утечки и тока проводимости, связанные с энергией электрического поля, что не вносит существенных погрешностей для частот до 1 МГц и удельного сопротивления грунта не более 100 Ом·м [13]. Также при вычислении интегралов (3)–(6) для нахождения потокосцепления с объектом не учитывалось влияние магнитного поля, инициируемого токами в земле.

Баланс тепловой энергии. Исходя из первого закона термодинамики тепловой баланс энергии в конструктивных элементах ЭО представляется следующим уравнением:

$$Q_{\text{дж}} + Q_{\text{сол}} = \Delta Q + \Delta Q_{\text{из}} + \Delta Q_{\text{к}} + \Delta Q_{\text{тпр}}, \quad (26)$$

где $Q_{\text{дж}}$ – тепловая энергия от нагрева электрическим током несущей конструкции, Дж; $Q_{\text{сол}}$ – количество теплоты, получаемое при поглощении солнечной энергии несущей конструкцией, Дж; ΔQ – внутренняя энергия несущей конструкции, Дж; $\Delta Q_{\text{из}}$ – энергия, излучаемая нагретой частью несущей конструкции, Дж; $\Delta Q_{\text{к}}$ – тепловой поток конвективного охлаждения поверхности несущей конструкции окружающей средой, Дж; $\Delta Q_{\text{тпр}}$ – энергия, затрачиваемая на теплопроводность в несущей конструкции, Дж.

Работа, совершаемая силой тока, по закону Джоуля–Ленца

$$Q_{\text{дж}} = I^2 R t = P t, \quad (27)$$

где I – сила тока, А; R – сопротивление конструктивного элемента ЭО электрическому току, Ом; t – продолжительность нагрева, с; P – мощность нагрева, Вт.

Сопротивление проводника зависит от температурного коэффициента электрического сопротивления, поэтому для расчетов токоведущих проводников в (27) необходимо учитывать это изменение, однако в случае контактных сопротивлений пересчет не требуется.

Энергия $\Delta Q_{\text{из}}$, излучаемая нагретой до температуры T конструкцией, определяется по ее светимости (закон Стефана–Больцмана) из расчета на площадь поверхности излучения F и температуру окружающей среды T_0

$$\Delta Q_{\text{из}} = \varepsilon \sigma F (T^4 - T_0^4). \quad (28)$$

Тепловой поток $\Delta Q_{\text{к}}$ конвективного охлаждения поверхности конструкции окружающей средой определяется из следствия закона Фурье с учетом площади охлаждаемой поверхности

$$\Delta Q_{\text{к}} = \theta F (T - T_0), \quad (29)$$

где $\theta = 5,6 + 4\nu$ – коэффициент конвективной теплоотдачи при условии плоской поверхности конструкции на открытом воздухе, Вт/м²·К; ν – скорость ветра, м/с [14, с. 470].

Количество теплоты $Q_{\text{сол}}$ (лучистой энергии солнца), поглощаемое конструкцией, зависит от района инсоляции и определяется на метр квадратный поверхности объекта

$$Q_{\text{сол}} = OF, \quad (30)$$

где O – мощность потока солнечного излучения, Вт/м².

Энергия $\Delta Q_{\text{тпр}}$, затрачиваемая на теплопроводность в несущей конструкции, для установившегося режима

$$\Delta Q_{\text{тпр}} = \frac{\lambda_{\text{т}} s t \Delta T}{l} = \frac{\Delta T}{R_{\text{т}}} t = \sigma_{\text{т}} \Delta T t, \quad (31)$$

где $\lambda_{\text{т}}$ – коэффициент теплопроводности материала проводника (контакта), Вт/(м·К); s – площадь поперечного сечения проводника теплоты, м²; ΔT – разность температур по концам участка проводимости теплоты, °С; l – длина участка проводимости теплоты, м; t – продолжительность процесса теплопроводности, с; $R_{\text{т}}$ – тепловое сопротивление проводника, К/Вт; $\sigma_{\text{т}}$ – тепловая проводимость проводника, Вт/К.

Внутренняя энергия ΔQ такой системы в установившемся режиме

$$\Delta Q = cm \Delta T = C (T - T_{\text{н}}), \quad (32)$$

где c – удельная теплоемкость материала проводника (контакта), Дж/(кг·К); m – масса конструкции, кг; T – установившаяся температура конструкции, К; $T_{\text{н}}$ – начальная температура конструкции, К; C – теплоемкость системы, Дж/К.

Достижение установившегося режима при подстановке (27)–(32) в (26) описывается уравнением баланса тепловой энергии для участка электрической цепи с током, характеризующегося постоянной времени нагрева t :

$$(P + OF)t = C \Delta T + \sigma_{\text{т}} \Delta T t + \theta F (T - T_0)t + \varepsilon \sigma F (T^4 - T_0^4)t. \quad (33)$$

В стационарном режиме изменение внутренней энергии не происходит и уравнение переходит в баланс мощности тепловых потоков

$$P = \theta F(T - T_0) + \varepsilon \sigma F(T^4 - T_0^4) - \sigma_T(T_0 - T). \quad (34)$$

Дифференциальная форма записи учитывает градиент температурного поля нагрева контактного соединения конструкции

$$P + OF = C \frac{\partial T}{\partial t} - \sigma_T \text{grad} T + \theta F(T - T_0) + \varepsilon \sigma F(T^4 - T_0^4). \quad (35)$$

При малых превышениях температуры (до 5 градусов) нагрева конструктивных элементов ЭО над окружающей средой мощность потока излучения ΔQ из эквивалентна линейной зависимости, таким образом уравнение баланса энергии приводится к параболическому виду

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_T}{c \cdot \rho_V} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\theta + \varepsilon \cdot \sigma \cdot 10^8}{c \cdot \rho_V} \cdot (T - T_0) + \frac{\rho_S \cdot j^2 + O}{c \cdot \rho_V}, \quad (36)$$

где ρ_S – удельное электрическое сопротивление контакта конструкции, Ом·м; c – удельная теплоемкость контакта конструкции, Дж/(кг·К); ρ_V – удельная массовая плотность контакта конструкции, кг/м³; j – плотность индукционного тока в контуре конструкции, А/м².

Классическая форма записи параболического уравнения теплопроводности [15]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - bT + q, \quad (37)$$

где $a = \frac{\lambda}{c \rho_V}$ – коэффициент температуропроводности; $b = \frac{(\theta + \varepsilon \cdot \sigma \cdot 10^8)}{c \cdot \rho_V}$ –

коэффициент теплообмена; $q = \frac{\rho_S \cdot j^2 + O + (\theta + \varepsilon \cdot \sigma \cdot 10^8) \cdot T_0}{c \cdot \rho_V}$ – тепловые

источники.

Основные результаты

Основной причиной возникновения индукционных токов в конструктивных элементах ЭО является появление несимметрии векторного магнитного потенциала (1) вращающегося переменного магнитного поля вследствие разных токов нагрузки по фазам и присоединениям, деформации или изменения в процессе эксплуатации геометрической формы конструктивных элементов, технологической особенности конструкции ЭУ, неправильного монтажа и отклонения от заводской конструкции. Например, деформация обмоток трехфазного трансформатора (рис. 3), трехфазная сеть тягового (однофазного) железнодорожного транзита [16], порталые опоры на оттяжках (ПБ-500) воздушных линий электропередачи (рис. 4), экраны генераторных токопроводов [17] и т. д.

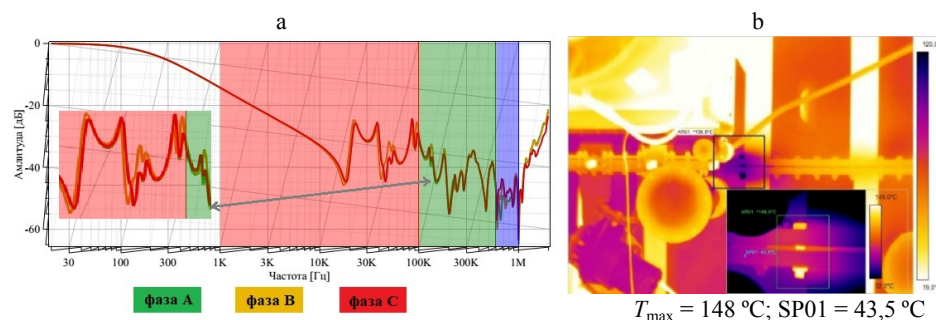


Рис. 3. Диагностические признаки изменения конструктивных параметров трансформатора 125 МВА (межфазное отклонение по сопротивлению короткого замыкания фазы В более 3 %): а – признаки деформации обмоток трансформатора при снятии амплитудно-частотных характеристик (ГОСТ 59329–2020, сквозная схема с закороткой); б – термограмма нагрева болта колокола

Fig. 3. Diagnostic features of changes in the design parameters of a 125 MVA power transformer (deviation in short-circuit resistance of phase B more than 3 %): а – signs of the transformer windings deformation when amplitude-frequency characteristics are being scoped (GOST 59329-2020, end-to-end circuit with a short-circuit); б – heating thermogram of the bell bolt

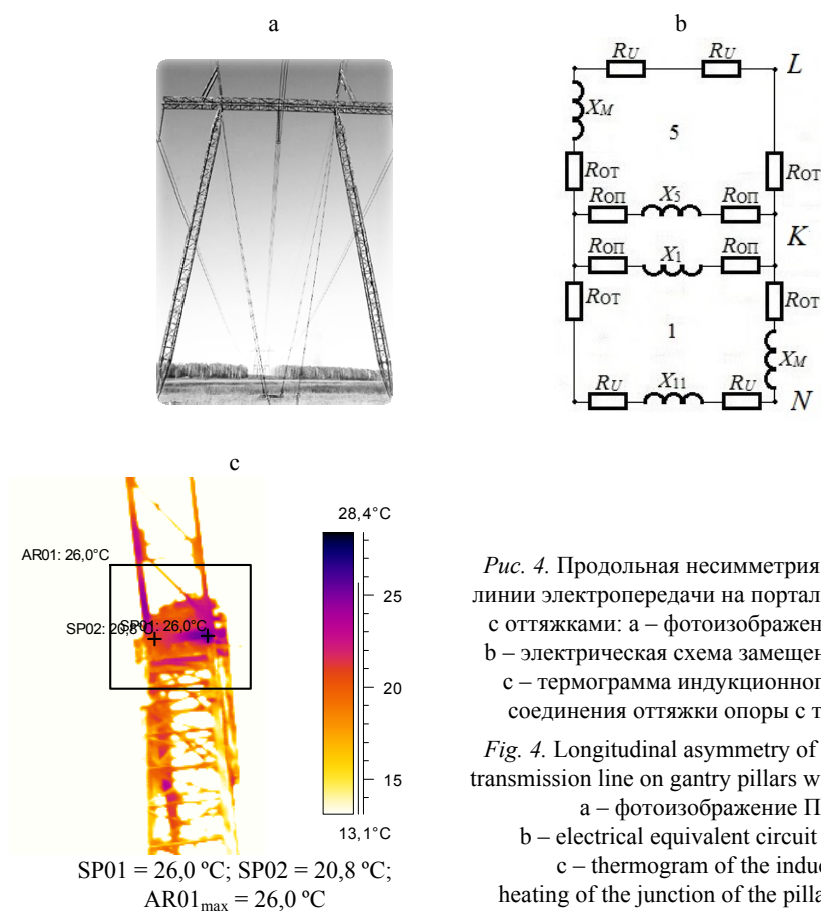


Рис. 4. Продольная несимметрия воздушной линии электропередачи на порталных опорах с оттяжками: а – фотоизображение ПБ-500; б – электрическая схема замещения ПБ-500; с – термограмма индукционного нагрева соединения оттяжки опоры с траверсой

Fig. 4. Longitudinal asymmetry of an overhead transmission line on gantry pillars with guy wires: а – фотоизображение ПБ-500; б – electrical equivalent circuit PB-500; с – thermogram of the induction heating of the junction of the pillar guy wire with the traverse

Потери мощности в одном болте колокола силового трансформатора, обусловленные несимметрией вращающегося магнитного поля вследствие деформации обмотки фазы B , нагретого индукционным током в среднем на 130°C при скорости ветра 1 м/с , как показано на рис. 3, согласно уравнению (34), составят

$$P = 9,6 \cdot 0,01 \cdot 130 + 0,94 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,01 \times \\ \times (413^4 - 283^4) - 2 \cdot 104,5 \approx 234\text{ Вт.} \quad (38)$$

Индукционный нагрев (рис. 3b) соответствует величине магнитной индукции [18]

$$B_m = \sqrt{\frac{P \cdot 2\rho}{f_E v^2 h^2 V \cdot 10^{-12}}} = \sqrt{\frac{234 \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 50^2 \cdot 2^2 \cdot 47}} \cdot 10^{12} = 9978,7\text{ Гс} \approx 1\text{ Тл}, \quad (39)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, Ом·см; f_E – коэффициент формы кривой ЭДС-взаимоиндукции; v – частота, Гц; h – диаметр стержня, см; B_m – магнитная индукция, Тл; V – объем тела, см³.

На рис. 4 приведен пример индукционного нагрева ПБ-500, обусловленный нескомпенсированным магнитным полем средней фазы, и, как следствие, появления продольной несимметрии в воздушной линии электропередачи.

В сравнении с предыдущим примером потери мощности в одном соединении оттяжки опоры с траверсой, нагретом в среднем на 3°C , согласно уравнению (34), составят

$$P = 9,6 \cdot 0,01 \cdot 3 + 0,94 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,01 \times \\ \times (291^4 - 288^4) + 0,25 \cdot 3 \approx 1,19\text{ Вт.} \quad (40)$$

Индукционный ток во время проведения измерений равен 6 А , что соответствует джоулевому тепловыделению (27) $1,2\text{ Вт}$ и среднему сопротивлению контакта 33 мОм (случай появления индукционного тока только в контуре № 1 опоры (рис. 4)) [19].

Индукционный ток в оттяжках может быть верифицирован по второму закону Кирхгофа

$$\dot{I}_{GUY} = \frac{\dot{E}_M}{Z_{\text{ПР}}} + \frac{\dot{E}_M}{Z_{\text{ОБ}}} = \dot{E}_M \left(\frac{1}{Z_{\text{ПР}}} + \frac{1}{Z_{\text{ОБ}}} \right) = \dot{E}_M \cdot Z_{\text{ПБ-500}}, \quad (41)$$

где $Z_{\text{ПР}} = R_{L,N} + Z_K Z_{N,L} / (Z_K + Z_{N,L})$ – комплексное прямое сопротивление ветвей L и N , Ом; $Z_{\text{ОБ}} = (R_{L,N} Z_{N,L} + R_{L,N} Z_K + Z_{N,L} Z_K) / Z_K$ – комплексное об-

ратное сопротивление ветвей L и N , Ом; $Z_{L,N} = R_{L,N} + jX_{1+5}$, $Z_K = R_K + jX_{1,5}$ – комплексные сопротивления ветвей L , K , N , Ом; $Z_{ПБ-500}$ – комплексное полное сопротивление опоры ПБ-500, Ом; $R_L = 2(R_U + R_{OT})$, $R_K = R_{OP}$, $R_N = 2(R_U + R_{OT})$ – активное сопротивление ветвей L , K , N соответственно, Ом; R_U – сопротивление контактов крепления оттяжек к анкерной плите, Ом; R_{OT} – сопротивление контакта крепления оттяжки к опоре, Ом; R_{OP} – сопротивление контакта соединения траверсы со стойкой опоры, Ом; E_M – электродвижущая сила взаимоиндукции контуров 1 и 5, В; $X_{1,5}$, X_{11} – сопротивление самоиндукции контуров 1, 5 и их объединения, Ом.

На рис. 5 показана зависимость вероятностной величины индукционной потери энергии в ПБ-500 от средней величины контактного сопротивления соединений конструктивных элементов при токе нагрузки 550 А для случаев статистической выборки: 10 % – все контакты рабочие; 30 % – большое сопротивление одного анкерного узла; 60 % – большое сопротивление соединений portalной опоры; $M(P)$ – математическое ожидание потери энергии в portalной опоре на оттяжках [20].

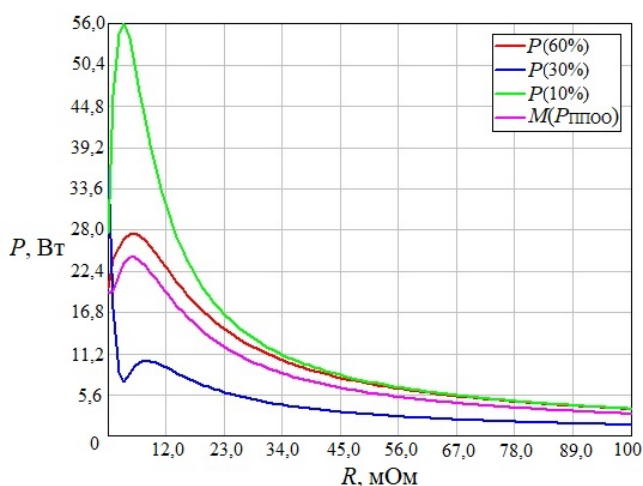


Рис. 5. Потери мощности индукционного нагрева в portalной опоре ПБ-500

Fig. 5. Power losses of induction heating in the portal support PB-500

В табл. 1 сведены результаты аналитических расчетов потерь электроэнергии в транспонированной воздушной линии электропередачи класса напряжения 500 кВ с учетом взаимоиндукции несущей конструкции трехфазной системы и с помощью метода симметричных составляющих по формулам (7)–(25).

Учет сопротивления земли и второй гармоники при определении потерь мощности в ЭУ высокого и сверхвысокого классов напряжения (эксплуатация с глухозаземленной нейтралью) влияет на соотношение активной и реактивной мощностей – активные потери становятся больше, а реактивная составляющая меньше, соответственно угол нагрузки уменьшается.

Таблица 1

**Результат расчета несимметричного режима электропередачи
транспонированной ВЛ-500 на порталых опорах с оттяжками ($Z_{\text{оп}} = 0,132 + j0,023$)
для местности с глубиной залегания линии обратного тока 1700 м**

**Electric energy losses of asymmetric power transmission mode
overhead line 500 kV on gantry pillars with guy wires ($Z_{\text{GP}} = 0,132 + j0,023$)
for area with a return current line depth of 1700 m**

Данные АСУ								
U_1 , кВ	U_2 , кВ	P_1 , МВт	P_2 , МВт	Q_1 , МВар	Q_2 , МВар	$\Delta P_{\text{н}}$, МВт	$P_{\text{к}}$, МВт	L , км
513,9	507	187,2	180,7	-33,8	166,3	0,93	0,64	192,9
Расчет трехфазной системы векторов								
ΔP , МВт	ΔQ , МВт	ΔP^* , МВт	ΔQ^* , МВт	Угол нагрузки φ , град	Угол нагрузки φ^* , град			
0,8416	8,886	0,8408	8,66	84,62°	84,45			
Расчет по (7)–(25)								
ΔP_1 , МВт	ΔP_2 , кВт	ΔP_0 , Вт	ΔQ_1 , МВар	ΔQ_2 , кВар	ΔQ_0 , Вар	ΔP_{120} , МВт	ΔQ_{120} , МВар	φ_{120} , град.
0,84	44,4	0,285	8,718	25,57	1,33	0,8844	8,7435	84,22
Влияние взаимоиндукции ПБ-500								
$\Delta P - \Delta P^*$, кВт		$\Delta Q - \Delta Q^*$, кВар			$\varphi - \varphi^*$			
1,0		280,0			-0,17°			
Учет второй гармоники								
$\Delta P_{120} - \Delta P^*$, кВт		$\Delta Q_{120} - \Delta Q^*$, кВар			$\varphi_{120} - \varphi^*$			
43,6		83,5			-0,23°			
* Расчет для трехфазной системы с учетом влияния взаимоиндукции несущей конструкции ВЛ, но без учета сопротивления земли.								

Мероприятия по снижению потери энергии в конструктивных элементах электрооборудования

Эксплуатация электрооборудования при появлении термических нагревов в несущих конструкциях теряет энергетическую эффективность. Возникновение индукционных токов в конструктивных элементах является признаком нарушения симметрии векторного магнитного потенциала (1) многофазного (трехфазного) вращающегося магнитного поля и, значит, изменения электротехнических параметров оборудования. Поэтому убрать или не допустить индукционный ток в несущей конструкции – значит улучшить энергетическую эффективность. Дополнительные нагревы также являются опасными для обслуживающего персонала и снижают функцию надежности работы оборудования, что является дополнительным фактором для проведения модернизации.

В случае нагрева болтов колокола силовых трансформаторов применяют магнитные шунты, балансирующие векторные магнитные потенциалы области несимметрии.

В примере с ПБ-500 модификация [21] замкнутого контура при применении анкерных плит с отдельными крюками на каждую оттяжку позво-

ляет ограничить величину индукционного тока и одновременно повысить общую надежность несущей конструкции ВЛ. Комплексная модернизация [22] управляемой самокомпенсирующейся воздушной линии (УСВЛ) с несколькими цепями в «одном окне», настроенных синфазно, в противофазе или с управляемым плавным регулированием фазового сдвига от 0 до 180 электрических градусов позволяет компенсировать внешнее магнитное поле. В случае противофазной настройки двух цепей производимое ими переменное магнитное поле в окружающем пространстве самокомпенсируется и векторный магнитный потенциал в несущей конструкции отсутствует. Таким образом, экономия ненормированных ПЭ от индукционного нагрева для новой УСВЛ на portalных опорах с оттяжками при среднегодовой нагрузке 550 А на 100 км в год, в соответствии с графиком на рис.5, составит

$$W_{\text{ппоо}} = P_{\text{уд}} l k_{\text{и}} T = 33,9 \cdot 100 \cdot 0,9 \cdot 8760 \approx 26726 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}, \quad (42)$$

где $P_{\text{уд}}$ – мощность индукционного нагрева новых portalных опор на оттяжках на 1 км ВЛ, Вт/км; l – длина участка ВЛ, км; $k_{\text{и}}$ – коэффициент использования опор данного типа от общего числа опор ВЛ, о. е.; T – число часов использования ВЛ в году, ч [23].

ВЫВОДЫ

1. Предложен параметрический синтез баланса энергии в конструктивных элементах электрооборудования при нарушении симметрии параметров режима электропередачи.
2. Предложен метод определения и верификации величины дополнительных технических потерь энергии в опорах ВЛ типа ПБ-500.
3. Предложены новые технологии УСВЛ: модификация контура оттяжек и управляемая электропередача по нескольким цепям в противофазе для уменьшения индукционных токов в несущей конструкции ЭУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Методики определения нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям: приказ М-ва энергетики Российской Федерации от 7 авг. 2014 г. № 506 // Министерство юстиции Российской Федерации. URL: <https://minjust.consultant.ru/documents/11644>.
2. Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям: приказ М-ва энергетики Российской Федерации от 30 дек. 2008 г. № 326. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902143004>.
3. Об опыте расчетов, анализа и нормирования потерь электроэнергии в электрических сетях России и Казахстана / В. Э. Воронницкий, М. А. Калинкина, А. С. Садовская [и др.] // Электрические станции. 2019. № 11. С. 31–43.
4. Овсянников, А. Г. Индукционные потери энергии в опорах воздушной линии электропередачи / А. Г. Овсянников, Р. А. Нечитаев // Научный вестник НГТУ. Т. 63. 2016. № 2. С. 129–140. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2016-2-129-140>.

5. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions: IEEE 1459–2000. IEEE, 2010. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2000.93398>.
6. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г. А. Данилов, Ю. М. Денчик, М. Н. Иванов, Г. В. Ситников; под ред. В. П. Горелова, В. Г. Сальникова. 3-е изд. М.: Берлин: Директ-Медиа, 2019. 558 с.
7. Additional Energy Losses From Asymmetric and Non-Sinusoidal Current in an Electrical Facility and Methods of Their Reduction / E. V. Tarasov, L. L. Bulyga, V. Ya. Ushakov, N. N. Kharlov // MATEC Web of Conferences. 2015. Vol. 37. P. 1057. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153701057>.
8. Поспелов, Г. Е. Применение управляемых гибких линий электропередачи в электрических сетях энергосистем // Г. Е. Поспелов, Т. Г. Поспелова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 5. С. 5–9.
9. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: в 2 т. / Л. А. Бессонов. М.: Юрайт, 2020. Т. 1: Электрические цепи. 363 с.
10. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: в 2 т. / Л. А. Бессонов. М.: Юрайт, 2020. Т. 2: Электромагнитное поле.
11. Горшков, А. В. Эмпирический метод определения максимального значения наведенного напряжения в рассматриваемой точке отключенной воздушной линии электропередачи / А. В. Горшков // Электричество. 2019. № 11. С. 23–32. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2019-11-23-32>.
12. Котова, Е. Н. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учеб.-метод. пособие / Е. Н. Котова, Т. Ю. Паниковская. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. 216 с.
13. Carson, J. R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return / J. R. Carson // The Bell System Technical Journal. 1926. Т. 5, No 4. С. 539–554. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x>.
14. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг; пер. с нем. 2-е изд. М.: Мир, 1985. 520 с.
15. Аполлонский, С. М. Дифференциальные уравнения математической физики в электротехнике / С. М. Аполлонский. СПб.: Питер, 2012. 352 с.
16. Компенсация искажений напряжения в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой / Д. А. Шандрыгин, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12, № 4 (48). С. 38–52.
17. Закарюкин, В. П. Моделирование пофазно экранированных токопроводов / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 5–6. С. 120–126. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-5-6-120-126>.
18. Миткевич, В. Ф. Магнетизм и электричество / В. Ф. Миткевич. СПб.: Изд. А. С. Суворина, 1912. 258 с.
19. Нечитаев, Р. А. Анализ индукционных потерь энергии в опорах воздушной ЛЭП 500 кВ / Р. А. Нечитаев // Научный вестник НГТУ. 2017. Т. 68, № 3. С. 158–171. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2017-3-158-171>.
20. Нечитаев, Р. А. Модификация несущих конструкций воздушных линий электропередачи с целью минимизации потерь электроэнергии / Р. А. Нечитаев, А. С. Трофимов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 4 (48). С. 135–147.
21. Патент RU 79310 U1, МПК E04H 12/08, E04H 12/10. Опора воздушной линии электропередачи: 2008124902/22: заявлено 20.06.2008; опубл. 27.12.2008 / В. П. Дикой, А. Л. Ивановский, Н. М. Коробков, Р. А. Нечитаев, А. Г. Овсянников; заявитель и патентообладатель ОАО «НТЦ Электроэнергетики». URL: <https://patents.google.com/patent/RU79310U1/ru>.
22. Компактные управляемые линии электропередачи / Ю. Г. Шакарян, В. М. Постолатий, Л. В. Тимашова, С. Н. Карева // Энергия единой сети. 2012. № 3. С. 24–29.
23. Nechitaev, R. A. Verification Modeling of Magnetic Field Influence on Power Transmission Line Losses / R. A. Nechitaev, N. L. Novikov, L. I. Tolstobrova // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). IEEE, 2021. P. 166–170. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647530>.

24. Анализ электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя с помощью 3D-моделирования / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, Б. М. Хрусталева, Д. В. Мирош // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 125–136. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136>.
25. Секацкий, Д. А. Расчет и анализ удельных потерь активной мощности на коронирование в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических данных / Д. А. Секацкий, Н. А. Попкова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 1. С. 16–32. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32>.
26. Nechitaev, R. New Approach to Evaluate the Energy Efficiency of Overhead Power Transmission Lines: Results of Theoretical and Experimental Research / R. Nechitaev, A. Khalyas-maa // IEEE Industry Applications Magazine. 2023. Т. 29. No 3. С. 67–74. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2022.3214022>.

Поступила 19.11.2024 Подписана в печать 21.01.2025 Опубликовано онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. On Approval of the Methodology for Determining the Standards of Losses of Electric Energy during its Transmission through Electric Networks: Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No 506 of August 7, 2014. *Ministry of Justice of the Russian Federation*. Available at: <https://minjust.consultant.ru/documents/11644> (in Russian).
2. On the Organization of Work in the Ministry of Energy of the Russian Federation to Approve Standards for Technological Losses of Electricity during its Transmission through Electric Networks: Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No 326 of December 30, 2008. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902143004> (in Russian).
3. Vorotnitskii V. E., Kalinkina M. A., Sadovskaya A. S., Novikova M. A., Tsoi D. A. (2019) On Experience of Calculating, Analyzing and Standardizing Electricity Losses in Electrical Networks of Russia and Kazakhstan. *Elektricheskie Stantsii = Electrical Stations*, (11), 31–43 (in Russian).
4. Ovsyannikov A. G., Nechitaev R. A. (2016) Induction Power Losses in Overhead Transmission Line Towers. *Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 63 (2), 129–140. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2016-2-129-140> (in Russian).
5. IEEE 1459–2000. *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. IEEE, 2010. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2000.93398>.
6. Danilov G. A., Denchik Yu. M., Ivanov M. N., Sitnikov G. V. (2019) *Improving the Quality of Functioning of Power Transmission Lines*. 2nd ed., Moscow-Berlin: Direct-Media. 558 (in Russian).
7. Tarasov E. V., Bulyga L. L., Ushakov V. Ya., Kharlov N. N. (2015) Additional Energy Losses from Asymmetric and Non-Sinusoidal Current in an Electrical Facility and Methods of their Reduction. *MATEC Web of Conferences*, 37, 01057. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153701057>.
8. Pospelov G. E., Pospelova T. G. (2010) Application of Controlled Flexible Electric Power Lines in Power System Networks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 5–9. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2010-0-5-126-129>.
9. Bessonov L. A. (2020) *Electrical Engineering Theoretical Fundamentals. Vol.1. Electrical Circuit*, Moscow, Yurait Publ. 239 (in Russian).
10. Bessonov L. A. (2020) *Electrical Engineering Theoretical Fundamentals. Vol. 2. Electromagnetic Field*. Moscow, Yurait Publ. 389 (in Russian).
11. Gorshkov A. V. (2019) An Empirical Method for Determining the Maximal Induced Voltage Value at the Considered Point of a Disconnected Overhead Power Line. *Elektrichestvo*, (11), 23–32. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2019-11-23-32> (in Russian).

12. Kotova E. N., Panikovskaya T. Yu. (2014) *Electromagnetic Transients in Electrical Systems*. Yekaterinburg, Ural Federal University Publ. 216 (in Russian).
13. Carson J. R. (1926) Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. *Bell System Technical Journal*, 5 (4), 539–554. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x>.
14. Kuhlning H (1980) *Physik*. Leipzig, Veb Fachbuchverlag.
15. Apollonsky S. M. (2012) *Differential Equations of Mathematical Physics in Electrical Engineering*. St. Petersburg, Peter Publ. 352 (in Russian).
16. Shandrygin D. A., Dovgun V. P., Egorov D. E., Solopko I. V., Shishkin Z. A. (2020) Compensation of the Voltage Distortion in Electric Power Systems with Traction Load. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 12 (4), 38–52 (in Russian).
17. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. (2015) Modelling of Screened Current Distributors. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, (5–6), 120–126. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-5-6-120-126> (in Russian).
18. Mitkevich V. F. (1912) *Magnetism and Electricity*. St. Petersburg, Publishing House of A. S. Suvorin. 258 (in Russian).
19. Nechitaev R. A. (2017) Analysis of Induction Power Losses in 500 kV Overhead Transmission Line Towers. *Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 68 (3), 158–171. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2017-3-158-171> (in Russian).
20. Nechitaev R. A., Trofimov A. S. (2020) Modification of a Power Transmission Line Constructive Elements to Power Losses Minimization. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 12 (4), 136–148 (in Russian).
21. Dikoi V. P., Ivanovskii A. L., Korobkov N. M., Nechitaev R. A., Ovsyannikov A. G. (2008) *Overhead Transmission Line Tower*. RF Patent No 79310. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU79310U1/ru> (in Russian).
22. Shakaryan Yu. G., Postolatii V. M., Timashova L. V., Kareva S. N. (2012) Compact Controlled Power Transmission Lines. *Energiya Edinoi Seti [Energy of Unified Grid]*, (3), 24–29 (in Russian).
23. Nechitaev R. A., Novikov N. L., Tolstobrova L. I. (2021) Verification Modeling of Magnetic Field Influence on Power Transmission Line Losses. *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, 166–170. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647530>.
24. Pekhota A. N., Galushko V. N., Khrustalev B. M., Mirosh D. V. (2024) Analysis of Electromagnetic and Thermal Processes of an Induction Motor Using 3D Modeling. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 125–136. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136> (in Russian).
25. Sekatski D. A., Papkova N. A. (2024) Calculation and Analysis of Specific Losses of Active Power in Overhead Power Lines due to Corona in View of Climatic Data. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (1), 16–32. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32> (in Russian).
26. Nechitaev R., Khalyasmaa A. (2023) New Approach to Evaluate the Energy Efficiency of Overhead Power Transmission Lines: Results of Theoretical and Experimental Research. *IEEE Industry Applications Magazine*, 29 (3), 67–74. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2022.3214022>.