



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА КОНТАКТОВ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Петров А.Р., Грачева Е.И.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
petrova113@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В работе представлен алгоритм оценки температуры контактов аппаратов низкого напряжения на основе регрессионного анализа. *ЦЕЛЬ.* Разработка регрессионных моделей для определения температуры контактов автоматических выключателей, контакторов и магнитных пускателей. *МЕТОДЫ.* Проверка полученных моделей была проведена критерием Кохрена и Фишера, а также была оценена значимость каждого из коэффициентов критерием Стьюдента. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Были построены графические зависимости для определения температуры нагрева контактов аппаратов для ряда значений номинальных токов при температуре окружающей среды 40°C. Также построены графики для исследуемых аппаратов при изменении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C. Построенные графики позволяют определить значение температуры нагрева без проведения предварительных расчетов для автоматических выключателей на номинальные токи 40А, 63А, 100А, 160А, 250А и для контакторов и магнитных пускателей на номинальные токи 40А, 63А, 100А, 250А, 400А. Полученные значения температуры нагрева контактов были сопоставлены с ГОСТ 403-73. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Модели для определения температуры нагрева контактов позволяют учитывать техническое состояние аппарата и легко могут быть изменены при изменении условий и режимов эксплуатации.

Ключевые слова: *низковольтная сеть; коммутационный аппарат; контактное соединение; нагрев контактов; регрессионный анализ.*

Для цитирования: Петров А.Р., Грачева Е.И. Моделирование температуры нагрева контактов низковольтных коммутационных аппаратов с учетом режимов эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 42-53. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-42-53.

MODELING OF CONTACT HEATING TEMPERATURE OF LOW-VOLTAGE SWITCHING DEVICES WITH REGARD TO OPERATING MODES

Petrov A.R., Gracheva E.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
petrova113@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The paper presents an algorithm for measuring the temperature of minimum voltage devices based on regression analysis. *THE PURPOSE.* Development of regression models for determining the contact temperature of circuit breakers, contactors and magnetic starters. *METHODS.* The obtained models were validated by Cochran and Fisher's criterion and the significance of each of the coefficients was assessed by Student's criterion. *RESULTS.* Graphical dependences for determining the contact heating temperature of the apparatuses for a number of values of rated currents at an ambient temperature of 40°C were plotted. The graphs were also constructed for the investigated devices when the ambient temperature changes from 5°C to 40°C. The constructed graphs allow to determine the value of heating temperature without preliminary calculations for circuit breakers for rated currents 40A, 63A, 100A, 160A, 250A and for contactors and magnetic starters for rated currents 40A, 63A, 100A, 250A, 400A. The obtained values of contact heating temperature were compared with GOST 403-73. *CONCLUSIONS.* Models for determining the contact heating temperature allow the

technical condition of the apparatus to be taken into account and can easily be modified when conditions and operating modes change.

Keywords: *low-voltage network; switching device; contact connection; contact heating; regression analysis.*

For citation: Petrov A.R., Gracheva E.I. Modeling of contact heating temperature of low-voltage switching devices with regard to operating modes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 42-53. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-42-53.

Введение (Introduction)

В составе систем промышленного электроснабжения низковольтные сети, как правило, имеют наибольшую протяженность, при этом на кабельных линиях и проводах устанавливаются низковольтные коммутационные аппараты (НКА) различных типов и назначения [1]. Как показали проведенные исследования, НКА имеют различные технические и эксплуатационные характеристики [2]. Вследствие значительной разветвленности и протяженности цеховые низковольтные сети характеризуются достаточно высоким уровнем потерь электроэнергии (ЭЭ). Поэтому при наблюдающемся в настоящее время повышении стоимости ЭЭ актуальной задачей является достоверное определение потерь в низковольтных цеховых сетях и, следовательно, учет потерь ЭЭ в НКА [3].

Как известно, надежность работы НКА является одним из необходимых условий для эффективной эксплуатации оборудования цеховых сетей [4, 5]. Повышение качества функционирования НКА в связи с усложнением конструкции аппаратов является актуальной задачей эксплуатационных служб промышленных предприятий [6, 7]. В настоящее время часто отсутствуют полные и точные статистические сведения о причинах и частоте выхода из строя НКА при различных условиях эксплуатации [8]. Поэтому необходим системный сбор сведений о выходе из строя оборудования, а также уточнению методов обработки и использования этих данных [9, 10].

Как известно, потери мощности в НКА определяются величиной протекающего тока по контактам [11, 12]. При этом превышение допустимой температуры нагрева контактов и контактных соединений НКА является одной из основных причин возникновения их отказа [13-15]. Допустимое значение температуры нагрева контактов определяется материалом их изготовления. Согласно ГОСТ 403-73 «Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов» для контактов, расположенных внутри аппаратов и выполненных из меди с защитным покрытием от коррозии, допустимое значение превышения температуры составляет 65°C. Если защитное покрытие от коррозии отсутствует, то значение превышения температуры составит 55°C.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для точного определения активных потерь мощности в НКА целесообразно применение специальных моделей, параметры которых легко определить для каждого конкретного случая. Параметры таких моделей вычисляются на основе вероятностно-статистического подхода и учитывают физические характеристики контактной системы исследуемых аппаратов. При определении температуры нагрева можно получить упрощенные выражения, обеспечивающие необходимую достоверность и позволяющие сократить объем требуемой информации.

В этой ситуации воспользуемся методами регрессионного анализа и теории планирования эксперимента, на основе которых можно получить вероятностно-статистические модели, реализующие зависимость температуры нагрева контактов аппаратов от обобщенных параметров.

Для решения поставленной задачи в качестве основных независимых факторов, влияющих на нагрев контактов НКА, приняты следующие параметры:

x_1 – номинальный ток аппарата, $I_{ном}$, А;

x_2 – коэффициент загрузки аппарата, k_3 ;

x_3 – температура окружающей среды, t_{oc} , °С.

Первоначальные границы изменения независимых факторов исследуемых аппаратов представлены в таблице 1.

Границы изменения факторов
Limits of change of factors

Фактор	$X_{i \min}$	$X_{i \text{cp}}$	$X_{i \max}$	ΔX_i
Автоматические выключатели, контакторы и магнитные пускатели				
$x_1 \rightarrow I_{\text{НОМ}}, \text{ A}$	5	202,5	400	197,5
$x_2 \rightarrow K_3$	0,1	0,8	1,5	0,7
$x_3 \rightarrow t_{\text{OC}}, \text{ }^\circ\text{C}$	5	22,5	40	17,5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

где:

$$X_{i \text{cp}} = \frac{X_{i \min} + X_{i \max}}{2} \quad (1)$$

$$\Delta X_i = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{2} \quad (2)$$

Температура нагрева контактов НКА определяется:

$$t = \frac{(I_{\text{НОМ}} \cdot K_3)^2 \cdot \rho + t_{\text{OC}} \cdot F \cdot k_T \cdot S}{F \cdot k_T \cdot S - (I_{\text{НОМ}} \cdot K_3)^2 \cdot \rho \cdot \alpha} \quad (3)$$

где: ρ – удельное электрическое сопротивление материала контактов, Ом·м; F – охлаждающая поверхность проводника, м²; k_T – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); S – площадь поперечного сечения контактов, м²; α – температурный коэффициент сопротивления.

Для многофакторной регрессионной модели рассматривается следующая форма связи резульативного показателя температуры нагрева контактов от основных влияющих факторов:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (4)$$

Для разработки регрессионной модели зависимости температуры нагрева контактов от основных влияющих факторов используем полный факторный эксперимент (ПФЭ) вида 2³. Значения функции цели – температуры нагрева контактов- при различных диапазонах варьирования факторов вычисляем, используя выражение (3). В уравнении (4) коэффициенты $b_0 \dots b_{123}$ – коэффициенты уравнения регрессии, вычисляемые по методу наименьших квадратов.

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{iu}}{N}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{iu} \cdot x_{ju}}{N} \quad (5)$$

где: i, j – номера факторов; x_i, x_j – кодированные значения факторов (+1 или -1); y_u – значение функции цели – выходной величины (температура нагрева контактов); u – номер опыта; N – число опытов (в данном случае $N=8$).

Получив значения коэффициентов уравнения регрессии для кодированных факторов необходимо перейти к записи полиномов в натуральных величинах. Для такого преобразования используем выражение:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} \quad (6)$$

где:

 \tilde{x}_i – кодированное значение фактора; x_i – действительное значение фактора; x_{i0} – значение нулевого уровня фактора.Для оценки точности эксперимента для каждой i -ой точки факторного пространства проводят K опытов. В результате получают значения $y_{i1} \dots y_{iK}$ исследуемого параметра, для которых находят среднее значение:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^K y_i}{K} \quad (7)$$

В ходе эксперимента проведены 3 опыта, при этом рассчитана температура нагрева контактов y_1, y_2, y_3 при изменении значений факторов в пределах их варьирования. Данные для расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Пределы варьирования факторов для 3-х опытов
Limits of variation of factors for 3 experiments

Опыт К	Предел	Фактор		
		$x_1 \rightarrow I_{ном}, A$	$x_2 \rightarrow K_3$	$x_3 \rightarrow t_{ос}, ^\circ C$
Автоматические выключатели, контакторы и магнитные пускатели				
1	min	6	0,15	6
	max	400	1,45	41
2	min	8	0,15	3
	max	400	1,55	38
3	min	10	0,2	2
	max	400	1,45	37

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение результатов (Discussion of results)

Матрица планирования эксперимента для расчета параметров уравнения регрессии для автоматических выключателей представлена в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Матрица планирования эксперимента для определения зависимости функции цели (температуры нагрева контактов) автоматических выключателей ПФЭ типа 2³

Experiment planning matrix for determining the dependence of the target function (contact heating temperature) of FFE type 2³ circuit breakers

u	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁₂	x ₁₃	x ₂₃	x ₁₂₃	y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}	$S_{\bar{y}_i}^2$	\hat{y}	$S_{\hat{y}_i}^2$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	6,01	3,02	2,05	3,69	4,26	2,45	1,54
2	+	+	-	-	-	-	+	+	6,52	3,52	2,92	4,32	3,73	3,12	1,44
3	+	-	+	-	-	+	-	+	6,94	4,90	4,59	5,48	1,63	4,37	1,23
4	+	+	+	-	+	-	-	-	67,49	75,02	62,46	68,32	40,02	71,9	12,8
5	+	-	-	+	+	-	-	+	41,01	38,02	37,06	38,70	4,25	39,9	1,45
6	+	+	-	+	-	+	-	-	41,60	38,59	38,06	39,42	3,65	40,6	1,4
7	+	-	+	+	-	-	-	-	42,08	40,18	39,98	40,75	1,34	41,86	1,24
8	+	+	+	+	+	+	+	+	111,5	120,7	106,5	112,9	52,2	109,3	12,6

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Продолжение таблицы 3
Continuation of table 3

u	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
1	3,69	-3,69	-3,69	-3,69	3,69	3,69	3,69	-3,69
2	4,32	4,32	-4,32	-4,32	-4,32	-4,32	4,32	4,32
3	5,48	-5,48	5,48	-5,48	-5,48	5,48	-5,48	5,48
4	68,32	68,32	68,32	-68,32	68,32	-68,32	-68,32	-68,32
5	38,70	-38,70	-38,70	38,70	38,70	-38,70	-38,70	38,70
6	39,42	39,42	-39,42	39,42	-39,42	39,42	-39,42	-39,42
7	40,75	-40,75	40,75	40,75	-40,75	-40,75	40,75	-40,75
8	112,90	112,90	112,90	112,90	112,90	112,90	112,90	112,90
\bar{b}_{ij}	39,20	17,04	17,67	18,74	16,71	1,18	1,22	1,15
t _p	51,52	22,40	23,22	24,64	21,96	1,55	1,6	1,51

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Значение y₁ при u=1, K=1 определим по (3):

$$y_1 = \frac{(6 \cdot 0,15)^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} + 6 \cdot (2 \cdot (2,8 + 2,8) \cdot 10^{-3}) \cdot 16 \cdot (2,8 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6})}{(2 \cdot (2,8 + 2,8) \cdot 10^{-3}) \cdot 16 \cdot (2,8 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6}) - (6 \cdot 0,15)^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 6,01$$

Остальные значения y определяем аналогично, подставляя в выражение (3) необходимые значения факторов.

Определим среднее значение \bar{y} для трех опытов:

$$\bar{y}_{(u=1)} = \frac{6,01 + 3,02 + 2,05}{3} = 3,69 \quad ; \dots \quad \bar{y}_{(u=8)} = 112,9$$

Определяем коэффициенты регрессии для трех опытов по (5):

$$\bar{b}_0 = \frac{(+1) \cdot 3,69 + \dots (+1) \cdot 112,9}{8} = 39,2; \quad \bar{b}_1 = 17,04 \quad \dots \quad \bar{b}_{123} = 1,15$$

Коэффициенты регрессии приведены в таблице 3. После вычисления значений коэффициентов b полином (4) зависимости температуры нагрева контактов автоматических выключателей «у» примет следующий вид:

$$y = 39,2 + 17,04x_1 + 17,67x_2 + 18,74x_3 + 16,71x_1x_2 + 1,18x_1x_3 + 1,22x_2x_3 + 1,15x_1x_2x_3 \quad (8)$$

Гипотезу однородности (равенства) дисперсий проверяют с помощью критерия Кохрена. Расчетное значение параметра данного критерия определяют по выражению:

$$G_p = \frac{S_{\bar{y}i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_{\bar{y}i}^2} \quad (9)$$

где: $S_{\bar{y}i \max}^2$ – наибольшее значение $S_{\bar{y}i}^2$ из совокупности значений каждой строчки;

$\sum_{i=1}^N S_{\bar{y}i}^2$ – сумма построчных дисперсий.

Построчная дисперсия определяется:

$$S_{\bar{y}i}^2 = \frac{\sum_{i=1}^K (y_i - \bar{y})^2}{K - 1} \quad (10)$$

Расчетное значение параметра критерия Кохрена:

$$G_p = \frac{52,23}{(4,26 + \dots + 52,23)} = 0,47$$

Полученное значение сравнивается с критическим значением $G_{кр}$. Значение $G_{кр}$ находят из таблицы распределения Кохрена по числу степеней свободы числителя $f_1=K-1$, знаменателя $f_2=N$ и уровню значимости q . Если $G_p < G_{кр}$, то гипотеза об однородности дисперсий принимается, в противном случае – отвергается, и тогда эксперимент необходимо повторить, изменив условия его проведения.

Для определения табличного значения параметра критерия Кохрена при 95%-ной доверительной вероятности, предварительно находим число степеней свободы $f_1=K-1=3-1=2$, а $f_2=N=8$.

$$G_p < G_{кр} \\ 0,47 < 0,52$$

Опыт воспроизводим, так как требование выполняется.

Гипотезу о статистической значимости коэффициентов регрессии проверяют по критерию Стьюдента. Расчетное значение параметра критерия t_p определяется по выражению:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S_b} \quad (11)$$

Расчетное значение t_p приведено в таблице 3. Значение дисперсии определения коэффициентов регрессии:

$$S_b^2 = \frac{S^2}{N \cdot K} \quad (12)$$

где S^2 – оценка генеральной дисперсии воспроизводимости эксперимента, которая определяется:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{\bar{y}i}^2}{N} \quad (13)$$

$$S^2 = \frac{4,26 + \dots + 52,23}{8} = \frac{111,13}{8} = 13,89$$

$$S_b^2 = \frac{13,89}{8 \cdot 3} = 0,58; \quad S_b = \sqrt{0,58} = 0,76$$

Критическое значение параметра критерия $t_{кр}$ определяют по таблице распределения Стьюдента по числу степеней свободы $f = N \cdot (K-1) = 8 \cdot (3-1) = 16$, уровень значимости принимается равным 5%. Тогда значение $t_{кр} = 2,12$, по выражению $S_b \cdot t_{кр} = 0,76 \cdot 2,12 = 1,61$. Таким образом, значимыми являются те коэффициенты регрессии, которые по абсолютной

величине больше данного значения, коэффициенты, значение которых меньше полученной величины, отбрасываются – это коэффициенты b_{13}, b_{23}, b_{123} .

Окончательный вид уравнения регрессии принимает вид:

$$y = 39,2 + 17,04x_1 + 17,67x_2 + 18,74x_3 + 16,71x_1x_2 \quad (14)$$

Ниже приведены значения кодированных факторов:

$$x_1 = \frac{I_{\text{НОМ}} - 202,5}{197,5} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{197,5} - 1,025 ;$$

$$x_2 = \frac{k_3 - 0,8}{0,7} = \frac{k_3}{0,7} - 1,143 ;$$

$$x_3 = \frac{t_{\text{ОС}} - 22,5}{17,5} = \frac{t_{\text{ОС}}}{17,5} - 1,286$$

В натуральном масштабе:

$$t_{\text{ав}} = -3,01 - 0,011 \cdot I_{\text{НОМ}} + 0,85 \cdot k_3 + 1,07 \cdot t_{\text{ОС}} + 0,12 \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot k_3 \quad (15)$$

Для оценки точности регрессионной модели определим погрешности при изменении факторов x_1, x_2, x_3 (табл. 4).

Таблица 4
Table 4

Результаты вычислений погрешности для автоматических выключателей
Results of error calculations for circuit breakers

№	x_0	x_1	x_2	x_3	y по (3)	\hat{y} по (14)	$ y - \hat{y} $	$\delta, \%$
1	+	0	0,5	0	51,4	47,8	3,6	7,6
2	+	-0,5	0	1,5	58,9	58,7	0,2	0,4
3	+	-0,1	-1	0,8	36,7	36,3	0,4	1,1
4	+	-1	0	1	40,2	40,9	0,7	1,6
5	+	0,5	-1	0	22,5	21,5	1,0	4,8
6	+	0,8	0,4	1,1	75,9	85,3	9,5	11,1
7	+	0	0,1	-1	19,8	22,0	2,2	9,9
8	+	-0,6	-0,4	1,3	48,8	50,2	1,3	2,7
9	+	-0,4	0	1	51,0	51,0	0,0	0,0
10	+	-1	1	-0,5	14,5	13,8	0,6	4,7

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Наибольшая погрешность модели для расчета параметров автоматических выключателей (табл. 4) составляет 11,1%, что показывает достаточную точность полученного уравнения регрессии.

Адекватность математической модели проверяется по F – критерию Фишера, который представляет собой отношение большей дисперсии к меньшей. То есть: $S_{\text{ад}}^2 > S^2$. Если данное условие не выполняется – числитель и знаменатель необходимо поменять местами. Расчетное значение F_p определяется по выражению:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2} \quad (16)$$

где $S_{\text{ад}}^2$ – оценка дисперсии адекватности, которая вычисляется как:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - L} \quad (17)$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{3 \cdot ((2,45 - 3,69)^2 + \dots + (109,35 - 112,9)^2)}{8 - 5} = 33,73$$

где: L – количество коэффициентов в уравнении регрессии, оставшихся после исключения незначимых коэффициентов;

m – число параллельных опытов.

$$F_p = \frac{33,73}{13,89} = 2,43$$

Полученное расчетное значение F_p сравнивается с табличным значением $F_{\text{кр}}$ для числа степеней свободы $f_1 = K \cdot (N - M) = 3 \cdot (8 - 5) = 9$, $f_2 = N \cdot (K - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$.

$$F_p < F_{\text{кр}} \\ 2,43 < 2,54$$

Выполнение условия подтверждает адекватность разработанной модели.

Матрица планирования эксперимента для определения функции цели (температуры нагрева контактов) магнитных пускателей и контакторов представлена в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Матрица планирования эксперимента для определения зависимости функции цели (температуры нагрева контактов) контакторов и магнитных пускателей ПФЭ типа 2³

Experiment planning matrix for determining the dependence of the target function (contact heating temperature) of FFE type 2³ contactors and magnetic starters

u	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁₂	x ₁₃	x ₂₃	x ₁₂₃	y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}	S _{y_i} ²	\hat{y}	S _{y_i} ²
1	+	-	-	-	+	+	+	-	6,01	3,02	2,05	3,69	4,26	3,35	0,117
2	+	+	-	-	-	-	+	+	6,16	3,15	2,27	3,86	4,14	3,53	0,110
3	+	-	+	-	-	+	-	+	6,94	4,90	4,59	5,48	1,63	5,27	0,044
4	+	+	+	-	+	-	-	-	21,52	20,68	17,26	19,82	5,09	20,7	0,776
5	+	-	-	+	+	-	-	+	41,01	38,02	37,06	38,70	4,25	39	0,092
6	+	+	-	+	-	+	-	-	41,18	38,18	37,31	38,89	4,12	39,2	0,096
7	+	-	+	+	-	-	-	-	42,08	40,18	39,98	40,75	1,34	40,9	0,023
8	+	+	+	+	+	+	+	+	58,80	58,30	54,54	57,21	5,43	56,3	0,833

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Продолжение таблицы 5

Continuation of table 5

u	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
1	3,69	-3,69	-3,69	-3,69	3,69	3,69	3,69	-3,69
2	3,86	3,86	-3,86	-3,86	-3,86	-3,86	3,86	3,86
3	5,48	-5,48	5,48	-5,48	-5,48	5,48	-5,48	5,48
4	19,82	19,82	19,82	-19,82	19,82	-19,82	-19,82	-19,82
5	38,70	-38,70	-38,70	38,70	38,70	-38,70	-38,70	38,70
6	38,89	38,89	-38,89	38,89	-38,89	38,89	-38,89	-38,89
7	40,75	-40,75	40,75	40,75	-40,75	-40,75	40,75	-40,75
8	57,21	57,21	57,21	57,21	57,21	57,21	57,21	57,21
\bar{b}_{ij}	26,05	3,90	4,77	17,84	3,81	0,27	0,33	0,26
t _p	65,6	9,81	12	44,92	9,58	0,67	0,83	0,66

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

После вычисления значений коэффициентов *b* полином (4) для определения зависимости функции цели (температуры нагрева контактов) «y» контакторов и магнитных пускателей примет следующий вид:

$$y = 26,05 + 3,9x_1 + 4,77x_2 + 17,84x_3 + 3,81x_1x_2 + 0,27x_1x_3 + 0,33x_2x_3 + 0,26x_1x_2x_3 \quad (18)$$

Расчетное значение параметра критерия Кохрена по (9) составляет:

$$G_p = \frac{5,43}{(4,26 + \dots + 5,43)} = 0,18$$

При этом неравенство выполняется:

$$G_p < G_{кр} \\ 0,18 < 0,52$$

Гипотезу о статистической значимости коэффициентов регрессии проверим по критерию Стьюдента.

S² по (13):

$$S^2 = \frac{4,26 + \dots + 5,43}{8} = \frac{30,27}{8} = 3,78$$

$$S_b^2 = \frac{3,78}{8 \cdot 3} = 0,16; S_b = \sqrt{0,16} = 0,4$$

Таким образом, значимыми являются те коэффициенты, значение которых больше значения S_b·t_{кр} = 0,4·2,12 = 0,848, остальные коэффициенты отбрасываются.

Окончательный вид уравнения регрессии примет вид:

$$y = 26,05 + 3,91x_1 + 4,77x_2 + 17,84x_3 + 3,81x_1x_2 \quad (19)$$

В натуральном масштабе:

$$t_{кмп} = -1,87 - 0,002 \cdot I_{НОМ} + 1,25 \cdot \kappa_3 + 1,02 \cdot t_{OC} + 0,027 \cdot I_{НОМ} \cdot \kappa_3 \quad (20)$$

Результаты вычислений погрешности разработанной модели при изменении факторов x_1, x_2, x_3 приведены в таблице 6.

Таблица 6
Table 6

Результат вычислений погрешности для контакторов и магнитных пускателей
Result of error calculations for contactors and magnetic starters

№	x_0	x_1	x_2	x_3	y по (3)	\hat{y} по (19)	$ y-\hat{y} $	$\delta, \%$
1	+	0	0,5	0	31,3	28,4	2,9	10,3
2	+	-0,5	0	1,5	52,4	50,9	1,5	3,0
3	+	-0,1	-1	0,8	36,6	35,6	1,0	2,7
4	+	-1	0	1	40,2	40,0	0,2	0,5
5	+	0,5	-1	0	22,3	21,4	0,9	4,3
6	+	0,8	0,4	1,1	50,3	51,9	1,6	3,0
7	+	0	0,1	-1	9,6	8,7	1,0	11,2
8	+	-0,6	-0,4	1,3	46,6	45,9	0,7	1,5
9	+	-0,4	0	1	40,4	42,4	2,0	4,7
10	+	-1	1	-0,5	14,5	14,2	0,2	1,7

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Наибольшая погрешность модели для расчета параметров исследуемых контакторов и магнитных пускателей (табл. 6) составляет 11,2%, что показывает достаточную точность полученного уравнения регрессии.

$S_{ад}^2$ – оценка дисперсии адекватности по (17):

$$S_{ад}^2 = \frac{3 \cdot ((3,35 - 3,69)^2 + \dots + (56,3 - 57,21)^2)}{8 - 5} = 2,1$$

Адекватность математической модели проверяется по F – критерию Фишера по (16):

$$F_p = \frac{3,78}{2,1} = 1,8$$

Полученное расчетное значение F_p сравнивается с табличным значением $F_{кр}$, для числа степеней свободы $f_1 = K \cdot (N - M) = 3 \cdot (8 - 5) = 9$, $f_2 = N \cdot (K - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$.

$$F_p < F_{кр} \\ 1,8 < 2,54$$

Выполнение требования подтверждает адекватность рассматриваемой модели.

На рисунках 1 и 2 представлены графические зависимости температуры нагрева исследуемых аппаратов при изменении коэффициента загрузки от 0,1 до 1,5.

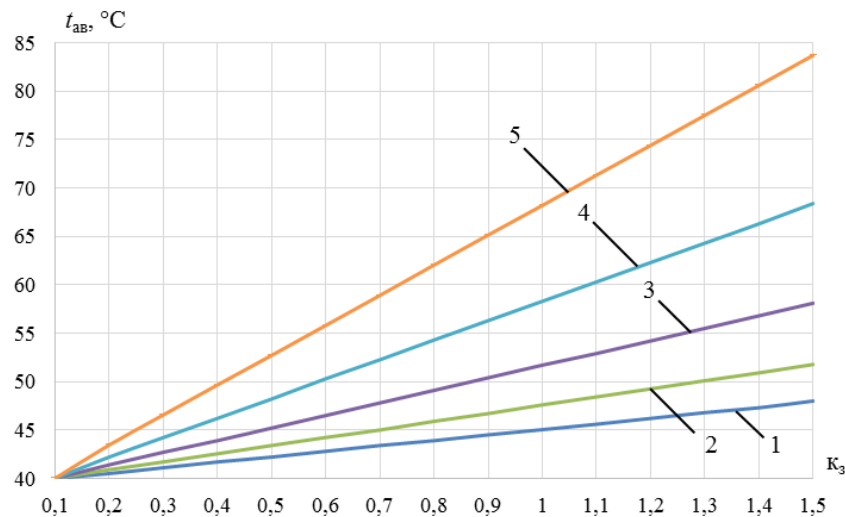


Рис. 1. Графические зависимости температуры нагрева контактов автоматических выключателей от коэффициента загрузки: 1 – $I_{ном} = 40$ А; 2 – $I_{ном} = 63$ А; 3 – $I_{ном} = 100$ А; 4 – $I_{ном} = 160$ А; 5 – $I_{ном} = 250$ А
Fig. 1. Graphical dependences of contact heating temperature of circuit breakers on the load factor: 1 – $I_{nom} = 40$ A; 2 – $I_{nom} = 63$ A; 3 – $I_{nom} = 100$ A; 4 – $I_{nom} = 160$ A; 5 – $I_{nom} = 250$ A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

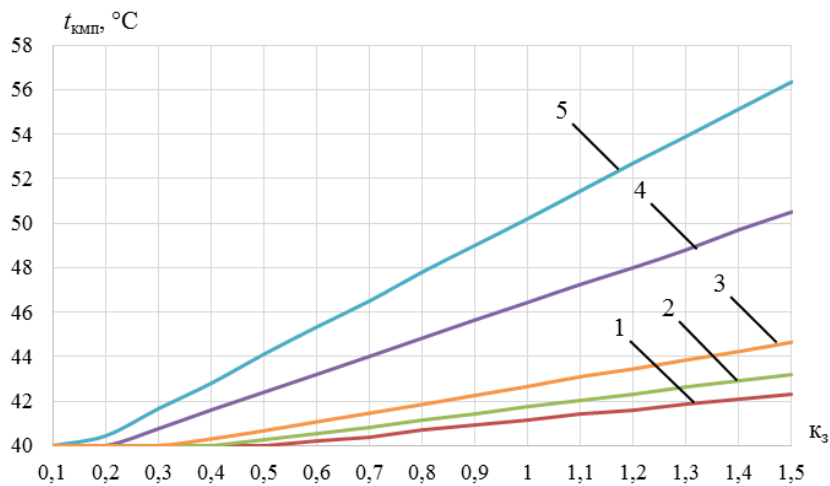


Рис. 2. Графические зависимости температуры нагрева контактов контакторов и магнитных пускателей от коэффициента загрузки: 1 – $I_{ном} = 40$ А; 2 – $I_{ном} = 63$ А; 3 – $I_{ном} = 100$ А; 4 – $I_{ном} = 250$ А; 5 – $I_{ном} = 400$ А

Fig. 2. Graphical dependences of contact heating temperature of contactor and magnetic starter contact on the load factor: 1 – $I_{nom} = 40$ A; 2 – $I_{nom} = 63$ A; 3 – $I_{nom} = 100$ A; 4 – $I_{nom} = 250$ A; 5 – $I_{nom} = 400$ A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графики (рис. 1 и 2) построены для НКА, работающих при температуре окружающей среды, равной 40°C , которые позволяют достаточно просто определить температуру нагрева контактов. Полученные графики показывают, что температура нагрева контактов исследуемых аппаратов не превышает значения, установленные ГОСТ 403-73.

Определим температуру нагрева контактов при изменении температуры окружающей среды от 5 до 40°C . На рисунке 3 представлены графические зависимости температуры нагрева контактов автоматических выключателей, на рисунке 4 – графические зависимости температуры нагрева контактов контакторов и магнитных пускателей.

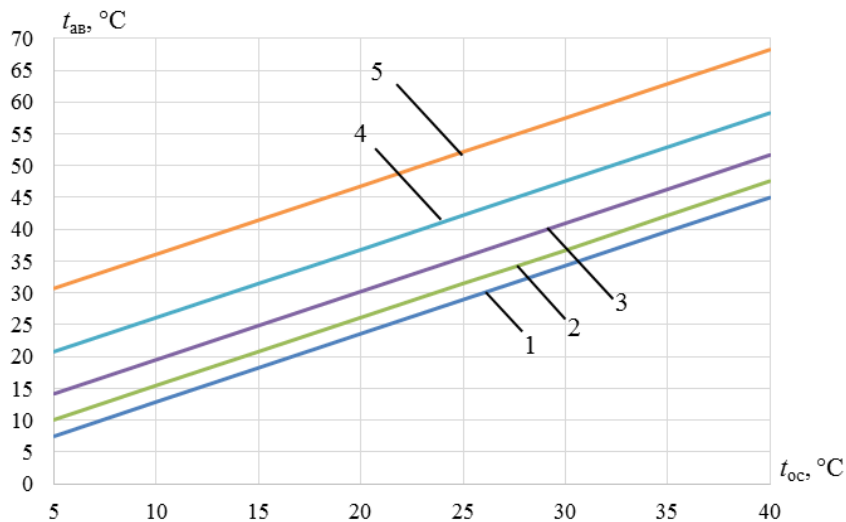


Рис. 3. Графические зависимости температуры нагрева контактов автоматических выключателей при изменении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C : 1 – $I_{ном} = 40$ А; 2 – $I_{ном} = 63$ А; 3 – $I_{ном} = 100$ А; 4 – $I_{ном} = 160$ А; 5 – $I_{ном} = 250$ А

Fig. 3. Graphical dependences of circuit breakers contact heating temperature at ambient temperature changes from 5°C to 40°C : 1 – $I_{nom} = 40$ A; 2 – $I_{nom} = 63$ A; 3 – $I_{nom} = 100$ A; 4 – $I_{nom} = 160$ A; 5 – $I_{nom} = 250$ A

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рисунок 3 показывает, что при повышении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C температура нагрева контактов автоматических выключателей повышается на $37,5^{\circ}\text{C}$.

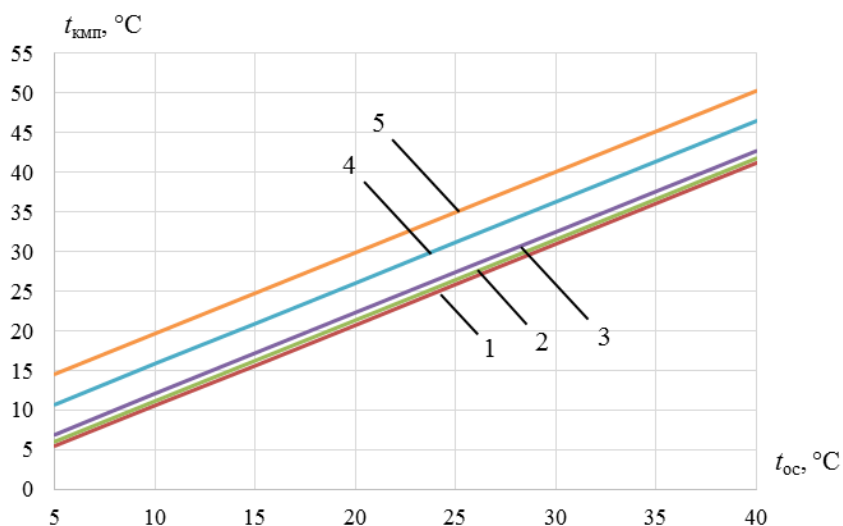


Рис. 4. Графические зависимости температуры нагрева контактов контакторов и магнитных пускателей при изменении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C: 1 – I_{ном} = 40 А; 2 – I_{ном} = 63 А; 3 – I_{ном} = 100 А; 4 – I_{ном} = 250 А; 5 – I_{ном} = 400 А

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При повышении температуры окружающей среды от 5°C до 40°C температуры нагрева контактов контакторов и магнитных пускателей повышается на 35,7°C (рис. 4).

Заключение (Conclusions)

Проведенные исследования показывают, что для определения температуры нагрева контактов НКА целесообразно составлять специализированные модели, которые обладают достаточной точностью.

Одним из методов определения температуры нагрева контактов НКА является регрессионный анализ, который позволяет получить уравнение зависимости температуры нагрева контактов от основных влияющих факторов- параметров оборудования, в качестве которых приняты величина номинального тока аппарата, коэффициент загрузки аппарата и температура окружающей среды.

Разработанные регрессионные модели определения температуры нагрева контактов НКА позволяют учитывать техническое состояние аппарата и легко могут быть изменены при изменении условий и режимов эксплуатации. Представленные графические зависимости позволяют достаточно быстро определить значение температуры нагрева контактов НКА с учетом режимов эксплуатации без проведения предварительных расчетов.

Литература

1. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Альзакаар 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; 24 (6): 3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>.
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутривзаводского электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020; 22 (2): 65-74. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>.
3. Петров А. Р. и др. Совершенствование методики оценки потерь электроэнергии во внутривзаводских электрических сетях // Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.
4. Верстунин А.Ю. Математическая итеративно-адаптивная модель процесса установления стационарного теплового состояния контактно-токоведущих контуров контакторов // Вестник МЭИ. 2023. № 2. С. 27-36. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-2-27-36.
5. Wei C. Power Grid Facility Thermal Fault Diagnosis via Object Detection with Synthetic Infrared Imagery // 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEECT), Macau, Macao, 2021, pp. 217-221, DOI: 10.1109/CEEECT53198.2021.9672631.
6. Мамонтов А.Н., Пушница К.А. Тепловизионный контроль реакторов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 8. С. 145–151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500.

7. Haider M., Doegar A., Verma R. K. Fault Identification in Electrical Equipment using Thermal Image Processing // 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Greater Noida, India, 2018, pp. 853-858, doi: 10.1109/GUCON.2018.8675108.

8. Власов А. Б. и др. Особенности реализации метода количественной термографической диагностики при внедрении цифровых технологий // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 484–495. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495.

9. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

10. Коробейников А. Б., Сарваров А. С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №1 (26). С. 4-9.

11. Ещенко Д.В., Никитин А.Т., Белов О.А. Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля // Вестник КамчатГТУ. 2020. №54. С. 6-19.

12. Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. Thermal Behavior of Electrical Contact for Different AC Loads // 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187457.

13. Bhagat A. K., Chauhan A. Thermal Image-Based Fault Analysis of Induction Motors using a Novel Machine Learning Model // 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 1429-1433, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046714.

14. Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment by Infrared Thermography // 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 516-520, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959756.

15. Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. Thermal Diagnostics of a High Power Fuse with Thermovision Camera // 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Maldives, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988120.

Авторы публикации

Петров Алмаз Радикович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. gracheva.i@bk.ru

References

1. Abdullazyanov, E.Y., Gracheva, E.I., Alzakkar, A., Nizamiev, M.F., Shumikhina, O.A., Valtchev, S. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022, 24 (6), pp. 3-12. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>. (In Russ.).

2. Gracheva, E.I., Gorlov, A.N., Shakurova, Z.M. Calculation of the economy of electric energy in industrial electrical supply systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020. 22(2). pp. 65-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-65-74>.

3. Petrov, A. R. et al. Improvement of the methodology for assessing power losses in in-plant power grids. *Vestnik of MSTU*, 2024, 27(4), pp. 511–520. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.

4. Verstunin, A.Yu. Iterative-Adaptive Mathematical Model of Settling a Stationary Thermal State of the Contactor Live Circuits. *Bulletin of MPEI*. 2023. No. 2. pp. 27-36. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-2-27-36. (in Russ.).

5. Wei C. Power Grid Facility Thermal Fault Diagnosis via Object Detection with Synthetic Infrared Imagery // 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), Macau, Macao, 2021, pp. 217-221, DOI: 10.1109/CEECT53198.2021.9672631.

6. Mamontov, A.N., Puschnitsa, K.A. Thermal control of reactors. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 8. Pp. 145–151. DOI: 10.34031/article_5d4d7a2f4f7a33.36054500. (In Russ.).

7. Haider M., Doegar A., Verma R. K. Fault Identification in Electrical Equipment using Thermal Image Processing // 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Greater Noida, India, 2018, pp. 853-858, doi: 10.1109/GUCON.2018.8675108.

8. Vlasov, A. B. et al. Features of implementing the quantitative thermographic diagnostics method while introducing digital technology. *Vestnik of MSTU*, 2019, 22(4), pp. 484–495. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495. (In Russ.)

9. Shpiganovich, A.N., Shpiganovich, A.A., Petrov, A.R., Gracheva, E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024. 26 (2), pp. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77. (In Russ.).

10. Korobeinikov, A.B., Sarvarov, A.S. Analysis of existing methods for diagnostics of electric motors and perspectives of their development. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2015. No. 1 (26). pp. 4-9. (In Russ.).

11. Eshchenko, D.V., Nikitin, A.T., Belov, O.A. Practical application of thermal-imaging analysis and control methods. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2020. No. 54. pp. 6-19. (In Russ.)

12. Andrei P., Cazacu E., Stanculescu M., Andrei H., Caciula I., Drosu O. Thermal Behavior of Electrical Contact for Different AC Loads // 2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania, 2023, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187457.

13. Bhagat A. K., Chauhan A. Thermal Image-Based Fault Analysis of Induction Motors using a Novel Machine Learning Model // 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), Moradabad, India, 2022, pp. 1429-1433, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046714.

14. Dragomir A., Adam M., Antohi S.-M., Atanasoaei M., Pantiru A. Monitoring and Diagnosis of Electrical Equipment by Infrared Thermography // 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 516-520, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959756.

15. Hadzhiev I., Malamov D., Kolev N., Balabozov I., Yatchev I. Thermal Diagnostics of a High Power Fuse with Thermovision Camera // 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Maldives, 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988120.

Authors of the publication

Almaz R. Petrov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено **12.06.2025 г.**

Отредактировано **01.08.2025 г.**

Принято **04.08.2025 г.**