

УДК 621.316.543

А. В. Близняков, В. М. Кораблев

## Анализ установившегося теплового режима токоведущего контура избирателя устройства регулирования напряжения трансформатора

*Выполнен анализ установившегося теплового режима токоведущего контура избирателя устройства регулирования напряжения трансформатора, на основе которого разработана программа для персонального компьютера, позволяющая рассчитать установившиеся температуры в узловых точках.*

Одним из серьезных требований, предъявляемых к токоведущим системам силовых элементов распределительных устройств электрических станций и подстанций (токопроводов, ошиновки, силовых и измерительных трансформаторов, коммутационных аппаратов и т. д.), является надежная работа при длительном протекании номинального тока. Известно, что проверка данного требования осуществляется проведением соответствующих периодических и типовых испытаний. Испытания на нагрев токоведущих систем в номинальном режиме проводятся также и на этапах научно-исследовательской и опытно-конструкторской разработки. При этом следует отметить, что на данных этапах эти испытания проводятся обычно многократно при внесении изменений в конструкцию токоведущей системы, что влечет за собой ощутимые затраты времени и энергоресурсов. Поэтому весьма полезным может быть разумное сочетание испытаний с проведением поверочных расчетов по уточненным методикам, которые в максимальной степени учитывали бы особенности конструкции разрабатываемой токоведущей системы и условий охлаждения на ее различных участках.

Существуют классические методы анализа теплового режима токоведущих систем. Одним из них является анализ установившихся и неуставившихся тепловых режимов однородных (с идентичными по всей длине условиями теплообмена) токопроводов [1]. Другим методом является использование результатов решения классической задачи нагрева одинаковых полубесконечных стержней, контактирующих по торцевым поверхностям [2]. В данном случае рассматривается идеализированная симметричная (относительно контакта) токоведущая система. Применение данного подхода может быть использовано лишь для токоведущих систем с относительно простой структурой. Существуют также некоторые варианты расчета неоднородных в тепловом отношении токоведущих систем [3]. В них рассматриваются ряд конкретных задач анализа теплового режима токоведущих систем, не содержащих контактов. Последний подход не дает возможности выполнить даже приближенный качественный анализ теплового режима сложной токоведущей системы. Известны также методы анализа относительно сложных в тепловом отношении структур – радиоэлектронных устройств [4]. Однако,

© А. В. Близняков, В. М. Кораблев 2009 г.

такие подходы совершенно неприемлемы для токоведущих систем. В новых изданиях научно-технической литературы (например, в [5]), рассматриваются задачи анализа установившихся и неуставившихся тепловых режимов элементов электрических аппаратов. Однако, при этом следует отметить, что новые в принципиальном плане подходы к решению задачи анализа теплового режима сложных неоднородных токоведущих систем в этих новых изданиях не содержатся. Существует также методика анализа тепловых режимов сложных, неоднородных токоведущих систем, содержащих токопроводы с различными условиями охлаждения, контакты, силовые полупроводниковые приборы и т. п. [7]. Однако, в ней предлагается лишь принципиальный подход к решению подобного рода задач.

Целью данного исследования является создание методики анализа установившихся тепловых режимов, которая бы в максимальной степени учитывала конструктивные особенности токоведущих систем и позволяла разработку тепловых моделей сложных неоднородных токоведущих систем.

Классическим примером сложной и неоднородной в тепловом отношении токоведущей системы является токоведущий контур устройств регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой (устройства РПН) серии РНТА [6]. Он содержит, как правило, разнообразные токоведущие элементы, в том числе – контакт-детали, имеющие зачастую сложную геометрическую форму и абсолютно разные (в том числе и значительно ухудшенные) условия охлаждения. Токоведущий контур устройства РПН содержит также коммутирующие контакты и контактные соединения, являющиеся дополнительными источниками тепла. Характерным примером токоведущего контура устройства РПН серии РНТА является ламельный контактный узел избирателя, показанный на рис. 1. Он содержит следующие основные элементы: ламели 1; неподвижный контакт 2, закрепленный на изоляционной стойке 4, к которому подключается токопровод 5, соединяющий избиратель устройства РПН с отпайками обмотки трансформатора; токосъемное кольцо 6, закрепленное на изоляционном цилиндре 7, к которому подключается токопровод 8, соединяющий избиратель с контактором.

Очевидно, что представленный токоведущий кон-

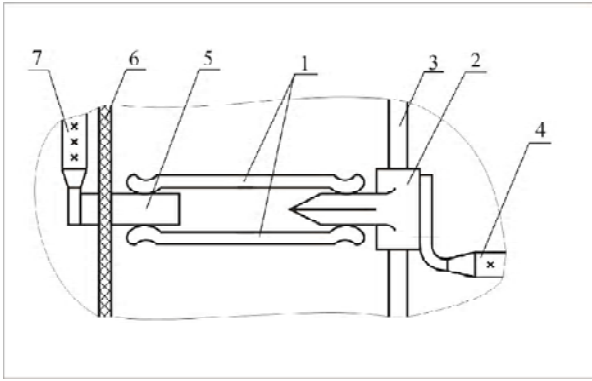


Рис. 1. Токоведущий контур избирателя устройства РПН

тур имеет неоднородную и довольно сложную структуру, в которой различные его участки имеют совершенно разные параметры, а именно: во-первых, различную геометрическую конфигурацию; во-вторых, разный материал, из которого изготовлены их детали; в-третьих, различную плотность тока; в-четвертых, совершенно разные условия теплообмена с окружающей средой. Поэтому для таких контактных систем применять классические подходы для анализа установившегося теплового режима можно лишь в предварительных проектных расчетах. Анализ теплового режима таких токоведущих систем с учетом их конструктивных особенностей представляет собой достаточно сложную задачу, что связано с происходящими сложными и разнообразными процессами теплообмена токоведущих элементов с окружающей средой, а также – между отдельными элементами токоведущего контура (вследствие присутствия уравнивающих тепловых потоков).

Наиболее приемлемый подход к решению поставленной задачи базируется на методике, представленной в [7]. В соответствии с ней неоднородный токоведущий контур избирателя (рис. 1) по длине пути протекания тока нагрузки разбивается на ряд участков, имеющих однородную геометрическую конфигурацию и материал, неизменную плотность тока и однородные условия теплообмена с окружающей средой. По результатам такого разбиения составляется тепловая схема замещения, показанная на рис. 2.

Представленная схема замещения состоит из нескольких участков, представляющих собой однородные элементы (токопроводы):

- 1 – токопровод, соединяющий избиратель с контактором 7 (рис. 1); в данном случае он представляется как полубесконечный токопровод;
- 4 – токосъемное кольцо 5 (рис. 1);
- 7 – ламели 1 (рис. 1);
- 10 – неподвижный контакт 2 (рис. 1); участки 7, 10 и 13 представляются как токопроводы, имеющие определенную (конечную) длину;
- 13 – токопровод, соединяющий избиратель с трансформатором 4 (рис. 1), представляется полубесконечным токопроводом.

Схема замещения на рис. 2 содержит также коммутрующие контакты и контактные соединения, представленные областями стягивания контактов, отображенные сферическими моделями:

- 2–3 – контактное соединение между участками 1 и 4;
- 5–6 – скользящий контакт между участками 4 и 7;
- 8–9 – коммутрующий контакт между участками 7 и 10;

- 11–12 – контактное соединение между участками 10 и 13;

$\tau_1 - \tau_8$  – превышения температур в узловых точках токоведущего контура (т. е. на границах участков и областей стягивания).

Решение задачи основывается на условиях непрерывности температурного поля, для реализации которых необходимо получить зависимости для тепловых потоков на границах участков и областей стягивания контактов в виде [7]:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1(0) &= a_1 \lambda_1 q_1 (\tau_1 - \tau_{y1}); \\ \Phi_2(\infty) &= s_2 - s_{23} (\tau_1 - \tau_2); \\ \Phi_3(\infty) &= s_3 + s_{23} (\tau_1 - \tau_2); \\ \Phi_4(0) &= u_4 \tau_2 - v_4 \tau_3 + s_4; \\ \Phi_4(l_4) &= u_4 \tau_2 + v_4 \tau_3 - s_4; \\ \Phi_5(\infty) &= s_5 - s_{56} (\tau_3 - \tau_4); \\ \Phi_6(\infty) &= s_6 + s_{56} (\tau_3 - \tau_4); \\ \Phi_7(0) &= u_7 \tau_4 - v_7 \tau_5 + s_7; \\ \Phi_7(l_7) &= u_7 \tau_4 + v_7 \tau_5 - s_7; \\ \Phi_8(\infty) &= s_8 - s_{89} (\tau_5 - \tau_6); \\ \Phi_9(\infty) &= s_9 + s_{89} (\tau_5 - \tau_6); \\ \Phi_{10}(0) &= u_{10} \tau_6 - v_{10} \tau_7 + s_{10}; \\ \Phi_{10}(l_{10}) &= u_{10} \tau_6 + v_{10} \tau_7 - s_{10}; \\ \Phi_{11}(\infty) &= s_{11} - s_{11-12} (\tau_7 - \tau_8); \\ \Phi_{12}(\infty) &= s_{12} + s_{11-12} (\tau_7 - \tau_8); \\ \Phi_{13}(0) &= a_{13} \lambda_{13} q_{13} (\tau_8 - \tau_{y13}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В представленных выражениях индексы при тепловых потоках и параметрах:  $u, v, s$ , – обозначают номер участка или области стягивания на схеме замещения на рис. 2.

Зависимости, определяющие параметры для областей стягивания, имеют следующий вид [7]:

$$\left. \begin{aligned} s_i &= \frac{I^2 R_{k,i,i+1}}{\lambda_i + \lambda_{i+1}} \lambda_i (1 - \lambda_{i+1} G_i) \\ s_{i+1} &= \frac{I^2 R_{k,i,i+1}}{\lambda_i + \lambda_{i+1}} \lambda_{i+1} (1 + \lambda_i G_i) \\ s_{i,i+1} &= \frac{\lambda_i \lambda_{i+1} (\rho_i + \rho_{i+1})}{R_{k,i,i+1} (\lambda_i + \lambda_{i+1})} \\ G_i &= \frac{1}{2(\rho_i + \rho_{i+1})} \left( \frac{\rho_{i+1}}{\lambda_{i+1}} - \frac{\rho_i}{\lambda_i} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

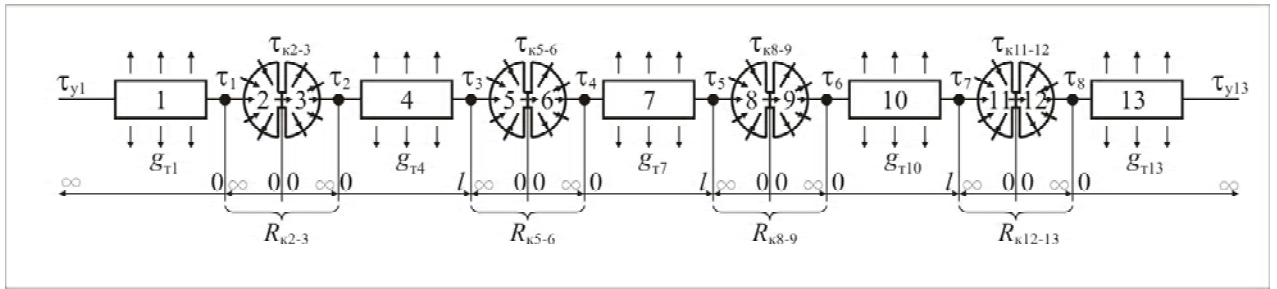


Рис. 2. Тепловая схема замещения токоведущего контура избирателя

где  $i = 2, 5, 8, 11$ .

Параметры токопроводов определяются из соотношений [7]:

$$\left. \begin{aligned} u_i &= a_i \lambda_i q_i \frac{ch(a_i l_i)}{sh(a_i l_i)} \\ v_i &= \frac{a_i \lambda_i q_i}{sh(a_i l_i)} \\ s_i &= \tau_{yi} (v_i - u_i) \end{aligned} \right\},$$

где  $i = 4, 7, 10$ ;

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \sqrt{\frac{1}{\lambda_i q_i} \left( g_{тi} - \frac{I^2 \rho_{0i} \alpha_i}{q_i} \right)} \\ \tau_{yi} &= \frac{I^2 \rho_{0i} (1 + \alpha_i \vartheta_0)}{g_{тi} q_i - I^2 \rho_{0i} \alpha_i} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $i = 1, 4, 7, 10, 13$ ;

$I$  – ток нагрузки, длительно протекающий в токоведущем контуре;

$\vartheta_0$  – температура охлаждающей среды;

$R_{кi,i+1}$  – переходное контактное сопротивление областей стягивания с индексами, соответствующими зависимостям (2);

$\lambda_i, \rho_{0i}, \alpha_i$  – соответственно коэффициент теплопроводности, удельное электрическое сопротивление и температурный коэффициент сопротивления материала  $i$ -го участка токоведущего контура;

$g_{тi}$  – удельная тепловая проводимость с поверхности  $i$ -го участка ( $i = 1, 4, 7, 10, 13$ );

$q_i$  – поперечное сечение  $i$ -го участка ( $i = 1, 4, 7, 10, 13$ );

$l_i$  – длина  $i$ -го участка ( $i = 4, 7, 10$ ).

Пользуясь условиями непрерывности температурного поля на границах участков и областей стягивания контактов:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1(0) &= \Phi_2(\infty); \Phi_3(\infty) = \Phi_4(0); \\ \Phi_4(l_4) &= -\Phi_5(\infty); \Phi_6(\infty) = \Phi_7(0); \\ \Phi_7(l_7) &= -\Phi_8(\infty); \Phi_9(\infty) = \Phi_{10}(0); \\ \Phi_{10}(l_{10}) &= -\Phi_{11}(\infty); \Phi_{12}(\infty) = \Phi_{13}(0) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

получим систему линейных алгебраических уравнений трехдиагонального типа:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} \tau_1 + a_{12} \tau_2 &= b_1 \\ a_{21} \tau_1 + a_{22} \tau_2 + a_{23} \tau_3 &= b_2 \\ \dots & \\ a_{76} \tau_6 + a_{77} \tau_7 + a_{78} \tau_8 &= b_7 \\ a_{87} \tau_7 + a_{88} \tau_8 &= b_8 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= a_1 \lambda_1 q_1 + s_{23}; \quad a_{12} = -s_{23}; \\ b_1 &= s_2 + a_1 \lambda_1 q_1; \\ a_{21} &= s_{23}; \quad a_{22} = -s_{23} - u_4; \quad a_{23} = u_4 \\ b_2 &= s_4 - s_3; \\ \dots & \\ a_{87} &= s_{11-12}; \quad a_{88} = -s_{11-12} - a_{13} \lambda_{13} q_{31}; \\ b_8 &= s_{12} - a_{13} \lambda_{13} q_{31}. \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Из решения полученной системы находятся искомые превышения температур в узловых точках (т. е. – на границах участков и областей стягивания). На основе описанной методики разработана компьютерная программа «Точный нагрев», реализующая решение задачи по определению установившегося теплового режима токоведущего контура. Указанное решение осуществляется следующими последовательными приближениями:

1) задаются начальные превышения температур в узловых точках (т. е. на границах участков  $\tau_i$ );

2) рассчитываются суммарные коэффициенты теплоотдачи и соответствующие удельные проводимости  $g_{\tau_i}$  с поверхности токопроводов;

3) решается система уравнений (5) и определяются новые приближения превышений температур на границах участков  $\tau_i$  (которые сравниваются с предыдущими);

4) если разница между новым и предыдущим приближением больше заданного значения, определяющего точность расчета, то повторяются расчеты  $g_{\tau_i}$  и нахождение решения системы уравнений с получением нового приближения  $\tau_i$ ; если разница меньше указанного значения, то расчет заканчивается (при этом результатом расчета является последнее приближение);

5) по результатам расчета превышений температур на границах областей стягивания контактов определяются превышения температур в контактных точках в соответствии с соотношением [7]:

$$\tau_{k1,i+1} = \frac{I^2 R_{k1,i+1}^2}{2(\lambda_i + \lambda_{i+1})(\rho_i + \rho_{i+1})} + \frac{\lambda_i \tau_i + \lambda_{i+1} \tau_{i+1}}{\lambda_i + \lambda_{i+1}}, \quad (7)$$

где  $i$  – индекс, номер которого соответствует областям стягивания 2, 5, 8, 11.

Как указывалось ранее, в процессе расчета теплового режима для участков токоведущего контура (исключая области стягивания) рассчитываются удельные тепловые проводимости  $g_{\tau_i}$ , т. е. – тепловые проводимости, приходящиеся на единицу длины  $i$ -го участка. Известно, что токоведущие части устройств РПН работают в среде трансформаторного масла. В этом случае происходит преимущественно конвективный теплообмен. Для токоведущих частей, непосредственно соприкасающихся с охлаждающей средой (трансформаторным маслом), удельная тепловая проводимость определяется по следующей формуле [2]:

$$g_{\tau_i} = \alpha_{ki} P_i, \quad (8)$$

где  $\alpha_{ki}$  – конвективный коэффициент теплоотдачи с поверхности  $i$ -го участка токоведущего контура, определяемый в ходе решения задачи с помощью известных критерияльных уравнений [2–5];

$P_i$  – теплоотдающий периметр  $i$ -го участка (для участков, имеющих относительно сложную конфигурацию, задается теплоотдающий периметр, представляющий собой удельную поверхность, соприкасающуюся с охлаждающей средой и приходящуюся на единицу длины пути тока).

Теплофизические параметры трансформаторного масла (являющегося в данном случае охлаждающей средой) заданы в виде табличных функций, которые в ходе выполнения программы интерполируются кубическими сплайнами, а затем рассчитываются (в зависимости от средней температуры) в виде:

$$v_m = \frac{v_{icp} + v_0}{2}, \quad (9)$$

где  $v_{icp}$  – средняя температура  $i$ -го участка, определяемая как средняя арифметическая температур на его границах

$$v_{icp} = v_0 + \frac{\tau_j(0) + \tau_{j+1}(l_i)}{2}. \quad (10)$$

Средняя температура в области стягивания определяется в соответствии со следующим выражением [2, 3, 5]:

$$\tau_{icp} = \tau_j + \frac{2}{3} [\tau_{kj,j+1} - \tau_j], \quad (11)$$

где  $\tau_j$  – превышение температуры на границе в узловой точке, соответствующей данной области стягивания;

$\tau_{kj,i+1}$  – превышение температуры в контактной точке между  $i$ -й и  $(i+1)$ -й областью стягивания.

На участках, содержащих токопроводы, покрытые слоем твердой изоляции, при расчете суммарной тепловой проводимости учитывается также и его тепловое сопротивление. Например, для круглого изолированного токопровода удельное тепловое сопротивление слоя твердой изоляции рассчитывается по следующей формуле [2–5]:

$$r_{из} = \frac{1}{2\pi\lambda_{из}} \ln(D/d), \quad (12)$$

где  $\lambda_{из}$  – удельная теплопроводность материала слоя твердой изоляции;

$D$  – диаметр токопровода с учетом слоя твердой изоляции;

$d$  – диаметр проводника.

В качестве объекта для экспериментальной проверки предложенной методики расчета выбран токоведущий контур устройства РПН типа РНТА-35/1250. Основными исходными данными расчета являются:

- 1) ток нагрузки – 1500 А;
- 2) температура трансформаторного масла – 70 °С;
- 3) материал каждого участка;
- 4) сечение каждого участка;
- 5) теплоотдающий периметр и определяющий размер каждого участка;
- 6) длина (для участков конечной длины);
- 7) падения напряжения на контактах:
  - а) ламели-неподвижный контакт – 0,01 В;
  - б) ламели-токосъемное кольцо – 0,01 В.

Результаты расчета (в частности, превышения температур в узловых точках) представлены на рис. 3.

Результаты расчета сравниваются с опытными данными, которые получены при проведении периодических испытаний устройства РПН типа РНТА-35/1250. Результаты измерения превышений температур в узловых точках при аналогичных значениях тока нагрузки и падениях напряжения в контактах представлены в табл. 1 и на рис. 3 (где показано расположение термомпар). Температура трансформаторного масла при испытаниях составляла 25,5 °С (термомпара 12).

Таблица 1. Данные протокола испытаний на нагрев устройства РПН типа РНТА-35/1250

№№ терморпар	Превышения температур, К			
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Среднее значение
1	18,2	23,5	17,6	19,8
2	17,8	22,5	18,9	19,7
3	16,7	18,0	18,0	17,6
4	17,0	18,0	18,2	17,7

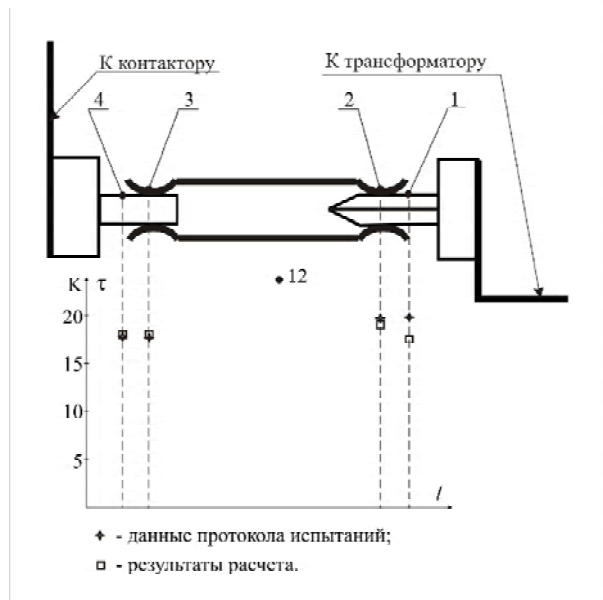


Рис. 3. Сравнение расчетных и опытных данных

*Здійснено аналіз усталеного теплового режиму струмоведучого контуру обирача пристрою регулювання напруги трансформатора, на основі якого розроблена програма для персонального комп'ютера, що дозволяє розрахувати усталені температури у вузлових точках.*

*The analysis of steady-state thermal behavior of the transformer tap-changer selector current-carrier is performed. On its basis the software for personal computer that enables to compute steady-state temperatures in the nodal points is developed.*

## Вывод

Сравнение расчетных (полученных с использованием предложенной методики) и опытных данных превышений температур свидетельствует о их хорошем совпадении между собой для исследуемого устройства (с погрешностью, не превышающей 10%).

## Перечень ссылок

1. Брон О. Б. Электрические аппараты с водяным охлаждением / О. Б. Брон. – Л. : Энергия, 1967. – 264 с.
2. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов: Общие вопросы проектирования / П. В. Сахаров. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.
3. Залесский А. М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А. М. Залесский, Г. А. Кукеков. – Л. : Энергия, 1971. – 378 с.
4. Дульнев Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах / Г. Н. Дульнев, Э. М. Семяшкин. – Л. : Энергия, 1968. – 360 с.
5. Белкин Г. С. Тепловые процессы в электрических аппаратах / Г. С. Белкин. – М. : Знак, 2006. – 224 с.
6. Порудоминский А. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / А. В. Порудоминский. – М. : Энергия, 1974. – 288 с.
7. Близняков А. В. Расчет тепловых режимов неоднородных токоведущих систем электрических аппаратов / А. В. Близняков, В. М. Кораблев // Электрический журнал. – 1997. – №1. – С. 18–22.

Поступила в редакцию 12.12.08 г.