

Григорьев Н.П., Давыдов Ю.А., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

## СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Статья посвящена проблеме снижения потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока. Стратегические программы развития железных дорог России предусматривают внедрение информационных технологий. Информационные технологии обеспечивают новые подходы к методам оценки работы системы тягового электроснабжения. Для цифровых технологий в системе тягового электроснабжения предложены формулы расчета потерь мощности и электрической энергии. На основе методов теоретических основ электротехники и теории электроснабжения тяговых нагрузок переменного тока 25 кВ получены новые формулы расчета потерь мощности в трансформаторах. Потери мощности в стали определены с учетом несимметрии напряжения обмоток. Потери в меди силовых трансформаторов тяговых подстанций определяются с учетом несимметрии тока обмоток трансформатора. Несимметрия тока учитывается фазными токами обмоток. Исходными данными для расчета приняты дискретные значения прогнозных мгновенных схем тока тяговой и мощности районных нагрузок. Прогнозные значения мгновенных схем определяются по результатам мониторинга и статистического анализа. Расчет потерь мощности в силовых трансформаторах тяговых подстанций определяется при одном и двух в работе трансформаторах. Расчет потерь электрической энергии предложено определять на основе результатов потерь мощности мгновенных схем. Количество трансформаторов в работе выбирается по минимальным потерям электрической энергии.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, тяговая подстанция, переменный ток, потери мощности, потери электрической энергии.

### ВВЕДЕНИЕ

Энергоемкость перевозочного процесса системы тягового электроснабжения необходимо минимизировать [1]. Решение такой задачи возможно при системном анализе на основе мониторинга технических показателей работы системы тягового электроснабжения [2] и синтезе схем питания тяговых нагрузок с минимальным расходом электроэнергии на тягу поездов [3].

Перспективная система тягового электроснабжения предусматривает широкое применение информационных технологий для повышения эффективности работы. Одной из задач в принятии рациональных решений при выборе схем питания тяговых нагрузок является переход от исходных данных в виде интегральных показателей к анализу мгновенных схем. Таким образом, расчет может быть выполнен с учетом дисперсии исходных данных. Примером получения показателей работы тяговых подстанций переменного тока в виде последовательности дискретных значений мгновенных схем является автоматизированная система мониторинга тяговых подстанций [4]. Следовательно, разработка алгоритмов и формул для расчета технико-экономических показателей по прогнозным мгновенным схемам работы является актуальной задачей.

Снижение потерь электрической энергии предложено выполнять выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок, которые предусматривают определение числа в работе силовых трансформаторов [5] по минимальным потерям электрической энергии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

Применяемые формулы для расчета потерь электрической энергии в силовых трансформаторах тяговых подстанций (далее тяговых трансформаторах) не

обеспечивают учет несимметричных тяговых нагрузок и напряжения обмоток. Потери мощности мгновенной схемы при  $n$  однотипных тяговых трансформаторах  $\Delta P_n$  при номинальной мощности тягового трансформатора  $S_{ном}$ , кВА, и мощности нагрузки трансформатора  $S_H$ , кВА, принято определять по формуле [1]

$$\Delta P_n = n \Delta P_{xx} + \frac{\Delta P_k}{n S_{ном}^2} S_H^2, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{xx}$  – потери холостого хода силового трансформатора, кВт;  $\Delta P_k$  – потери короткого замыкания, кВт.

При заводских испытаниях  $\Delta P_{xx}$  определяют при следующих условиях [7]. Опыт холостого хода выполняется при испытательном симметричном напряжении с допустимым отклонением. Как известно, мощность потерь холостого хода состоит из потерь в стали и изоляции [8].

Действительное напряжение обмоток тяговых трансформаторов в системах тягового электроснабжения, как правило, не соответствует напряжениям испытания силовых трансформаторов. Следовательно, действительные потери мощности в магнитопроводе, стальных элементах трансформатора, диэлектрические потери в изоляции при отсутствии нагрузок тяговых и районных обмоток далее (потери в стали) будут отличаться от  $\Delta P_{xx}$ , определенных при заводских испытаниях.

Потери электроэнергии в кВт·ч в стали силового трансформатора предложено [9] определять по формуле

$$\Delta W_x = \Delta P_{xx} \sum_{i=1}^m T_{pi} \left( \frac{U_i}{U_{ном}} \right)^2, \quad (2)$$

где  $T_{pi}$  – время работы трансформатора при  $i$ -м действительном напряжении, ч;  $m$  – число значений действительного напряжения;  $U_i$  – напряжение обмотки при  $i$ -м значении напряжения, кВ;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение обмотки трансформатора, кВ.

Действительные потери мощности в стали  $\Delta P_{ст}$  при симметричном напряжении обмоток и не соответствующем номинальному напряжению определим по формуле

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{xx} \left( \frac{U}{U_{ном}} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\Delta P_{xx}$  – потери холостого хода, кВт.

Потери мощности в стали при симметричной системе векторов напряжения обмоток высшего напряжения можно определить по следующей формуле:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{xx} K_U, \quad (4)$$

где  $\Delta P_{xx}$  – номинальные потери холостого хода, кВт;  $K_U$  – коэффициент, учитывающий несоответствие действительного и номинального напряжения обмоток высшего напряжения.

Для тяговых подстанций переменного тока характерны несимметричные напряжения обмоток высшего, тягового и районного напряжения. Следовательно, определение действительных потерь мощности в стали по формуле (3), полученной из формулы (2), не дает точного результата.

В системе тягового электроснабжения переменного тока обмотки тяговых трансформаторов высшего напряжения соединены по схеме «звезда», а обмотки для питания тяговых нагрузок – по схеме треугольника. При такой схеме соединения сумма напряжений обмоток всегда будет равна нулю (следовательно, будет равно нулю напряжение нулевой последовательности) [10].

Для расчета потерь в стали при симметричных составляющих несимметричную систему векторов напряжения обмоток высшего напряжения получим в виде симметричных систем напряжений прямой и обратной последовательности.

Вектор напряжения фазы  $A$  прямой  $\dot{U}_{A(I)}$  и обратной  $\dot{U}_{A(II)}$  последовательности определим по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A(I)} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C), \\ \dot{U}_{A(II)} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a = e^{j120^\circ}$ ,  $a^2 = e^{j240^\circ}$  – оператор поворота.

Действительные потери мощности в стали  $\Delta P_{ст}$  при несимметричной системе напряжения получим в виде суммы потерь от напряжения прямой  $U_{(I)}$  и обратной  $U_{(II)}$  последовательности:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст(I)} + \Delta P_{ст(II)}, \quad (6)$$

где  $\Delta P_{ст(I)} = \Delta P_{xx} (U_{(I)} / U_{ном})^2$  – потери мощности от напряжения прямой последовательности;  $\Delta P_{ст(II)} = \Delta P_{xx} (U_{(II)} / U_{ном})^2$  – потери мощности от напряжения обратной последовательности.

Обозначив  $(U_{(I)} / U_{ном})^2$  равным  $K_1$  и  $(U_{(II)} / U_{ном})^2$  равным  $K_2$ , получим формулу для расчета действительных потерь мощности в стали для несимметричного напряжения обмоток тягового трансформатора:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{xx} (K_1 + K_2), \quad (7)$$

где  $K_2 = \alpha_U^2$ ;  $\alpha_U$  – коэффициент несимметрии напряжения.

Отношение действительных потерь в стали к потерям холостого хода в процентах получим по формуле

$$\Delta P'_{ст} = (\Delta P_{ст} / \Delta P_{xx}) 100\%. \quad (8)$$

Подставив формулу (7) в формулу (8), получим коэффициент приращения потерь мощности в стали при отклонении действительных векторов напряжения обмоток от номинальных:

$$\Delta P'_{ст} = (K_1 + K_2) 100\%. \quad (9)$$

Определим  $K_1$  для ряда значений отношения напряжения прямой последовательности к номинальному. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Определим  $K_2$  для ряда значений отношения напряжения обратной последовательности к номинальному напряжению. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Расчет действительных потерь мощности в стали тяговых трансформаторов подстанций переменного тока при выборе числа трансформаторов в работе предложено определять по паспортным данным  $\Delta P_{xx}$  для конкретных трансформаторов с учетом действительного напряжения обмоток тяговых трансформаторов для мгновенных схем.

Потери мощности в меди тяговых трансформаторов определим на активных сопротивлениях обмоток высшего, тягового и районного напряжения для каждой фазы по токам плеч питания тяговых нагрузок и мощности районных нагрузок (рис. 1).

Нагрузочные потери мощности в обмотках высшего напряжения  $\Delta P_B$  определим по формуле

$$\Delta P_B = (I_{AX}^2 + I_{BY}^2 + I_{CZ}^2) R_B \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где  $I_{AX}$ ,  $I_{BY}$ ,  $I_{CZ}$  – модуль токов обмоток высшего напряжения  $AX$ ,  $BY$  и  $CZ$  соответственно, А;  $R_B$  – активное сопротивление обмоток высшего напряжения, Ом.

Модуль токов обмоток  $AX$ ,  $BY$  и  $CZ$  высшего напряжения трансформатора определим по формулам:

$$\begin{aligned} I_{AX} &= |i_{ax} + \underline{D}_{AX} i_p|, \\ I_{BY} &= |i_{by} + \underline{D}_{BY} i_p|, \\ I_{CZ} &= |i_{cz} + \underline{D}_{CZ} i_p|, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $i_{ax}$ ,  $i_{by}$ ,  $i_{cz}$  – токи тяговых обмоток;  $\underline{D}_{AX}$ ,  $\underline{D}_{BY}$ ,  $\underline{D}_{CZ}$  – операторы поворота токов обмоток  $a_{pxp}$ ,  $b_{pyr}$  и  $c_{pzp}$  районных нагрузок соответственно;  $i_p$  – ток районной нагрузки.

Таблица 1  
Коэффициент приращения потерь холостого хода от напряжения прямой последовательности

$\frac{U_{(I)}}{U_{ном}}$	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
$K_1, \%$	72	81	90	100	110	121	132

Таблица 2

Коэффициент приращения потерь холостого хода от напряжения обратной последовательности

$\alpha_U$	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24
$K_2, \%$	0,16	0,64	1,44	2,56	4,00	5,76

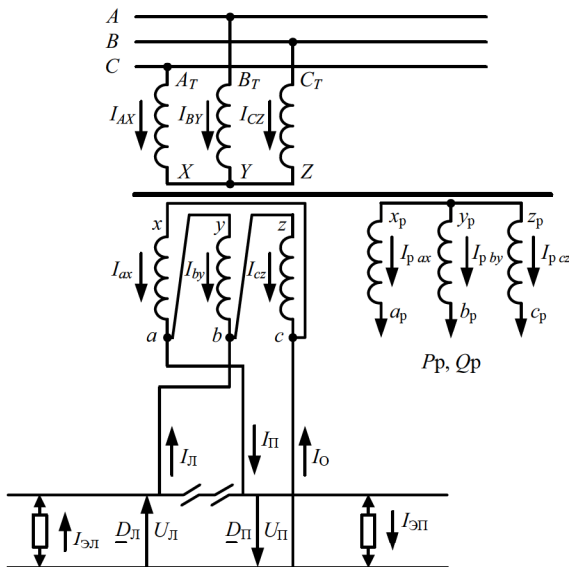


Рис. 1. Схема присоединения тягового трансформатора к ЛЭП и тяговой сети,

$I_{\text{эл}}, I_{\text{эп}}$  – токи поездов соответственно левого и правого плеча;  $D_{\text{л}}, D_{\text{п}}$  – операторы поворота напряжения левого и правого плеча питания в фазных координатах;  $U_{\text{л}}$  – напряжение левого плеча;  $U_{\text{п}}$  – напряжение правого плеча;  $I_{\text{л}}$  – ток левого плеча;  $I_{\text{п}}$  – ток правого плеча;  $I_{\text{о}}$  – ток фидера обратного тока

Токи тяговых обмоток  $ax, by$  и  $cz$  определим по токам плеч и операторам поворота напряжения плеч питания:

$$\begin{aligned} i_{ax} &= \frac{2}{3} D_{\text{п}} i_{\text{п}} - \frac{1}{3} D_{\text{л}} i_{\text{л}}, \\ i_{by} &= -\frac{1}{3} D_{\text{п}} i_{\text{п}} - \frac{1}{3} D_{\text{л}} i_{\text{л}}, \\ i_{cz} &= -\frac{1}{3} D_{\text{п}} i_{\text{п}} + \frac{2}{3} D_{\text{л}} i_{\text{л}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Ток районной нагрузки определим по формуле

$$i_p = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}}{\sqrt{3} U_p} e^{j \left( \arctg \frac{Q_p}{P_p} \right)}. \quad (13)$$

Потери мощности в обмотках тягового напряжения  $\Delta P_T$  определим по формуле

$$\Delta P_T = (I_{ax}^2 + I_{by}^2 + I_{cz}^2) R_T \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где  $I_{ax}, I_{by}, I_{cz}$  – модуль токов тяговых обмоток трансформатора, А;  $R_T$  – активное сопротивление тяговых обмоток, Ом.

Потери мощности в обмотках районного напряжения  $\Delta P_p$  определим по формуле

$$\Delta P_p = \frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_p^2} R_p \cdot 10^{-3}, \quad (15)$$

где  $P_p, Q_p$  – активная и реактивная мощности районных нагрузок, кВт и квар соответственно;  $U_p$  – линейное напряжение районных нагрузок, кВ;  $R_p$  – активное сопротивление обмоток районной нагрузки, Ом.

Для мгновенной схемы  $i$  при одном включенном в работу трансформаторе потери мощности определим по формуле

$$\begin{aligned} \Delta P_{1i} &= \Delta P_{xx} (K_{1i} + K_{2i}) + \\ &+ \left[ (I_{AXi}^2 + I_{BYi}^2 + I_{CZi}^2) R_B + \right. \\ &\left. + (I_{axi}^2 + I_{byi}^2 + I_{czi}^2) R_T + \frac{P_{pi}^2 + Q_{pi}^2}{U_{pi}^2} R_p \right] \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для мгновенной схемы  $i$  при двух включенных в работу силовых трансформаторах потери мощности определим по формуле

$$\begin{aligned} \Delta P_{2i} &= 2 \Delta P_{xx} (K_{1i} + K_{2i}) + \\ &+ \frac{1}{2} \left[ (I_{AXi}^2 + I_{BYi}^2 + I_{CZi}^2) R_B + \right. \\ &\left. + (I_{axi}^2 + I_{byi}^2 + I_{czi}^2) R_T + \frac{P_{pi}^2 + Q_{pi}^2}{U_{pi}^2} R_p \right] \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для интервала времени, содержащего  $m$  прогнозных мгновенных схем при интервале квантования токов плеч питания тяговых и мощности районных нагрузок  $\Delta t$ , определим потери электрической энергии при одном и двух в работе тяговых трансформаторов по формулам

$$\Delta W_1 = \left( \sum_{i=1}^m \Delta P_{1i} \right) \Delta t, \quad (18)$$

$$\Delta W_2 = \left( \sum_{i=1}^m \Delta P_{2i} \right) \Delta t. \quad (19)$$

Выбор одного или двух в работе тяговых трансформаторов на перспективный период времени выполняется по минимальным прогнозным потерям электрической энергии.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены формулы расчета потерь мощности в стали силовых трансформаторов тяговых подстанций переменного тока с учетом действительного несимметричного напряжения обмоток.

2. Потери электрической энергии в меди силовых трансформаторов предложено определять по значениям мгновенных схем токов плеч питания тяговых и мощности районных нагрузок.

3. Предложена методика выбора числа силовых трансформаторов в работе на расчетный период по потерям электрической энергии при несимметричных нагрузках и напряжениях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года : утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2718 р от 15 декабря 2011 г.



2. Пат. 2478049 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В60М 3/00. Система электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока / Н.П. Григорьев, А.А. Крикун; заявитель и патентообладатель ДВГУПС. № 2011129592; заявл. 15.07.2011; опубл. 27.03.2013.
3. Власенко С.А., Григорьев Н.П., Парфианович А.П. Повышение энергоэффективности работы электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: материалы VII междунар. симп. «Элтранс-2015», 7–9 окт. 2015 г., Санкт-Петербург. СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. С. 88–92.
4. Автоматизированная система мониторинга тяговых подстанций / В.Н. Ли, Ф.А. Протасов, Е.Ю. Тряпкин, А.В. Гуляев, М.Ю. Кейно // Автоматизация в промышленности. 2013. №11. С. 22–25.
5. Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ / Григорьев Н.П., Клыков М.С., Парфианович А.П., Шестухина В.И. // Электротехника. 2016. № 2. С. 58–60.
6. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
7. ГОСТ 3484.1-88 (СТ СЭВ 1070-78). Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний (с Изменением №1). Дата введения 1990-01-01.
8. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
9. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. №326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям».
10. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. трансп. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1982. 528 с.

Поступила в редакцию 27 сентября 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### REDUCTION OF ELECTRIC ENERGY LOSSES OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM OF ALTERNATING CURRENT (AC)

Nikolai P. Grigoriev

Ph.D. (Eng.), Professor, the Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: 0101gnp@mail.ru.

Iurii A. Davydov

D. Sc. (Eng.), Professor, Rector, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: rector@festu.khv.ru.

Arseniy P. Parfianovich

Postgraduate Student, the Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Polina N. Trofimovich

Senior Lecturer, the Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: eteem3@festu.khv.ru.

The article is devoted to the problem of reduction of electric energy losses of traction power supply system of alternating current (AC). The Strategic Development Programs of Russian Railways (RZD) provide for introduction of information technology. Information technology requires new approaches to estimation methods of traction power supply system operation. The formulas are offered to calculate power and electric energy losses within the traction power supply system, which make use of digital technology to ensure its proper operation. Proceeding from the methods of theoretical fundamentals of electrical engineering and theory of power supply of 25 kV AC traction loads new calculation formulas to determine power losses of transformers are obtained. Iron power losses are determined taking into account asymmetry of winding voltage. Coil power losses of power transformers of traction substations are determined taking into account asymmetry of current of transformer windings. Current asymmetry is represented by phase currents of windings. As initial data the research group takes discrete values of expected instantaneous current values of traction loads at a certain time interval as well as load values, the capacity of the given district traction power supply system is able to cope with. Expected instantaneous current values of traction loads are determined by the results of monitoring and statistical analysis. Calculation of power losses in power transformers of traction substations is performed both for one and two

transformers in operation respectively. Electric energy losses are to be calculated considering power losses caused by occurrence of instantaneous current values of traction loads. The number of the transformers in operation is to be chosen for the minimum electric energy losses.

**Keywords:** power transformer, traction substation, alternating current, power loss, loss of electrical energy.

#### REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya kholdinga "Rossiiskie zheleznye dorogi" na period do 2015 g. i na perspektivu do 2030 goda: utv. rasporyazheniem OAO "RZD" № 2718 r ot 15 dekabrya 2011 g.* [Energy Strategy of the holding company "Russian Railways" for the time period of up to 2015 and for successive period of up to 2030: appr. by the order of JSC "RZD"], no. 2718, December 15, 2011. (In Russian)
2. Grigoryev N.P., Krikun A.A. *Sistema elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka* [Power supply system of alternating current electrified railways]. Patent RF, no. 2478049, 2011. (In Russian)
3. Vlasenko S.A., Grigoryev N.P., Parfianovich A.P. Increasing power efficiency of 25 kV AC electrified railways by means of normal feed circuits of traction loads. *Elektrifikatsiya, razvitie elektroenergeticheskoi infrastruktury i elektricheskogo podvizhnogo sostava skorostnogo i vysoko-*

- skorostnogo zheleznodorozhnogo transporta. Materialy VII mezhdunar. symp.* [Electrification, development of power engineering infrastructure and electric rolling stock for express and high-speed railway transport. Proceedings of the VIIth International Symposium "Eltrans-2015"]. St. Petersburg: St. Petersburg State Transport University, 2012, pp. 88–92. (In Russian)
4. Li V.N., Protasov F.A., Tryapkin E. Yu., Gulyaev A.V., Keino M.Yu. Automated monitoring system for traction substations. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry], 2013, no. 11, pp. 22–25. (In Russian)
  5. Grigoryev N.P., Klykov M.C., Parfianovich A.P., Shestukhina V.I. Increasing power efficiency of 25 kV AC traction power supply. *Flektrotekhnika* [Electrical engineering], 2016, no.2, pp. 58–60. (In Russian)
  6. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electric systems and networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 592 p. (In Russian)
  7. GOST 3484.1-88 (ST SEV1070-78). Power transformers. Methods of electromagnetic tests (with Modification 1). Date of introduction 01.01.1900. (In Russian)
  8. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 528 p. (In Russian)
  9. *Prikaz Ministerstva RF ot 30 dekabrya 2008 g. N 326 "Ob organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiiskoi Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter elektroenergii pri eyo peredache po elektricheskim setyam"* [Order of Energy Ministry of the Russian Federation of December 30, 2008, no. 326 "On setting and approving the standards for technological losses of electric power during its transmission through electric networks"]. (In Russian)
  10. Markvardt K.G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport, 1982. 528 p. (In Russian)

Григорьев Н.П., Давыдов Ю.А., Парфианович А.П., Трофимович П.Н. Снижение потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 36-40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-36-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-36-40)

Grigoriev N.P., Davydov Iu.A., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N. Reduction of Electric Energy Losses of Traction Power Supply System of Alternating Current (AC). *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electro-technical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 36-40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-36-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-36-40)