

А. С. ЛУКОВЕНКО

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ПРИ ОТКЛОНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРА**ECONOMIC DAMAGE ASSESSMENT METHODOLOGY IN CASE OF TRANSFORMER LOAD RATIO DEVIATION**

Целью исследования является разработка методики оценки экономического ущерба при отклонении коэффициента загрузки трансформатора. В процессе исследования использован метод определения оптимальной загрузки силового трансформатора. Разработана методика оценки экономического ущерба при отклонении коэффициента его загрузки. Определен оптимальный коэффициент загрузки силового трансформатора по критерию минимума затрат денежных средств на трансформацию электрической энергии. Уровень загрузки силовых трансформаторов можно оценивать по двум критериям: по максимуму интегрального значения коэффициента полезного действия и по минимуму потерь денежных средств при трансформации электроэнергии. Согласно предложенной методике поведена оценка ущерба при отклонении коэффициента загрузки трансформатора от оптимальных значений, для чего рассчитаны относительные потери электрической энергии. Полученные результаты при оценивании энергетической и финансово-экономической эффективности показывают, что при завышении коэффициента загрузки относительно оптимальных значений гораздо предпочтительнее их завышение, чем занижение. Достоверность результатов подтверждается удовлетворительным совпадением расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными на действующем энергопредприятии.

Ключевые слова: качество электроэнергии, силовой трансформатор, коэффициент загрузки трансформатора, стоимость трансформации электроэнергии, надежность

При решении актуальных задач в области электроэнергетики следует принимать во внимание специфику электрической энергии, которую можно рассмотреть как товар, который представляют энергетические предприятия. Электрическая энергия (ЭЭ) – это единственный вид продукции, для перемещения которого от места производства до места его потребления не требуется применения других ресурсов. В результате расходуется часть передаваемой ЭЭ, поэтому неизбежны технические потери.

The aim of the study is to develop a methodology for assessing economic damage when the transformer load factor deviates. In the process of research, a method was used to determine the optimal load of a power transformer. A method for assessing economic damage in case of a deviation of its load factor has been developed. The optimal load factor of a power transformer has been determined according to the criterion of the minimum cost of money for the transformation of electrical energy. The load level of power transformers can be assessed by two criteria: by the maximum integral value of the efficiency and by the minimum loss of money during the transformation of electricity. According to the proposed methodology, the assessment of damage is carried out when the load factor of the transformer deviates from the optimal values, for which the relative losses of electrical energy are calculated. The results obtained when evaluating energy and financial and economic efficiency show that when the load factor is overestimated relative to the optimal values, it is much more preferable to overestimate than underestimate. The reliability of the results is confirmed by the satisfactory agreement of the calculated results with the experimental data obtained at the operating power plant.

Keywords: power quality, power transformer, transformer load factor, cost of power transformation, reliability

Основная задача состоит в определении экономически обоснованного уровня этих потерь.

Еще одной важной и актуальной задачей является качество электрической энергии. Качество ЭЭ в сетях общего назначения по большинству показателей характеризуется техническими характеристиками и режимами работы электроприемников потребителей ЭЭ. Довольно сложно привести пример другого вида продукции, качество которого может быть ухудшено покупателем еще до ее поставки [1, 2].

В настоящее время энергетические компании имеют дело с возрастающим количеством электрических нагрузок, ухудшающих качество электроэнергии в сети, как на бытовом, так и на промышленном уровне, а также с активной деятельностью по стандартизации качества электроэнергии [3–5]. Последняя тенденция весьма неоднозначна, так как на начальном этапе она приводит к штрафным санкциям по отношению к производителям и даже к потребителям, в то время как организации, занятые распределением энергии, как правило, не несут никакой ответственности в отношении мощности короткого замыкания или структуры полного сопротивления сети [6–8].

Современное оборудование, применяемое на промышленных и коммерческих объектах, более чувствительно к нарушениям качества электроэнергии, чем оборудование, применявшееся в прошлом веке. Оборудование, содержащее микропроцессорные средства управления и силовые электронные устройства, вычислительные машины, системы автоматизации управления, приводы с регулируемой скоростью вращения, могут быть чувствительны ко многим видам помех, кроме фактических прерываний. Процессы и оборудование стали более взаимосвязанными, что может сделать их более уязвимыми к выходу из строя одного компонента. Неисправность оборудования или неправильное управление важным процессом может влиять на непрерывность производства, приводя к материальным потерям [9–11].

1. Методы исследования

Согласно требованиям ГОСТ 32144 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», несинусоидальность характеризуется следующими показателями:

- а) коэффициент искажения синусоидальности;
- б) коэффициент n гармонической составляющей.

Оптимальные уровни потерь в сетях районной энергетической системы могут быть обеспечены только при определенных режимах работы их отдельных элементов. Для этого необходимо поддерживать оптимальную загрузку данных элементов, в частности силовых трансформаторов (СТ).

Под оптимальной загрузкой понимается величина, адекватная принятому критерию. Уровень загрузки силовых трансформаторов можно оценивать по следующим критериям:

- 1) по максимуму интегрального значения коэффициента полезного действия (КПД);
- 2) по минимуму потерь денежных средств при трансформации электроэнергии.

Расчет интегрального значения КПД может быть произведен по выражению [12]:

$$\eta_{WM} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_2}{W_2 + \Delta W}, \quad (1)$$

где W_1 – расход электрической энергии на первичной обмотке трансформатора, кВт·ч; W_2 – расход электрической энергии на вторичной обмотке трансформатора, кВт·ч (рис. 1).



Рис. 1. Расход электрической энергии на первичной и вторичной обмотках трансформатора

Расход электрической энергии на вторичной обмотке трансформатора определяется по выражению [13]:

$$W_2 = S_H \cdot \cos\phi_{2H} \cdot \left(\frac{S_M}{S_H}\right)^2 \cdot T_M, \quad (2)$$

где S_M – максимальная полная мощность, кВт·А; S_H – номинальная мощность ($S_H = \kappa_{WM}$), кВт·А; $\cos\phi_{2H}$ – коэффициент активной мощности; T_M – количество часов в расчетном периоде при определении объема потребления электрической энергии (мощности), ч.

Потери электрической энергии в трансформаторе за расчетный период могут быть найдены из формулы [13]:

$$\Delta W = \Delta P_x \cdot T + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S_M}{S_H}\right)^2 \cdot \tau, \quad (3)$$

где τ – время максимальных потерь, ч, определяется из выражения (4) [13]; ΔP_x – потери мощности холостого хода, кВт; ΔP_k – потери мощности короткого замыкания, кВт; T – период.

$$\tau = \left(0,124 + \left[\frac{T_M}{10^4}\right]^2\right) \cdot 8760 \text{ ч.} \quad (4)$$

Минимальные потери денежных средств при трансформации электрической энергии определяются по выражению [12]:

$$\eta_{WM} = \frac{S_H \cdot \kappa_{WM} \cdot \cos\phi_{2M} \cdot T_M}{S_H \cdot \kappa_{WM} \cdot \cos\phi_{2M} \cdot T_M + \Delta P_x \cdot T + \Delta P_k \cdot \kappa_{WM}^2 \cdot \tau}. \quad (5)$$

Оптимальное значение коэффициента загрузки, отвечающее оптимальной величине КПД, определяется по формуле [12]:

$$\frac{\partial \eta_{Wn}}{\partial K_{Wn}} = 0. \tag{6}$$

Оптимальная нагрузка трансформатора из условия минимальных потерь денежных средств при трансформации ЭЭ определяется по формуле [13]:

$$K_{WM}^{opt} = \sqrt{\frac{\Delta P_x \cdot T}{\Delta P_k \cdot \tau}}. \tag{7}$$

Расход денежных средств на трансформацию определяется из выражения [12]:

$$C_T = P_T \cdot K_T + \Delta P_x \cdot T \cdot C_3 + C_3 \cdot \Delta P_k \cdot \left(\frac{S_M}{S_H}\right)^2 \cdot \tau. \tag{8}$$

где P_T – коэффициент дисконтирования, %; K_T – стоимость трансформатора, руб.; C_3 – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб./кВт·ч.

Относительная стоимость трансформации электроэнергии рассчитывается по формуле [13]:

$$\eta_{CM} = \frac{S_H \cdot k_{CM} \cdot \cos \phi \cdot T_M \cdot C_3}{S_H \cdot k_{CM} \cdot \cos \phi \cdot T_M \cdot C_3 + P_T \cdot K_T + \Delta P_x \cdot T \cdot C_3 + \Delta P_k \cdot k_{CM}^2 \cdot \tau \cdot C_3}, \tag{9}$$

где K_{CM} – коэффициент загрузки, определяемый из условия минимальной стоимости трансформации электроэнергии.

Оптимальная нагрузка трансформатора из условия минимальной стоимости трансформации ЭЭ определяется из выражения [12]:

$$K_{CM}^{opt} = \sqrt{\frac{P_T \cdot K_T + C_3 \cdot \Delta P_x \cdot T}{C_3 \cdot \Delta P_k \cdot \tau}}. \tag{10}$$

Оценка ущерба при отклонении коэффициента загрузки K_{CM}^{opt} , K_{WM}^{opt} от оптимальных значений рассчитывается по формуле [13]:

$$\Delta W^* = \frac{\Delta P_x \cdot T + \Delta P_k \cdot k_{WM}^2 \cdot \tau}{S_H \cdot k_{WM} \cdot \cos \phi_{2M} \cdot T_M}. \tag{11}$$

Относительные затраты на трансформацию электроэнергии рассчитываются по выражению [13]:

$$C_T^* = \frac{P_T \cdot K_T + \Delta P_x \cdot T \cdot C_3 + C_3 \cdot \Delta P_k \cdot \left(\frac{S_M}{S_H}\right)^2 \cdot \tau}{S_H \cdot k_{CM} \cdot \cos \phi_{2M} \cdot T_M \cdot C_3}. \tag{12}$$

2. Результаты исследования

Для понимания описанной методики проведен расчет коэффициента загрузки трансформатора (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициентов загрузки

K_{WM}, K_{CM}	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,02	0,03
0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,2	0,3
0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	-	-

Принятые исходные данные, взятые на действующем энергопредприятии: трансформатор ТМ-400; $S_H = 400$ кВ·А; $P = 0,161$ Вт; $T = 8000$ ч; $C_3 = 0,565$ руб./кВт·ч; $\cos \phi_{2M} = 0,8$; $C_T = 72,65$ руб.; $T_M = 4923$ ч.

Согласно выражению (4) определяется время максимальных потерь:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4923}{10^4}\right)^2 \cdot 8760 = 3413,121 \text{ ч.}$$

По выражению (5) определяются минимальные потери денежных средств при трансформации ЭЭ:

$$\eta_{WM(0,002)} = \frac{400 \cdot 0,002 \cdot 0,8 \cdot 4923}{400 \cdot 0,002 \cdot 0,8 \cdot 4923 + 1,05 \cdot 8000 + 5,5 \cdot 0,002^2 \cdot 3413,121} \cdot 100\% = 27,277 \%. \tag{13}$$

Относительная стоимость трансформации ЭЭ рассчитывается по формуле (9).

$$\eta_{CM(0,002)} = \frac{400 \cdot 0,002 \cdot 0,8 \cdot 0,565}{400 \cdot 0,002 \cdot 0,8 \cdot 4923 \cdot 0,565 + 0,231 \cdot 29060 + 1,05 \cdot 8000 \cdot 0,565 + 5,5 \cdot 0,002^2 \cdot 3413,121 \cdot 0,565} \cdot 100\% = 15,857 \%$$

Полученные значения η_{WM} , η_{CM} сводятся в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость минимальных потерь денежных средств при трансформации ЭЭ от относительной стоимости трансформации ЭЭ

№ п/п	η_{WM} %	η_{CM} %
1	0	0
2	27,277	15,857
3	42,861	27,329
4	52,944	36,014
5	60,002	42,817
6	65,217	48,291
7	78,936	64,878
8	84,882	73,267
9	88,200	78,331
10	90,314	81,720
11	91,778	84,147
12	92,849	85,971
13	93,667	87,391
14	94,311	88,529
15	94,830	89,461
16	97,177	93,909
17	97,909	95,491
18	98,222	96,303
19	98,364	96,796
20	98,421	97,128
21	98,429	97,366
22	98,406	97,546
23	98,362	97,686
24	98,304	97,799

Согласно полученным данным табл. 2, на рис. 2 построен график зависимости $\eta_{WM} = \eta_{WM}(k_{WM})$.
Согласно полученным данным табл. 2, на рис. 3 построен график зависимости $\eta_{CM} = \eta_{CM}(k_{CM})$.

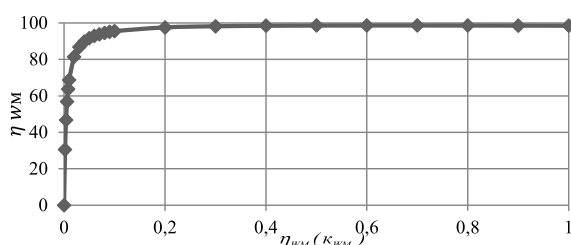


Рис. 2. Зависимость времени максимальных потерь от коэффициента загрузки трансформатора

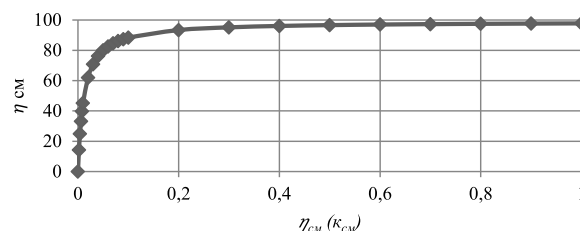


Рис. 3. Зависимость стоимости трансформации ЭЭ от коэффициента загрузки трансформатора

По формуле (7) определяется коэффициент загрузки трансформатора:

$$K_{WM}^{OPT} = \sqrt{\frac{1,05 \cdot 8000}{5,5 \cdot 3413,121}} = 0,669 \text{ о.е.}$$

По выражению (10) определяется коэффициент загрузки трансформатора, определяемый из условия минимальной стоимости трансформации ЭЭ:

$$K_{CM}^{OPT} = \sqrt{\frac{0,161 \cdot 29060 + 0,565 \cdot 1,05 \cdot 8000}{0,565 \cdot 5,5 \cdot 3413,121}} = 0,943 \text{ о.е.}$$

После преобразования формул (7) и (10) получается зависимость:

$$K_{WM}^{OPT} = K_{WM}^{OPT}(T_M), K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(T_M),$$

$$K_{WM}^{OPT} = \sqrt{\frac{1,05 \cdot 8000}{5,5 \cdot 3413,121}} \cdot \frac{1}{(0,124 + \frac{8000}{10^4})} = 1,578 \text{ о.е.}$$

$$K_{CM}^{OPT} = \sqrt{\frac{0,161 \cdot 29060 + 0,565 \cdot 1,05 \cdot 8000}{5,5 \cdot 3413,121 \cdot 8760}} \cdot \frac{1}{(0,124 + \frac{8000}{10^4})} = 0,019 \text{ о.е.}$$

Далее считается зависимость $K_{WM}^{OPT} = K_{WM}^{OPT}(T_M)$; $K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(T_M)$ – 7 раз для каждого количества часов в расчетном периоде при определении объема потребления ЭЭ (T_M принимаем не менее 3000 ч с шагом 500 ч.).

Таблица 3

Зависимость $K_{WM}^{OPT} = K_{WM}^{OPT}(T_M)$, $K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(T_M)$

№ п/п	T_M , ч	K_{WM}^{OPT} , о. е.	K_{CM}^{OPT} , о. е.
1	3000	1,578	0,019
2	3500	1,411	0,015
3	4000	1,276	0,014
4	4500	1,165	0,013
5	5000	1,072	0,012
6	5500	0,992	0,011
7	6000	0,923	0,010

Согласно полученным данным табл. 3, на рис. 4 построен график зависимости $K_{WM}^{OPT} = K_{WM}^{OPT}(T_M)$.

Согласно полученным данным табл. 3, на рис. 5 построен график зависимости $K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(T_M)$. После преобразования формул (7) и (10) получается зависимость

$$K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(C_Э) K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(P_T)$$

$$K_{CM}^{OPT}(C_Э) = \sqrt{\frac{0,161 \cdot 29060 + 0,1 \cdot 1,05 \cdot 8000}{0,1 \cdot 5,5 \cdot 3413,122}} = 1,523 \text{ о.е.}$$

$$K_{CM}^{OPT}(P_T) = \sqrt{\frac{0,1 \cdot 29060 + 0,565 \cdot 1,05 \cdot 8000}{0,565 \cdot 5,5 \cdot 3413,122}} = 0,849 \text{ о.е.}$$

Зависимость $K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(C_Э)$ считается для 9 значений, зависимость $K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(P_T)$ считается для 6 значений ($C_Э$ принимается от 0,1 – 1,7 руб./кВт·ч с шагом 0,2 руб./кВт·ч; P_T принимается от 0,1 – 0,35 % с шагом 0,05 %).

Согласно полученным данным табл. 4, на рис. 6 построен график зависимости $K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(C_Э)$.

Согласно полученным данным табл. 4, на рис. 7 построен график зависимости $K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(P_T)$.

Согласно выражению (11), проведена оценка ущерба при отклонении коэффициента загрузки трансформатора K_{CM}^{OPT} , K_{WM}^{OPT} от оптимальных значений, для этого рассчитаны относительные потери энергии при значениях: 0,25; K_{WM}^{OPT} ; 0,9.

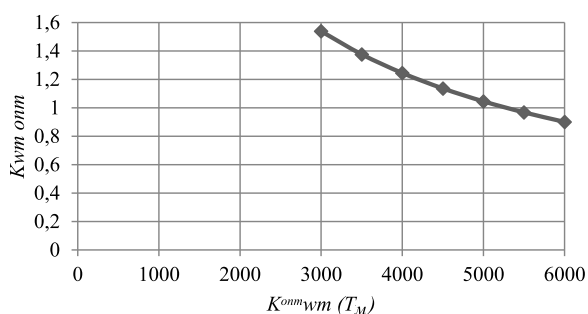


Рис. 4. Зависимость коэффициента загрузки трансформатора от количества часов в расчетном периоде при определении объема потребления ЭЭ

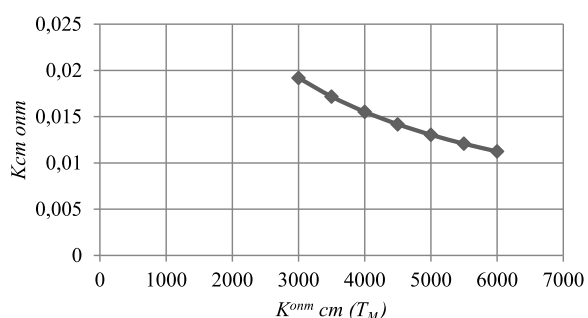


Рис. 5. Зависимость коэффициента загрузки от количества часов в расчетном периоде

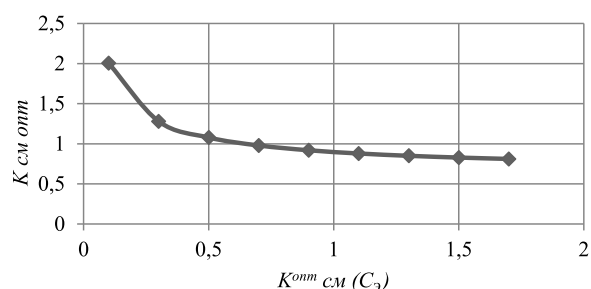


Рис. 6. Зависимость коэффициента загрузки от стоимости 1 кВт·ч ЭЭ

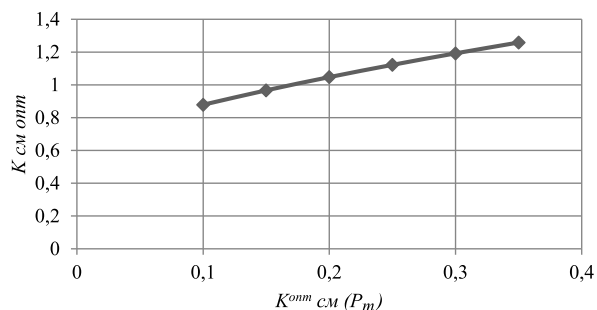


Рис. 7. Зависимость коэффициента загрузки, определяемого из условия минимальной стоимости трансформации ЭЭ от коэффициента дисконтирования

Таблица 4

Зависимость $K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(C_э), K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(P_T)$

№ п/п	$C_э$ руб./кВт·ч	$K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(C_э)$, о.е.	P_T , %	$K_{CM}^{OPT} = K_{CM}^{OPT}(P_T)$, о.е.
1	0,1	1,523	0,1	0,849
2	0,3	1,035	0,15	0,926
3	0,5	0,906	0,2	0,997
4	0,7	0,845	0,25	1,064
5	0,9	0,809	0,3	1,126
6	1,1	0,785	0,35	1,185
7	1,3	0,769	-	-
8	1,5	0,756	-	-
9	1,7	0,746	-	-

$$\Delta W^* = \frac{1,05 \cdot 8000 + 5,5 \cdot 0,25^2 \cdot 3413,12}{400 \cdot 0,25 \cdot 0,8 \cdot 4923} = 0,024 \text{ тыс. кВт·ч.}$$

$$\Delta W^* = \frac{1,05 \cdot 8000 + 5,5 \cdot 0,669^2 \cdot 3413,12}{400 \cdot 0,669 \cdot 0,8 \cdot 4923} = 0,016 \text{ тыс. кВт·ч.}$$

$$\Delta W^* = \frac{1,05 \cdot 8000 + 5,5 \cdot 0,9^2 \cdot 3413,12}{400 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 4923} = 0,017 \text{ тыс. кВт·ч.}$$

Кроме того, определены относительные затраты на трансформацию электроэнергии при 0,25; K_{WM}^{OPT} ; 1 по выражению (12).

$$C_T^* (0,25) = 0,090 \text{ руб.};$$

$$C_T^* (K_{CM}^{OPT}) = 0,020 \text{ руб.};$$

$$C_T^* (1) = 0,023 \text{ руб.}$$

Выводы. 1. Оптимальный коэффициент загрузки трансформатора по критерию максимума интегрального КПД равен 0,669 о.е., оптимальный коэффициент загрузки трансформатора по критерию минимума затрат денежных средств на трансформацию ЭЭ равен 1,094, следовательно, в целях экономии затрат на трансформацию необходимо обеспечивать максимальную нагрузку трансформатора.

2. При уменьшении количества часов при определении объема потребления ЭЭ (T_m) значение оптимальной загрузки трансформатора из условия минимальных потерь денежных средств при трансформации ЭЭ и оптимальная нагрузка трансформатора из условия минимальной стоимости трансформации ЭЭ увеличиваются, например, при $T_m=4000$ часов, $K_{WM}^{OPT}=1,276$; $K_{CM}^{OPT}=0,014$, а при $T_m=4500$ ч, $K_{WM}^{OPT}=1,165$; $K_{CM}^{OPT}=0,013$. Что может говорить об экономической выгоде предприятия.

3. При увеличении стоимости ЭЭ величина K_{CM}^{OPT} уменьшается, при $C_{\Sigma}=0,1$ руб./кВт·ч оптимальный коэффициент загрузки становится равным 1,523 о.е., а при $C_{\Sigma}=0,3$ руб./кВт·ч $K_{CM}^{OPT}(C_{\Sigma})=1,035$ о.е. С точки зрения энергетической и финансово-экономической эффективности завышение коэффициента загрузки против оптимальных значений гораздо предпочтительнее, чем их занижение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белицын И. В., Голомонзин Д.Ю. Компенсация реактивной мощности как средство повышения качества электрической энергии // Евразийское Научное Объединение. 2020. № 2. С. 84–86.
2. Севостьянов А. А. Способ анализа качества электрической энергии в трехфазной системе промышленного электроснабжения // Интеллектуальная электротехника. 2020. № 3. С. 4–5. DOI 10.46960/2658-6754_2020_3_4.
3. Сошинов А.Г., Айсина Т.Х. Наиболее часто встречающиеся нарушения нормативных показателей качества электрической энергии в электрических сетях // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. 2021. № 1. С. 28–32.
4. Коверникова Л.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Н. Качество электроэнергии в ЕЭС России: Текущие проблемы и необходимые решения // Электроэнергия: передача и распределение. 2016. № 2(35). С. 28–38.
5. Дворкин Д. В., Силаев М. А., Тульский В. Н., Палис Ш. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии // Электричество. 2017. № 7. С. 12–18.

6. Ивакин В.Н., Ковалев В.Д., Магницкий А.А. Нормирование энергоэффективности распределительных трансформаторов // Энергия единой сети. 2017. № 5 (34). С. 20–31.

7. Коверникова Л.И., Серков А.В., Шамонов Р.Г. Об управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем // Энергетическая политика. 2018. № 1. С. 75–85.

8. Ye G. Power Quality in Distribution Networks: Estimation and Measurement of Harmonic Distortion and Voltage Dips // Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven. 2017. Pp.155.

9. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Коверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.

10. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, in IEEE Std 519-2018. М., 2018. С. 1–29.

11. Ахметбаев Д.С., Ахметбаев А.Д. Системный подход к определению коэффициентов трансформации трансформаторов распределительных сетей // Управление качеством электрической энергии: сборник трудов Международной научно-практической конференции. (Москва, 05–07 декабря 2018 г.). М., 2018. С. 27–34.

12. Кулдин Н.А. Трансформаторы / Петрозаводский ГУ. Петрозаводск, 2011. 38 с.

13. Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям (утв. приказом Минэнерго РФ от 30 декабря 2008 г. № 326).

REFERENCES

1. Belicyn I. V., Golomonzin D.Ju. Reactive power compensation as a means of improving the quality of electrical energy. *Evrasijskoe Nauchnoe Obedinenie* [Eurasian Scientific Association], 2020, no. 2, pp. 84-86. (in Russian)
2. Sevost'janov A. A. Method for analyzing the quality of electrical energy in a three-phase industrial power supply system. *Intellektual'naja jelektrotehnika* [Intelligent Electrical Engineering], 2020, no. 3, pp. 4-15. DOI 10.46960/2658-6754_2020_3_4. (in Russian)
3. Soshinov, A.G., Ajsina T.H. The most common violations of the normative indicators of the quality of electrical energy in electrical networks. *Operativnoe upravlenie v jelektrojenergetike: podgotovka personala i podderzhanie ego kvalifikacii* [Operational management in the electric power industry: training of personnel and maintaining their qualifications], 2021, no. 1, pp. 28-32. (in Russian)
4. Kovertnikova L.I., Tul'skij V.N., Shamonov R.N. Electricity quality in the UES of Russia: Current problems and necessary solutions. *Jelektrojenergija: Peredacha i raspredelenie* [Electricity: transmission and distribution], 2016, no. 2(35), pp. 28–38. (in Russian)

5. Dvorkin D. V., Silaev M. A., Tul'skij V. N., Palis Sh. Problems of assessing the consumer's contribution to the distortion of the quality of electricity. *Jelektrichestvo* [Electricity], 2017, no. 7, pp.12-18. (in Russian)
6. Ivakin V.N., Kovalev V.D., Magnickij A.A. Energy efficiency regulation of distribution transformers. *Jenergija edinoj seti* [Energy of a single network], 2017, no. 5 (34), pp. 20-31. (in Russian)
7. Kovernikova L.I., Serkov A.V., Shamonov R.G. On the management of the quality of electrical energy in Russia in the past, present and future. *Jenergeticheskaja politika* [Energy Policy], 2018, no. 1, pp. 75–85. (in Russian)
8. Ye G. Power Quality in Distribution Networks: Estimation and Measurement of Harmonic Distortion and Voltage Dips. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2017, p.155.
9. Kovernikova L.I., Sudnova V.V., Shamonov and all. *Kachestvo jelektricheskoy jenergii: sovremennoe sostojanie, problemy i predlozhenija po ih resheniju.*; otv. red. N.I. Voropaj [The quality of electrical energy: current state, problems and proposals for their solution / ed. N.I. Voropay]. Novosibirsk, Nauka, 2017. 219 p.
10. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, in IEEE Std 519-2018, 2018, pp.1-29.
11. Ahmetbaev D.S., Ahmetbaev A.D. A systematic approach to determining the transformation ratios of distribution network transformers. *Upravlenie kachestvom jelektricheskoy jenergii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Moskva, 05–07.12. 2018)* [Electricity quality management: collection of proceedings of the International Scientific and Practical Conference. (Moscow, 05-07 December 2018)], 2018, pp. 27-34. (in Russian)
12. N. A. Kuldin. *Transformatory: Ucheb. Posobie* [Transformers: Tutorial]. Petrozavodsk, Petr GU, 2011. 38 p.
13. *Instrukcija po organizacii v Ministerstve jenergetiki Rossijskoj Federacii raboty po raschetu i obosnovaniju normativov tehnologicheskikh poter' jelektrojenergii pri ee peredache po jelektricheskim setjam (otv. prikazom Minjenergo RF ot 30 dekabrya 2008 g. N 326)* [Instructions for organizing in the Ministry of Energy of the Russian Federation work on the calculation and substantiation of standards for technological losses of electricity during its transmission through electric grids (approved by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 326 dated December 30, 2008)].

Об авторах:

ЛУКОВЕНКО Антон Сергеевич

кандидат технических наук
электромонтер по обслуживанию ПС 220 кВ Тайга
Филиал ПАО «ФСК ЕЭС» – Красноярское
предприятие МЭС Сибири
660111, Россия, г. Красноярск,
ул. Пограничников, 105, стр. 5
E-mail: anlukov2.0@mail.ru

LUKOVENKO Anton S.

PhD, Maintenance Electrician at SS 220 kV Taiga
Branch of PJSC “FGC UES” - Krasnoyarsk enterprise
of backbone electrical networks
660111, Russia, Krasnoyarsk, Pogranichnikov str., 105, 5
E-mail: anlukov2.0@mail.ru

Для цитирования: Луковенко А.С. Методика оценки экономического ущерба при отклонении коэффициента загрузки трансформатора // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 3. С. 168–175. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.22.

For citation: Lukovenko A.S. Economic Damage Assessment Methodology in Case of Transformer Load Ratio Deviation. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 168–175. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.22.