

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА****DOI: 10.26730/1999-4125-2017-4-84-89****УДК 621.311:621.316****ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ПОД НАГРУЗКОЙ НА УРОВЕНЬ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ****EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE ON-LOAD TAP-CHANGING  
DEVICE ON THE LEVEL OF ACTIVE POWER LOSSES  
IN POWER TRANSFORMERS****Непша Федор Сергеевич,**

старший преподаватель, e-mail: nepshafs@gmail.com

**Nepsha Fedor S.,** Senior lecturer**Ефременко Владимир Михайлович,**

кандидат техн. наук, профессор, e-mail: evm-47@mail.ru

**Efremenko Vladimir M.,** C. Sc. (Engineering), ProfessorКузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, ul. Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian  
Federation

**Аннотация.** В распределительных сетях 6-35 кВ часто приходится сталкиваться с проблемой регулирования напряжения в условиях изменения электрических нагрузок. Для поддержания напряжения на шинах 6-35 кВ в подобных условиях используются устройства регулирования под нагрузкой (УРПН). Однако в процессе расчета и оптимизации электрических режимов распределительных сетей по критерию минимума потерь (потребления) активной мощности не учитываются изменения уровня потерь активной мощности в трансформаторе при переключении анцапф УРПН, что может отразиться на качестве результатов оптимизации. В связи с этим, анализ изменения уровня потерь активной мощности в трансформаторе при переключении анцапф УРПН является актуальной научно-технической задачей. В данной статье представлены результаты анализа изменения уровня потерь активной мощности в трансформаторе в зависимости от положения УРПН и коэффициента загрузки трансформатора. Авторами получены графические зависимости изменения потерь активной мощности в трансформаторе при изменении напряжения в пределах зоны нечувствительности устройства автоматического регулирования напряжения трансформатора (АРНТ). На основании проведенного анализа установлены наиболее оптимальные положения УРПН при разных коэффициентах загрузки трансформатора, а также сделаны выводы о необходимости учета переключений УРПН в процессе оптимизации уровня напряжения в сети по критерию минимума потерь (потребления) активной мощности.

**Abstract.** In distribution networks of 6-35 kV, one often has to deal with the problem of voltage regulation under conditions of changing electrical loads. To maintain the voltage on the 6-35 kV busbars in similar conditions, the on-load tap-changing devices are used. However, in the process of calculating and optimizing the electric modes of distribution networks, the changes in the level of active power loss in the transformer during tap changing on the on-load tap-changing device are not taken into account by the criterion of minimum losses (consumption) of active power, which may affect the quality of the optimization results. In this regard, the analysis of the change in the level of active power loss in the transformer during tap changing of the on-load tap-changing device is an actual scientific and technical task. In this paper, the authors present the results of an analysis of the change in the level of active power losses in the transformer depending on the position of the on-load tap-changing device and the load factor of the transformer. The authors obtained graphical dependences of the change in the losses of active power in the transformer with a change in the voltage within the dead zone of the automatic voltage regulating control relays. On the basis of the analysis, the most optimal positions of the on-load tap-changing device with different load factors of the transformer were established, and conclusions were drawn about the need to take into account the switching of the on-load tap-changing device in the process of optimization of the voltage level in the network by the criterion of minimum losses (consumption) of active power.

**Ключевые слова:** регулирование напряжения, регулирование под нагрузкой, потери активной мощности, оптимизация уровня напряжения.

**Keywords:** voltage regulation, power transformer on-load tap-changing devices, active power losses, voltage level optimization.

Известно, что при переключении УРПН происходит изменение числа витков в обмотке высшего напряжения, а также меняется магнитный поток [1,2]. Наиболее распространенная схема соединений УРПН с диапазоном регулирования  $\pm 9 \times 1,78\%$  приведена на рис. 1.

В положении реверсора «+» регулировочная обмотка включается согласно с основной обмоткой трансформатора, при этом происходит увеличение магнитного потока и коэффициента трансформации. Также увеличивается активное и индуктивное сопротивление трансформатора. При переключении реверсора в положение «-» регулировочная обмотка включается встречно основной, при этом происходит уменьшение магнитного потока и коэффициента трансформации, а также увеличение активного сопротивления и уменьшение индуктивного сопротивления.

Параметры схемы замещения силовых трансформаторов с УРПН могут быть определены по паспортным данным, а также по каталожным данным.

В большинстве случаев, параметры схемы замещения силового трансформатора (рис.2) определяются по формулам [3]:

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{ном}^2}{S_{ном}^2 \cdot 10^3}, \quad (1)$$

$$Z_T = \frac{u_{k\%омв} U_{омв}^2}{100 \cdot S_{ном}}, \quad (2)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad (3)$$

где  $\Delta P_K$  – потери короткого замыкания (кВт),  $U_{ном}$  – линейное номинальное напряжение обмотки (кВ),  $U_{омв}$  – напряжение на стороне ВН соответствующее  $n$ -ому ответвлению (кВ),  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора (МВА),  $u_{k\%омв}$  – напряжение короткого замыкания соответствующей отпайки УРПН, %.

При определении параметров схемы замещения по формулам (1-3) не учитывается зависимость активного сопротивления от числа витков регулировочной обмотки в процессе переключения УРПН. Реальные зависимости активных сопротивлений обмоток от номера анцапфы (ответвления) по паспортным данным трансформаторов типа ТДН-16000/35, ТРДН-25000/110 и ТРДН-40000/110  $R_{наен}=f(n)$  представлены на рис. 3.

В результате аппроксимации вышеуказанных зависимостей  $R_{наен}=f(n)$  полиномом 2-й степени в

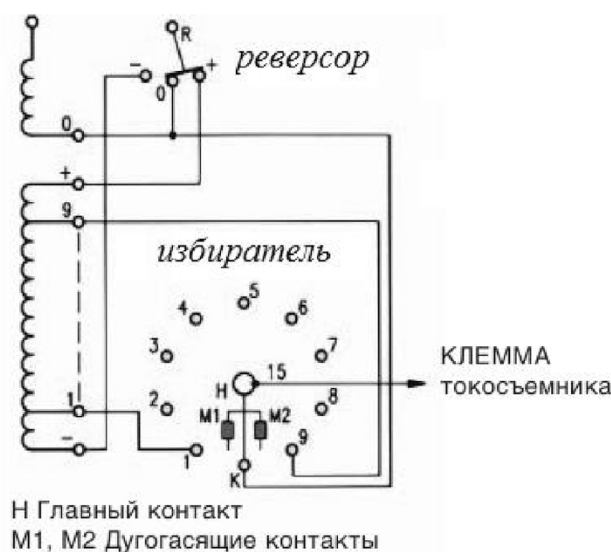


Рис. 1. Схема соединения УРПН  
 Fig. 1. Connection scheme of the on-load tap-changer

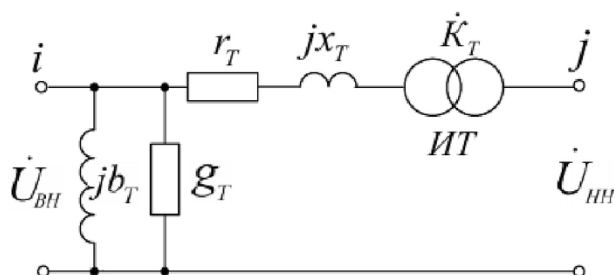


Рис. 2. Схема замещения двухобмоточного трансформатора  
 Fig. 2. Double-winding transformer equivalent circuit

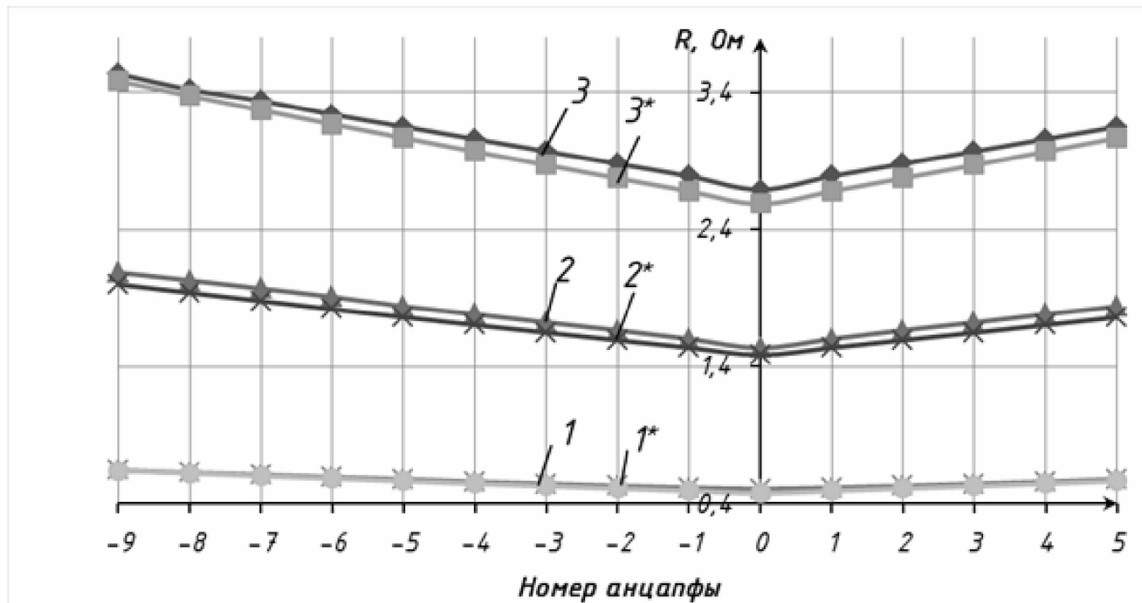


Рис. 3. Зависимости  $R_{nacn}=f(n)$  (1 – для ТДН-16000/35, 2 – для ТРДН-25000/110, 3 – для ТРДН-40000/110) и  $R_{rasc}=f(n)$  (1\* – для ТДН-16000/35, 2\* – для ТРДН-25000/110, 3\* – для ТРДН-40000/110)

Fig. 3. Dependencies  $R_{nacn}=f(n)$  (1 – for TDN-16000/35, 2 – for TRDN-25000/110, 3 – for TRDN-40000/110) и  $R_{rasc}=f(n)$  (1\* – for TDN-16000/35, 2\* – for TRDN-25000/110, 3\* – for TRDN-40000/110)

среде MATLAB авторами были получены следующие регрессионные функции:

– для трансформатора марки ТДН-16000/35  
 $R_T(n_m) = 0,0004 \cdot n_m^2 + 0,012 \cdot n_m + 0,5047$ , (4)

– для трансформатора марки ТРДН-25000/110,  
 $R_T(n_m) = 0,0003 \cdot n_m^2 + 0,0893 \cdot n_m + 2,6968$ , (5)

– для трансформатора марки ТРДН-40000/110  
 $R_T(n_m) = 0,00008 \cdot n_m^2 + 0,0616 \cdot n_m + 1,5384$ , (6)

Коэффициент детерминации  $R^2$  полученных функций равен единице, следовательно, полученные регрессионные зависимости (4-6) обладают сильной корреляцией с наблюдаемыми данными и полностью им соответствуют [4].

Однако практически, при отсутствии информации об активных сопротивлениях обмотки на каждой анцапфе УРПН, допустимо пользоваться формулой:

$$R = \frac{\Delta P_k (U_{ном} (1 + |n \cdot \Delta U_{ст*}|))^2}{S_{НОМ}^2 \cdot 10^3}, \quad (7)$$

где  $n$  – номер анцапфы УРПН, изменяющийся в пределах  $[-9, 9]$ ,  $\Delta U_{ст*}$  – шаг регулирования УРПН, %.

При этом полученные авторами значения коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) и средних ошибок аппроксимации ( $\bar{A}$ ) составляют: ТРДН-25000/110 ( $R^2=0,896$ ;  $\bar{A}=2,73\%$ ), ТРДН-40000/110 ( $R^2=0,799$ ;  $\bar{A}=4,26\%$ ), ТДН-16000/35 ( $R^2=0,86$ ;  $\bar{A}=2,62\%$ ). Это свидетельствует о сильной корреляции паспортных данных трансформатора с функцией (7). Зависимости  $R_{rasc}=f(n)$ , полученные по формуле (7), для трансформаторов марки ТРДН-25000/110, ТРДН-40000/110, ТДН-

16000/35 представлены на рис. 3.

Положения УРПН «1-5» могут не рассматриваться т.к. соответствуют напряжениям выше наибольшего для электрооборудования согласно п.3.4 [5].

Силовые трансформаторы оказывают влияние на уровень потребляемой активной мощности, которое заключается в изменении уровня потерь активной мощности в трансформаторе. На уровень потерь активной мощности в трансформаторе влияет коэффициент загрузки трансформатора, номер анцапфы УРПН, уровень напряжения в питающей сети.

Уровень потерь активной мощности в трансформаторе с учетом (7) можно оценить по формуле [6]:

$$\Delta P_m(n) = \frac{(k_z \cdot S_{ном})^2}{(U_{ном} (1 + n \cdot \Delta U_{ст*}))^2} \frac{\Delta P_k (U_{ном} (1 + |n \cdot \Delta U_{ст*}|))^2}{S_{НОМ}^2 \cdot 10^3} + \Delta P_{xx} \cdot \left( \frac{U}{U_{ном}} \right)^2, \quad (8)$$

Формулу (8) целесообразно рассмотреть при увеличении и уменьшении коэффициента трансформации относительно номинального.

Важно отметить, что при работе устройства АРНТ в режиме стабилизации, номер анцапфы УРПН подстраивается под напряжение питающей сети.

Таким образом, при увеличении напряжения происходит переключении анцапфы УРПН и увеличении сопротивления трансформатора.

При увеличении коэффициента трансформации (переключение анцапф в «+») уровень потерь

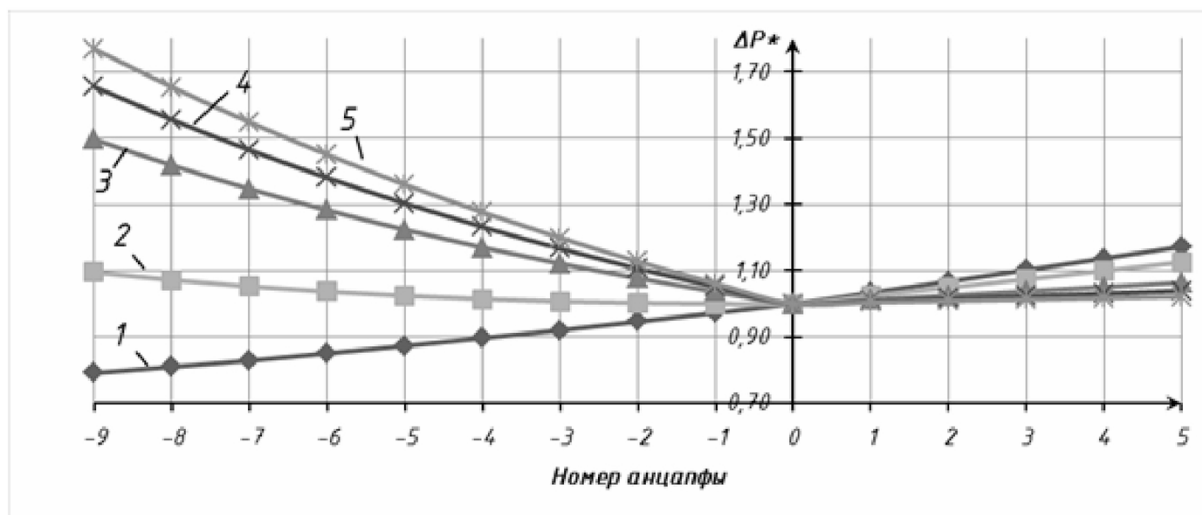


Рис. 4. Графики зависимостей  $\Delta P^*=f(n)$  при различных коэффициентах загрузки трансформатора (1 – при  $k_3=0,1$ ; 2 – при  $k_3=k_{ззр}$ ; 3 – при  $k_3=0,5$ ; 4 – при  $k_3=0,7$ ; 5 – при  $k_3=1$ )

Fig. 4. Dependencies  $\Delta P^*=f(n)$  at different load factors of the transformer (1 – for  $k_3=0,1$ ; 2 – for  $k_3=k_{ззр}$ ; 3 – for  $k_3=0,5$ ; 4 – for  $k_3=0,7$ ; 5 – for  $k_3=1$ )

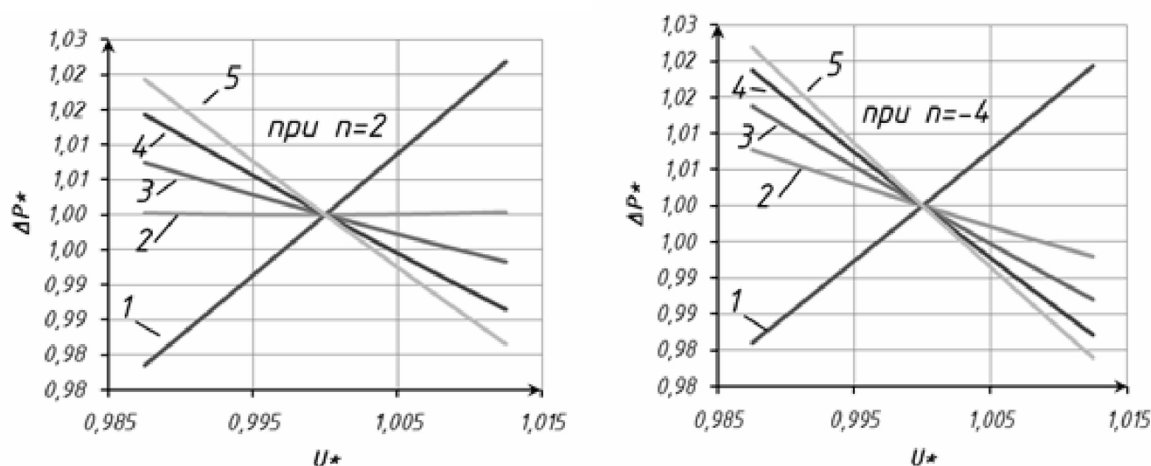


Рис. 5. Изменение потерь активной мощности в трансформаторе при разных положениях УРПН и колебаниях напряжения в пределах зоны НЧ ( $U_{нч}=2,5\%$ ) и разных коэффициентах загрузки (1 – при  $k_3=0,1$ ; 2 – при  $k_3=k_{ззр}$  для  $n=2$ ; 3 – при  $k_3=0,5$ ; 4 – при  $k_3=0,7$ ; 5 – при  $k_3=1$ )

Fig. 5. Change of active power losses in the transformer at different positions of the power transformer on-load tap-changing device and voltage fluctuations within the dead zone ( $U_{нч}=2,5\%$ ) and different load factors (1 – for  $k_3=0,1$ ; 2 – for  $k_3=k_{ззр}$  at  $n=2$ ; 3 – for  $k_3=0,5$ ; 4 – for  $k_3=0,7$ ; 5 – for  $k_3=1$ )

активной мощности в трансформаторе определяется по формуле:

$$\Delta P_m(n) = k_3^2 \Delta P_{\kappa} + \Delta P_{xx} \cdot \left( \frac{U}{U_{ном}} \right)^2, \quad (9)$$

Формула (9) показывает, что при повышении напряжения в питающей сети и регулировании напряжения устройством АРНТ в режиме «стабилизации» происходит увеличение уровня потерь активной мощности в трансформаторе за счет роста потерь холостого хода. При этом уровень нагрузочных потерь остается неизменным.

В условиях понижения напряжения в питающей сети и переключения анцапф в отрицательные положения, потери активной мощности в трансформаторе определяются по формуле:

$$\Delta P_m(n) = \frac{k_3^2 \Delta P_{\kappa} (U_{ном} (1 + |n \cdot \Delta U_{ст*}|))^2}{(U_{ном} (1 + n \cdot \Delta U_{ст*}))^2} + \Delta P_{xx} \cdot \left( \frac{U}{U_{ном}} \right)^2, \quad (10)$$

Формула (10) показывает, что при понижении напряжения питающей сети и переключении анцапф в отрицательные положения происходит значительное увеличение потерь, связанное с увеличением токовой нагрузки и увеличением сопротивления трансформатора.

Графики зависимостей  $\Delta P^*=f(n)$  в относительных единицах при переключении устройства РПН устройством АРНТ в режиме «стабилизации» и различных коэффициентах загрузки трансформатора представлены на рис. 4.

Значение граничного коэффициента загрузки  $k_{згр}$ , при загрузке ниже которого, минимум потерь активной мощности в трансформаторе не соответствует нейтральному положению анцапфы, может быть определен по формуле:

$$k_{згр} = \sqrt{\frac{\Delta P_{xx} \left( (1 - \Delta U_{ст*})^2 - 1 \right)}{\Delta P_k \left[ 1 - \frac{(1 + \Delta U_{ст*})^2}{(1 - \Delta U_{ст*})^2} \right]}}, \quad (11)$$

Формула (11) получена из условия равенства потерь активной мощности в нейтральном положении анцапфы УРПН и в положении анцапфы «-1».

Надо отметить, что зависимости, представленные на рис.4, справедливы в том случае, если напряжение в сети соответствует напряжению анцапф УРПН. При колебаниях напряжения в пределах одной отпайки УРПН, когда отклонения напряжения находятся в зоне нечувствительности (зона НЧ) устройства АРНТ ( $U_{нч} = 1,2 - 1,5 \Delta U_{ст*}$ ), потери активной мощности изменяются в соответствии с графиками, представленными на рис. 5.

Зависимости, представленные на рис. 4-5 позволяют сделать следующие выводы:

1. При  $k_3 > k_{згр}$  минимальный уровень потерь активной мощности в трансформаторе соответствует нейтральному положению анцапфы УРПН. Значение  $K_{згр}$  определяется соотношением потерь холостого хода и нагрузочных потерь.

2. При  $k_3 < k_{згр}$  потери активной мощности главным образом определяются потерями холостого хода. В связи с этим, минимум  $\Delta P$  не наблюдается в нейтральном положении. Минимум функции  $\Delta P^* = f(n)$  смещается в отрицательном направлении.

3. При уменьшении коэффициента трансформации (переключение УРПН в «-»), потери активной мощности увеличиваются пропорционально квадрату коэффициента загрузки трансформатора, положению анцапфы УРПН и обратно

пропорционально квадрату уровня напряжения на вводах трансформатора. При этом, с увеличением  $k_3$  потери активной мощности увеличиваются значительно.

4. При увеличении коэффициента трансформации (переключение УРПН в «+»), нагрузочные потери трансформатора остаются практически неизменными, но увеличиваются потери холостого хода. Прирост потерь активной мощности более значителен по мере уменьшения  $k_3$ .

5. При изменении напряжения в пределах зоны нечувствительности устройства АРНТ, характер зависимости  $\Delta P^* = f(U)$  зависит от коэффициента загрузки трансформатора. При этом, если  $k_3 > k_{згр}$  потери активной мощности уменьшаются при увеличении напряжения. Если  $k_3 < k_{згр}$  потери активной мощности увеличиваются при увеличении напряжения в пределах зоны НЧ.  $k_{згр}$  определяется соотношением потерь холостого хода и нагрузочных потерь, а также текущим положением УРПН.

6. Диапазон изменения потерь активной мощности в трансформаторе в различных положениях УРПН зависит от коэффициента загрузки трансформатора.

Таким образом, как показал анализ, изменение потерь активной мощности в силовых трансформаторах носит неоднозначный характер при работе УРПН на разных ответвлениях. Характер изменения потерь активной мощности определяется коэффициентом загрузки, шириной зоны НЧ, направлением переключения отпайки УРПН относительно нейтрального положения, соотношением потерь холостого хода и нагрузочных потерь. В связи с этим, необходимо учитывать изменение потерь активной мощности в трансформаторе в процессе переключения УРПН, при выполнении оптимизации уровня напряжения по критерию минимума потерь (потребления) активной мощности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 24126-80 (СТ СЭВ 634-88) Устройства регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой. Общие технические условия (с изменениями № 1, 2) – Введ. 1982-01 -01. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 36 с.
2. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии / Герасименко А.А., Федин В.Т. — Изд. 4-е. — М.: КНОРУС, 2014. — 648 с. — (Бакалавриат).
3. Идельчик, В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. - М.: Энергоатомиздат, 1988
4. Харченко М.А. Корреляционный анализ: Учебное пособие для вузов. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. - 31 с.
5. ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009). Напряжения стандартные. – Введ. 2015-10 -01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 13 с.
6. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.: ил.

## REFERENCES

1. GOST 24126-80 (ST SEV 634-88) Ustroystva regulirovaniya napryazheniya silovykh transformatorov pod nagruzkoy. Obshchie tekhnicheskie usloviya (s izmeneniyami № 1, 2) [Power transformer on-load tap-changing devices. General specifications]. Introduced 01.01.1982. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1988. 36 p.
2. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii [Transmission and distribution of electrical energy]. Izd. 4-e. Moscow: KNORUS, 2014. 648 p.
3. Idel'chik, V.I. Raschety i optimizatsiya rezhimov elektricheskikh setey i sistem [Calculations and optimization of modes of electrical networks and systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 286 p.
4. Kharchenko M.A. Korrelyatsionnyy analiz: Uchebnoe posobie dlya vuzov. [Correlation Analysis: a textbook for Universities]. Voronezh: Izd-vo VGU, 2008. 31 p.
5. GOST 29322-2014 (IEC 60038:2009). Standard voltages. Moscow: Standartinform, 2015. 22 p.
6. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Calculation, analysis and normalization of electricity losses in electrical networks: A guide for practical calculations]. Moscow: Izd-vo NTs ENAS, 2004. 280 p.

*Поступило в редакцию 29 мая 2017*  
*Received 29 May 2017*