



УДК 621.620.09

## УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ 33/11 КВ ПУТЕМ ВЫРАВНИВАНИЯ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Грачева Е.И. <sup>1</sup>, Альзаккар А. <sup>1,2</sup>, Местников Н.П. <sup>3</sup>, Романова В.В. <sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> Казанский государственный энергетический университет

<sup>2</sup> Аль Баас университет

<sup>3</sup> Физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета

<sup>4</sup> Забайкальский государственный университет

<sup>5</sup> Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»



### Информация о статье

Поступила:

21 октября 2024 г.

Рецензирование:

12 февраля 2025 г.

Принята к печати:

10 марта 2025 г.

### Ключевые слова:

срок службы, трансформатор, аппроксимирующая функция, график нагрузки, регулирование потребления электроэнергии

### Аннотация.

Силовые трансформаторы, как известно, являются важнейшей частью электротехнических комплексов. Рабочее состояние силовых трансформаторов обеспечивает нормальную работу электрооборудования подстанций и электроснабжение потребителей электроэнергией. Достоверное прогнозирование и увеличение срока службы трансформаторов является важнейшей задачей для электротехнических комплексов Сирийской Арабской Республики в условиях экономических санкций со стороны недружественных государств. Целью данного исследования является увеличение срока службы силовых трансформаторов с помощью способов регулирования потребления электроэнергии, основанных на выравнивании графиков нагрузки трансформаторов 33/11 подстанции «Кабун-1» (г. Адра, Сирийская Арабская Республика). В работе представлен анализ системы электроснабжения промышленной зоны г. Адра. Разработаны аппроксимирующие функции суточных графиков активных мощностей нагрузок трансформаторов Прядыльно-ткацкой фабрики (первое и второе приближение).

Разработаны мероприятия по регулированию потребления электроэнергии от трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1». Определение коэффициента использования грузоподъемности карьерного самосвала с учетом физико-механических свойств горной массы и параметров погрузки является одной из актуальных задач современного горного производства.

**Для цитирования:** Грачева Е.И., Альзаккар А., Местников Н.П., Романова В.В. Увеличение срока службы трансформаторов 33/11 кВ путем выравнивания графиков нагрузок электропотребителей в климатических условиях Сирийской Арабской Республики // Техника и технология горного дела. – 2025. – № 1(28). – С. 70-90. – DOI: 10.26730/2618-7434-2025-1-70-90, EDN: FWIOEF

### Введение

Промышленные предприятия г. Адра получают питание от подстанции «Кабун-1» по кабельным линиям напряжением 11 и 0,4 кВ. На подстанции установлены 2 трансформатора,  $S_{\text{ном}}=20$  МВА; 33/11 кВ и 2 трансформатора,  $S_{\text{ном}}=10$  МВА; 33/0,4 кВ. От трансформаторов с  $S_{\text{ном}}=20$  МВА получают питание коммунально-бытовые (Ком-быт.) потребители, Механическая (Мех.) мастерская, Завод соков (режим работы в одну смену) и Прядыльно-ткацкая (Пряд-ткац.) фабрика. Потребителем наибольшей мощности является Пряд-ткац. фабрика, работающая в двухсменном режиме. На фабрике установлены 36 трансформаторов с  $S_{\text{ном}}=1$  МВА. Фабрика получает питание от подстанции «Кабун-1» по кабельным линиям на  $U=11$  кВ. От



трансформаторов с  $S_{ном}=10$  МВА; 33/0,4 кВ получают питание ряд потребителей коммунально-бытового сектора на 0,4 кВ.

### Постановка цели и задач

Целью представленной работы является разработка способов увеличения срока службы силовых трансформаторов с помощью регулирования потребления электроэнергии, основанного на выравнивании графиков нагрузки (на примере электропотребителей трансформаторов напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1», Сирийская Арабская Республика).

Для достижения поставленной цели требуется решение основных задач:

- Анализ научных работ ученых, проводящих исследования срока службы силовых трансформаторов.
- Разработка аппроксимирующих функций суточных графиков активных мощностей нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ.
- Разработка мероприятий по регулированию потребления электроэнергии от трансформаторов 33/11 кВ.

В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам увеличения срока службы силовых трансформаторов и способам регулирования режимов потребления электроэнергии. Ниже представлен анализ некоторых научных работ ученых, проводящих исследования в этой области.

I.A. Khudonogov, E.Yu. Puzina, A.G. Tuigunova [1] предложили на основании результатов анализа учитывать динамический износ изоляции обмоток, связанный с воздействием тока короткого замыкания на тяговую обмотку, при оценке остаточного ресурса силовых трансформаторов тяговых подстанций в нормативных документах.

V.A. Thango, J.A. Jordaan, A.F. Nnachi [2] исследовали возможность прогнозирования заводами-изготовителями трансформаторов остаточного срока службы трансформаторного оборудования при различных нагрузках для солнечной фотоэлектрической системы. Результаты исследований показывают – при увеличении нагрузки на установку целесообразна замена установленного трансформатора на трансформатор большей мощности.

Д.К. Якубова [3] рассматривает влияние режимов нагрузки на износ изоляции силовых трансформаторов на примере ТЩ-1000000/220-УХЛ1. Как известно, если максимальное значение нагрузки не превышает номинальной мощности трансформатора, температура обмоток и масла изменяется в диапазоне температур ниже допустимой нормы. В данной работе рассматривается многоступенчатый график нагрузки электропотребителей трансформатора, который определяется начальной эквивалентной нагрузкой, средней перегрузкой трансформатора в заданный интервал времени, а затем корректировкой ограничений.

Rao Fu, Dingrui Zhi, Xiaolong Yang [4] предложили метод прогнозирования срока службы трансформатора на основе байесовской оптимизации и нейронной сети. По данному методу используются режимные параметры эксплуатационных данных трансформатора и оценивается его состояние и оставшийся срок службы с помощью индикатора работоспособности. Эффективность данного метода была проверена на реальных характеристиках трансформатора и предоставляет интерес для персонала по техническому обслуживанию интеллектуальных подстанций.

Saleh Forouhari, A. Abu-Siada [5] представили эффективную модель на основе нечеткой логики для оценки остаточного ресурса силового трансформатора на основе значений межфазного натяжения и кислотного числа изоляционного масла силового трансформатора.

Sanjeevikumar Padmanaban, Mohsen Khalili, Morteza Azimi Nasab [6] показывают, что критерий индекса работоспособности имеет высокую степень достоверности определения сроков технического обслуживания и ремонта исследуемых трансформаторов. Кроме того, при сравнении предлагаемого метода с известным методом для семи образцов трансформаторов индекс готовности системы предлагаемого метода увеличился примерно на 40%.

A.S. Lukovenko, V.V. Kukartsev, V.S. Tynchenko, K.A. Bashmur [7] рассматривают вопрос расчета надежности силовых масляных трансформаторов. По статистической информации выявлены наиболее повреждаемые части силовых трансформаторов. Приведены основные



показатели, характеризующие уровень и состояние обмоток силовых трансформаторов. С использованием квантификаторов распределения Хи-квадрат определены верхняя и нижняя границы наработки на отказ обмоток силовых трансформаторов для различных периодов эксплуатации, определены доверительные границы с вероятностью  $\alpha = 0,9, 0,95, 0,99$ . По полученным данным распределения Хи-квадрат получен поток отказов основного элемента – обмоток силовых трансформаторов с различными периодами эксплуатации.

В.А. Thango, К. Moloi, J.A. Jordaan, A.F. Nnnach [8] предлагают новую методику, которая реализует сложный финансовый анализ, необходимый для точной оценки снижения срока службы трансформатора без нагрузки и под нагрузкой. Данная методика учитывает факторы и причины снижения срока службы трансформатора как результат спорадического профиля генерации солнечной фотоэлектрической установки и связанных с ней нормированных затрат на электроэнергию в расчете общей стоимости трансформаторов.

Yang Liu, Zehai Gao, Molin Chu [9] анализируют причины и механизм уменьшения производительности авиационного трансформаторного выпрямителя и подтверждают достоверность параметров инициализации трансформаторного выпрямителя в соответствии с показателями работы системы. Модель снижения производительности авиационного трансформаторного выпрямителя построена с использованием Simulink и смоделирован процесс снижения производительности всего жизненного цикла.

Edwell T. Mharakurwa, George. N. Nyakoe, A.O. Akumu [10] рассматривают возможность разработки модели оценки остаточного ресурса и принятия решений по управлению активами на основе диагностики характеристик изоляции трансформатора. Предлагаемая модель разработана на основе применения алгоритмов нечеткой логики.

Отличие представленной работы от результатов других исследований заключается в том, что впервые исследованы условия эксплуатации трансформаторов напряжением 33/11 кВ (подстанция «Кабун-1», Сирия) на основании статистических данных электропотребления промышленными и непромышленными объектами. Определены зависимости изменения коэффициентов загрузки и температуры нагревания обмоток и предложены технические решения, направленные на увеличение относительных сроков службы трансформаторов.

Исследуем исходные и смоделируем аппроксимированные графики нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ Прядильно-ткацкой фабрики (первое и второе приближение), а также рассмотрим способы выравнивания графиков нагрузок электропотребителей трансформаторов подстанции «Кабун-1» 33/11 кВ (три варианта) для увеличения технического ресурса электрооборудования в климатических условиях Сирийской Арабской Республики.

### **Выбор вида аппроксимирующей функции суточных графиков активных мощностей нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики**

#### ***Первое приближение.***

Для исследования характеристик рассматриваемых графиков нагрузок и выбора аппроксимирующих функций используем результаты оценок параметров электропотребителей Прядильно-ткацкой фабрики, которая питается от подстанции «Кабун-1», приведенных в [11, 12]. Вид функции, аппроксимирующей график активной нагрузки в первом приближении, можно представить [13]:

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{[1]}(t) &= B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos(\omega^{[1]}t) = B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos\left(\frac{2\pi t}{T^{[1]}}\right) \\ B_p^{[1]} &\approx M_p^{[1]}(+)\approx M_p^{[1]}(-) \\ \omega^{[1]} &= \frac{2\pi}{T^{[1]}} = \frac{6}{24} \approx 0,25 [1/ч] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $M_p = P_{\text{сред}}$  – среднее значение за сутки исходного графика активной нагрузки, полученное по статистическим данным;  $M_p^{[1]}$  – среднее значение за сутки графика аппроксимации активной нагрузки в первом приближении;  $A_p^{[1]}$  – амплитуда косинуса, может быть приближенно определена по выражению:



$$A_p^{[1]} \approx A_p = 0,5(P_{\max} - P_{\min});$$

$P_{\max}$  и  $P_{\min}$  — соответственно максимальное и минимальное значение суточного графика активной нагрузки.

В Таблице 1 приведены суммарные и средние значения исходных суточных графиков активной мощности нагрузок для 36 трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики.

Таблица 1 – Статистические значения исходных суточных графиков активной мощности нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики

Table 1 – Statistical values of the initial daily graphs of active power of transformer loads of the Spinning and Weaving Factory

	$M_p$ , кВт	$P_{\max}$ , кВт	$P_{\min}$ , кВт	$0,5(P_{\max} - P_{\min})$	$\sigma$ , кВт	$\gamma$	$K_{\max}$
Сумм	14517	26730	4634	11048	7279	18,17	66,45
Сред	403	743	129	307	202	0,51	1,85

В Таблице 2 приведены:

1. Аргументы аппроксимирующих функций суточных активных нагрузок трансформаторов в первом приближении, то есть при периоде  $T^{[1]} = 24$  ч, угловой частоте  $\omega \approx 0,25$  [1/ч]

$$\Phi^{[1]}(t) = B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos(0,25 t) \quad (2)$$

2. Средние значения разностей

$$\left. \begin{aligned} &M_R^{[1]} \left[ f_{\text{исх}}(t) - \Phi^{[1]}(t) \right] \\ &M_R^{[1]} \% = \frac{M_R^{[1]}}{M_p^{[1]}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3. Значение среднеквадратического отклонения разностей

$$\left. \begin{aligned} &\delta_R^{[1]} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} \left( (M_R^{[1]})_i - (M_R^{[1]})_{\text{сред}} \right)^2}{24}} \\ &\delta_R^{[1]} \% = \frac{\delta_R^{[1]}}{M_p^{[1]}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Таблица 2 – Аргументы и оценка погрешности функции аппроксимации (первое приближение)

Table 2 – Arguments and error estimate of the approximation function (first approximation)

	Аргументы функция $N^{[1]}(t)$ аппроксимации в первом приближении		$M_R^{[1]}$ , кВт	$\delta_R^{[1]}$ , кВт
	$B_p^{[1]}$	$A_p^{[1]}$		
Сумм	14090	10480	62	4362

Данные Таблицы 2 показывают, что средние значения разностей исходного графика и аппроксимирующей функции составляют доли процента от среднего значения активной нагрузки за сутки для всех трансформаторов. На Рис. 1 показаны исходные графики активной нагрузки трансформатора 25 (с наибольшим значением коэффициента загрузки  $K_{зг} = 0,98$ ) и их приближенная аппроксимация.

В Таблице 3 приведены статистические характеристики аппроксимированных графиков активной нагрузки трансформаторов фабрики.

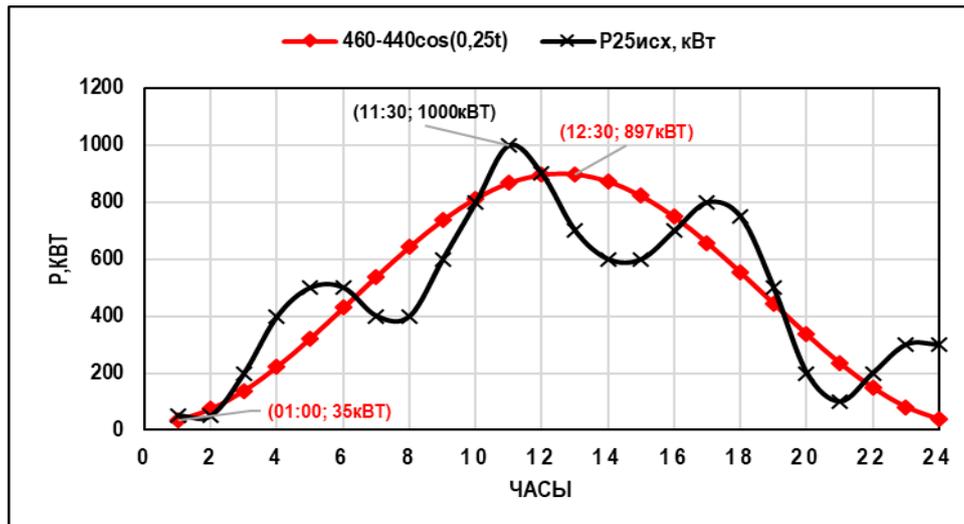


Рис. 1. Исходный график активной нагрузки трансформатора 25 и его приближенная аппроксимация

Fig. 1. Initial graph of active load of transformer 25 and its approximate approximation

Таблица 3. Статистические параметры исходных графиков и функций аппроксимации в первом приближении

Table 3. Statistical parameters of the original graphs and approximation functions in the first approximation

	$M_p^{[1]}$ , кВт	$P_{\max}$ , кВт	$P_{\min}$ , кВт	$\sigma$ , кВт	$\gamma$	$K_{\max}$
Сумм	14579	24310	4126	7232	17,85	59,98
Сред	405	675	115	201	0,49	1,67

В Таблице 4 представлены характеристики исходных суммарных графиков активной мощности нагрузки Пряжильно-ткацкой фабрики и суммарных аппроксимированных графиков.

Таблица 4. Суммарные статистические параметры исходных графиков и аппроксимированных в первом приближении

Table 4. Summary Statistical Parameters of the Original Graphs and Approximated in the First Approximation

График	$\Sigma M_p$ , кВт	$\Sigma P_{\max}$ , кВт	$\Sigma P_{\min}$ , кВт	$\Sigma \sigma$ , кВт	$\gamma_{\text{сред}}$	$(K_{\max})_{\text{сред}}$
Исходный	14517	26730	4634	7279	0,51	1,85
Аппроксим	14579	24310	4126	7232	0,49	1,67

По выражению (2) определяется функция аппроксимации суммарного графика нагрузки фабрики

$$B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos(0,25t) = 14090 - 10480 \cos(0,25t) \quad (5)$$

На Рис. 2 показаны суммарные графики активной мощности нагрузок Пряжильно-ткацкой фабрики исходный и аппроксимированный.

Данные Таблицы 4 и Рис. 2 показывают, что при практическом совпадении средних значений графиков мощности нагрузки наблюдается значительная разница в минимальном и максимальном значениях. Максимальная нагрузка исходного графика наблюдается в 14:30, а аппроксимированного – в 12:30, поэтому требуется уточнение аппроксимации.

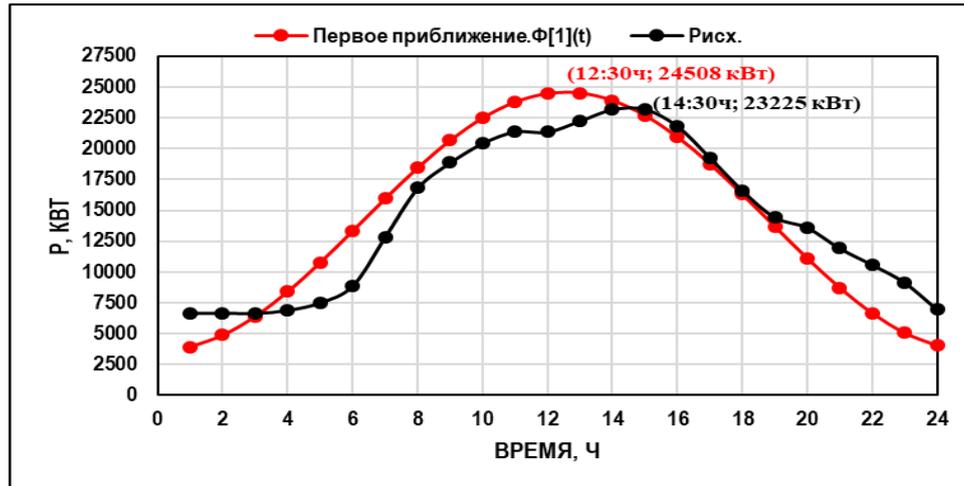


Рис. 2. Суммарные графики активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики – исходный и аппроксимированный  
Fig. 2. Total graphs of active power of the loads of the Spinning and Weaving Mill – original and approximated

### Второе приближение.

Для аппроксимации суточных графиков активной нагрузки трансформаторов во втором приближении использована сумма гармонических функций:

1. Первая – с периодом  $T_1^{[2]}=20$  ч или 24 ч  $\omega_1^{[2]}=0,25$  и  $0,33$ );
2. Вторая – с периодом  $T_2^{[2]} \approx 6$ ч ( $\omega_1^{[2]}=1$ ).

Для более точного приближения времени наступления максимума нагрузки в исходном графике к времени наступления максимума функции аппроксимации подбирались различные начальные фазы.

$$j_0^{[2]}=2\pi \cdot t_0 \omega^{[2]}. \quad (6)$$

Следовательно, вид функции, аппроксимирующей график активной нагрузки во втором приближении:

$$\left. \begin{aligned} \Phi^{[2]}(t) &= B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cos(\omega_1^{[2]}t + j_{01}^{[2]}) \pm A_{P2}^{[2]} \cos(\omega_2^{[2]}t + j_{02}^{[2]}) \\ \Phi^{[2]}(t) &= \underbrace{B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_1^{[2]}} + j_{01}^{[2]}\right)}_{\text{Первая функция}} \pm \underbrace{A_{P2}^{[2]} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_2^{[2]}} + j_{02}^{[2]}\right)}_{\text{Вторая функция}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Проведем аппроксимацию функции во втором приближении для трансформатора 25 с помощью (8):

1. Первая функция  $(B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cos(\omega_1^{[2]}t + j_{01}^{[2]}))$ :

$$\left. \begin{aligned} (B_{P1}^{[2]})_{тр-25} &\approx (M_{P,1}^{[2]})_{тр-25} = 480 \text{ кВт} \\ (A_{P1}^{[2]})_{тр-25} &= \frac{P_{\text{макс.1}}^{[2]} - P_{\text{мин.1}}^{[2]}}{2} = \frac{800 - 200}{2} = 300 \text{ кВт} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2. Вторая функция  $(A_{P2}^{[2]} \cos(\omega_2^{[2]}t + j_{02}^{[2]}))$ :

$$(A_{P2}^{[2]})_{тр-25} = (P_{\text{мин}}^{[2]})_{тр-25} = 235 \text{ кВт} \quad (9)$$

3. Суммарная аппроксимация функции во втором приближении для трансформатора тр-25:



$$\left. \begin{aligned} \left[ \phi^{[2]}(t) \right]_{тр-25} &= \underbrace{480 - 300 \cos\left(\frac{2\pi t}{24} + 0\right)}_{\text{Первая функция}} - \underbrace{235 \cos\left(\frac{2\pi t}{6} - 8\right)}_{\text{Вторая функция}} \\ \left[ \phi^{[2]}(t) \right]_{тр-25} &= 480 - 300 \cos(0,25t) - 235 \cos(t - 8) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

На Рис. 3 показаны 4 графика, соответствующие первой и второй аппроксимации функции, суммарной аппроксимации функции и исходный для трансформатора тр-25:

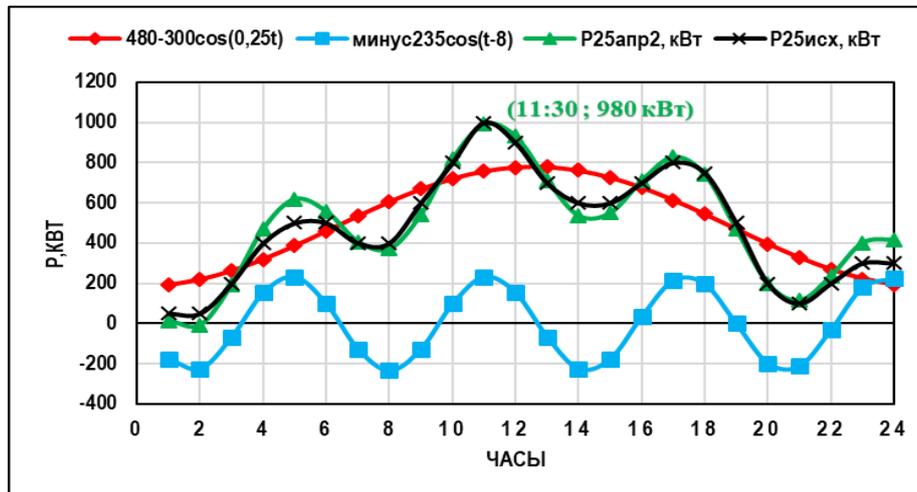


Рисунок 3 – График исходный и графики функции уточненной аппроксимации активной нагрузки трансформатора 25

Figure 3 – Graphs: original and functions of the refined approximation of the active load of transformer 25

Рис. 3 показывает совпадение между исходными и аппроксимированными графиками, особенно во время максимума (11 ч 30 мин; 980 кВт).

В Таблицах 5 и 6 показаны статистические параметры исходных графиков (среднего и суммарного) активной нагрузки и функций аппроксимации во втором приближении.

Таблица 5 – Статистические параметры исходных графиков активной нагрузки и функций аппроксимации во втором приближении (часть 1)

Table 5 – Statistical parameters of the initial graphs of active load and approximation functions in the second approximation (part 1)

	M <sub>p</sub> , кВт		P <sub>макс</sub> , кВт		σ, кВт	
	исходный	второе приближение	исходный	второе приближение	исходный	второе приближение
Сред	403	403	743	743	202	201
Сумм	14517	14513	26730	26754	7279	7227

Таблица 6. Статистические параметры исходных графиков активной нагрузки и функций аппроксимации во втором приближении (часть 2)

Table 6. Statistical parameters of the initial graphs of active load and approximation functions in the second approximation (part 2)

	P <sub>мин</sub> , кВт		γ		K <sub>макс</sub>	
	исходный	второе приближение	исходный	второе приближение	исходный	второе приближение
Сред	128	61	0,51	0,51	1,84	1,86
Сумм	4634	2712 (2162)	18,17	18,13	66,45	66,60



Рассчитаем погрешности для второй аппроксимации графиков активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики (для трансформатора 25):

1. Аппроксимирующая функция

$$\phi^{[2]}(t) = 480 - 300 \cos(0,25t) - 235 \cos(t - 8) \quad (11)$$

2. Средние значения разностей (Рис. 3)

$$\left. \begin{aligned} M_R^{[2]} \left[ f_{\text{исх}}(t) - \phi^{[2]}(t) \right] &= \frac{16}{24} \approx 0,66 \\ M_R^{[2]} \% &= \frac{0,66}{483} \times 100 = 0,14\% \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

3. Значение среднеквадратического отклонения разностей

$$\left. \begin{aligned} \delta_R^{[2]} &= \sqrt{\frac{65599}{24}} = 52,28 \\ \delta_R^{[2]} \% &= \frac{52,28}{483} \times 100 = 11\% \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

В Таблице 7 представлено сравнение погрешностей для первой и второй аппроксимации графиков активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики.

Таблица 7 – Значения погрешностей аппроксимации (первое и второе приближение) в среднем по трансформаторам Прядильно-ткацкой фабрики

Table 7 – Approximation error values (first and second approximation) on average for transformers of the Spinning and Weaving Factory

Вид графика	Средняя разность		Средняя разность		Среднеквадр. погрешность		Среднеквадр. погрешность	
	$M_R^{[2]}$ кВт	$M_R^{[1]}$ кВт	$M_R^{[2]}$ %	$M_R^{[1]}$ %	$\delta_R^{[2]}$ кВт	$\delta_R^{[1]}$ кВт	$\delta_R^{[2]}$ %	$\delta_R^{[1]}$ %
Сред.	-0,13	2	-0,03	0,418	67,67	121	17,18	30

В Таблице 8 представлено сравнение значений исходного и приближений (1) и (2) суточных графиков активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики.

Установлено, что для приближения (2) достаточно точную степень совпадения графиков показывают статистические данные в Таблицах 5 и 6; оценки погрешностей время и значения максимума в Таблицах 7 и 8 (14:30; 26750 кВт).

Таблица 8 – Статистические параметры исходных графиков и функций аппроксимации, первое и второе приближение (2) суточных графиков активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики

Table 8 – Statistical parameters of the initial graphs and approximation functions, first and second approximation (2) of daily graphs of active power of loads of the Spinning and Weaving Factory

График	$\Sigma M_P$ , кВт	$\Sigma P_{\text{макс}}$ , кВт	Время максимум	$\Sigma P_{\text{мин}}$ , кВт	$\Sigma \sigma$ , кВт	$\gamma_{\text{сред}}$	$(K_{\text{макс}})_{\text{сред}}$
Исходный	14517	26730	14:30	4634	7279	0,51	1,85
Аппроксимир (1)	14579	24310	12:30	4126	7232	0,49	1,67
Аппроксимир (2)	14513	26754	14:30	2712	7227	0,51	1,86



### Анализ способов выравнивания графиков нагрузки электропотребителей трансформаторов подстанции «Кабун-1»

Из возможных способов выравнивания графиков нагрузок [14, 15] Прядельно-ткацкой фабрики выбраны следующие.

1. Сдвиг времени начала работы ткацкого производства с 5:30 на 12:30 (сдвигается на 7 ч), остальные производства работают в исходных режимах.

2. Сдвиг времени начала работы ткацкого производства с 5:30 на 12:30 (сдвигается на 7 ч) и Прядельного производства с 5:30 на 22:30 (сдвигается на 17 ч), остальные потребители работают в исходных режимах.

#### Первый и второй варианты.

В Таблицах 9, 10 и 11 приведены расчеты параметров аппроксимированных графиков полной мощности нагрузок для исходной, первого и второго вариантов сдвига времени начала работы.

Таблица 9 – Аппроксимированные значения полной мощности нагрузок электропотребителей подстанции «Кабун-1» с учетом компенсации реактивной мощности на Прядельно-ткацкой фабрике.

Table 9 – Approximated values of the total power of the loads of electrical consumers of the Kabun-1 substation, taking into account the compensation of reactive power at the Spinning and Weaving Factory.

	$S_{\text{ком.быт}}$	$S_{\text{ткац}}$	$S_{\text{пряд}}$	$S_{\text{проч}}$	$S_{\text{сум.аппр}}$	$S_{\text{сум.Кабун-1.исх.комп}}$
$S_{\text{сред}}, \text{ МВА}$	14,99	5,86	6,77	2,18	29,81	28,93
$S_{\text{макс}}, \text{ МВА}$	22	9,19	10,39	3,99	42,69	42
$K_{\text{эл}}$	0,68	0,64	0,65	0,55	0,70	0,69
$S_{\text{эфф}}, \text{ МВА}$	22,36	8,96	7,28	2,57	30,88	30,46
$\sigma_s, \text{ МВА}$	7,13	3,41	2,69	1,34	8,41	9,53
$\gamma_s$	0,48	0,58	0,40	0,61	0,28	0,33

Таблица 10 – Аппроксимированные значения полной мощности нагрузок электропотребителей подстанции «Кабун-1» (вариант 1), время начала работы ткацкого производства – 12:30

Table 10 – Approximated values of the total power of the loads of electrical consumers of the substation "Kabun-1" (option 1), the start time of the weaving production is 12:30

	$S_{\text{ком.быт}}$	$S_{\text{ткац}}$	$S_{\text{пряд}}$	$S_{\text{проч}}$	$S_{\text{сум.апр.вар.1}}$
$S_{\text{сред}}, \text{ МВА}$	14,99	5,65	6,77	2,18	29,6
$S_{\text{макс}}, \text{ МВА}$	22	9,18	10,39	3,99	37,4
$K_{\text{эл}}$	0,68	0,62	0,65	0,55	0,79
$S_{\text{эфф}}, \text{ МВА}$	22,36	6,19	7,28	2,57	30,29
$\sigma_s, \text{ МВА}$	7,13	2,56	2,69	1,34	6,92
$\gamma_s$	0,48	0,46	0,40	0,61	0,23

Таблица 11 – Аппроксимированные значения полной мощности нагрузок электропотребителей подстанции «Кабун-1» (Вариант 2), время начала работы ткацкого производства – 12:30 и Прядельного производства - 22:30

Table 11 – Approximated values of the total power of the loads of electrical consumers of the substation "Kabun-1" (Option 2), the start time of the weaving production is 12:30 and the Spinning production is 22:30

	$S_{\text{ком.быт}}$	$S_{\text{ткац}}$	$S_{\text{пряд}}$	$S_{\text{проч}}$	$S_{\text{сум.апр.вар.2}}$
$S_{\text{сред}}, \text{ МВА}$	14,99	5,65	6,55	2,18	29,38
$S_{\text{макс}}, \text{ МВА}$	22	9,18	10,39	3,99	36,36
$K_{\text{эл}}$	0,68	0,62	0,63	0,55	0,81
$S_{\text{эфф}}, \text{ МВА}$	22,36	6,19	7,15	2,57	29,74
$\sigma_s, \text{ МВА}$	7,13	2,56	2,81	1,34	5,15
$\gamma_s$	0,48	0,46	0,43	0,61	0,18



По данным Таблицы 6 суммарная полная мощность нагрузки подстанции «Кабун-1» с учетом сдвига времени начала работы Прядильно-ткацкой фабрики для второго варианта

$$S_{\text{сум.Кабун-1.сдвиг.фаб.вар.2}} = S_{\text{сум.фаб.сдвиг}} + S_{\text{ком-быт.исх}} \quad (14)$$

Все расчетные значения представлены в Таблице 12.

Таблица 12 – Значения полной мощности нагрузок электропотребителей трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» при сдвиге времени начала работы Прядильно-ткацкой фабрики (вариант 2) и компенсацией реактивной мощности коммунально-бытовых потребителей.

Table 12 – Values of the total power loads of electrical consumers of 33/11 kV transformers of the Kabun-1 substation with a shift in the start time of the Spinning and Weaving Factory (option 2) and compensation for the reactive power of public utility consumers.

	$S_{\text{сум.Кабун-1.исх.комп}}$	$S_{\text{сум.фаб.сдвиг}}$	$S_{\text{ком-быт.исх}}$	$S_{\text{сум.Кабун-1.сдвиг.фаб.вар.2}}$
$S_{\text{сред}}, \text{ МВА}$	28,93	14,39	14,46	28,85
$S_{\text{макс}}, \text{ МВА}$	42	14,59	23	37,47
$K_{\text{зп}}$	0,69	0,99	0,63	0,77
$S_{\text{эфф}}, \text{ МВА}$	30,46	14,39	21,90	29,46
$\sigma_s, \text{ МВА}$	9,53	0,13	7,85	5,62
$\gamma_s$	0,33	0,01	0,54	0,19

На Рис. 4, 5, и 6 показаны графики нагрузок трансформаторов напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» и их слагаемые – в реальном и аппроксимированном виде – для различных случаев времени начала работы производств Прядильно-ткацкой фабрики.

В Таблице 13 показаны статистические характеристики проведенных исследований.

Данные Таблицы 13 показывают, что во втором варианте сдвига времени начала работы максимальная нагрузка снижается на 4,5 МВА (42–37,47), а его время наступления сдвигается с 9:30 при исходном варианте на 20:30 во втором варианте (Рис. 6). Величина вариации нагрузки снижается с 0,33 при исходном варианте до 0,19 при втором варианте, то есть происходит уплотнение графика.

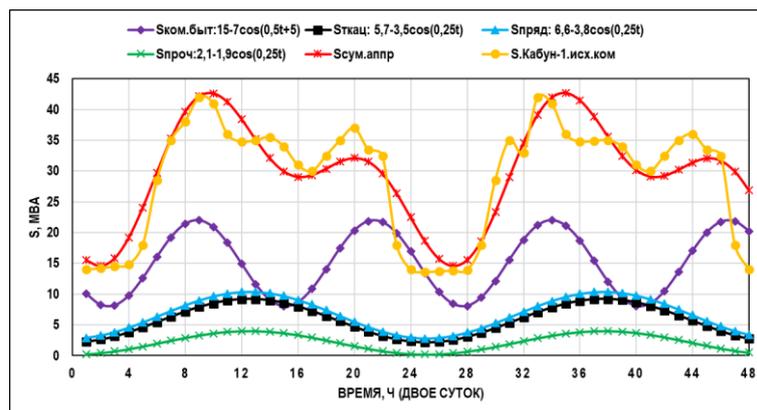


Рисунок 4 – Аппроксимированные графики полной мощности нагрузок электропотребителей подстанции «Кабун-1» с учетом компенсации реактивной мощности на Прядильно-ткацкой фабрике

Figure 4 – Approximate graphs of the total power loads of electrical consumers of the Kabun-1 substation, taking into account reactive power compensation at the Spinning and Weaving Factory

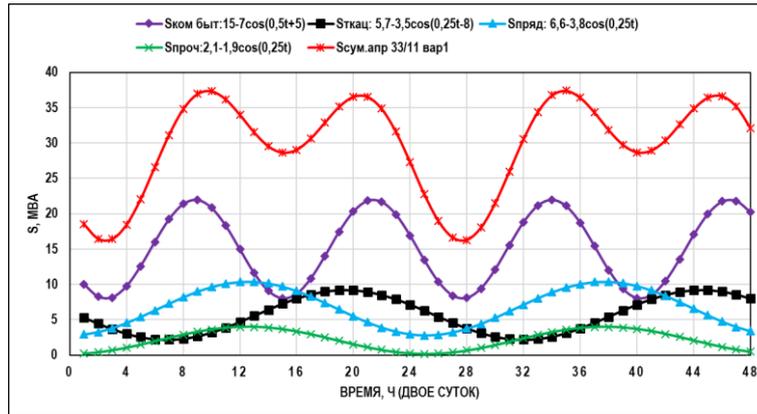


Рисунок 5 – Аппроксимированные графики нагрузок электропотребителей подстанции «Кабун-1» (Вариант 1) с учетом времени начала работы ткацкого производства – 12:30  
 Figure 5 – Approximated load graphs of power consumers of the substation "Kabun-1" (Option 1) taking into account the start time of the weaving production – 12:30

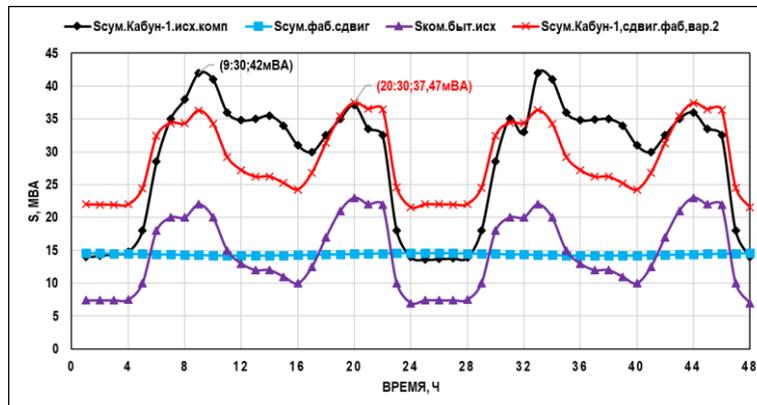


Рисунок 6 – Фактические графики нагрузок электропотребителей трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» при сдвиге времени начала работы Прядельно-ткацкой фабрики (вариант 2) и компенсацией реактивной мощности коммунально-бытовых потребителей  
 Figure 6 – Actual load graphs of 33/11 kV transformer power consumers of the Kabun-1 substation with a shift in the start time of the Spinning and Weaving Factory (option 2) and compensation for the reactive power of public utility consumers

Таблица 13 – Статистические характеристики фактических и аппроксимированных графиков нагрузок трансформаторов напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» при различных вариантах сдвигов времени начала работы подразделений Прядельно-ткацкой фабрики  
 Table 13 – Statistical characteristics of actual and approximated load graphs of 33/11 kV transformers of the Kabun-1 substation for various options for shifting the start time of the divisions of the Spinning and Weaving Mill

Показатель	Исходный с компенсацией		Вариант 1		Вариант 2
	Аппрокс.	Реальный	Аппрокс.	Аппрокс.	Реальный
$S_{\text{сред}}$ , МВА	29,81	28,93	29,60	29,38	28,85
$S_{\text{макс}}$ , МВА	42,69	42,00	37,40	36,36	37,47
$K_{\text{эл}}$	0,70	0,69	0,79	0,81	0,77
$S_{\text{эфф}}$ , МВА	30,88	30,46	30,29	29,74	29,46
$\sigma_s$ , МВА	8,41	9,53	6,92	5,15	5,62
$\gamma_s$	0,28	0,33	0,23	0,18	0,19



Для оценки срока службы трансформаторов требуется определить графические изменения зависимости и коэффициентов загрузки трансформаторов и соответствующие им температуры нагревания обмоток и далее значение относительных сроков службы.

Коэффициент загрузки трансформаторов напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» для второго варианта вычисляется по выражению

$$t=1ч \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} K_{зг.вар.2} &= \frac{S_{сум.Кабун-1.сдвиг.фаб.вар.2}}{S_{ном.тр}} \\ K_{зг.вар.2} &= \frac{21,99}{40} = 0,55 \end{aligned} \right. \quad (15)$$

С помощью [12] определим значение относительного срока службы исследуемых трансформаторов (второй вариант)

$$t=1ч \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} T_{с.сл.вар.2} &= -1,46K_{зг.вар.2}^2 - 0,5K_{зг.вар.2} + 1,83 \\ T_{с.сл.вар.2} &= -1,46(0,55)^2 - 0,5(0,55) + 1,83 \\ T_{с.сл.вар.2} &= 1,35 \end{aligned} \right. \quad (16)$$

Расчетные значения представлены в Таблице 14.

Таблица 14 – Расчетные значения коэффициента загрузки трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» (второй вариант)

Table 14 – Calculated values of the transformer loading factor of 33/11 kV substation "Kabun-1" (second option)

	$S_{сум.Кабун-1.сдвиг.фаб.вар.2}$ , МВА	$S_{ном.тр}$ , МВА	$K_{зг.вар.2}$	$T_{с.сл.вар.2}$
Сред	28,85	40	0,75	0,9
Макс	37,47	40	0,94	1,35

На Рис. 7 и 8 представлены результаты расчетов коэффициентов загрузки и относительного срока службы исследуемых трансформаторов для второго варианта.

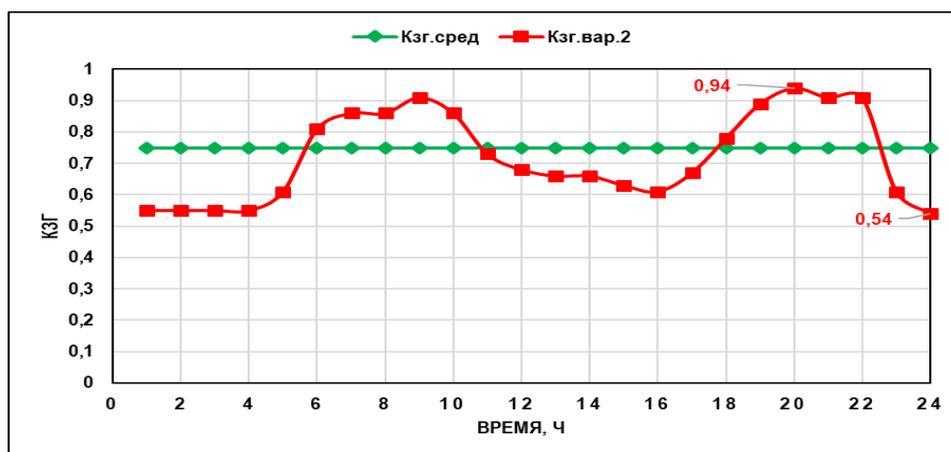


Рисунок 7 – Графические зависимости суточных значений коэффициентов загрузки трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» (второй вариант сдвига времени начала работы электропотребителей)

Figure 7 – Graphic dependencies of daily values of transformer loading factors of 33/11 kV substation "Kabun-1" (second option of shifting the start time of operation of electrical consumers)

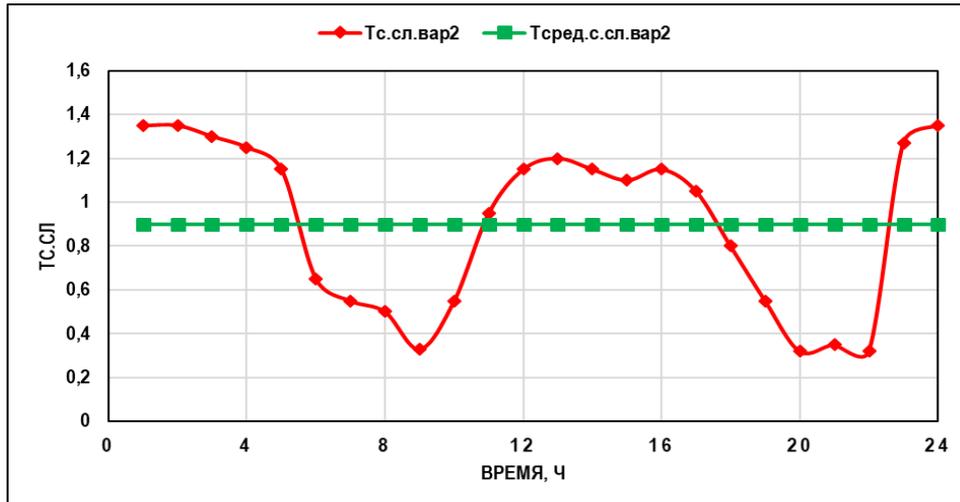


Рисунок 8 – Графические зависимости относительного срока службы трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» (второй вариант сдвига времени начала работы)  
Figure 8 – Graphic dependencies of the relative service life of 33/11 kV transformers of the Kabun-1 substation (second option for shifting the start time of operation)

На Рис. 7 показано, что значение среднего коэффициента загрузки трансформаторов (второй вариант времени начала работы Пряжильно-ткацкой фабрики) равно 0,75, предельные значения: 0,54-0,94.

График Рис. 8 показывает, что значение среднего относительного срока службы трансформаторов (второй вариант) равно 0,9, т. е. меньше, чем желаемого, т. к. в интервале наибольших нагрузок значение температуры нагревания обмотки выше допустимой (85°C)

С помощью [12] определим значения температуры нагревания обмоток исследуемых трансформаторов (для второго варианта).

$$t=1ч \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_{c.cп.вар.2} = -0,125 t_{обм.вар.2} + 11,792 \\ t_{обм.вар.2} = \frac{11,79 - T_{c.cп.вар.2}}{0,125} \\ t_{обм.вар.2} = \frac{11,79 - 1,35}{0,125} = 83,52 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right. \quad (17)$$

В Таблице 15 представлены значения температуры нагревания обмоток трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» для второго варианта.

Таблица 15 – Расчетные температуры нагревания обмоток трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» для второго варианта

Table 15 – Calculated heating temperatures of 33/11 kV transformer windings of the Kabun-1 substation for the second option

	$t_{обм.исх}$	$T_{c.cп.вар.2}$	$t_{обм. вар.2}$
Сред	90,3	0,9	87
Макс	97,5	1,35	91,76
Мин	83,5	0,32	83,52

На Рис. 9 показаны графические зависимости суточных значений температуры нагрева обмоток исследуемых трансформаторов по данным Таблицы 15 для различных вариантов нагрузки.

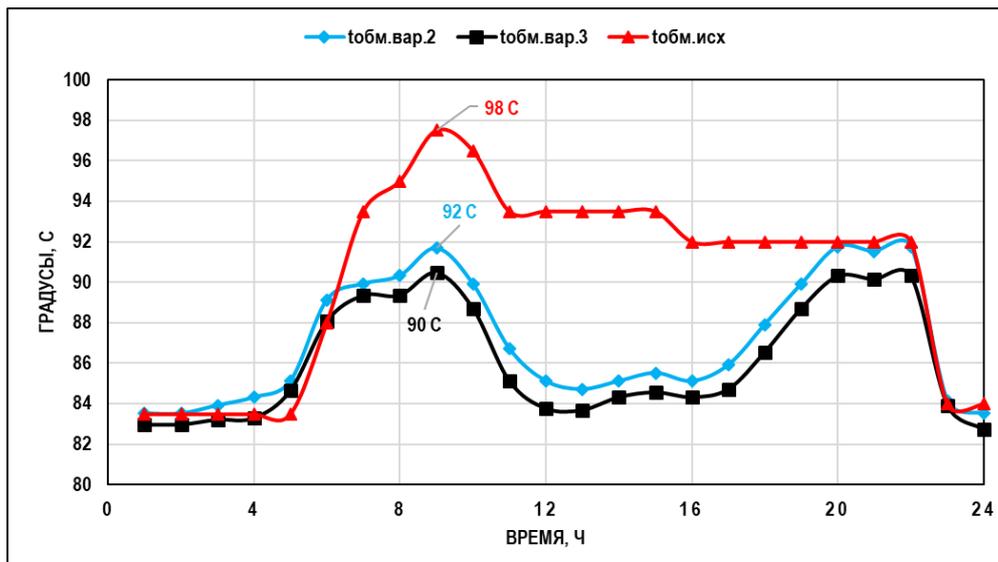


Рисунок 9 – Графические зависимости суточных значений температуры нагрева обмоток трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» для различных вариантов нагрузки  
Figure 9 – Graphic dependencies of daily values of heating temperature of 33/11 kV transformer windings of the Kabun-1 substation for various load options

В Таблице 16 представлен сравнительный анализ параметров нагрева обмоток и срока службы трансформаторов подстанции «Кабун-1» при исходных и вторых вариантах. Данные Таблицы 16 показывают, что значение срока службы исследуемых трансформаторов при графике нагрузок для второго варианта выравнивания существенно больше (примерно в полтора раза) (0,63→0,9), чем для исходного графика нагрузок с учетом компенсации реактивной мощности. Таблица 16 – Значения температуры нагрева обмоток и срока службы трансформаторов подстанции «Кабун-1» для различных вариантов графиков нагрузок  
Table 16 – Values of winding heating temperature and service life of transformers of the Kabun-1 substation for different variants of load schedules

Характеристика нагрузки	Коэф. загрузки трансформатора		Температура нагрева обмотки, °С		Относительный срок службы (Т <sub>с.сл</sub> )
	К <sub>зг.макс</sub>	К <sub>зг.сред</sub>	t <sub>обм.макс</sub>	t <sub>обм.сред</sub>	
Исходный график при компенсации реактивной мощности	1,05	0,75	98	90	0,63
График по вар. 2 при аппроксимации компенсации реактивной мощности	0,94	0,72	92	87	0,9
График по вар. 3 при аппроксимации компенсации реактивной мощности	0,9	0,72	90	84	1,05

### Третий вариант.

По результатам проведенных исследований значение среднего относительного срока службы трансформаторов (во втором варианте) равно 0,9, так как в режиме максимальных нагрузок температура нагрева обмотки выше допустимой величины. Поэтому возможно проанализировать дополнительные мероприятия для выравнивания графиков нагрузок трансформаторов при изменении времени начала работы на некоторых мелких промышленных электропотребителей Нового сектора г. Адра.



Результаты исследований характеристик графиков нагрузок коммунально-бытовых, административно-общественных электропотребителей, механической мастерской и завода по производству соков в г. Адра, питающихся от трансформаторов напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1», представлены в [11, 12].

Третий вариант снижения электропотребления и выравнивания графика нагрузок трансформаторов напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» включает следующие мероприятия.

1. Установка батарей конденсаторов на стороне низшего напряжения трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики.
  2. Смещение времени начала работы ткацкого производства Прядильно-ткацкой фабрики с 5:30 на 12:30.
  3. Смещение времени начала работы прядильного производства Прядильно-ткацкой фабрики с 5:30 на 22:30.
  4. Смещение времени начала работы механической мастерской с 7:30 на 23:30.
  5. Смещение времени начала работы завода соков с 8:30 на 0:30.
- Суммарная полная мощность подстанции «Кабун-1» третьего варианта

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{Кабун-1.вар.3}} &= S_{\text{ком-быт.вар.3}} + S_{\text{пряд-ткац.вар.3}} \\ S_{\text{ком-быт.вар.3}} &= S_{\text{об-д}} + S_{\text{сок.вар.3}} + S_{\text{мех.вар.3}} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

В Таблице 17 представлены результаты определения суммарной полной мощности нагрузок трансформаторов подстанции «Кабун-1».

Для третьего варианта сдвига времени начала работы наибольшая мощность нагрузки снижается на 5,38 МВА (42,0 – 36,62), вариация нагрузок снижается с 0,33 до 0,17. По отношению ко второму варианту сдвигов времени только подразделений Прядильно-ткацкой фабрики, наибольшее значение снизилось еще на 0,85 МВА (42,00 – 37,47), при этом во всех вариантах среднее значение мощности нагрузок трансформаторов напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» постоянно равно 28,90 МВА (Таблица 18).

Таблица 17 – Результаты расчетов суммарной полной мощности нагрузок трансформаторов подстанции «Кабун-1» для третьего варианта

Table 17 – Results of calculations of the total apparent power of transformer loads of the substation "Kabun-1" for the third option

Время, ч	Ад-об.	Мех. мастерская	Завод соков	Ком.-бытов	Пряд.-ткац	«Кабун-1» Вар.3
Сред	13,05	0,46	0,90	14,41	14,51	28,92

Таблица 18 – Статистические параметры фактических графиков нагрузок трансформаторов напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» для третьего варианта сдвига времени начала работы электропотребителей

Table 18 – Statistical parameters of the actual load graphs of 33/11 kV transformers of the Kabun-1 substation for the third option of shifting the start time of electricity consumers

Параметр	Бытовые адм-об.	Мех. Мастерская	Завод соков	Ком.-бытов	Пряд.-ткац	«Кабун-1» Вар.3	«Кабун-1» Исходный
$S_{\text{сред}}$ , МВА	13,05	0,46	0,90	14,41	14,51	28,92	28,93
$S_{\text{макс}}$ , МВА	21,40	1,10	1,80	21,70	15,94	36,62	42,00
$K_{\text{зи}}$	0,61	0,42	0,50	0,66	0,91	0,80	0,69
$S_{\text{эфф}}$ , МВА	14,12	0,64	1,06	15,22	14,54	29,33	30,46
$\sigma_s$ , МВА	5,39	0,45	0,57	4,90	0,99	4,89	9,53
$\gamma_s$	0,41	0,98	0,63	0,34	0,07	0,17	0,33



На Рис. 10 показаны графики полной мощности нагрузок исследуемых трансформаторов для третьего варианта.

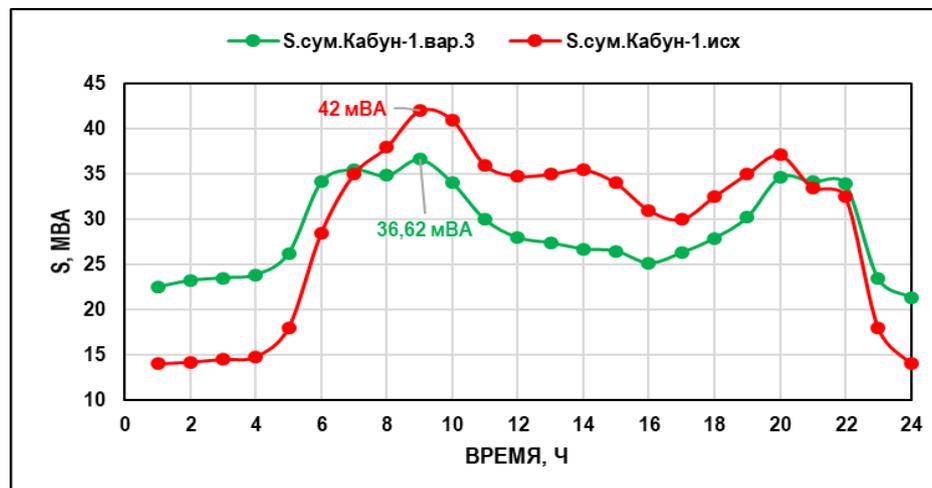


Рисунок 10 – Графики полной мощности нагрузок трансформаторов напряжением 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» – исходный и при третьем варианте сдвига  
Figure 10 – Graphs of the total power loads of transformers with a voltage of 33/11 kV at the Kabun-1 substation – the initial and the third shift option

Используя алгоритм, применяемый для второго варианта, оценим значения коэффициентов загрузки, температуры нагрева обмоток и срока службы трансформаторов для третьего варианта (используем (15), (16) и (17)), результаты представлены в Таблицах 19 и 20.

На Рис. 11 и 12 представлены графические суточные зависимости результатов расчета коэффициентов загрузки и относительного срока службы трансформаторов для третьего варианта.

Таблица 19 – Результаты расчетов значений коэффициентов загрузки и относительного срока службы трансформаторов подстанции «Кабун-1» для третьего варианта

Table 19 – Results of calculations of the values of the load factors and the relative service life of transformers of the Kabun-1 substation for the third option

Время	$S_{ном.тр}$	$S_{сум.Кабун-1.вар.3}$	$K_{зг.вар.3}$	$T_{с.сл.вар.3}$
Сред	40	28,75	0,72	1,05
Макс	40	36,21	0,90	1,42

Таблица 20 – Результаты расчетов температуры нагревания обмоток и относительного срока службы трансформаторов подстанции «Кабун-1» для третьего варианта

Table 20 – Results of calculations of the heating temperature of windings and the relative service life of transformers of the substation "Kabun-1" for the third option

	$t_{обм.исх}$	$T_{с.сл.вар.3}$	$t_{обм.вар.3}$
Сред	90,3	1,05	84,7
Макс	97,5	1,42	90

В Таблице 16 представлены сравнение исходного и второго варианта с третьим вариантом. Результаты исследований показали следующее.

1. Значение среднего коэффициента загрузки трансформаторов (третий вариант сдвига времени начала работы электропотребителей подстанции «Кабун-1») равно 0,72, предельные значения 0,61– 0,91.

2. Значение величины среднего относительного срока службы трансформаторов в третьем варианте равно 1,05- несколько больше, чем желаемый. Это объясняется тем, что значение средней температуры нагрева обмотки меньше 84°C (при допустимой температуре, равной 85°C).

3. Значение относительного срока службы трансформаторов в случае соответствия графика нагрузки третьему варианту существенно выше (почти в два раза) (0,63→1,05), чем при исходном графике с установкой компенсирующих устройств.

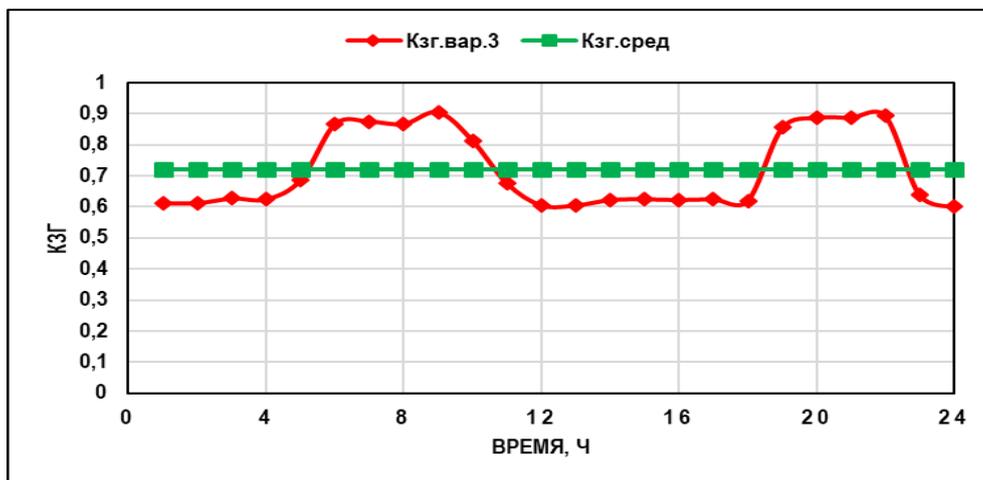


Рис. 11 – Графические зависимости суточного изменения коэффициентов загрузки трансформаторов подстанции «Кабун-1» (третий вариант сдвигов времени начала работы электропотребителей)

Fig. 11 – Graphic dependencies of daily changes in transformer loading factors of the Kabun-1 substation (the third variant of shifts in the start time of operation of electrical consumers)

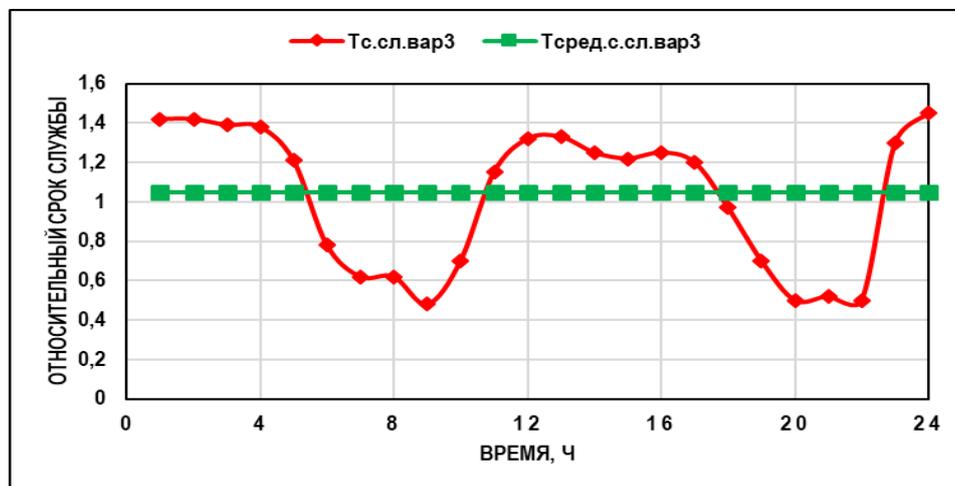


Рисунок 12 – Графические зависимости изменения относительного срока службы трансформаторов «Кабун-1» (третий вариант начала работы электропотребителей)

Figure 12 – Graphic dependencies of daily changes in transformer loading factors of the Kabun-1 substation (the third variant of shifts in the start time of operation of electrical consumers)

#### Основные результаты работы:

- Разработаны аппроксимирующие функции для суточных графиков активных мощностей нагрузок трансформаторов Пряжильно-ткацкой фабрики (первое и второе приближение).
- Доказана достаточно высокая степень совпадения статистических параметров графиков нагрузок; оценки погрешности функции аппроксимации для приближения 2.



– Доказано, что численные параметры суммы аппроксимированных графиков и исходного графика Пряжильно-ткацкой фабрики примерно совпадают. Поэтому для выравнивания графиков нагрузок Фабрики использованы разработанные функции аппроксимации, а затем проведено сравнение полученных результатов параметров нагрузок с реальными графиками.

– Установлено в результате проведенных исследований, что срок службы трансформаторов подстанции «Кабун-1» (второй вариант и третий вариант) зависит от времени начала работы подразделений Пряжильно-ткацкой фабрики. При этом выявлено:

А. Во втором варианте срок службы трансформаторов при графике нагрузок выравнивания существенно больше (примерно в полтора раза) (0,63→0,9), чем для исходного графика нагрузок с учетом компенсации реактивной мощности, и средняя температура нагрева обмотки уменьшилась на 3°C (90→87)°C.

Б. В третьем варианте срок службы трансформаторов существенно выше (почти в два раза) (0,63→1,05), чем при исходном графике с установкой компенсирующих устройств и средняя температура нагрева обмотки уменьшилась на 6°C (90→84)°C.

### Список литературы

1. I.A. Khudonogov, E.Yu. Puzina, A.G. Tuigunova. Evaluation of Short Circuit Currents Effects on Power Transformers Residual Service Life. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2019. – DOI 10.1109/ICIEAM.2019.8743069.
2. B.A. Thango, J.A. Jordaan, A.F. Nnachi. Service Life Estimation of Photovoltaic Plant Transformers Under Non-Linear Loads. *EEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, PowerAfrica*. 2020. – DOI 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219912.
3. Якубова Д.К. Исследование влияния нагрузочных режимов трансформатора ТНЦ-1000 000/220-УХЛ1 на износ изоляции // Материалы конференции: Энергия ва ресурс тежаш муаммолари, 2016. [https://www.researchgate.net/publication/339843450\\_ISSLEDOVANIE\\_VLIANIA\\_NAGRUZOCNYH\\_REZIMOV\\_TRANSFORMATORA\\_TNC-1000\\_000220-UHL1\\_NA\\_IZNOS\\_IZOLACII](https://www.researchgate.net/publication/339843450_ISSLEDOVANIE_VLIANIA_NAGRUZOCNYH_REZIMOV_TRANSFORMATORA_TNC-1000_000220-UHL1_NA_IZNOS_IZOLACII)
4. Rao Fu, Dingrui Zhi, Xiaolong Yang. Service Life Prediction Method of Transformer in Prefabricated Substation Based on BOA-BP Neural Network. *International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*. 2024. – DOI 10.1109/REPE59476.2023.10511298.
5. Saleh Forouhari, A. Abu-Siada. Remnant life estimation of power transformer based on IFT and acidity number of transformer oil. *International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. 2015. – DOI 10.1109/ICPADM.2015.7295331.
6. S. Padmanaban, M. Khalili, M.A. Nasab. Determination of Power Transformers Health Index Using Parameters Affecting the Transformer's Life. *IETE Journal of Research*. 2023;69:8714. – DOI 10.1080/03772063.2022.2048714.
7. A.S. Lukovenko, V.V. Kukartsev, V.S. Tynchenko, K.A. Bashmur. Reliability forecasting model for power transformers that have fulfilled their standard service life. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1399:055091. – DOI 10.1088/1742-6596/1399/5/055091.
8. B.A. Thango, K. Moloi, J.A. Jordaan, A.F. Nnnach. A Further Look into the Service Lifetime Cost of Solar Photovoltaic Energy Transformers. *Robotics and Mechatronics Conference (RobMech)*. 2021. – DOI 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA52254.2021.9377229.
9. Yang Liu, Zehai Gao, Molin Chu. Prediction Method of Remaining Service Life of Aviation Transformer Rectifier Based on Improved LSTM Algorithm. *International Conference on Electronics Technology (ICET)*. 2022. – DOI 10.1109/ICET55676.2022.9825180.
10. E.T. Mharakurwa, G.N. Nyakoe, A.O. Akumu. Transformer Remnant Life Estimation and Asset Management model based on Insulation Stress Assessment. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*. 2019. – DOI 10.1109/EIC43217.2019.9046526.
11. A. Alzakkar, E. Gracheva, Y. Samofalov. An Analytical Study of the Electrical Power Consumption in the Industrial City (Adra – Syria). *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2023. Pp. 410-415. – DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139241.
12. Грачева Е.И., Альзаккар А.М., Вальчев С. Исследование температурных режимов элементов силовых трансформаторов на примере трансформаторов подстанции «Кабун-1» (Сирийская Арабская Республика) // Проблемы энергетики. – 2023. – № 25(2). – С. 84-96. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-2-84-96.
13. Захаров В.С. Влияние параметров фидера 35 кВ на аппроксимирующие функции критериев определения места повреждения // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 58(3). – С. 79-83. – DOI 10.18411/lj-02-2020-55.



14. Базаров А.А., Данилушкин А.И. Способ выравнивания графика нагрузки мощных индукционных установок // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – № 4(72). – С. 71-85. – DOI 10.14498/tech.2021.4.6.
15. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзаккар А.М. Анализ и исследование электропотребления объектов промышленной зоны г. Адра-Сирия // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – № 25(1). – С. 118-129. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-118-129.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### **Информация об авторах**

**Грачева Елена Ивановна**, д.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета  
e-mail: [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru)  
Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

**Альзаккар Ахмад**, аспирант университета электроэнергетики Казанского государственного энергетического университета, сотрудник «Аль Баас» университета г. Хомс Сирийской Арабской Республики  
e-mail: [ahmadalzakkar86@gmail.com](mailto:ahmadalzakkar86@gmail.com)  
Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51  
Сирийская Арабская Республика, г. Хомс, ул. Дамаск – Алеппо

**Местников Николай Петрович**, к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение» Физико-технического института Северо-Восточного федерального университета, ведущий инженер Института физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН  
e-mail: [sakhacase@bk.ru](mailto:sakhacase@bk.ru)  
Россия, 677007, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1

**Романова Виктория Викторовна**, к.т.н., доцент кафедры «Энергетика» Забайкальского государственного университета  
e-mail: [romanova181@mail.ru](mailto:romanova181@mail.ru)  
Россия, 672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30

доцент кафедры «Энергетика» филиала Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в г. Волжском  
Россия, 404110, г. Волжский, пр-кт им. Ленина, 69

UDC 621.620.09

## **INCREASING THE SERVICE LIFE TRANSFORMERS 33/11 KV BY ALIGNING THE LOAD GRAPHS OF ELECTRICITY CONSUMERS IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC**

**Elena I. Gracheva<sup>1</sup>, Ahmad Alzakkar<sup>1,2</sup>, Nikolai P. Mestnikov<sup>3</sup>, Victoria V. Romanova<sup>4,5</sup>**

<sup>1</sup> Kazan State Power Engineering University

<sup>2</sup> Al Baath University

<sup>3</sup> Physical and Technical Institute of the North-Eastern Federal University



<sup>4</sup> Transbaikal State University

<sup>5</sup> National Research University "Moscow Power Engineering Institute"



#### Article info

Received:  
21 October 2024

Revised:  
12 February 2025

Accepted:  
10 March 2025

**Keywords:** service life, transformer, approximating function, load schedule, power consumption control

#### Abstract.

Power transformers are known to be the most important part of electrical complexes. The working condition of power transformers ensures the normal operation of electrical equipment at substations and the supply of electricity to consumers. Reliable forecasting and increasing the service life of transformers is a critical task for electrical complexes in the Syrian Arab Republic under economic sanctions from unfriendly states. The purpose of this study is to increase the service life of power transformers using methods for regulating electricity consumption based on leveling the load schedules of transformers 33/11 substation "Kabun-1" (Adra, Syrian Arab Republic). The paper presents an analysis of the power supply system of the industrial zone of Adra. Approximating functions of daily schedules of active power loads of transformers of the Spinning and Weaving Factory (first and second approximation) have been developed. Measures have been developed to regulate electricity consumption from 33/11 kV transformers of the Kabun-1 substation. Determining the coefficient of utilization of the carrying capacity of a quarry dump truck, taking into account the physical and mechanical properties of the rock mass and loading parameters, is one of the urgent tasks of modern mining production.

---

**For citation** Gracheva E.I., Alzakkar A., Mestnikov N.P., Romanova V.V. Increasing the service life transformers 33/11 kV by aligning the load graphs of electricity consumers in the climatic conditions of the Syrian Arab Republic. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2025;1(28):70-90. DOI: 10.26730/2618-7434-2025-1-70-90, EDN: FWIOEF

---

#### References

1. I.A. Khudonogov, E.Yu. Puzina, A.G. Tuigunova. Evaluation of Short Circuit Currents Effects on Power Transformers Residual Service Life. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. – 2019. – DOI 10.1109/ICIEAM.2019.8743069.
2. B.A. Thango, J.A. Jordaan, A.F. Nnachi. Service Life Estimation of Photovoltaic Plant Transformers Under Non-Linear Loads. *EEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, PowerAfrica*. – 2020. – DOI 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219912.
3. Yakubova D.K. Investigation of the influence of loading modes of the transformer TNS-1000 000/220-UHL1 on the insulation wear. *Conference Proceedings: Energiya va resurs tejash muammolari*, 2016.
4. Rao Fu, Dingrui Zhi, Xiaolong Yang. Service Life Prediction Method of Transformer in Prefabricated Substation Based on BOA-BP Neural Network. *International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*. 2024. – DOI 10.1109/REPE59476.2023.10511298.
5. Saleh Forouhari, A. Abu-Siada. Remnant life estimation of power transformer based on IFT and acidity number of transformer oil. *International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. 2015. – DOI 10.1109/ICPADM.2015.7295331.
6. S. Padmanaban, M. Khalili, M.A. Nasab. Determination of Power Transformers Health Index Using Parameters Affecting the Transformer's Life. *IETE Journal of Research*. 2023;69:8714. – DOI 10.1080/03772063.2022.2048714.
7. A.S. Lukovenko, V.V. Kukartsev, V.S. Tynchenko, K.A. Bashmur. Reliability forecasting model for power transformers that have fulfilled their standard service life. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1399:055091. – DOI 10.1088/1742-6596/1399/5/055091.
8. B.A. Thango, K. Moloi, J.A. Jordaan, A.F. Nnnach. A Further Look into the Service Lifetime Cost of Solar Photovoltaic Energy Transformers. *Robotics and Mechatronics Conference (RobMech)*. 2021. – DOI 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA52254.2021.9377229.
9. Yang Liu, Zehai Gao, Molin Chu. Prediction Method of Remaining Service Life of Aviation Transformer Rectifier Based on Improved LSTM Algorithm. *International Conference on Electronics Technology (ICET)*. 2022. – DOI 10.1109/ICET55676.2022.9825180.



10. E.T. Mharakurwa, G.N. Nyakoe, A.O. Akumu. Transformer Remnant Life Estimation and Asset Management model based on Insulation Stress Assessment. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*. 2019. – DOI 10.1109/EIC43217.2019.9046526.
11. A. Alzakkar, E. Gracheva, Y. Samofalov. An Analytical Study of the Electrical Power Consumption in the Industrial City (Adra – Syria). *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2023. Pp. 410-415. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139241.
12. Gracheva E.I., Alzakkar A.M., Valchev S. Investigation of temperature modes of power transformer elements on the example of transformers of the substation “Kabun-1” (Syrian Arab Republic) // *Energy problems*. 2023;25(2):84-96. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-2-84-96 [In Russ.].
13. Zakharov, V.S. Influence of the 35 kV feeder parameters on the approximating functions of the fault location criteria. *Trends of science and education development*. 2020;58(3):79-83. DOI 10.18411/lj-02-2020-55 [In Russ.].
14. Bazarov, A.A.; Danilushkin, A.I. Method of the load schedule equalization of the powerful induction plants. *Vestnik of Samara State Technical University. Series: Technical sciences*. 2021;4(72):71-85. - DOI 10.14498/tech.2021.4.6. [In Russ.].
15. Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Alzakkar A.M. Analysis and study of power consumption of the industrial zone objects of the city of Adra-Syria. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Problems of power engineering*. 2023;25(1):118-129. [In Russ.].

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Information about the authors

**Elena I. Gracheva**, Ph.D. (Tech.), Professor of the Department of Power Supply for Industrial Enterprises at Kazan State Power Engineering University  
e-mail: [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru)  
Russia, 420066, Kazan, st. Krasnoselskaya, 51

**Ahmad Alzakkar**, postgraduate student of the University of Electric Power Engineering of the Kazan State Power Engineering University, employee of the Al Baath University in Homs, Syrian Arab Republic  
e-mail: [ahmadalzakkar86@gmail.com](mailto:ahmadalzakkar86@gmail.com)  
Russia, 420066, Kazan, st. Krasnoselskaya, 51  
Syrian Arab Republic, Homs, st. Damascus - Aleppo

**Nikolai P. Mestnikov**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, Institute of the North-Eastern Federal University, Leading Engineer of the V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”  
e-mail: [sakhacase@bk.ru](mailto:sakhacase@bk.ru)  
Russia, 677007, Yakutsk, st. Oktyabrskaya, 1

**Victoria V. Romanova**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor  
e-mail: [romanova181@mail.ru](mailto:romanova181@mail.ru)  
Transbaikal State University, Russia, 672039, Chita, st. Alexandro-Zavodskaya, 30  
Volzhsky branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute. Russia, 404110, Volzhsky, pr-kt im. Lenina, 69

