

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПРИМЕРЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОДСТАНЦИИ
«КАБУН-1» (СИРИЙСКАЯ АРАБСКАЯ РЕСПУБЛИКА)**

Грачева Е.И.¹, Ахмад М-Насер Альзаккар¹, Valtchev S.²

^{1,2}Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

³UNINOVA–CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon
2829-516 Campus Caparica, Portugal

²<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, Ahmadalzakkar86@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ:* Любое устройство, когда повышается его температура, со временем теряет свою работоспособность, силовые трансформаторы так же. Проблемы перегрева и изоляции являются основными факторами, которые влияют на рабочее состояние силовых трансформаторов. Таким образом, исследование имеет высокую актуальность и прикладную востребованность, потому что, нагрев элементов силовых трансформаторов, особенно на территории Сирийской Арабской Республики может достигать 46 °С. Мониторинг состояния силовых трансформаторов имеет определяющее значение при исследовании показателей надежности и безопасности в энергосистеме. Термическое напряжение является одним из основных параметров, который необходимо контролировать. Резкие колебания температуры обмотки трансформатора, масла, изолирующей среды и т. д. влияют на условия эксплуатации, срок службы и безопасность эксплуатации трансформаторов. *ЦЕЛЬ.* Целью является определение вида функциональных зависимостей температуры нагрева обмоток и масла силовых трансформаторов от их загрузки. *МЕТОДЫ.* Определение вида функциональных зависимостей изменения температуры обмоток и масла силовых трансформаторов с использованием методов статистической обработки данных, аппроксимирующих функций и оценкой их достоверности. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Разработаны аппроксимирующие функции основных температурных параметров элементов силовых трансформаторов - функция температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла; функция температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха; функция температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха; функция температуры перегрева наиболее нагретой точки сверх температуры охлаждающего воздуха. Определены коэффициенты детерминации полученных функций температуры среднего перегрева обмотки и средней ошибки аппроксимации. В результате исследований установлено, что полиномиальная функция является наиболее достоверной. Разработанные зависимости могут быть использованы для практического применения для оценки и анализа температуры нагрева масла и обмоток трансформаторов при известной их загрузке, а также для управления режимами эксплуатации электрооборудования и потребителей электроэнергии систем электроснабжения.

Ключевые слова: силовой трансформатор; условия охлаждения; температура обмотки; температура масла; коэффициент загрузки.

Для цитирования: Грачева Е.И., Ахмад М-Насер Альзаккар., Valtchev S. Исследование температурных режимов элементов силовых трансформаторов на примере трансформаторов подстанции «кабун-1» (Сирийская Арабская Республика) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 84-96. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-84-96.

**STUDY OF THE TEMPERATURE CONDITIONS OF POWER TRANSFORMERS
ELEMENTS FOR EXAMPLE TRANSFORMERS AT SUBSTATION
«KABUN-1» (SYRIAN ARAB REPUBLIC)**

EI. Gracheva¹, A. Alzakkar¹, Valtchev S.²

^{1,2}Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³UNINOVA–CTS, Faculty of Sciences and Technology University NOVA of Lisbon
2829-516 Campus Caparica, Portugal

²<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, Ahmadalzakkar86@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE.* Any device loses its performance over time, Power transformers too. The problems of overheating and insulation are the main influencing factors to the operation status of power transformers. Thus, the study is of high relevance and applied demand, because the heating of power transformer elements, especially in the territory of the Syrian Arab Republic, can reach 46 °C. Monitoring the state of power transformers is of decisive importance in the study of reliability and safety indicators in the power system. Thermal stress is one of the main parameters to be controlled. Sharp fluctuations in the temperature of the transformer winding, oil, insulating medium, etc. affect the operating conditions, service life and safety of transformers. *PURPOSE.* Determination of the type of functional dependences of the heating temperature of windings and oil of power transformers on their loading. *METHODS.* Determination of the type of functional dependences of the change in the temperature of the windings and oil of power transformers using the methods of statistical data processing, approximating functions and assessing their reliability. *RESULTS.* Approximating functions of the main temperature parameters of power transformer elements have been developed - a function of the temperature of the average overheating of the winding above the oil temperature; function of the temperature of the average overheating of the oil above the temperature of the cooling air; oil superheat temperature function above the cooling air temperature; superheat function of the hottest spot above the cooling air temperature. The coefficients of determination of the obtained temperature functions of the average overheating of the winding and the average approximation error are determined. As a result of the research, it was found that the polynomial function is the most reliable. The developed dependencies can be used for practical application to assess and analyze the heating temperature of oil and transformer windings with a known load, as well as to control the operating modes of electrical equipment and consumers of electrical energy in power supply systems.

Key words: power transformer; cooling conditions; winding temperature; oil temperature; load factor.

For citation: Gracheva EI. Alzakkar A. Valtchev S. Study of the temperature conditions of power transformers elements for example transformers at substation «Kabun-1» (Syrian Arab Republic) *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(2):84-96. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-84-96.

Введение (Introduction)

В связи с климатическими условиями высоких температур в Сирии особое внимание уделяется повышению эффективности работы силовых трансформаторов. Ниже представлен анализ некоторых научных работ авторов, проводящих исследования в данной области.

Так, Е.И. Грачевой, А. Альзаккар [1] определены данные параметров графиков нагрузок электропотребителей объектов г. Адра (Сирия), статистические данные суммарной полной мощности электропотребителей трансформаторов подстанции «Кабун-1» напряжением 33/11 кВ. В своей работе Е.И. Грачева, О.В. Наумов, Р.Р. Садыков [2] рассматривают природу возникновения потерь холостого хода силовых трансформаторов, причины увеличения данных потерь за период эксплуатации. На основе обработки статистических данных оцениваются значения этих изменений. Показана необходимость учета реальных потерь холостого хода трансформаторов при расчете потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях.

В [3] Э.Ю. Абдуллазянов, Е. И. Грачева, А. Альзаккар, М.Ф. Низамиев, О.А. Шумихина, S. Valtchev провели исследование, позволяющее повысить достоверность прогнозирования величины электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных предприятиях. При этом, предлагается использовать динамику изменения величины эквивалентного сопротивления внутривоздушных сетей электроснабжения, что позволит управлять режимами расхода электроэнергии и вносить корректировки в процессы прогнозирования.

A.S. Semenov, M.N. Semenova, Y.V. Bebikhov [4] провели исследование и разработали универсальные математические модели для их использования при проектировании новых и реконструкции действующих систем электроснабжения промышленных предприятий. A. Dixit; C. Ekanayake; Hui Ma. [5] в своем исследовании провели анализ вычислительных алгоритмов для сравнения характеристик охлаждения трансформатора, заполненного минеральным маслом и трансформатора, заполненного натуральным эфирным маслом.

Wang, L. Zhou, S. Yuan, J. Wang [6] представили улучшенную динамическую тепловую модель с предварительным физическим моделированием для трансформаторов в режиме охлаждения ONAN. О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев [7] разработали дополнительную систему охлаждения силовых масляных трансформаторов, способную обеспечить снижение пиковой нагрузки и ее равномерное распределение в течение всей продолжительности работы оборудования за счет аккумуляции холода.

В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Малышев [8] разработали дополнительную систему охлаждения силового трансформатора с термоэлектрическими преобразователями. Результаты исследований показали возможность использования предлагаемой системы жидкостного охлаждения силовых масляных трансформаторов с помощью термоэлектрических модулей и ВГТО. В. А. Камакиным, Д. В. Волковой [9] определены электрические, геометрические и тепловые характеристики трансформатора ТМ-160/10. А также определены 2D-распределения температуры и плотности тепловых потоков в трансформаторе в продольном и поперечном разрезах.

А. С. Хисматуллин, М. В. Кофановым, Ш. Д. Каримовым в [10] рассмотрена модернизированная система охлаждения масляного трансформатора с использованием элегаза и последующей его очисткой от примесей в мембранном фильтре. Показана целесообразность применения фильтра очистки элегаза в модернизированной системе охлаждения масляного трансформатора. Е. Ю. Комков, А. И. Тихонов в [11] разработали универсальную модель управления системой охлаждения силового трансформатора с принудительным охлаждением, реализованную в среде математического процессора MATLAB. Модель построена на основе данных системы мониторинга силовых трансформаторов и математического аппарата нейронных сетей.

Ю. Н. Тимониным, В. А. Сушкиным в [12] разработана система управления групповым электроприводом для насосных агрегатов и вентиляторов системы охлаждения силового трансформатора, которая состоит из частотно - регулируемого преобразователя, микропроцессорной системы управления и переключающей контактной аппаратуры.

М. Г. Баширов, М. Р. Миннибаев, А. С. Хисматуллин [13] предлагают новый способ охлаждения масляных трансформаторов с помощью разработанной программы увеличения коэффициентов переноса при всплытии пузырьков газа в жидкости и проведенных экспериментов по изучению этого явления.

Научной и практической значимостью предлагаемой статьи являются результаты проведенных исследований, показывающие, что в условиях высоких температур летом в Сирии (которые могут достигать 46 °С) необходимо особое внимание уделять анализу процессов в системах охлаждения трансформаторов. Разработанные модели аппроксимирующих функций оценки температурных режимов – температуры нагревания масла и обмоток трансформаторов с использованием коэффициента загрузки, могут быть рекомендованы для практического применения при исследовании режимных параметров трансформаторов с номинальной мощностью 20 000 кВА. Необходимо контролировать температуру нагрева элементов конструкции трансформаторов, которая не должна превышать нормируемые значения для обеспечения длительного срока службы трансформаторов. Что является особенно актуальным в настоящее время, в связи с введением экономических санкций со стороны недружественных стран по отношению к Сирийской Арабской Республике.

Отличие представленной работы от результатов других исследований, заключаются в том, что впервые исследованы условия работы трансформаторов напряжением 33/11 кВ (подстанция «Кабун-1», Сирия) и определены функциональные зависимости основных температурных параметров элементов трансформаторов от их загрузки.

Материалы и методы (Materials and methods)

Параметры температуры режимов

На подстанции «Кабун-1» установлены 2 трансформатора мощностью 20 000 кВА и напряжением 33/11 кВ, которые питают промышленные предприятия в г. Агра-Сирия. Таблица 1 показывает характеристики этих трансформаторов.

Таблица 1
Table 1Основные характеристики трансформатора 33/11 кВ
Main characteristics of the 33/11 kV transformer

Тип (Марка)	УТЕС (Саудовская Аравия)
Серийный №	5-04-005-01-268
Охлаждение	ONAN
Тип охлаждения	Д
Фаз	3
Частота	50 Гц
S_N	20 000 кВА
Векторный групп	D/Yn -11
В.Н	33 кВ
Н.Н	11 кВ
Z_{Γ}	10 %
Класс изоляции	A
$P_{кз}$	19140 кВт
$\Delta P_{хх}$	900 кВт
$\theta_{обм.макс}$	98,5 °С
$\theta_{обм.сред}$	85,5 °С

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Исследуем температурные режимы нагрева отдельных элементов конструкции трансформаторов. Используем следующие обозначения переменных:

$\theta_{обм.макс}$ — значение номинальной температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора;

$\theta_{обм.сред}$ — номинальное значение средней по сопротивлению температуры обмотки трансформатора.

Значение температуры нагрева элемента конструкции трансформатора θ определяется величиной потерь в данном элементе и температурой охлаждающей среды $\theta_{о.с.}$, то есть температурой воздуха.

Превышение температуры элемента трансформатора $\theta_{пр}$ относительно температуры охлаждающей среды $\theta_{о.с.}$ определяется по выражению:

$$\theta_{пр} = \theta - \theta_{о.с.} \quad (1)$$

Значения допустимых температур масла и обмоток трансформаторов показаны в таблице 2.

Таблица 2
Table 2Значение допустимых температур масла и обмоток
Value of permissible oil and winding temperatures

Параметр	Обозначение (°С)	Величина
Средние по сопротивлению температуры обмотки значения сверх значения температуры масла.	$\theta_{обм.сред}$	22
Средние по сопротивлению температуры обмотки значения сверх значения температуры воздуха.	$\theta_{обм.сред}$	66
Средняя по объёму значения температуры масла над значением температуры охлаждающего воздуха	$\theta_{мс.сред}$	45
Значение температуры масла в верхнем слое сверх значения температуры охлаждающего воздуха.	$\theta_{мс-макс}$	56
Значение температуры наиболее нагретой точки обмотки над средним значением по сопротивлению температуры обмотки	$\theta_{мс-макс} - \theta_{обм.сред}$	14
Значение температуры наиболее нагретой точки обмотки над значением температуры охлаждающего воздуха	$\theta_{мс-макс}$	78

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Для закрытых трансформаторных подстанций с естественной приточной вентиляцией значение эквивалентной температуры воздуха принимается на 8°С выше температуры наружного воздуха.

Коэффициент детерминации

Для исследования функциональных зависимостей параметров, установления взаимосвязи между переменными и построения моделей аппроксимации, используется коэффициент детерминации.

Коэффициент детерминации (R^2) — это мера, которая предоставляет информацию о соответствии модели. В контексте регрессии это статистическая мера того, насколько достоверно линия регрессии аппроксимирует фактические данные [14, 15].

При этом статистическая модель используется либо для прогнозирования будущих результатов, либо для проверки гипотез. Коэффициент R^2 лежит в диапазоне от 0 до 1. Чем ближе значение коэффициента к единице, тем существеннее взаимозависимость переменных.

В нашем исследовании независимой переменной является температура нагрева элемента трансформатора ($y=t_{\text{сред}}$), а зависимой переменной является его коэффициент загрузки ($x=K_{\text{з}}$).

Коэффициент R^2 вычисляется по уравнению:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

y_i — фактические значения;

\hat{y} — расчетные значения исследуемой величины;

$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{n}$ — среднее значение исследуемой величины;

$\sum_i (y_i - \hat{y})^2$ — сумма квадратов ошибок регрессии;

$\sum_i (y_i - \bar{y})^2$ — сумма квадратов отклонений точек данных от среднего значения.

Средняя ошибка аппроксимации вычисляется по выражению:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{(y_i - \hat{y})}{y_i} \right| \quad (3)$$

n — Количество фактических значений.

Построение функций аппроксимации

В таблице 3 показаны фактические значения функциональных зависимостей между коэффициентом загрузки ($K_{\text{з}}$) и допустимыми температурами масла и обмоток трансформатора (t_1, t_2, t_3, t_4) подстанции «Кабун-1», где:

$t_1(^{\circ}\text{C})$ — значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла;

$t_2(^{\circ}\text{C})$ — значение температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха;

$t_3(^{\circ}\text{C})$ — значение температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха;

$t_4(^{\circ}\text{C})$ — значение температуры перегрева наиболее нагретой точки сверх температуры охлаждающего воздуха.

Таблица 3

Table 3

Фактические значения температуры элементов трансформатора подстанции «Кабун-1» в зависимости от его загрузки

Actual temperature values of elements of substation «Kabun-1» transformer depending on its load

$K_{\text{з}}=x$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$t_1=y_1$	1	5	8	10	20	25	35	45	55	70	85
$t_2=y_2$	1	7	10	20	30	45	60	80	100	120	150
$t_3=y_3$	1	8	13	25	40	55	75	105	140	160	180
$t_4=y_4$	1	13	30	45	60	90	120	150	180	220	260

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Исследуем значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла. При этом возможные аппроксимирующие функции представим следующими выражениями, используя данные таблице 3:

Экспоненциальная:

$$t_1 = 2,7697 \cdot e^{1,9146 K_{\text{з}}} \quad (4)$$

Линейная:

$$t_1 = 41,182K_{32} - 85,455 \quad (5)$$

Полиномиальная:

$$t_1 = 17,541K_{32}^2 + 6,1K_{32} + 1,979 \quad (6)$$

Вычислим коэффициент детерминации по выражению (2) для полиномиальной функции:

Фактические значения получены из таблицы 3:

$$t_i = 1; 5; 8; 10; 20; 25; 35; 45; 55; 70; 85 \quad (7)$$

Расчетные значения с помощью уравнения (6):

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= 17,541K_{32}^2 + 6,1K_{32} + 1,979 \\ K_{32} = 0 &\Rightarrow \hat{t}_1 = 17,541(0)^2 + 6,1(0) + 1,979 = 1,979 \\ K_{32} = 0,2 &\Rightarrow \hat{t}_2 = 17,541(0,2)^2 + 6,1(0,2) + 1,979 = 3,9 \\ &\vdots \\ K_{32} = 2 &\Rightarrow \hat{t}_{11} = 17,541(2)^2 + 6,1(2) + 1,979 = 84,34 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Среднее значение:

$$\left. \begin{aligned} \bar{t} &= \frac{\sum_i t_i}{n} = \frac{1+5+8+10+20+25+35+45+55+70+85}{11} \\ \bar{t} &= 32,636 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставим (7), (8), (9) в (2):

$$\left. \begin{aligned} R^2 &= 1 - \frac{\sum_i (t_i - \hat{t})^2}{\sum_i (t_i - \bar{t})^2} \\ R^2 &= 1 - \frac{(1-1,979)^2 + \dots + (85-84,343)^2}{(1-32,636)^2 + \dots + (85-32,636)^2} = 0,998 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Чем ближе значение коэффициента к 1, тем существеннее взаимозависимость переменных. Далее вычислим среднюю ошибку аппроксимации, подставляя (7) и (8) в (3):

$$\left. \begin{aligned} \bar{A} &= \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{(t_i - \hat{t})}{t_i} \right| \\ \bar{A} &= \frac{1}{11} \left(\left| \frac{1-1,979}{1} \right| + \dots + \left| \frac{85-84,343}{85} \right| \right) \cdot 100\% = 7,192 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Ошибка составляет менее 10%, что свидетельствует о достаточно высокой точности аппроксимации. Результаты расчета показаны в таблице 4.

Таблица 4.

Table 4

Результаты расчета коэффициента детерминации для полиномиальной функции

Determination coefficient calculation results for a polynomial function

$t_i = t_1$	\hat{t}	\bar{t}	$(t_i - \hat{t})^2$	$(t_i - \bar{t})^2$	$\sum_i (t_i - \hat{t})^2$	$\sum_i (t_i - \bar{t})^2$	R^2	$\bar{A}, \%$
1	1,979	32,636	0,958	1000,855	14,017	7898,545	0,998	7,192
5	3,90068		1,208	763,765				
8	7,22564		0,599	606,947				
10	11,953		3,817	512,402				
20	18,085		3,665	159,676				
25	25,62		0,384	58,313				
35	34,558		0,195	5,587				
45	44,899		0,01	152,861				
55	56,644		2,703	500,135				
70	69,792		0,043	1396,046				
85	84,343		0,431	2741,957				

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В таблице 5 приведены уравнения аппроксимации функциональных параметров температуры (t_1 , t_2 , t_3 , t_4).

Таблица.5.

Table 5

Уравнения аппроксимации функциональных зависимостей температуры установившегося перегрева элементов трансформатора от его коэффициентов загрузки
Equations for approximating the functional dependencies of the temperature of the fixed overheating of the transformer elements from its load factors

Аппроксимирующая функция		R2	$\bar{A}\%$
t_1 (°C)			
Экспоненциальная	$t_1 = 2,7697e^{1,9146K_{32}}$	0,711	9,97%
Линейная	$t_1 = 41,182K_{32} - 85,455$	0,945	85,16%
Полиномиальная	$t_1 = 17,541K_{32}^2 + 6,1K_{32} + 1,979$	0,998	7,2%
t_2 (°C)			
Экспоненциальная	$t_2 = 3,5496e^{2,127K_{32}}$	0,50	16,61%
Линейная	$t_2 = 73,5K_{32} - 16,864$	0,947	161,81%
Полиномиальная	$t_2 = 30,798K_{32}^2 + 11,903K_{32} + 1,6154$	0,999	4,49%
t_3 (°C)			
Экспоненциальная	$t_3 = 4,0746e^{2,208K_{32}}$	0,292	21,41%
Линейная	$t_3 = 94,5K_{32} - 21,591$	0,952	205%
Полиномиальная	$t_3 = 35,111K_{32}^2 + 24,279K_{32} - 0,5245$	0,993	13,84%
t_4 (°C)			
Экспоненциальная	$t_4 = 6,456e^{2,1634K_{32}}$	0,127	41,49%
Линейная	$t_4 = 129,23K_{32} - 22,955$	0,968	218%
Полиномиальная	$t_4 = 41,171K_{32}^2 + 46,885K_{32} + 1,7483$	0,999	6,3%

Обсуждение результатов

Графики аппроксимирующих функций

По данным таблицы 5, установлено, что полиномиальная функция является наиболее точной для всех исследуемых параметров – t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , т.к. коэффициент детерминации ближе к единице и процент средней ошибки аппроксимации наименьший. В то же время, наименее точной функцией рассматриваемых параметров, является экспоненциальная.

На рисунке 1 приведены графики аппроксимирующих функций температуры установившегося перегрева от коэффициентов загрузки трансформаторов для значений: t_1 (°C) — температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла; t_2 (°C) — температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха; t_3 (°C) — температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха; t_4 (°C) — температуры перегрева наиболее нагретой точки сверх температуры охлаждающего воздуха.

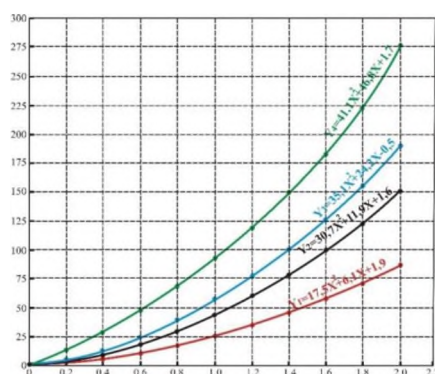


Рис. 1. Графики аппроксимирующих функций (полиномиальные) Fig. 1. Graphs of functions approximation (polynomial)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

Расчёт значения установившейся средней температуры нагрева обмотки ($t_{\text{обм.сред.к}}$)

Определим, нагрев обмотки и масла трансформатора при изменении нагрузки [16] по выражению:

$$\theta_{\text{кон}}(t) = \theta_{\text{нач}} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} + \theta_{\text{кон}} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}\right] \quad (12)$$

где $\theta_{\text{кон}}(t)$ — значение перегрева элемента конструкции трансформатора в момент времени t ;

где $\theta_{\text{нач}}$ — значение перегрева элемента конструкции трансформатора для $t=0$, определяется нагрузкой трансформатора за предыдущий интервал времени [17, 18] (В нашем исследовании установлено $\theta_{\text{нач}}=30^\circ\text{C}$).

где $\theta_{\text{кон}}$ — значение конечного перегрева, установившегося за время $3T_0$ при постоянной нагрузке;

где T_0 — значение постоянной времени нагрева [19, 20], которое определяется по таблице 6.

Таблица 6

Table 6

Значения постоянных времени нагрева трансформатора
Transformer Heating Time Constant Value

Номинальная мощность трансформаторов, кВА	Тип охлаждения	T_0 , час
До 630	М	2,5
1000-6300	М	3,5
10 000-32 000	Д	2,5
40 000-63 000	Д	3,5
100 000-125 000	ДЦ	2,5

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

В нашем исследовании значение постоянной времени нагрева трансформатора 20 000 кВА, установленного на подстанции «Кабун-1», $T_0=2,5$ ч.

Для климатической зоны Сирии значение эквивалентной годовой температуры $\theta_{\text{о.с.эвк}}=26^\circ\text{C}$.

Определим значение установившейся средней температуры нагрева обмотки по выражению:

$$t_{\text{обм.сред.к}} = \theta_{\text{о.с.эвк}} + \theta_{\text{обм.сред.к}} \quad (13)$$

где $\theta_{\text{обм.сред.к}}$ — значение перегрева обмотки относительно воздуха определяется по выражению:

$$\theta_{\text{обм.сред.к}} = \theta_{\text{обм.сред.м.к}} + \theta_{\text{м.сред.к}} \quad (14)$$

где $\theta_{\text{обм.сред.м.к}}$ — значение перегрева обмотки относительно масла;

$\theta_{\text{м.сред.к}}$ — значение перегрева масла относительно воздуха.

Из таблицы 5 значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла:

$$\theta_{\text{обм.сред.м}} = 17,541K_{\text{зг}}^2 + 6,1K_{\text{зг}} + 1,979 \quad (15)$$

Значение температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха:

$$\theta_{\text{м.сред}} = 30,798K_{\text{зг}}^2 + 11,903K_{\text{зг}} + 1,615 \quad (16)$$

С помощью (12), выражения (15) и (16) будут иметь вид:

$$\theta_{\text{обм.сред.м}}(t) = \theta_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{нач}}}} + \left(17,541K_{\text{зг}}^2 + 6,1K_{\text{зг}} + 1,979\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{нач}}}}\right) \quad (17)$$

$$\theta_{\text{м.сред}}(t) = \theta_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{нач}}}} + \left(30,798K_{\text{зг}}^2 + 11,903K_{\text{зг}} + 1,615\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{нач}}}}\right) \quad (18)$$

Подставим (17) и (18) в (14):

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t) = \theta_{\text{обм.сред.м}}(t) + \theta_{\text{м.сред}}(t) \quad (19)$$

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t) = 2 \cdot \theta_{\text{нач}} \cdot e^{\frac{-t}{T_{\text{нач}}}} + (38,339K_{\text{зг}}^2 + 18,003K_{\text{зг}} + 3,394) \left(1 - e^{\frac{-t}{T_{\text{нач}}}} \right)$$

С помощью выражения (16) и принимая во внимание следующие условия:

1. Длительность значения нагрузки в интервале ($t=1$ ч);
 2. значение постоянной времени нагрева ($T_{\text{нач}} = T_0 = 2.5$ ч);
 3. значение перегрева элемента конструкции трансформатора для $t=0$ ($\theta_{\text{нач}} = 30^\circ\text{C}$);
 4. значение эквивалентной годовой температуры для климата Сирии ($\theta_{\text{о.с.экв}} = 26^\circ\text{C}$);
- Тогда температура нагревания обмотки в конце периода t :

$$t_{\text{обм.сред}}(t) = \theta_{\text{о.с.экв}} + 60 \cdot e^{\frac{-t}{2.5}} + (38,339K_{\text{зг}}^2 + 18,003K_{\text{зг}} + 3,394) \left(1 - e^{\frac{-t}{2.5}} \right) \quad (20)$$

Покажем (17) и (18):

$$\theta_{\text{обм.сред.м}}(t=1 \text{ ч}) = 30 \cdot e^{\frac{-1}{2.5}} + (7,541K_{\text{зг}}^2 + 6,1K_{\text{зг}} + 1,979) \left(1 - e^{\frac{-1}{2.5}} \right) \quad (21)$$

$$\theta_{\text{обм.сред.м}}(t=1 \text{ ч}) = 2,488K_{\text{зг}}^2 + 2,013K_{\text{зг}} + 20,762$$

$$\theta_{\text{м.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 30 \cdot e^{\frac{-1}{2.5}} + (30,798K_{\text{зг}}^2 + 11,903K_{\text{зг}} + 1,615) \left(1 - e^{\frac{-1}{2.5}} \right) \quad (22)$$

$$\theta_{\text{м.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 10,163K_{\text{зг}}^2 + 3,928K_{\text{зг}} + 20,641$$

Подставляем (21) и (22) в (19):

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = \theta_{\text{обм.сред.м}}(t=1 \text{ ч}) + \theta_{\text{м.сред}}(t=1 \text{ ч}) \quad (23)$$

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 12,651K_{\text{зг}}^2 + 5,94K_{\text{зг}} + 41,339$$

Значение температуры нагревания обмотки в конце часа ($\theta_{\text{о.с.экв}} = 26^\circ$):

$$t_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = \theta_{\text{о.с.экв}} + \theta_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) \quad (24)$$

$$t_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 26 + 12,651K_{\text{зг}}^2 + 5,94K_{\text{зг}} + 41,339$$

$$t_{\text{обм.сред}}(t=1 \text{ ч}) = 12,651K_{\text{зг}}^2 + 5,94K_{\text{зг}} + 67,339$$

С помощью выражения (24) получим данные таблице 7.

Таблица 7
Table 7

Фактические значения температуры нагревания обмотки
Actual temperature of winding heating

Кзг	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$t_{\text{обм.сред.к}}$	67,34	69	71,73	75,45	80,18	85,93	92,68	100,45	109,23	119	129,82

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

На рисунке 2 показана графическая зависимость среднего значения установившейся температуры нагревания обмотки ($t_{\text{обм.сред.к}}$) $^\circ\text{C}$ от значения коэффициентов загрузки трансформаторов напряжением 33/11 подстанции «Кабун-1».

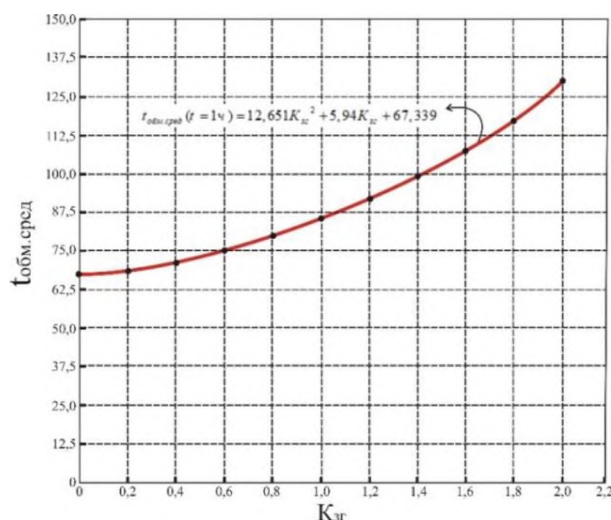


Рис.2. График эквивалентной температуры *Fig. 2. Graph of equivalent temperature*
 *Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author.

График на рисунке 2 показывает, что:

1. значение номинальной температуры среднего по сопротивлению значения температуры обмотки $t_{обм.сред} = 85^{\circ}\text{C}$ поэтому при $K_{гр} \geq 1.1$ наблюдается превышение конечного нагрева выше допустимого значения.

2. Конечный перегрев наблюдается в том случае, когда значение соответствующей нагрузки имеет место быть в период времени больший чем $3T_0$ при соответствующей длительности $t \geq 3 \times 2.5 = 7.5$ ч.

3. В интервале времени t меньшей чем $3T_0$, наблюдающийся нагрузки значение перегрева в конце интервала меньше, чем установившееся значение.

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны:

1. аппроксимирующие функции температурных параметров элементов силовых трансформаторов:

- Функция температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры – масла ($\theta_{обм.сред,м} = t_1$);
- Функция температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха ($\theta_{обм.сред} = t_2$);
- Функция температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха ($\theta_{м.сред} = t_3$);
- Функция температуры перегрева наиболее нагретой точки сверх температуры охлаждающего воздуха ($\theta_{м,макс} = t_4$).

2. Определены коэффициенты детерминации (R^2) разработанных функций и средняя ошибка аппроксимации (A%), которые показали, что полиномиальная функция является наиболее достоверной.

3. Определена функция средней температуры нагрева обмотки трансформаторов подстанции «Кабун-1» ($t_{обм.сред,к}$) при следующих исходных данных - динамики мощности нагрузки в интервале ($t=1$ ч); постоянной времени нагрева $T_0=2,5$ ч ; перегрева обмотки трансформатора для $t=0$ ($\theta_{нач}=30^{\circ}\text{C}$); эквивалентной годовой температуры для климата Сирии ($\theta_{о.с.эжв}=26^{\circ}\text{C}$).

Полученные температурные характеристики элементов трансформаторов могут быть рекомендованы для исследования и управления режимными параметрами оборудования систем электроснабжения.

Литература

1. Грачева Е.И., Альзаккар А. Анализ и исследование электропотребления объектов промышленной зоны г. Адра-Сирия. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 118-129. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-118-129.
2. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016;(1-2):53-63. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-1-2-53-63>.

3. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзаккар А., Низамиев М.Ф., Шумихина О.А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 3-12. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.
4. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebikhov Y.V. Development of universal mathematical model of electrical power supply system of area of industrial enterprise // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE, 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.
5. A. Dixit; C. Ekanayake; Hui Ma. Thermal Analysis of Natural Cooling Type Distribution Transformer Retrofilled With Natural Ester Oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.29 Issue.1, 2022. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3148447.
6. L. Wang, L. Zhou, S. Yuan, J. Wang. Improved dynamic thermal model with pre-physical modeling for transformers in ONAN cooling mode. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.34, Issue. 4, 2019. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2903939.
7. О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев. Дополнительная система охлаждения масляных трансформаторов с применением термоэлектрических преобразователей// Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. Серия: Технические Науки 2017. № 5(21). С. 96-103.
8. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев. Использование дополнительного охлаждения масляных трансформаторов при совместной работе термоэлектрических преобразователей и грунтовых теплообменников // Вестник Южно-Уральского государственного университета, 2018. Т. 18, № 1. С. 61–67. DOI: 10.14529/power180108.
9. Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловое моделирование маслонеполненного силового трансформатора ТМ - 160/10 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №5. С. 141-151. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-5-141-151.
10. Хисматуллин А. С., Кофанов М. В., Каримов Ш. Д. Фильтрация элегаза в модернизированной системе охлаждения масляного трансформатора // Журнал: Наука и Бизнес: Пути Развития. 2019. № 5(95). С. 149-153. EDN KPOLZW.
11. Комков Е. Ю., Тихонов А. И. Разработка модели управления системой охлаждения силовых трансформаторов // Автоматизация в промышленности. 2008. № 8. С. 45-47.
12. Тимонин Ю. Н., Сушкин В. А. Система управления охлаждением трансформатора // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 6-1. С. 257-265. EDN PXPSKD.
13. Баширов М. Г., Минлибаев М. Р., Хисматуллин А. С. Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал, 2014. № 2. С. 347-357. EDN STGYBV.
14. Макарова И. Л., Игнатенко А. М. Коэффициент детерминации для нелинейной регрессии // Евразийское Научное Объединение. 2018. № 3-3(37). С. 161-163. EDN YVSWMB.
15. Chicco D., Warrens J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Computer Science 7, 2021. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>.
16. Альзаккар А. Применение искусственных нейронных сетей для оценки устойчивости напряжения электроэнергетических систем в Сирии // Международный технико-экономический журнал. 2020. С.87-95.
17. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Галицкий Ю. Я. [и др.] Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. 2021. № 6. С. 62-71. DOI 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71.
18. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Ахметшин А. Р., Солуянов В. И. Анализ фактических электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 6. С. 134-147. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-6-134-147. EDN MBYUSE.
19. R. Zanella; C. Nore; X. Mininger; F. Bouillault. Numerical Study of Cooling by Ferrofluids in an Electrical Transformer Using an Axisymmetric Model, IEEE Transactions on Magnetics. vol.57 Issue.7, 2021. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3066412.
20. M. Daghrh, Z. Wang, Q. Liu. Experimental Study of the Influence of Different Liquids on the Transformer Cooling Performance. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.34, Issue.2, 2019. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2895533.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Альзаккар Ахмад – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

Stanimir Valtchev – Associate Professor of University NOVA of Lisbon, Portugal.

References

1. Gracheva EI, Alzakkar A. Analysis and study of power consumption of objects in the industrial zone of Adra-Syria. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(1) 118-129. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-118-129.
2. Gracheva EI, Naumov OV, Sadykov RR. Accounting losses of idling of transformers in the period of exploitation at calculation losses of the electric power in distributive networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(1-2):53-63. doi: 10.30724/1998-9903-2016-0-1-2-53-63.
3. Abdullazyanov E.Y., Gracheva E.I., Alzakkar A., Nizamiev M.F., Shumikhina OA, Valtchev S. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(6):3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.
4. Semenov A.S., Semenova M.N., Bebikhov Y.V. Development of universal mathematical model of electrical power supply system of area of industrial enterprise. International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE, 2019. pp.1-5. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867704.
5. A. Dixit; C. Ekanayake; Hui Ma. Thermal Analysis of Natural Cooling Type Distribution Transformer Retrofilled With Natural Ester Oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol.29 Issue.1, 2022. doi: 10.1109/TDEI.2022.3148447.
6. L. Wang, L. Zhou, S. Yuan, J. Wang. Improved dynamic thermal model with pre-physical modeling for transformers in ONAN cooling mode. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.34, Issue. 4, 2019. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2903939.
7. Dmitrieva OS, Dmitriev AV. Additional cooling system of oil transformers using thermoelectric converters. *Vestnik of Irkutsk State Technical University*. 2016;21(5):96-103.
8. Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Madyshev IN. Use of Additional Cooling of Oil Transformers in the Joint Operation of Thermoelectric Converters and Ground-Coupled Heat Exchangers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018;18(1):61–67. doi: 10.14529/power180108.
9. Tien N, Gilfanov KH. Thermal modelling of oil-filled power transformer TM - 160/10. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(5):141-151. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-141-151.
10. Khismatullin AS, Kofanov MV, Karimov ShD, et al. SF6 Gas Filtration in Modernized Cooling System of Oil Transformer. *Journal: Science and Business: Ways of Development*, 2019;5:149–153.
11. Komkov EYu, Tikhonov AI. Control model development for a cooling system of power transformers. *Journal: Automation in Industry*, 2008;5:45–47.
12. Timonin Yu.N., Sushkin V.A. Managerial System by Cooling the Transformer. *Journal: News of Tula State University. Technical Science*, 2011, 6(1):257–265. EDN PXPSKD.
13. MG. Bashirov, MR. Minlibayev, AS. Hismatullin. Increase of efficiency of cooling of the power oil transformers. *Journal: The online edition Oil and Gas Business*, 2014;2:347–357. doi: 10.17122/ogbus-2014-2-347-367. EDN STGYBV.
14. Makarova IL, Ignatenko AM. Determination Coefficient for Nonlinear Regression. *Journal: Eurasian Scientific Association*, 2018;3:161–163.
15. Chicco D, Warrens J, Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peer J Computer Science* 7, 2021. doi:10.7717/peerj-cs.623.
16. A. Alzakkar, Application of Artificial Neural Networks to Evaluate Stability of Voltage of Electric Power Systems in Syria, *The international technical-economic journal*. 2020; 1:87-95. doi: 10.34286/1995-4646-2020-70-1-87-95.
17. YI. Soluyanov, AI. Fedotov, YYa. Galitsky, NV. Chernova, Azat R. AKHMETSHIN. Updating the Standard Specific Electric Loads of Apartment Buildings in the Republic of Tatarstan. *Journal: Elektrichestvo*, 2021;6:62–71. doi: 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71.

18. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Analysis of the actual electrical loads of public premises embedded in residential buildings. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(6):134-147. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-134-147.

19. R. Zanella, C. Nore, X. Mininger, et al. Numerical Study of Cooling by Ferrofluids in an Electrical Transformer Using an Axisymmetric Model, *IEEE Transactions on Magnetics*. vol.57 Issue.7, 2021. doi: 10.1109/TMAG.2021.3066412.

20. M. Daghray, Z. Wang, Q. Liu. Experimental Study of the Influence of Different Liquids on the Transformer Cooling Performance. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019;34(2). doi: 10.1109/TPWRD.2019.2895533.

Authors of the publication

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Ahmad A. Alzakkar –Kazan State Power Engineering University.

Stanimir Valtchev – Associate Professor of University NOVA of Lisbon, Portugal.

Шифр научной специальности:

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Смежные специальности в рамках группы научной специальности

2.4.3.Электроэнергетика

Получено

21.03.2023г.

Отредактировано

06.04.2023г.

Принято

12.04.2023г.