

УДК 621.31

ББК 31.2

А.И. ОРЛОВ, Д.В. БОРТНИК, И.А. КАРПОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Ключевые слова: силовой трансформатор, допустимая длительная нагрузка, тепловой режим, уравнение Ньютона–Рихмана, коэффициент теплопередачи.

В статье рассматривается проблема определения допустимой длительной нагрузки силовых трансформаторов с учетом их теплового режима. Актуальность работы обусловлена высоким уровнем физического износа трансформаторного оборудования и необходимостью повышения его эксплуатационной надежности. Превышение температуры обмоток и масла ускоряет старение изоляции, что требует разработки методов прогнозирования теплового состояния трансформаторов.

Цель исследования – разработка методики определения допустимой длительной нагрузки трансформатора в зависимости от температуры окружающей среды. Научная новизна заключается в разработке приближенной модели теплового режима работы силового трансформатора, позволяющей прогнозировать температуру элементов и допустимую нагрузку.

Материалы и методы. Методы исследования включают математическое моделирование с использованием уравнений Ньютона–Рихмана для описания теплообмена между теплотехнически однородными элементами трансформатора. Для численного решения системы дифференциальных уравнений использован метод Рунге–Кутты 4-го порядка с переменным шагом 30 с. Расчеты выполнены посредством разработанных авторами программ на языке Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования с экспериментальными данными из открытых источников и требованиями ГОСТ 14209-85.

Результаты. Предложена математическая модель, рассматривающая трансформатор как систему из трех теплотехнически однородных элементов: магнитопровода, обмоток и масла, теплообмен между которыми описывается уравнениями Ньютона–Рихмана. Получены уравнения, позволяющие определять установившуюся температуру элементов трансформатора и максимально допустимый коэффициент загрузки с учетом ограничения температуры обмотки и масла, заданных значений температуры окружающей среды и коэффициента загрузки. Получены приближенные формулы для определения объемов и площадей контакта поверхностей элементов трансформатора на основе расчетной схемы. Представлены соотношения, позволяющие приблизительно определять эти величины в зависимости от номинальной мощности для геометрически подобных трансформаторов. Показано, что наибольшее влияние на тепловой режим оказывает коэффициент теплопередачи между маслом и окружающей средой. Сформулировано условие допустимости эксплуатации трансформатора при сохранении заданного уровня нагрузки и температуры окружающей среды. Результаты моделирования подтверждены сравнением с экспериментальными данными.

Выводы. Предложена математическая модель теплового режима трансформатора, учитывающая инерционность изменения температуры в его теплотехнически однородных элементах. Определено влияние коэффициента загрузки и температуры окружающей среды на установившиеся значения температуры элементов. Получено условие допустимости эксплуатации трансформатора, обеспечивающее ограничение температуры обмоток и масла.

Введение. Проблема повышения эксплуатационной надежности трансформаторов актуальна для электрооборудования различных классов напряжений. Так, количество трансформаторных подстанций и эксплуатируемого

электрооборудования распределительных сетей класса 6–10 кВ по сравнению с оборудованием класса напряжения 35 кВ и выше в ПАО «Россети» превышает более чем в 40 раз [11]. Общий уровень физического износа оборудования в ПАО «Россети Центр» составляет 76,6%, из них износ трансформаторного оборудования различных классов напряжения – более 83% [7].

Превышение допустимых значений температуры обмоток трансформатора и масла приводит к ускоренному старению изоляционных материалов, уменьшению срока службы трансформатора и повышению вероятности отказа. Актуальная величина длительно допустимой нагрузки зависит от режимов работы потребителей, температуры окружающей среды, условий охлаждения трансформатора и постоянно изменяется.

В правилах устройства электроустановок (ПУЭ)¹ определены значения кратковременных перегрузок трансформаторов независимо от длительности и значений предшествующих нагрузок и температуры окружающей среды. В приложении № 1 к приказу Минэнерго России от 8 февраля 2019 г. № 81² содержатся требования к перегрузочной способности трансформаторов классов напряжений выше 110 кВ. В документе приведены коэффициенты допустимой длительной перегрузки в зависимости от температуры охлаждающей среды без ограничения длительности и значения аварийных перегрузок с учетом их длительности.

В работе [2] заявлено о необходимости учета реального суточного графика нагрузки трансформаторной подстанции во избежание ошибок в определении допустимой продолжительности перегрузки и вызванных этим последствий. Авторы предлагают методику определения этой продолжительности, рассматривая трансформатор как однородное тело [2].

Л. Киш рассматривает трансформатор как систему из трех тел: магнитопровода, обмоток и масла, между которыми происходит теплообмен [6. С. 37]. Аналогичный подход используют и другие авторы, дополняя его описанием параметрической идентификации параметров модели по результатам измерений [3, 4, 12]. Л. Киш использует электрическую аналогию для описания процесса охлаждения, в которой охлаждаемые тела замещаются параллельно соединенными RC-цепочками. Электрические емкости соответствуют количеству теплоты в элементах трансформатора, а электрические сопротивления обратны величинам коэффициентов теплопередачи между телами. Превышениям температуры при такой аналогии соответствуют напряжения на конденсаторах, поддерживаемые источниками ЭДС, которые в момент времени $t = 0$ отключаются от конденсаторов, что приводит к их разряду через сопротивления [6].

В.И. Солдатовым и соавт. представлен метод прогнозирования теплового состояния силовых маслонаполненных трансформаторов при постоянной

¹ Правила устройства электроустановок: все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий. М.: ЭНАС, 2019. 672 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/173340>.

² Требования к перегрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики, и ее поддержанию: приложение № 1 к приказу Минэнерго России от 08.02.2019 № 81. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72109886/#review>.

нагрузке 20% и его расширение, направленное на оценку допустимой нагрузки. Авторы приводят результаты тепловизионного обследования стенок бака трансформатора для оценки изменений температуры масла по высоте в широком диапазоне температур окружающей среды от -8 до $+35^{\circ}\text{C}$. Согласно представленным термограммам, градиент температуры составляет приблизительно $8\text{--}10^{\circ}\text{C}$ на метр высоты бака трансформатора, причем этот градиент мало зависит от температуры окружающей среды [8, 9].

Цель исследования состоит в разработке методики определения допустимой длительной нагрузки трансформатора в зависимости от температуры окружающей среды.

Научная новизна заключается в разработке приближенной модели теплового режима работы силового трансформатора, позволяющей прогнозировать температуру элементов и допустимую нагрузку.

Материалы и методы. Учет большого количества конструктивных параметров трансформатора и физических свойств материалов не всегда возможен и не отвечает цели работы; однако чрезмерное упрощение модели может не учитывать условия работы конкретного трансформатора и значимые физические процессы, такие как инерционность нагрева и охлаждения обмоток, наличие теплообмена между магнитопроводом и обмотками. При разработке модели приняты следующие допущения:

а) трансформатор рассматривается как совокупность теплотехнически однородных элементов: магнитопровода и обмоток, находящихся в заполненном маслом баке;

б) внутренняя теплопроводность конструктивных элементов трансформатора и масла принимается настолько высокой, что неравномерность распределения температуры магнитопровода и обмоток не учитываются; градиент температуры масла по высоте непосредственно в модели не учитывается, но определяется отдельно;

в) конвекция масла не рассматривается;

г) взаимодействие между элементами определяется величинами коэффициентов теплопередачи и площадей соприкасающихся поверхностей;

д) величины коэффициентов теплопередачи принимаются постоянными, не зависящими от температуры.

При разработке математической модели теплообмена в элементах трансформатора, получении расчетных формул для определения объемов и площадей контакта элементов использовались методы математического моделирования. Численные расчеты и получение данных для визуализации выполнены на ЭВМ посредством разработанных авторами программ на языке Python с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Численное решение обыкновенного дифференциального уравнения разработанной модели реализовано методом Рунге–Кутты 4-го порядка с постоянным временным шагом 30 с. Определение коэффициентов теплоотдачи на основе анализа данных из открытых источников выполнено методом параметрической идентификации. Использовался метод сравнительного анализа результатов моделирования с экспериментальными данными из открытых источников, сопоставления полученных результатов с требованиями стандартов.

Результаты исследования. Теплообмен между теплотехнически однородным телом и окружающим пространством можно описать уравнением Ньютона – Рихмана:

$$c_p m \frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha S (\theta_{\text{нар}} - \theta) + P, \quad (1)$$

где θ и $\theta_{\text{нар}}$ – температура тела и окружающей среды, К или $^{\circ}\text{C}$; t – время, с; α – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; S – площадь поверхности, м^2 ; c_p – удельная теплоемкость материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; m – масса; P – мощность, выделяющаяся внутри тела, Вт.

Магнитопровод находится в непосредственном контакте с обмотками, а вся активная часть – в трансформаторном масле. Тогда, принимая теплопроводность металлического бака бесконечной, согласно уравнению (1), для каждого однородного элемента трансформатора можно записать уравнение теплообмена с окружающим пространством:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_c}{dt} &= k_{c.o}(\theta_o - \theta_c) + k_{c.m}(\theta_m - \theta_c) + \frac{P_o}{C_c}; \\ \frac{d\theta_o}{dt} &= k_{o.c}(\theta_c - \theta_o) + k_{o.m}(\theta_m - \theta_o) + \frac{\beta^2 P_K}{C_o}; \\ \frac{d\theta_m}{dt} &= k_{m.c}(\theta_c - \theta_m) + k_{m.o}(\theta_o - \theta_m) + k_{m.b}(\theta_b - \theta_m), \end{aligned} \quad (2)$$

где P_o и P_K – потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора, Вт; β – коэффициент загрузки трансформатора; θ_c , θ_o , θ_m , θ_b – температуры магнитопровода (стали), обмоток, масла и окружающей среды (воздуха) соответственно, $^{\circ}\text{C}$; $k = \frac{\alpha S}{c_p m}$ – коэффициент, характеризующий интенсивность теплообмена, с^{-1} .

Формулы для расчета семи коэффициентов k в уравнениях (2) представлены в таблице.

**Формулы для расчета коэффициентов k
в уравнениях тепловой модели трансформатора (4)**

	Сталь (магнитопровод)	Обмотки	Масло	Воздух
Сталь (магнитопровод)	–	$k_{c.o} = \frac{\alpha_{c.o} S_{c.o}}{c_{p,c} m_c}$	$k_{c.m} = \frac{\alpha_{c.m} S_{c.m}}{c_{p,c} m_c}$	–
Обмотки	$k_{o.c} = \frac{\alpha_{c.o} S_{c.o}}{c_{p,o} m_o}$	–	$k_{o.m} = \frac{\alpha_{o.m} S_{o.m}}{c_{p,o} m_o}$	–
Масло	$k_{m.c} = \frac{\alpha_{c.m} S_{c.m}}{c_{p,m} m_m}$	$k_{m.o} = \frac{\alpha_{o.m} S_{o.m}}{c_{p,m} m_m}$	–	$k_{m.b} = \frac{\alpha_{m.b} S_{m.b}}{c_{p,m} m_m}$

После преобразования уравнения тепловой модели трансформатора (2) могут быть представлены в матричной форме:

$$\frac{d\Theta}{dt} = K \cdot \Theta + A, \quad (3)$$

где $\Theta = (\theta_c, \theta_o, \theta_m)^T$ – вектор-столбец переменных; $A = \left(\frac{P_o}{C_c}, \frac{\beta^2 P_K}{C_m}, k_{m.b} \theta_b \right)^T$ – вектор-столбец влияющих величин.

Матрица коэффициентов:

$$K = \begin{bmatrix} -(k_{c.o} + k_{c.m}) & k_{c.o} & k_{c.m} \\ k_{o.c} & -(k_{o.c} + k_{o.m}) & k_{o.m} \\ k_{m.c} & k_{m.o} & -(k_{m.c} + k_{m.o} + k_{m.b}) \end{bmatrix}.$$

Уравнения (3) позволяют определять температуры элементов трансформатора θ_c , θ_o , θ_m при известных температурах окружающей среды θ_b и коэффициенте загрузки трансформатора β . Установившиеся значения температур $\Theta_{уст}$, соответствующие заданным θ_b и β , можно определить в результате решения уравнений (3) при нулевой левой части:

$$K \cdot \Theta_{уст} = -A. \quad (4)$$

Приравнивание к нулю левой части уравнений (3) позволяет определить допустимую нагрузку трансформатора при заданной максимально допустимой температуре масла $\theta_{м,доп}$ или наиболее нагретой точки обмотки $\theta_{о,доп}$ в установившемся режиме при известной температуре окружающей среды θ_b . Так, при заданных $\theta_{м,доп}$ и θ_b предельно допустимый коэффициент загрузки трансформатора $\beta_{м,доп}$ определяется в результате решения системы уравнений, записанных в матричной форме:

$$K_M \cdot B_M = -A_M, \quad (5)$$

где $B_M = (\theta_c, \theta_o, \beta_{м,доп})^T$ – вектор-столбец неизвестных; матрица коэффициентов и вектор-столбец свободных членов:

$$K_M = \begin{bmatrix} -(k_{c.o} + k_{c.m}) & k_{c.o} & 0 \\ k_{o.c} & -(k_{o.c} + k_{o.m}) & \frac{P_K}{C_M} \\ k_{m.c} & k_{m.o} & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_M = \begin{bmatrix} k_{c.m}\theta_{м,доп} + \frac{P_0}{C_c} \\ k_{o.m}\theta_{м,доп} \\ -(k_{m.c} + k_{m.o} + k_{m.b})\theta_{м,доп} + k_{m.b}\theta_b \end{bmatrix}.$$

Аналогично при заданной максимально допустимой температуре наиболее нагретой точки обмотки $\theta_{о,доп}$ в установившемся режиме и температуре окружающей среды θ_b предельно допустимый коэффициент загрузки трансформатора $\beta_{о,доп}$ определяется в результате решения системы уравнений в матричной форме:

$$K_o \cdot B_o = -A_o, \quad (6)$$

где $B_o = (\theta_c, \theta_m, \beta_{о,доп})^T$ – вектор-столбец неизвестных; матрица коэффициентов и вектор-столбец свободных членов:

$$K_o = \begin{bmatrix} -(k_{c.o} + k_{c.m}) & k_{c.m} & 0 \\ k_{o.c} & k_{o.m} & \frac{P_K}{C_M} \\ k_{m.c} & -(k_{m.c} + k_{m.o} + k_{m.b}) & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_o = \begin{bmatrix} k_{c.o}\theta_{о,доп} + \frac{P_0}{C_c} \\ -(k_{c.o} + k_{o.m})\theta_{о,доп} \\ k_{m.o}\theta_{о,доп} + k_{m.b}\theta_b \end{bmatrix}.$$

Расчет матриц коэффициентов **В** требует определения геометрических параметров, теплоемкостей и коэффициентов теплопередачи. При отсутствии проектной документации на конкретный трансформатор его геометрические параметры, такие как объемы и площади контакта поверхностей элементов, предлагается определять на основе приближенной расчетной схемы. Так, приближенная расчетная схема для маслонаполненного трансформатора с трехстержневым магнитопроводом с концентрическими обмотками показана на рис. 1.

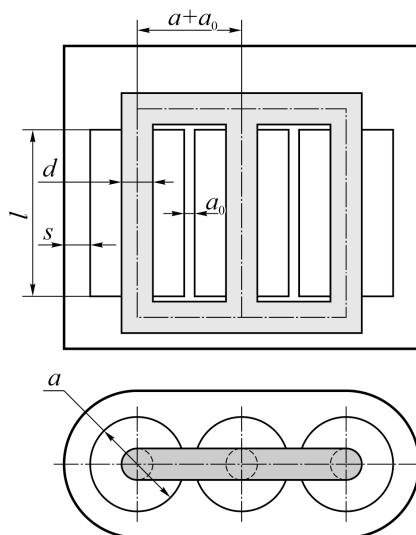


Рис. 1. Расчетная схема для определения объемов и площадей поверхности элементов трансформатора

Приближенные формулы для определения объемов магнитопровода (стали) (V_c), обмоток (V_o), бака (V_6) и масла (V_m) по расчетной схеме:

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{\pi d^2}{4} \cdot [3l + 4(a + a_0) + 2d]; \\ V_o &= \frac{\pi(a^2 - d^2)}{4} \cdot 3l; \\ V_6 &= \left[\frac{\pi(a + s)^2}{4} + 2(a + a_0)(a + s) \right] \cdot (l + 4d); \\ V_m &= V_6 - (V_c + V_o). \end{aligned} \quad (7)$$

Формулы (7) могут быть использованы для расчета массы, кг, соответствующих элементов трансформатора и их теплоемкостей, Дж/К:

$$m = \rho V$$

и

$$C = c_p m,$$

где ρ – плотность, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

На интенсивность теплообмена, помимо теплоемкости, влияет произведение коэффициента теплопередачи и площади контакта поверхностей. Приближенные формулы для расчета площадей контакта поверхностей магнитопровода

и обмоток ($S_{c.o}$), магнитопровода и масла ($S_{c.m}$), обмоток и масла ($S_{o.m}$) и масла и воздуха ($S_{m.b}$) по расчетной схеме (рис. 1):

$$\begin{aligned} S_{c.o} &= 3\pi dl; \\ S_{c.m} &= \pi d \cdot [4(a + a_0) + 2d]; \\ S_{o.m} &= 3\pi al + 6 \frac{\pi(a^2 - d^2)}{4}; \\ S_{m.b} &= \left[\frac{\pi(a + s)^2}{4} + 2(a + a_0)(a + s) \right] + \\ &\quad + [\pi(a + s) + 4(a + a_0)] \cdot l. \end{aligned} \quad (8)$$

Зная геометрические размеры трансформатора, можно определить размеры и мощность потерь других геометрически подобных трансформаторов исходя из того, что номинальная мощность таких трансформаторов пропорциональна линейному размеру в четвертой степени [5. С. 463] $S_H \sim l^4$, а потери – линейному размеру в кубе $\Sigma P \sim l^3$. Тогда соотношение площадей и объемов с номинальной мощностью трансформатора: $S_{пов} \sim \sqrt{S_H}$ и $V \sim S_H^{3/4}$. Соотношение мощности потерь с номинальной мощностью: $\Sigma P \sim S_H^{3/4}$.

Интенсивность сложного процесса конвективного теплообмена между маслом и конструктивными элементами трансформатора, между баком трансформатора с радиаторами и окружающей средой, а также теплообмена между обмотками и магнитопроводом учитывается в модели выбором значений коэффициентов теплопередачи.

Точные значения коэффициентов теплопередачи можно определить только экспериментальным путем, однако, зная диапазоны возможных изменений этих коэффициентов, а также руководствуясь ГОСТ 14209-85¹, можно оценить их приближенные значения. Согласно приложению 4 стандарта, при отсутствии в паспортных данных трансформатора величины тепловой постоянной времени, ее значение следует принимать равным 2,5 ч для трансформаторов номинальной мощностью до 6300 кВА и напряжением до 10 кВ.

На примере маслонаполненного трансформатора, имеющего следующие параметры: $S_H = 400$ кВА, $P_0 = 800$ Вт, $P_K = 5500$ Вт, получены расчетные зависимости, позволяющие оценить влияние коэффициентов теплопередачи α на установившиеся температуры элементов трансформатора $\theta_{уст}$ и на тепловые постоянные времени τ , представленные на рис. 2, а и б. Зависимости рассчитаны при нулевой температуре окружающей среды ($\theta_b = 0$ °С) и номинальной нагрузке трансформатора ($\beta = 1$), каждый график получен при изменении одного коэффициента теплопередачи при неизменных значениях остальных коэффициентов. Размеры конструктивных элементов рассматриваемого трансформатора, полученные по методике проектирования [10] и обозначенные согласно схеме на рис. 1: $a = 300$ мм, $a_0 = 10$ мм, $d = 180$ мм, $s = 75$ мм, $l = 502$ мм. Площади контакта поверхностей согласно (7): $S_{c.o} = 0,429$ м², $S_{o.m} = 1,291$ м², $S_{c.m} = 0,640$ м², $S_{m.b} = 1,215$ м². Объемы согласно (8): $V_c = 0,034$ м³, $V_o = 0,057$ м³, $V_6 = 0,328$ м³, $V_m = 0,237$ м³. Массы: $m_o = 122$ кг, $m_c = 263$ кг, $m_m = 201$ кг.

¹ ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки [дата введения 01.07.1985]. М.: Изд-во стандартов, 1985. 38 с.

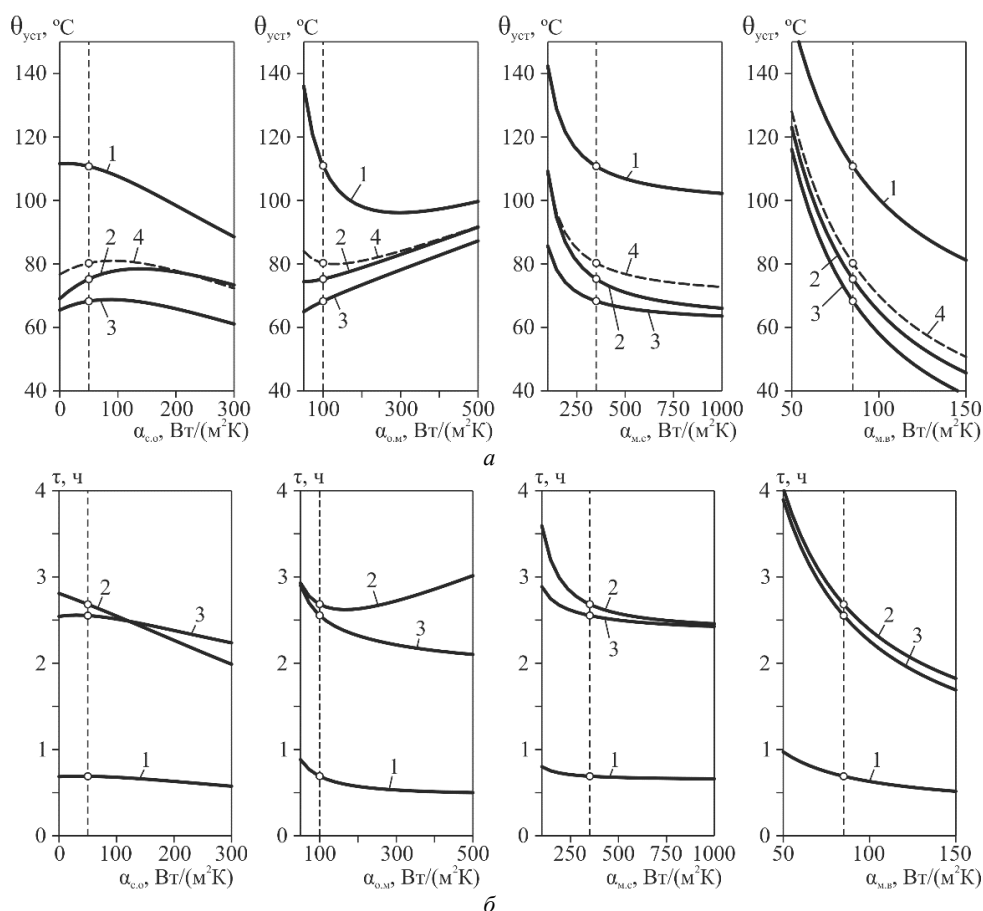


Рис. 2. Влияние коэффициентов теплопередачи α на установившуюся температуру элементов трансформатора $\theta_{уст}$ (а) и на тепловую постоянную времени τ (б):
1 – обмотки; 2 – магнитопровод; 3 – трансформаторное масло; 4 – средневзвешенное значение

Коэффициенты теплопередачи, принятые за базисные, относительно которых рассчитаны изменения параметров: $\alpha_{с.о.} = 50 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $\alpha_{о.м.} = 100 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $\alpha_{м.с.} = 350 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $\alpha_{м.в.} = 85 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, выделены на графиках вертикальной пунктирной линией. Установившиеся значения температуры, полученные в результате решения уравнения (4) для обмоток, магнитопровода и масла, равны $\theta_{уст.о.} = 110,8^\circ\text{C}$, $\theta_{уст.с.} = 75,2^\circ\text{C}$ и $\theta_{уст.м.} = 68,3^\circ\text{C}$; постоянные времени: $\tau_o = 41 \text{ мин}$, $\tau_c = 2 \text{ ч } 33 \text{ мин}$ и $\tau_m = 2 \text{ ч } 41 \text{ мин}$.

В результате сравнения влияния различных коэффициентов теплопередачи α на значения установившейся температуры $\theta_{уст}$ и тепловой постоянной времени τ , приведенных на рис. 2 а и б, можно отметить, что наибольшее влияние на установившуюся температуру и на тепловую постоянную времени оказывает коэффициент теплопередачи $\alpha_{м.в.}$, характеризующий интенсивность теплообмена наружной охлаждающей поверхности трансформатора (бака и радиаторов) с окружающей средой. На величину этого коэффициента влияют

площадь охлаждающей поверхности, вид конвекции и погодные условия. Коэффициент теплопередачи «обмотки – масло» $\alpha_{о.м}$ существенно влияет на значение установившейся температуры обмотки, причем значение этого коэффициента выше $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ маловероятно вследствие наличия изоляции проводников обмотки, снижающей интенсивность теплообмена. Значение коэффициента теплопередачи $\alpha_{с.о}$ минимально, как и его влияние на значения установившихся температур и тепловых постоянных времени. В работе Л. Киш теплообмен между обмоткой и магнитопроводом предлагается вообще не учитывать по причине теплоизоляционных свойств изолирующих цилиндров между магнитопроводом и обмотками [6. С. 36].

Распределение температуры масла по высоте бака неравномерно вследствие естественной конвекции масла в баке. Согласно ГОСТ 14209-85, при расчетах допустимой перегрузки трансформаторов принимается, что температура масла по высоте обмотки изменяется линейно. Данный факт подтверждается результатами экспериментальных тепловизионных исследований, представленными в работе [8]. На примере трансформаторов ТДТГ-20000/110 показано, что разница температуры между верхней и нижней точками бака высотой 3 м снижается со значения приблизительно 30°C при температуре наружного воздуха -10°C до 25°C при температуре наружного воздуха $+35^\circ\text{C}$. Результаты получены при коэффициенте загрузки $\beta = 0,2$. Приведенная в работе [8] зависимость средней температуры по высоте бака температуры от температуры наружного воздуха также практически линейная. В связи с этим для нахождения приближенного распределения температуры масла по высоте бака предлагается учитывать градиент температуры 10°C на 1 м высоты бака относительно средней расчетной температуры.

График изменения температуры обмоток, магнитопровода и масла при двухступенчатом прямоугольном графике нагрузки приведен на рис. 3. График получен при постоянной температуре окружающей среды $\theta_{в} = 0^\circ\text{C}$ и изменении коэффициента загрузки в интервале времени длительностью 6 ч с нуля до единицы. Начальные температуры элементов трансформатора приняты равными установившимся значениям $\theta_{уст.о} = 14,4^\circ\text{C}$, $\theta_{уст.с} = 14,9^\circ\text{C}$, $\theta_{уст.м} = 11,4^\circ\text{C}$ на холостом ходу ($\beta = 0$). Качественно подобный график изменения температуры обмоток и масла представлен в ГОСТ 14209-85, что демонстрирует адекватность предложенной модели. Существующие различия графиков обусловлены тем, что в ГОСТ 14209-85 не учитывается тепловая постоянная времени обмоток. В рассматриваемом примере эта постоянная приблизительно в 4 раза меньше тепловой постоянной времени масла и магнитопровода; в работах [1, 2] значение данной постоянной принято равным 5–10 мин.

Влияние коэффициента загрузки трансформатора β на установившееся значение температуры $\theta_{уст}$ элементов трансформатора показано на рис. 4. При низкой нагрузке $\theta_{уст.о} < \theta_{уст.с}$, с увеличением загрузки это соотношение изменяется на противоположное $\theta_{уст.о} > \theta_{уст.с}$ вследствие роста электрических потерь $P_{э} = \beta^2 P_{к}$. Равенство $\theta_{уст.о} = \theta_{уст.с}$ наступает раньше равенства электрических и магнитных потерь $\beta^2 P_{к} = P_{м}$ по причине более интенсивного теплообмена между маслом и магнитопроводом по сравнению с обмотками ($\alpha_{м.с} \cdot S_{м.с} > \alpha_{о.м} \cdot S_{о.м}$).

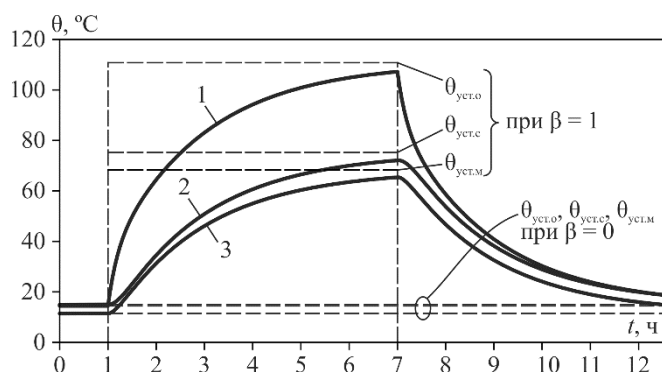


Рис. 3. Изменение температуры элементов рассматриваемого трансформатора при двухступенчатом прямоугольном графике нагрузки:

1 – обмотки, 2 – магнитопровод, 3 – трансформаторное масло

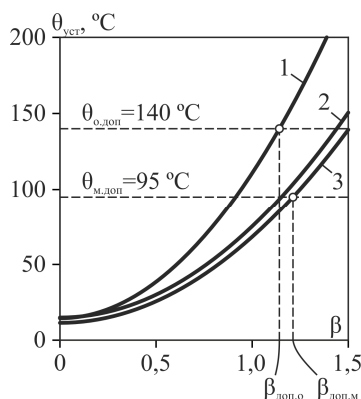


Рис. 4. Установившаяся температура $\theta_{уст}$ элементов

рассматриваемого трансформатора в зависимости от коэффициента загрузки при нулевой температуре окружающей среды ($\theta_{в} = 0^{\circ}\text{C}$):

1 – обмотки, 2 – магнитопровод, 3 – трансформаторное масло

Предложенная модель позволяет определить допустимость эксплуатации трансформатора при сохранении заданного уровня нагрузки и температуры окружающей среды $\theta_{в}$, что составляет практическую значимость работы. Так, если максимально допустимые стандартом значения температуры, составляющие 95°C для верхних слоев масла и 140°C для наиболее нагретой точки обмотки, соответствуют коэффициентам загрузки $\beta_{м.доп}$ и $\beta_{о.доп}$, рассчитываемым по уравнениям (5) и (6), то при температуре окружающей среды $\theta_{в} = 0^{\circ}\text{C}$ коэффициенты загрузки относятся как $\beta_{м.доп} > \beta_{о.доп}$. Значения коэффициентов загрузки $\beta_{м.доп}$ и $\beta_{о.доп}$ в зависимости от температуры окружающей среды $\theta_{в}$ показаны на рис. 5. Условием допустимости эксплуатации трансформатора при систематических перегрузках является такое ограничение коэффициента загрузки, при котором его значение не превышает минимальное из значений $\beta_{м.доп}$ и $\beta_{о.доп}$. Область значений β и $\theta_{в}$, в которой это условие выполняется, выделена штриховкой на рис. 5.

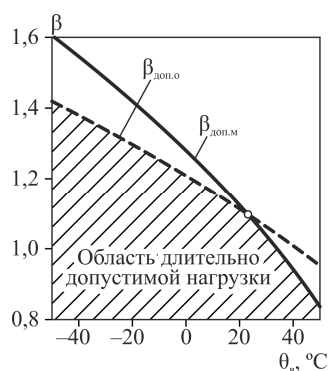


Рис. 5. Коэффициенты загрузки трансформатора $\beta_{\text{доп.о}}$ и $\beta_{\text{доп.м}}$, соответствующие максимально допустимой температуре обмоток $\theta_{\text{о.доп}} = 140^\circ\text{C}$ и масла $\theta_{\text{м.доп}} = 95^\circ\text{C}$ в зависимости от температуры окружающей среды $\theta_{\text{в}}$

Пример графика изменения температуры элементов трансформатора во времени в летний период показан на рис. 6, а и б. Значения рассчитаны при известном коэффициенте загрузки β и температуре окружающей среды $\theta_{\text{в}}$. Значения установившихся температур $\theta_{\text{уст}}$, которые имели бы место при сохраняющихся длительное время текущих уровнях температуры окружающей среды и коэффициенте загрузки, рассчитаны по уравнениям (4). На рис. 6, б представлены те же значения, но если коэффициент загрузки ограничен минимальным из значений $\beta_{\text{м.доп}}$ и $\beta_{\text{о.доп}}$, рассчитанным по уравнениям (5) и (6). В этом случае текущие значения температуры не превышают максимально допустимых значений 95 и 140°C .

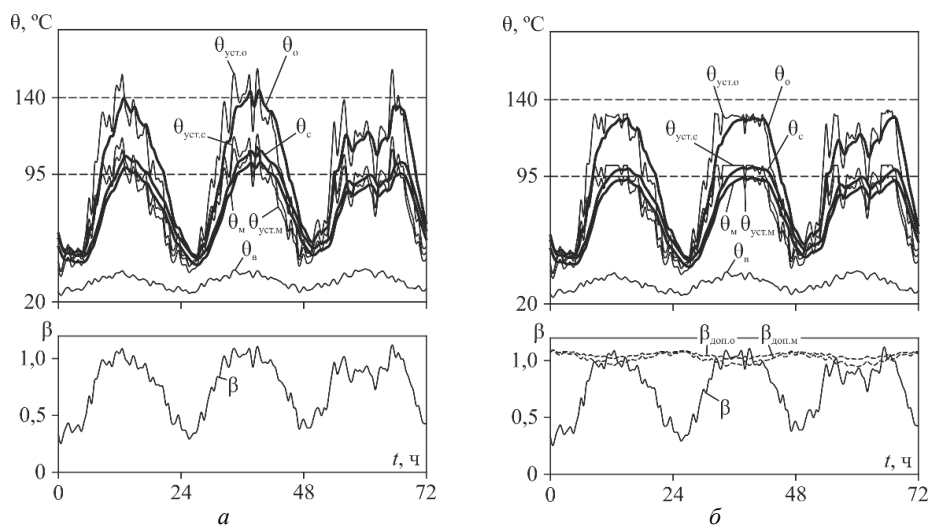


Рис. 6. Изменения температуры элементов трансформатора во времени в летний период при колебаниях температуры окружающей среды $\theta_{\text{в}}$ и коэффициентах загрузки трансформатора β :

а – без ограничения нагрузки;

б – при ограничении допустимой нагрузки β минимальным из значений $\beta_{\text{м.доп}}$ и $\beta_{\text{о.доп}}$

Несмотря на то, что практически осуществить точное ограничение коэффициента загрузки, представленное на рис. 6, б, практически невозможно, прогнозирование графика нагрузки и температуры окружающей среды позволяет заранее принимать меры для разгрузки трансформатора. В качестве прогнозных данных по температуре окружающей среды можно использовать метеоинформацию из открытых источников, а для предсказания нагрузки – статистические методы прогнозирования временных рядов или методы машинного обучения. Эти вопросы могут составлять перспективу дальнейших исследований по теме работы. Предложенную в работе математическую модель теплового режима трансформатора можно упростить путем пренебрежения инерционностью нагрева и охлаждения обмотки, а также рассматривать магнитопровод и масло совместно.

Выводы. 1. В работе предложена математическая модель теплового режима силового трансформатора как совокупности теплотехнически однородных элементов: магнитопровода и обмоток, находящихся в заполненном маслом баке.

2. На основе математической модели получены уравнения, позволяющие определять установившуюся температуру элементов трансформатора при заданном коэффициенте загрузки и температуре окружающей среды; а также максимально допустимый коэффициент загрузки с учетом ограничения температуры обмотки и масла и заданной температуры окружающей среды.

3. Получены формулы для определения объемов и площадей контакта поверхностей элементов трансформатора на основе расчетной схемы. Представлены соотношения, позволяющие приближенно определять эти величины в зависимости от номинальной мощности для геометрически подобных трансформаторов.

4. На примере трансформатора с естественным масляным охлаждением рассмотрено влияние коэффициентов теплоотдачи на установившуюся температуру элементов трансформатора и постоянную времени. Продемонстрировано, что наибольшее влияние на них оказывает величина коэффициента теплопередачи между наружной охлаждающей поверхностью трансформатора (бака и радиаторов) и окружающей средой.

5. Рассмотрено влияние коэффициента загрузки трансформатора на установившееся значение температуры элементов трансформатора и сформулировано условие допустимости эксплуатации трансформатора при сохранении заданного уровня нагрузки и температуры окружающей среды.

Литература

1. Анищенко В.А., Гороховик И.В. Влияние перегрузочной способности маслонаполненных трансформаторов на пропускную способность электрической сети // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 310–320.
2. Анищенко В.А., Иванов В.В. Определение допустимых систематических перегрузок распределительных масляных трансформаторов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 3. С. 5–15.
3. Зализный Д.И. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 кВ // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2001. № 3–4 (6). С. 51–60.

4. Зализный Д.И., Широков О.Г. Расчет температуры основных элементов силового масляного трансформатора на основе анализа температуры поверхности его бака // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2012. № 4. С. 18–28.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов: в 2 т. 3-е изд., стер. М.: ИД МЭИ, 2006. Т. 1. 652 с.
6. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / пер. с венгер., под ред. Г.Е. Тарле. (Трансформаторы. Вып. 36). М.: Энергия, 1980. 208 с.
7. Показатели деятельности. Производственный потенциал [Электронный ресурс] // ПАО «Россети Центр»: сайт. URL: <https://www.mrsk-1.ru/investors/indicators/production-potential/> (дата обращения: 06.12.2024).
8. Солдатов В.И., Зайчиков И.В., Лавров И.В. Метод прогнозирования теплового состояния силовых маслонаполненных трансформаторов в зависимости от температуры окружающей среды при постоянной эксплуатационной нагрузке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 9–1. С. 159–164.
9. Солдатов В.И., Зайчиков И.В., Лавров И.В. Расширение метода прогнозирования теплового состояния силовых маслонаполненных трансформаторов в зависимости от температуры окружающей среды и повышения нагрузки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 9–1. С. 165–170.
10. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
11. Факторы, влияющие на срок службы энергоэффективных трансформаторов / И.С. Снитко, А.И. Тихонов, А.В. Стулов, Н.Ю. Тумаков // Энергия единой сети. 2024. № 2(73). С. 54–60.
12. Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М. Параметрическая идентификация математической тепловой модели силового масляного трансформатора // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2005. № 1(26). С. 35–42.

ОРЛОВ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (a.i.orlov@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

БОРТНИК ДЕНИС ВАЛЕРЬЕВИЧ – ассистент кафедры электромеханики, аспирант кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (bortnik_denis16@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7010-8271>).

КАРПОВ ИЛЬЯ АЛЕКСЕЕВИЧ – аспирант кафедры электроснабжения и технической диагностики, Марийский государственный университет, Россия, Йошкар-Ола (ShumkenRP@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9768-9574>).

Alexander I. ORLOV, Denis V. BORTNIK, Ilya A. KARPOV
DETERMINATION OF THE PERMISSIBLE LONG-TERM LOAD
FOR POWER TRANSFORMERS

Key words: power transformer, permissible long-term load, thermal regime, Newton-Richmann equation, heat transfer coefficient.

The article addresses the problem of determining the permissible long-term load for power transformers while considering their thermal regime. The relevance of this work is due to the high level of physical wear and tear on transformer equipment and the need to improve its operational reliability. Exceeding the temperature of windings and oil accelerates insulation aging, necessitating the development of methods to predict the thermal state of transformers.

The purpose of this work is to develop a methodology for determining the permissible long-term load of a transformer depending on ambient temperature. The scientific novelty lies in the development of an approximate model of the thermal operating mode of a power transformer, allowing for the prediction of element temperatures and permissible loads.

Materials and methods. Research methods include mathematical modeling using Newton – Rikhsan equations to describe heat exchange between thermally homogeneous elements of the transformer. The fourth-order Runge – Kutta method with a time step of 30 seconds was used for numerical solution of the system of differential equations. Calculations were performed using author-developed programs in Python with Numpy and Matplotlib libraries. A comparative analysis of simulation results with experimental data from open sources and GOST 14209-85 requirements was conducted.

Results. A mathematical model is proposed, treating the transformer as a system of three thermally homogeneous elements – the core, windings, and oil – with heat exchange described by Newton – Rikhsan equations. Equations are obtained that make it possible to determine the steady-state temperature of transformer elements and the maximum allowable load factor, taking into account the limitation of the temperature of the winding and oil, the set ambient temperature and the load factor. Approximate formulas were obtained for determining the volumes and contact surface areas of transformer elements based on a calculation scheme. Ratios are presented that allow these values to be estimated approximately depending on the rated power for geometrically similar transformers. It was shown that the heat transfer coefficient between the oil and the environment has the greatest impact on the thermal regime. A condition for the permissible operation of the transformer was formulated, taking into account the required load level and ambient temperature. Simulation results were validated by comparison with experimental data.

Conclusions. A mathematical model of the transformer's thermal regime has been proposed, taking into account the inertia of temperature changes in its thermally homogeneous elements. The influence of the load factor and ambient temperature on the steady-state temperature values of the elements has been determined. A condition for the permissible operation of the transformer has been obtained, ensuring the limitation of winding and oil temperatures.

References

1. Anishchenko V.A., Gorokhovik I.V. *Vliyaniye peregruzochnoi sposobnosti maslonapolnennykh transformatorov na propusknyuyu sposobnost' elektricheskoi seti* [Influence of overload capacity of oil-filled transformers on the throughput of electric network]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 310–320.
2. Anishchenko V.A., Ivanov V.V. *Opreделение dopustimyykh sistemicheskikh peregruzok raspredelitel'nykh maslyanykh transformatorov* [Determination of permissible systematic overloads of distribution oil transformers]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2015, no. 3, pp. 5–15.
3. Zaliznyi D.I. *Ispol'zovanie teplovoi modeli dlya teoreticheskikh issledovaniy teplovykh protsessov v maslyanykh transformatorakh 10/0,4 kV* [Using a thermal model for theoretical studies of thermal processes in oil transformers 10/0.4 kV]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo*, 2001, no. 3–4 (6), pp. 51–60.
4. Zaliznyi D.I., Shirokov O.G. *Raschet temperatury osnovnykh elementov silovogo maslyanogo transformatora na osnove analiza temperatury poverkhnosti ego baka* [Calculation of the temperature of the main elements of a power oil transformer based on the analysis of the surface temperature of its tank]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 2012, no. 4, pp. 18–28.
5. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskie mashiny: v 2 t.* [Electrical Machines. 2 vols.]. Moscow, MEI Publishing House Publ., 2006, vol. 1, 652 p.
6. Kish L. *Nagytranszformatorok.* Müszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973. (Russ. ed.: *Nagrev i okhlazhdenie transformatorov.* Moscow, Energiya Publ., 1980, 208 p.)
7. *Pokazатели deyatel'nosti. Proizvodstvennyi potentsial.* PAO «Rosseti Tsentr» [Performance indicators. Production potential. PJSC "Rosseti Centre"]. Available at: <https://www.mrsk-1.ru/investors/indicators/production-potential/> (Accessed Date: 2024, Dec. 6).
8. Soldatov V.I., Zaichikov I.V., Lavrov I.V. *Metod prognozirovaniya teplovogo sostoyaniya silovykh maslonapolnennykh transformatorov v zavisimosti ot temperatury okruzhayushchei sredy pri postoyannoi ekspluatatsionnoi nagruzke* [Method for predicting the thermal state of power oil-filled

transformers depending on ambient temperature at constant operational load]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 9–1, pp. 159–164.

9. Soldatov V.I., Zaichikov I.V., Lavrov I.V. *Rasshirenie metoda prognozirovaniya teplovogo sostoyaniya silovykh maslonapolnennykh transformatorov v zavisimosti ot temperatury okruzhayushchei sredy i povysheniya nagruzki* [Expansion of the method for predicting the thermal state of power oil-filled transformers depending on ambient temperature and increased load]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 9–1, pp. 165–170.

10. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* [Transformer Calculations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 528 p.

11. Snit'ko I.S., Tikhonov A.I., Stulov A.V., Tumakov N.Yu. *Faktory, vliyayushchie na srok sluzhby energoeffektivnykh transformatorov* [Factors affecting the service life of energy-efficient transformers]. *Energiya edinoy seti*, 2024, no. 2(73), pp. 54–60.

12. Shirokov O.G., Zaliznyi D.I., Los' D.M. *Parametricheskaya identifikatsiya matematicheskoi teplovoi modeli silovogo maslyanogo transformatora* [Parametric identification of the mathematical thermal model of a power oil transformer]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo*, 2005, no. 1(26), pp. 35–42.

ALEXANDER I. ORLOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electromechanics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (a.i.orlov@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1152-6668>).

DENIS V. BORTNIK – Assistant Lecturer, Department of Electromechanics, Post-Graduate Student, Department of Power Supply and Technical Diagnostics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (bortnik_denis16@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7010-8271>).

ILYA A. KARPOV – Post-Graduate Student, Department of Power Supply and Technical Diagnostics, Mari State University, Russia, Yoshkar-Ola (ShumkenRP@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9768-9574>).

Формат цитирования: Орлов А.И., Бортник Д.В., Карпов И.А. Определение допустимой длительной нагрузки силовых трансформаторов // Вестник Чувашского университета. 2025. № 2. С. 97–111. DOI: 10.47026/1810-1909-2025-2-97-111.