

УДК 621.321

## Тепловой расчет обмоток сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов с использованием электрических схем замещения

А.В. Стулов, А.И. Тихонов  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
Иваново, Российская Федерация  
E-mail: alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В настоящее время тепловой расчет обмоток трансформаторов и токоограничивающих реакторов из алюминиевой или медной ленты проводится по методикам, которые не учитывают эффект вытеснения тока. В связи с этим имеет место значительная разница между расчетным и экспериментальным значениями средней и максимальной температур. Необходима разработка точной математической модели обмотки из ленты, учитывающей неравномерное токораспределение по высоте ленты.

**Материалы и методы:** Используются результаты тепловых испытаний обмоток токоограничивающего реактора, а также обмоток низшего напряжения сухих трансформаторов. При разработке модели применялись метод тепловых цепей и метод моделирования с использованием электрических схем замещения.

**Результаты:** Разработана тепловая модель обмотки из ленты, учитывающая неравномерное распределение тока по высоте обмотки. Дан сравнительный анализ результатов измерений распределения температуры в обмотке из ленты с расчетными значениями.

**Выводы:** Установлено, что распределение температуры в обмотке из ленты может быть с высокой степенью точности определено расчетным путем с применением предложенной модели. Предложенная математическая модель может быть использована для повышения точности расчетов и эффективности проектирования обмоток из ленты.

**Ключевые слова:** обмотка из ленты, вытеснение тока, теплопередача, тепловые цепи, коэффициент теплоотдачи.

## Heat Calculation of Transformers Windings and Current-Limiting Reactors by Means of Electrical Equivalent Circuit

A.V. Stulov, A.I. Tikhonov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: alxstl@mail.ru, ait@dsn.ru

### Abstract

**Background:** At present time heat calculation of transformers windings and current-limiting reactors of aluminum or copper tape are carried out by methodologies without taking into account the current crowding-out effect. So, there is great difference between calculated and experimental values of middle and maximum temperatures. The development of the exact mathematical model of transformer windings with taking into account the irregular current distribution on tape height is necessary.

**Materials and methods:** The authors use the thermal tests results of windings of current-limiting reactor 1600 A, 0.35 Ohm, as well as the thermal tests results of low-tension windings of dry-type transformers. The authors apply the method of heat circuits and method of electrical equivalent circuits while developing the model.

**Results:** The heat model of windings is developed. It considers the irregular current distribution on tape height. The authors provide the comparative analysis of the measurement results of temperature distribution in tape windings with calculation values.

**Conclusions:** The offered mathematical model can be used for increasing the calculation accuracy and designing efficiency of tape windings. It is proved that the temperature distribution in the tape windings can be defined with the high accuracy by means of calculations of the offered model.

**Key words:** tape winding, current displacement, heat transfer, heat circuits, heat convection coefficient.

В настоящее время не существует апробированной инженерной методики тепловых расчетов обмоток сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов, выполненных из алюминиевой или медной ленты (рис. 1,а). Поэтому тепловые расчеты ведутся обычно по методикам, предназначенным для сухих трансформаторов с обмотками, выполненными из провода. Особенностью обмоток, выпол-

ненных из ленты, является сильное вытеснение тока на края обмотки [1]. Неравномерное распределение тока по высоте ленты приводит к неравномерному распределению потерь по высоте обмотки и, следовательно, к неравномерным перегревам.

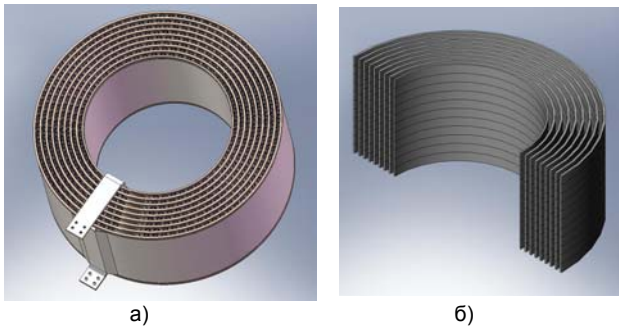


Рис. 1. Обмотка фазы реактора из алюминиевой ленты

В [1] приведена методика определения потерь в расчетной области обмотки, которая разбивается на  $n$  концентр, а каждый концентр на  $m$  расчетных секций (рис. 1,б).

Предлагаемая математическая модель теплового состояния обмотки из ленты представляет собой разветвленную тепловую цепь, состоящую из следующих элементов:

- источники тепловых потерь – потери в расчетных секциях;
- тепловые сопротивления теплопроводности и теплоотдачи с поверхности (вследствие свободной конвекции и излучения);
- тепловые сопротивления воздушного канала.

В рассматриваемой модели приняты следующие допущения:

1. С торцов обмотки теплоотдача отсутствует, так как бортовая изоляция выполнена из стеклотекстолита с низкой теплопроводностью.
2. Тепловыделение происходит равномерно по всему объему расчетной секции.

3. Коэффициенты теплопроводности материала не являются функцией температуры.

4. Коэффициент теплоотдачи с поверхности постоянен по высоте обмотки.

Фрагмент разветвленной электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотке, состоящей из двух концентр, выполненный в среде Simulink, представлен на рис. 2. Каждый концентр обмотки представлен прямой областью, являющейся отдельной подсистемой, фрагмент содержимого которой представлен на рис. 3. В свою очередь, каждая расчетная секция в схеме замещения концентр представлена подсистемой, фрагмент содержимого которой представлен на рис. 4.

Схема замещения каждой расчетной секции (рис. 4) содержит источник тока  $P_i$ , величина которого численно равна теплотерям в соответствующем витке этой секции (принимается, что теплотери выделяются в центре проводника). Сопротивления  $R_{wi}$  численно равны тепловым сопротивлениям элемента алюминиевого витка в радиальном направлении и вычисляются по формуле

$$R_{wi} = \frac{1}{2\pi h \lambda_{al}} \ln \frac{r_{wiu}}{r_{wie}}, \quad (1)$$

где  $h$  – высота секции;  $\lambda_{al}$  – теплопроводность материала обмотки (алюминиевой ленты);  $r_{wiu}$  – средний радиус витка;  $r_{wie}$  – внешний или внутренний радиус витка (в зависимости от того, с какой стороны от центра проводника находится данное сопротивление).

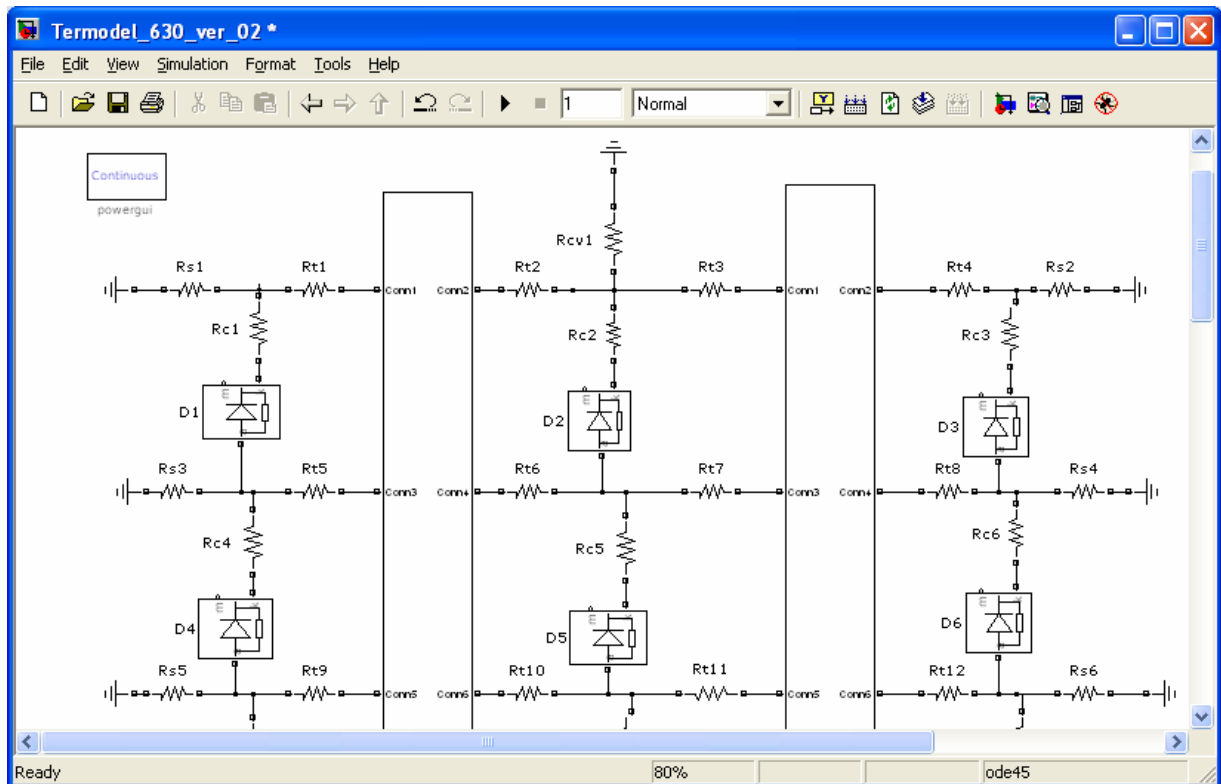


Рис. 2. Фрагмент разветвленной электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотке в среде Simulink

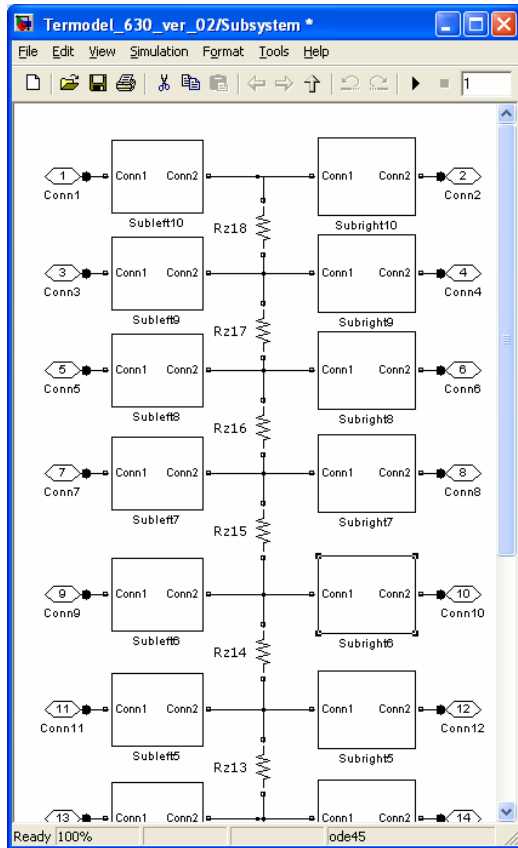


Рис. 3. Фрагмент электрической схемы замещения концентратора

Сопротивления  $R_{isi}$  численно равны тепловым сопротивлениям соответствующего слоя межвитковой изоляции и вычисляются по формуле

$$R_{isi} = \frac{b_{из}}{2\pi r_{isi} h \lambda_{из}}, \quad (2)$$

где  $b_{из}$  – толщина межвитковой изоляции;  $\lambda_{из}$  – теплопроводность материала изоляции;  $r_{isi}$  – средний радиус  $i$ -го слоя изоляции.

Сопротивления  $R_{zi}$  на рис. 3 численно равны тепловым сопротивлениям расчетной секции в осевом направлении и находятся по формуле

$$R_{zi} = \frac{h}{\lambda_{ал} \pi (r_2^2 - r_1^2)}, \quad (3)$$

где  $r_1, r_2$  – внутренний и наружный радиусы  $i$ -го витка соответственно.

Сопротивления  $R_{ti}$  (рис. 2) численно равны тепловым сопротивлениям теплоотдачи с поверхностей расчетных секций в окружающую среду и находятся по формуле

$$R_{ti} = \frac{1}{(\alpha_{conv} + \alpha_{rad}) S_f}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{conv}$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности за счет свободной конвекции;  $\alpha_{rad}$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности излучением;  $S_f$  – площадь теплоотдающей поверхности.

Коэффициент теплоотдачи излучением рассчитывается по закону Стефана-Больцмана [2]:

$$\alpha_{rad} = \frac{5,56 \cdot 10^{-8} \varepsilon_1 (T_f^4 - T_0^4)}{T_f - T_0}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_1$  – степень черноты излучающего тела;  $T_f$  – температура излучающей поверхности;  $T_0$  – температура окружающей среды.

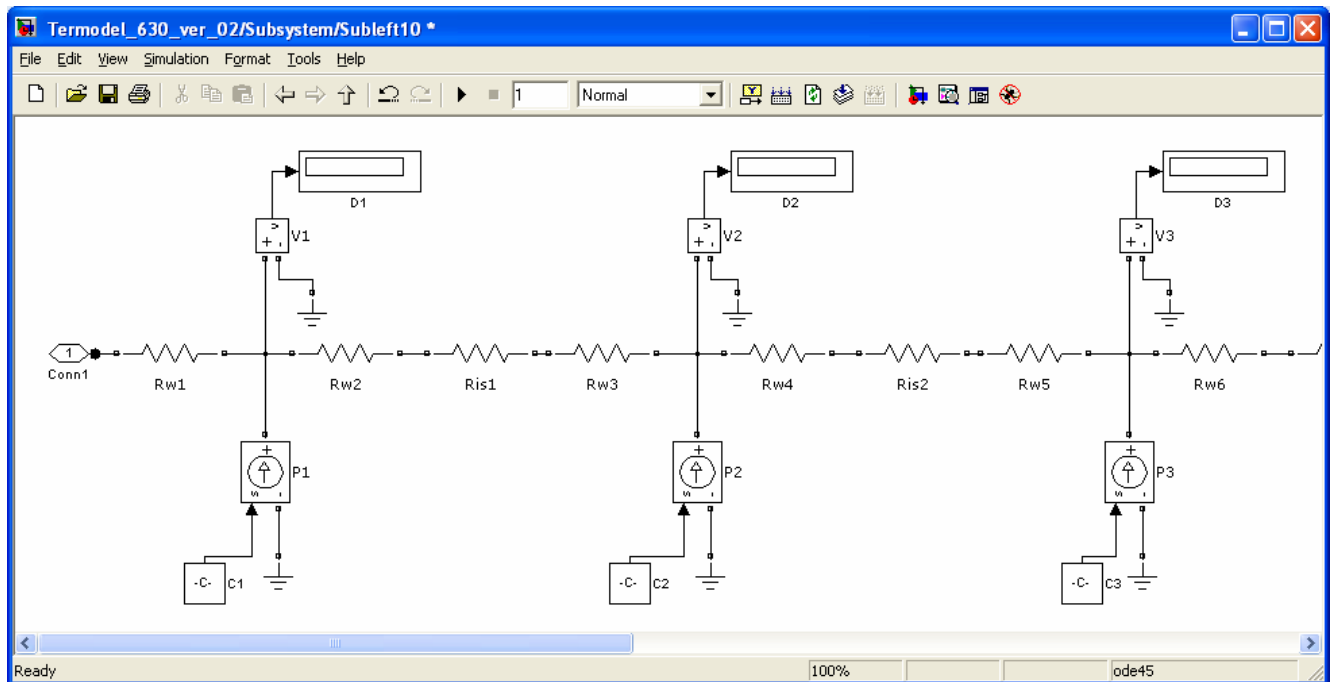


Рис. 4. Фрагмент электрической схемы замещения расчетной секции

Теплоотдача излучением учитывается только на внешних и внутренних поверхностях обмотки. В каналах это сопротивление не учитывается, так как противоположные стенки канала имеют приблизительно одинаковую температуру.

Сопротивления  $R_{ci}$  (рис. 2) численно равны тепловым сопротивлениям воздушного канала и с учетом конвекции рассчитываются по формуле

$$R_{ci} = \frac{h}{\lambda_{\text{экв}} S_{\text{кан}}}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{\text{экв}}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности;  $S_{\text{кан}}$  – сечение канала на пути теплового потока.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности вычисляется следующим образом [3]:

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_f \varepsilon_K, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_K$  – коэффициент конвекции;  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности текучей среды.

Коэффициент конвекции определяется величиной критерия Рэлея:

$$\varepsilon_K = \begin{cases} 1 \forall Ra_f < 10^3, \\ 0,105 Ra_f^{0,3} \forall 10^3 < Ra_f < 10^6, \\ 0,4 Ra_f^{0,2} \forall 10^6 < Ra_f < 10^{10}. \end{cases} \quad (8)$$

Критерий Рэлея  $Ra$  используют для обобщения экспериментальных данных о режиме течения флюидов разной физической природы:

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad (9)$$

где  $Pr$  – критерий Прандтля;  $Gr$  – критерий Грасгофа.

Критерий Прандтля представляет собой отношение двух характеристик: молекулярного переноса импульса  $\nu$  и теплоты  $a$  и является физическим параметром среды:

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \quad (10)$$

Для воздуха можно принять  $Pr \approx 0,7$  [2].

Критерий Грасгофа характеризует отношение термогравитационных сил и сил вязкого трения:

$$Gr = \frac{g R_0^3}{\nu^2} \beta \Delta T, \quad (11)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $R_0$  – определяющий размер (в нашем случае  $R_0 = H$ ,  $H$  – высота обмотки);  $\Delta T$  – модуль разности температур между стенкой и флюидом;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения флюида;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости.

Однонаправленное движение тепловых потоков, вызванное гравитацией, в электрической схеме замещения (рис. 2) учитывается с помощью диодов и дополнительных сопротивлений теплопроводности воздуха.

Для расчета цепи в системе моделирования Simulink была построена схема замещения обмотки НН ТСЛ-630/0,4. На производственной базе ЗАО «Трансформер» было проведено несколько экспериментов. Обмотка НН

ТСЛ-630 кВА, рассчитанная на напряжение 0,4 кВ, нагревалась номинальным током от одной из фаз трансформатора ТМГ-1000 10/0,4.

Измерение температур производилось с помощью 12-канального термоизмерителя ТМ-12. Экспериментальная тепловая постоянная времени составила 3 ч 10 мин. Расчетные и экспериментальные данные приведены в таблице и на рис. 5.

#### Результаты теплового расчета и испытаний обмотки НН ТСЛ-630/0,4

№ секции	Расчет, °С	Опыт, °С	Отклонение, %
1	58,59	52,74	10,51%
2	58,95	60,29	2,24%
3	58,67	58,78	0,18%
4	58,09	57,03	-1,89%
5	57,58	56,83	-1,31%
6	57,06	56,54	-0,91%
7	56,52	58,19	2,91%
8	56,05	56,92	1,54%
9	55,27	53,26	-3,71%
10	54,11	53,26	-1,59%

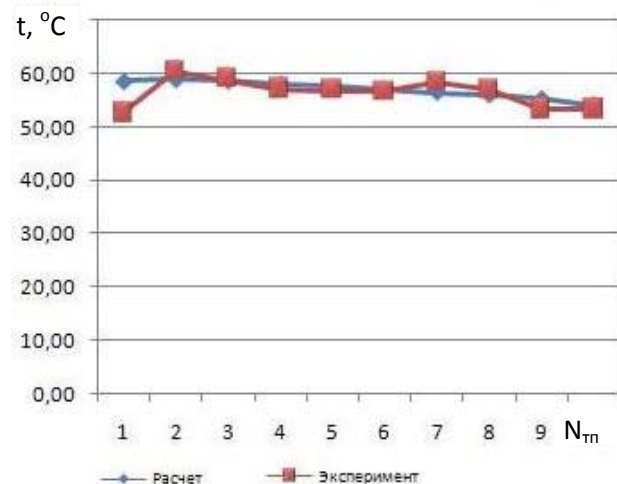


Рис. 5. Графическое представление результатов теплового расчета и испытаний обмотки НН ТСЛ-630/0,4 ( $N_{тп}$  – номер термопары по высоте обмотки)

#### Заключение

Предложенная схема замещения с достаточной степенью точности моделирует реальное тепловое состояние обмотки НН ТСЛ.

На результаты эксперимента влияет неравномерное распределение пропиточного лака по высоте обмотки и наличие бандажной ленты.

#### Список литературы

1. Тихонов А.И., Иванов А.В. Проектирование и производство токоограничивающих реакторов из алюминиевой ленты / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2010. – 116 с.
2. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел В.А. Теплопередача: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.

### References

1. Tikhonov, A.I., Ivanov, A.V. *Proektirovanie i proizvodstvo tokoogranichivayushchikh reaktorov iz alyuminievoy lenty* [Construction and production of current-limiting reactors of aluminium tape]. Ivanovo, 2010. 116 p.
2. Sipaylov, G.A., Sannikov, D.I., Zhadan, V.F. *Teplovye, gidravlicheskie i aerodinamicheskie raschety v elektricheskikh mashinakh* [Heat, hydraulic and aerodynamic calculations in electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989. 239 p.
3. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, V.A. *Teplotopredacha* [Heat transfer]. Moscow, Energoatomizdat, 1981. 416 p.

*Стулов Алексей Вадимович*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант,  
e-mail: alxstl@mail.ru

*Тихонов Андрей Ильич*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики,  
e-mail: ait@dsn.ru