

ЭНЕРГЕТИКА
POWER ENGINEERING

Сериков А.В., Герасименко Т.В.
A.V. Serikov, T.V. Gerasimenko

**ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В БЫТОВОМ ЭЛЕКТРОРАДИАТОРЕ
ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА**

THERMAL PROCESSES IN A TRANSFORMER TYPE HOUSEHOLD HEATER



Сериков Александр Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.

Mr.Alexander V.Serikov — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Electro Technical Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru.



Герасименко Татьяна Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.

Ms.Tatiana V.Gerasimenko — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Electro Technical Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация: Приведена конструкция электрорадиатора трансформаторного типа. Рассмотрены особенности и результаты моделирования теплового поля. Предложена методика теплового расчета для инженерного проектирования таких устройств. Показаны сравнительные результаты тепловых расчетов и испытаний макетного образца.

Summary: The paper presents the design of a transformer-type household heater. Properties of its thermal field are considered and the results of modeling presented. A procedure for heat calculation for the engineering design of such devices is offered. Comparative results of thermal calculations and tests of a prototype are given.

Ключевые слова: электрорадиатор трансформаторного типа, тепловой расчет, макетный образец, испытания.

Keywords: transformer type electrical heater, thermal calculation, prototype, test.

УДК 621.356 : 621.314.2

Электрорадиаторы трансформаторного типа по сравнению с традиционными электроотопительными приборами, имеющими в качестве нагревательных элементов открытые спирали или трубчатые электронагреватели (ТЭН), имеют более высокий класс электро- и пожаробезопасности и значительно долговечнее их, хотя немного уступают им по стоимости [2]. По сравнению с маслонаполненными электрорадиаторами, они обладают примерно одинаковыми массогабаритными показателями и стоимостью, но менее пожароопасны, более долговечны, а также имеют меньшую тепловую инерцию.

Электрорадиаторы трансформаторного типа представляют собой трансформатор с короткозамкнутым вторичным контуром (обмоткой), не имеющим ни электрической, ни тепловой изоляции. Первичная обмотка включается в сеть. Электродвижущая сила вторичного контура настолько мала (менее 2 В), что опасность поражения электрическим током отсутствует. Основная часть тепла выделяется во вторичном контуре. Для улучшения теплоотдачи вторичный контур имеет весьма большую площадь поверхности.

Основными частями рассматриваемого электроотопительного устройства (см. рис. 1, а) являются индуктор 1 и вторичный короткозамкнутый контур, состоящий из электропроводящего листа 2 с отверстиями 3 для циркуляции воздуха. Края листа, изогнутого в П-образную форму, соединяются между собой посредством торцевых переходных элементов 4 и центральной трубки 5, выполненных также из электропроводящих материалов.

Индуктор однофазных нагревательных элементов трансформаторного типа (см. рис. 1, б) состоит из замкнутого шихтованного ферромагнитного сердечника 1 и первичной обмотки 2, охватывающей сердечник. Для обеспечения высокой степени электробезопасности индуктор помещается в электроизоляционный кожух и заливается компаундом. Тороидальная конструкция магнитной системы индуктора позволяет существенно уменьшить магнитное поле рассеяния, а также избежать стыковых соединений участков магнитопровода, следовательно, уменьшить потери, величину намагничивающего тока, повысить коэффициент полезного действия и коэффициент мощности нагревательного элемента. Первичная обмотка нагревательного элемента выполняется из медного или алюминиевого изолированного провода круглого сечения, равномерно намотанного на сердечник 1.

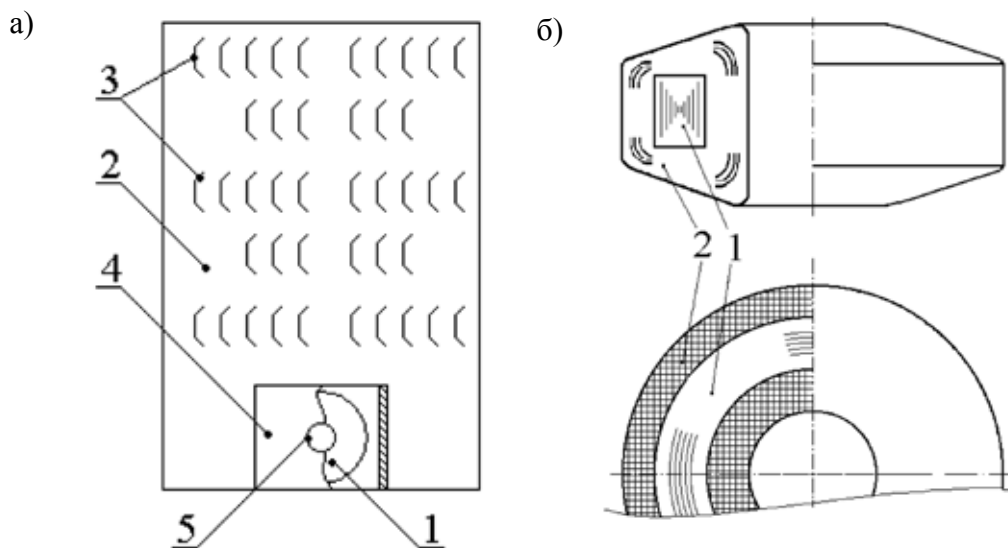


Рис. 1. Электрорадиатор трансформаторного типа (а) и однофазный тороидальный индуктор (б)

Одной из важных задач при проектировании электронагревательных устройств является анализ их теплового состояния, который позволяет решить следующие вопросы: анализ распределения температуры внутри нагревательного элемента; правильность выбора электромагнитных нагрузок; анализ распределения температуры и тепловых потоков с целью выработки рекомендаций по выбору электромагнитных нагрузок, оптимизации конструкции и т.п. Кроме этого величины температур различных частей бытового электроотопительного прибора должны удовлетворять требованиям стандарта [1].

Целью работы является моделирование теплового поля электрорадиатора трансформаторного типа, разработка рекомендаций для инженерных расчётов теплового состояния прибора и экспериментальное подтверждение правильности расчетов.

Наибольший интерес и важность представляет распределение температурного поля в тороидальном индукторе, поэтому область исследования определяется исходя из особенностей его конструкции. Расчет теплового поля индуктора проводился методом конечных элементов.

Так как максимальные температуры прибора будут иметь место в установившемся режиме работы, то целесообразно рассматривать этот режим, тепловое поле в котором является стационарным. Учитывая особенности тороидальной конструкции индуктора и приняв в рассмотрение лишь часть торцевого переходного элемента, представляющего собой круг диаметром, равным диаметру индуктора, расчёт производился в цилиндрической системе координат (r, z, φ) при следующих допущениях:

1) температурное поле осесимметрично $(\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0)$, что обосновывается

симметричностью конструкции, распределением потерь мощности и расположением поверхностей охлаждения;

2) условиями симметрии на поверхности являются однородные граничные условия второго рода $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$, где n – внешняя нормаль к границе;

3) область исследования кусочно-однородна, а коэффициенты теплопроводности материалов и мощность источников тепла не зависят от температуры;

4) главные оси анизотропии сред совпадают с осями координат r и z .

Область исследования имеет вид, изображенный на рис. 2.

С учетом принятых допущений температурное поле описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + p_0 = 0,$$

где T – температура, °С; λ_r, λ_z – коэффициенты теплопроводности сред по осям r и z соответственно, Вт/(м·°С); p_0 – удельная мощность источников тепла, Вт/м³.

На внешних поверхностях индуктора и вторичного контура будут выполняться граничные условия конвективной теплоотдачи в воздух и условия теплоотдачи излучением:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{\text{нов1}} = - \frac{\alpha_{\text{л}}(T_{\text{нов1}} - T_{\text{нов2}}) + \alpha_{\text{к}}(T_{\text{нов1}} - T_o)}{\lambda_n},$$

где λ_n – коэффициент теплопроводности в направлении нормали, Вт/(м·°С); $T_{\text{нов1}}$ – температура на граничной поверхности, °С; $T_{\text{нов2}}$ – температура поверхности, которая принимает излучение, °С; T_o – температура воздуха на достаточном удалении от граничной поверхности, °С; $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·°С); $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°С).

В рассматриваемой области тепловое излучение происходит между всеми нагретыми поверхностями. Лист вторичного контура и торцевые переходные элементы своими внешними поверхностями излучают в открытое пространство, а внутренними сторонами обмениваются излучением с кожухом индуктора и стержнем (см. рис. 2). Для упрощения рассматриваются тепловые излучения, которые существенно влияют на распределение температурного поля.

Коэффициенты теплоотдачи излучением на каждом шаге находим по формуле [3], Вт/(м²·°С)

$$\alpha_{л} = \frac{5,76\varepsilon_{12}}{T_{нов1} - T_{нов2}} \left[\left(\frac{T_{нов1} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{нов2} + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где ε_{12} – приведенная степень черноты.

Приведенную степень черноты вычисляем по формуле

$$\varepsilon_{12} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} \right) \right)^{-1},$$

где ε_1 – степень черноты одного из тел, участвующих в излучении (тело, для которого идет расчет $\alpha_{л}$); ε_2 – степень черноты второго тела, участвующего в излучении; S_1 – площадь поверхности первого тела, м²; S_2 – площадь поверхности второго тела, м².

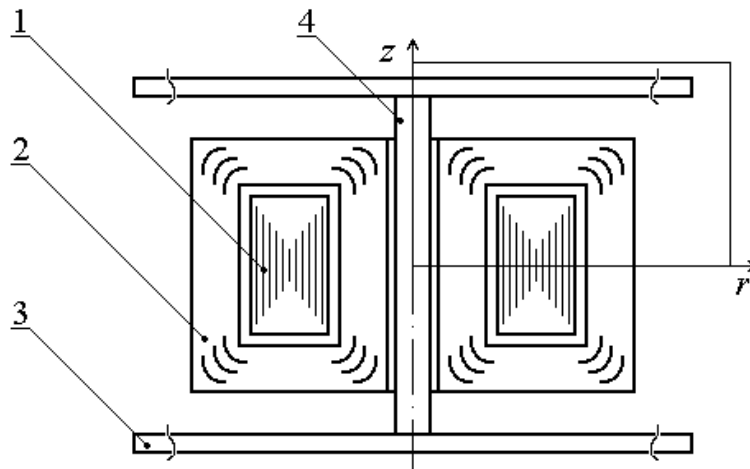


Рис. 2. Область исследования температурного поля:
 1 – магнитопровод; 2 – первичная обмотка; 3 – торцевые переходные элементы; 4 – центральная трубка

Для вычисления коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции необходимо определить характер развития пограничного слоя теплоотдающих поверхностей. В работе вид режима естественной конвекции не определялся. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи производился по формулам для различных видов течения и выбирался из результатов наибольший [3]. Использовались следующие формулы для различных режимов:

а) для пленочного режима

$$\alpha_{к} = \frac{A_0}{100 \cdot l};$$

б) для слабого ламинарного течения

$$\alpha_{к} = A_1 \sqrt[8]{\frac{\Delta T}{l^5}};$$

в) для ламинарного режима

$$\alpha_{к} = A_2 \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{l}};$$

г) для турбулентного режима

$$\alpha_{к} = A_3 \sqrt[3]{\Delta T},$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – коэффициенты для различных режимов, зависящие от температуры пограничного слоя; l – характерный размер, м; ΔT – перепад температуры между поверхностью и воздухом на достаточном удалении, °С.

Еще одно допущение, упрощающее расчет, заключается в том, что воздушный зазор между стержнем вторичного контура и кожухом индуктора считается твердым слоем с эквивалентной теплопроводностью.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности воздушного слоя, который считается по допущению твердым слоем, определяется по формуле, Вт/(м·°С):

$$\lambda_{\text{эkv}} = 0,18\lambda_b (\text{Pr} \cdot \text{Gr})^{0,25},$$

где λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С); Pr – критерий Прандтля; Gr – критерий Грасгофа.

Расчет теплового поля производится методом конечных элементов.

Так как распределение температурного поля однотипно для всего ряда мощностей, то рассмотрим результаты моделирования для мощности 650 Вт. На графике (см. рис. 3) проиллюстрировано распределение температуры в расчетной области по оси симметрии ($z = 0$).

Анализируя результаты расчета теплового поля, можно сделать следующие выводы:

- распределение температуры в сечении нагревательного элемента трансформаторного типа происходит крайне неравномерно. Равномерное распределение температуры можно наблюдать лишь в стержне вторичного контура, в торцевых переходных элементах вторичного контура происходит постепенное уменьшение температуры от центра элемента к краю;

- в индукторе распределение температуры неравномерное и максимальные значения наблюдаются в источниках тепла (сердечник и внутренняя часть первичной обмотки). Наибольший перепад температуры (до 50 °С) наблюдается в зазоре между индуктором и стержнем вторичного контура.

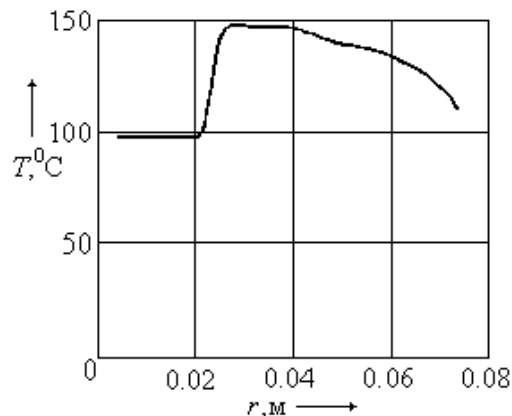


Рис. 3. Распределение температуры вдоль оси r при $z = 0$

Оценить тепловое состояние индуктора при инженерных расчетах электрорадиаторов трансформаторного типа рекомендуется с помощью следующей методики.

Площадь поверхности охлаждения индуктора, м²:

$$S_{o1} = \pi \cdot D_n \cdot B_z + 0,5 \cdot \pi \cdot (D_n^2 - D_e^2),$$

где D_n – наружный диаметр индуктора (кожуха), м; B_z – высота индуктора (кожуха), м; D_e – диаметр окна (внутренний диаметр) индуктора, м.

Средний коэффициент теплоотдачи с поверхности индуктора, Вт/(м²·°С):

$$\alpha_{и} = 1,3 \cdot 4 \sqrt{\frac{0,92(T_p - T_o)}{D_n}} + 10 \cdot \frac{0,92 \cdot T_p - 85}{0,92 \cdot T_p - 20},$$

где T_p, T_o – рабочая температура обмотки и температура окружающей среды соответственно, °С.

Перепад температуры на поверхности индуктора, °С:

$$\Delta T_1 = \frac{P_u}{\alpha_u \cdot S_{o1}},$$

где p_u – полная мощность тепловыделений в индукторе, Вт.

Перепад температуры в кожухе, °С:

$$\Delta T_2 = \frac{1,2 \cdot \delta_k \cdot p_u}{\lambda_k \cdot S_{o1}},$$

где δ_k – толщина кожуха индуктора, м; λ_k – коэффициент теплопроводности кожуха, Вт/(м·°С).

Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки поперек витков, Вт/(м·°С):

$$\lambda_o = 0,35 \sqrt{\frac{d}{1,3d_i - d}},$$

где d, d_i – диаметры неизолированного и изолированного провода соответственно, м.

Перепад температуры в обмотке, °С:

$$\Delta T_3 = \frac{(A_e + A_n) \cdot p_{и}}{6 \cdot \lambda_o \cdot S_{o1}},$$

где A_e, A_n – толщина обмотки по внутреннему и наружному диаметру соответственно, м.

Средняя температура обмотки, °С:

$$T_{ов} = T_o + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3.$$

Одним из основных технических требований, предъявляемых к бытовым электрорадиаторам, является величина температуры внешней поверхности корпуса [1], которая в условиях нормальной эксплуатации не должна превышать температуру окружающего воздуха более чем на 85 °С. Исходя из гигиенических условий, температура корпуса электрорадиатора, предназначенного для дополнительного отопления жилых помещений, не должна превышать 95 °С, а для детских и лечебных учреждений – 85 °С. Корпусом в электрорадиаторе трансформаторного типа является вторичный контур. Оценить его тепловое состояние можно по известным методикам [3] в следующей последовательности.

Площадь поверхности излучения корпуса, м²:

$$S_l = 2(L_k H_k + L_k B_k + H_k B_k),$$

где L_k, H_k, B_k – длина, высота и ширина корпуса соответственно, м.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·°С):

$$\alpha_k = 1,47 \cdot \sqrt[3]{(T_k - T_o)},$$

где T_k – средняя температура корпуса, °С.

Полный средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С):

$$\alpha = \alpha_k + \frac{S_l}{S_0} \alpha_l,$$

где S_0 – полная площадь теплоотдачи корпуса, м².

Средняя температура вторичного контура, °С:

$$T_2 = T_o + \frac{P_2}{\alpha \cdot S_0},$$

где P_2 – мощность вторичного контура, Вт

Для подтверждения правильности теоретических выводов создан макетный образец электрорадиатора трансформаторного типа мощностью 650 Вт (см. рис. 4). Кольцевой сердечник индуктора изготовлен из холоднокатаной электротехнической стали марки 3404 с толщиной листа 0,35 мм. На сердечнике равномерно намотана первичная обмотка из медного провода марки ПЭТ-155, которая имеет 524 витка. Между первичной обмоткой и магнитопроводом размещены термодатчики (термопара типа ТХК) для контроля температуры. Также термодатчики расположены на внешней и внутренней поверхностях кольцевого индуктора. Вся конструкция заливается компаундом с высоким коэффициентом теплопроводности и закрывается электроизоляционным кожухом из эпоксидного пресс-материала ВГС-Э. В центральном отверстии кожуха размещается короткозамыкающая трубка из алюминия марки АД0, которая приваривается к торцевым переходным элементам, а те, в свою очередь, к краям листа из алюминиевого сплава марки АМг5М, который является тепловыделяющим корпусом.



Рис. 4. Макетный образец электрорадиатора трансформаторного типа

Измерение температуры производилось после прогрева электрорадиатора в течение одного часа с помощью термопары (хромель-алюмель с коэффициентом $\kappa = 0,041 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$) с припаянным на конце медным диском диаметром 5 мм. Термо-ЭДС снималась вольтметром В7-22А. Результаты замеров показаны на рис. 5, а.

Проведенные испытания дали следующие результаты:

- время выхода электрорадиатора на установившийся режим из холодного состояния составило 9 мин;
- максимальная температура вторичного контура 80°C наблюдается в зоне сварного шва между листом корпуса и переходным элементом;
- средний коэффициент теплоотдачи с поверхности листа вторичного контура составил $\alpha \approx 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
- коэффициент мощности 0,98;

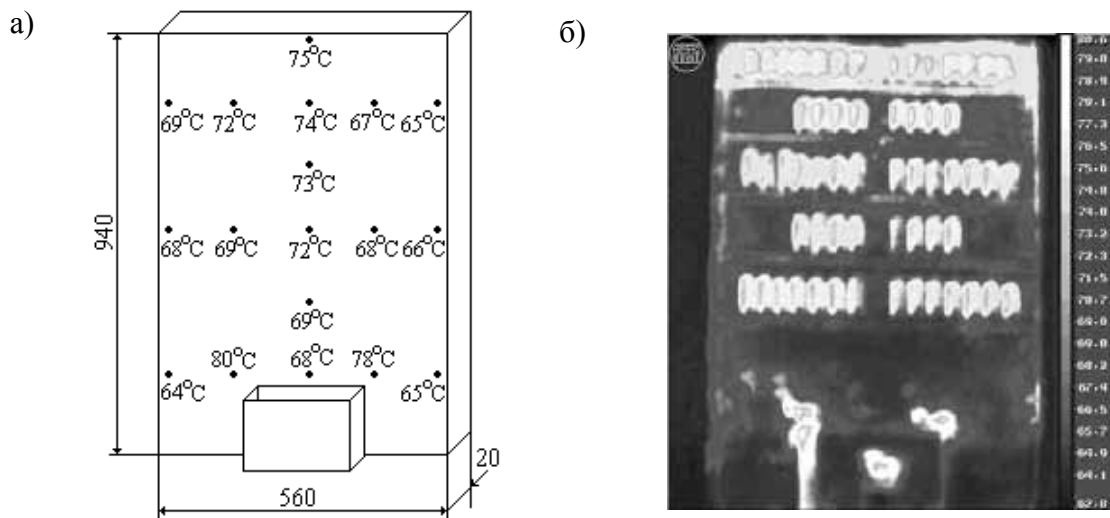


Рис. 5. Результаты замера температур термопарой (а) и термографом (б)

– ЭДС вторичного контура 0,42 В, что значительно меньше допустимого по условиям безопасности напряжения прикосновения 2 В.

Для исследования температурного поля макетного образца применялся портативный компьютерный термограф ИРТИС-2000 (оптико-механический сканирующий инфракрасный прибор для визуализации и измерения тепловых полей). Картина температурного поля представлена на рис. 5, б.

По результатам расчётов и испытаний макетного образца получены сравнительные данные, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные результаты расчетов и эксперимента

Метод определения	Температура (максимальная), °С		
	Первичная обмотка	Магнитопровод	Вторичный контур
Расчет теплового поля методом конечных элементов	136 (149)	140 (147)	–
Тепловой расчет по схеме замещения	142	143	70
Эксперимент методом термопар	145	146	71 (80)
Эксперимент ИРТИС-2000	–	–	69 (79)

Таким образом, результаты испытаний макетного образца полностью подтвердили правильность выполненных расчётов температурного поля и адекватность разработанной инженерной методики теплового расчёта индуктора и вторичного контура с помощью схемы замещения. Предложенную методику целесообразно использовать для оценки теплового состояния при проектировании бытовых электрорадиаторов трансформаторного типа дополнительного обогрева с короткозамкнутой вторичной обмоткой, играющей роль тепловыделяющего элемента.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 16617-87. Электроприборы отопительные бытовые. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 308-78, ГОСТ 16617-80, ГОСТ 18476-81; Введ. 05.10.87. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 28с.
- Кузьмин, В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа / В.М. Кузьмин. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 144 с.
- Сипайлов, Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учебник для вузов / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 238 с.