

Применение метода конечных разностей для определения распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин

Final differences method application for calculation of temperature distribution in traction motors isolation

Дорохина Е.С., Рапопорт О.Л., Хорошко А.А.

Рассматривается возможность применения метода конечных разностей для определения распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин, основанного на замене производных в дифференциальном уравнении их приближенным значением, что позволяет уйти от громоздких расчетов и получить достаточно точную картину теплового поля. Использование данного метода послужит основой для определения остаточного ресурса изоляции двигателя.

In article final differences method application is considered for calculation of temperature distribution in traction motors isolation. This method is based on replacement of derivatives in the differential equation by their approximate value that allows to leave from unwieldy calculations and to receive rather exact picture of a thermal field. The method will form a basis for traction motors isolation residual resource calculation.

Ключевые слова: метод конечных разностей, тяговый электродвигатель, распределение температуры, изоляция.

Key words: final differences method, traction motors, temperature distribution, isolation.

В настоящее время в условиях высокой грузонапряженности российских железных дорог определяющее значение имеет обеспечение надежной и безотказной работы электровозов и электропоездов, а также повышение их технико-экономических показателей. Эффективная и надежная работа электровозов во многом зависит от надежности тяговых электродвигателей (ТЭД). Как известно, работа любой электрической машины сопровождается потерями энергии, а применительно к тяговым электродвигателям, эти потери играют важную роль в определении общей картины теплового состояния ТЭД при эксплуатации. В результате возникающих электрических потерь, происходит перераспределение энергии и выделение её в виде тепла, которое нагревает отдельные узлы машины, повышая их температуру. Проведенные исследования показывают, что наиболее нагретыми частями двигателя при эксплуатации являются обмотки. Неоднократное превышение допустимой температуры обмоток приводит к ускоренному старению электроизоляционных материалов, что в последующем становится причиной пробоя изоляции и преждевременного выхода из строя ТЭД. Анализ отказов оборудования локомотивов показывает, что основные виды повреждений ТЭД как постоянного, так и переменного тока являются: пробой изоляции и межвитковые замыкания обмоток якоря, машин постоянного тока и статора машин переменного тока (16-25)%, пробой изоляции и

межвитковые замыкания главных и дополнительных полюсов и компенсационной обмотки (12-16)%.

Для недопущения наступления такого предельного состояния ТЭД в процессе эксплуатации, наиболее важной и перспективной для решения задач является получение информации о картине распределения температуры в изоляции между элементами конструкции ТЭД.

Решение данной задачи возможно с использованием метода конечных разностей [1].

Учитывая, что в тяговом электродвигателе передача тепла осуществляется посредством теплопроводности, то нестационарный перенос тепла теплопроводностью можно описать уравнением Фурье - Киргофа, записанным в декартовой системе координат:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t, T) \quad (1)$$

Это уравнение устанавливает связь между временным и пространственным изменением температуры в любой точке тела. С помощью данного уравнения можно описать множество вариантов развития процесса кондуктивного теплопереноса. Но для того, чтобы наиболее полно математически описать хотя бы один вариант, к соотношению (1) необходимо добавить условия однозначности, которые содержат геометрические, физические, начальные и граничные условия.

Метод конечных разностей основан на замене производных в дифференциальном уравнении их приближенным значением, выраженным через разности значений функции в отдельных дискретных точках – узлах сетки. Это позволяет уйти от громоздких расчетов. Аппроксимируя частные производные дифференциального уравнения (1) конечными разностями получаем систему линейных алгебраических уравнений для определения температуры, как локальной характеристики в каждом узле сетки. Полученная система является незамкнутой, для её замыкания используют разностное представление граничных условий. В результате получается замкнутая система линейных алгебраических уравнений, которая решается численными методами [1].

Таким образом используя данный метод можно получить картину распределения температуры через изоляцию между элементами конструкции ТЭД.

При этом делаем допущение, что сердечники статора ТЭД переменного тока, главные и добавочные полюса, сердечник якоря машин постоянного тока, а также все обмотки машин являются равномерно распределенными источниками тепла, следовательно, температура на границе с изоляционным материалом является температурой элемента конструкции. Зная температуру на границах изоляционных материалов, начальную температуру окружающей среды, и все свойства применяемых материалов можно получить кривую распределения температуры в изоляции между элементами конструкции.

Процесс теплопереноса, используя метод конечных разностей [2] изоляционной среды между сталью сердечника и обмоткой, можно представить

как совокупность двух или более пластин выполненных из изоляционных материалов с различными теплофизическими свойствами, как показано на рис 1.

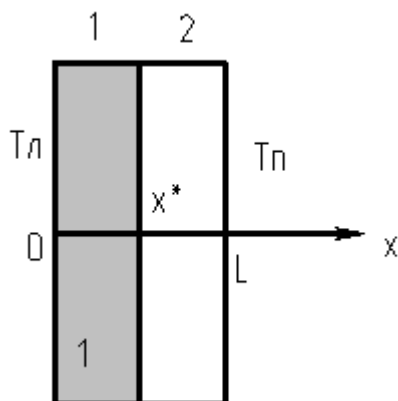


Рисунок 1 – Геометрия задачи

В этом случае математическая постановка задачи теплопереноса будет иметь вид:

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x^*, \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x^* < x < L; \end{cases} \quad (2);$$

где индекс 1 соответствует левой пластине (материал 1), а индекс 2 соответствует пластине правой (материал 2).

Начальные граничные условия определим следующим образом:

$$\begin{aligned} t = 0 : T = T_0, 0 \leq x \leq L; \\ x = 0 : T = T_n, t > 0; \\ x = L : T = T_n, t > 0; \end{aligned} \quad (3);$$

$$\begin{cases} T_1(t, x^*) = T_2(t, x^*); \\ \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \Big|_{x=x^*} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \Big|_{x=x^*} \end{cases} .$$

где ρ – плотность изоляционного материала; c – теплоемкость материала; λ – коэффициент теплопроводности изоляционного материала; T_n – температура на границе со сталью сердечника; T_n – температура на границе с обмоткой; T_0 – начальная температура; x – координата поперек толщины изоляции; L – толщина всех слоев изоляции.

Решение данной задачи проводится численно на основе неявной разностной схемы, алгоритм решения которой представлен в [2].

Для асинхронных тяговых двигателей в процессе эксплуатации важным является распределение температуры в изоляции между сталью сердечника статора и обмоткой статора в пазу. Температурное поле изоляции для двигателя НТА-1200 представлено на рис. 2. Изоляционные материалы между сталью сердечника статора и обмоткой статора: материал 1 – стеклослюдинитовая лента, со следующими свойствами: $\lambda_1 = 0.12 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ \text{С})$, $\rho_1 = 815 \text{ кг} / \text{м}^3$, $c_1 = 1300 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot ^\circ \text{С})$; материал 2 – лента ЛЭС ($\lambda_2 = 0.17 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ \text{С})$, $\rho_2 = 1500 \text{ кг} / \text{м}^3$, $c_2 = 1600 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot ^\circ \text{С})$).

На границе со сталью сердечника статора $\theta_n = 93,4^{\circ}C$, на границе с обмоткой статора $\theta_n = 149,9^{\circ}C$, начальная температура $\theta_o = 25^{\circ}C$.

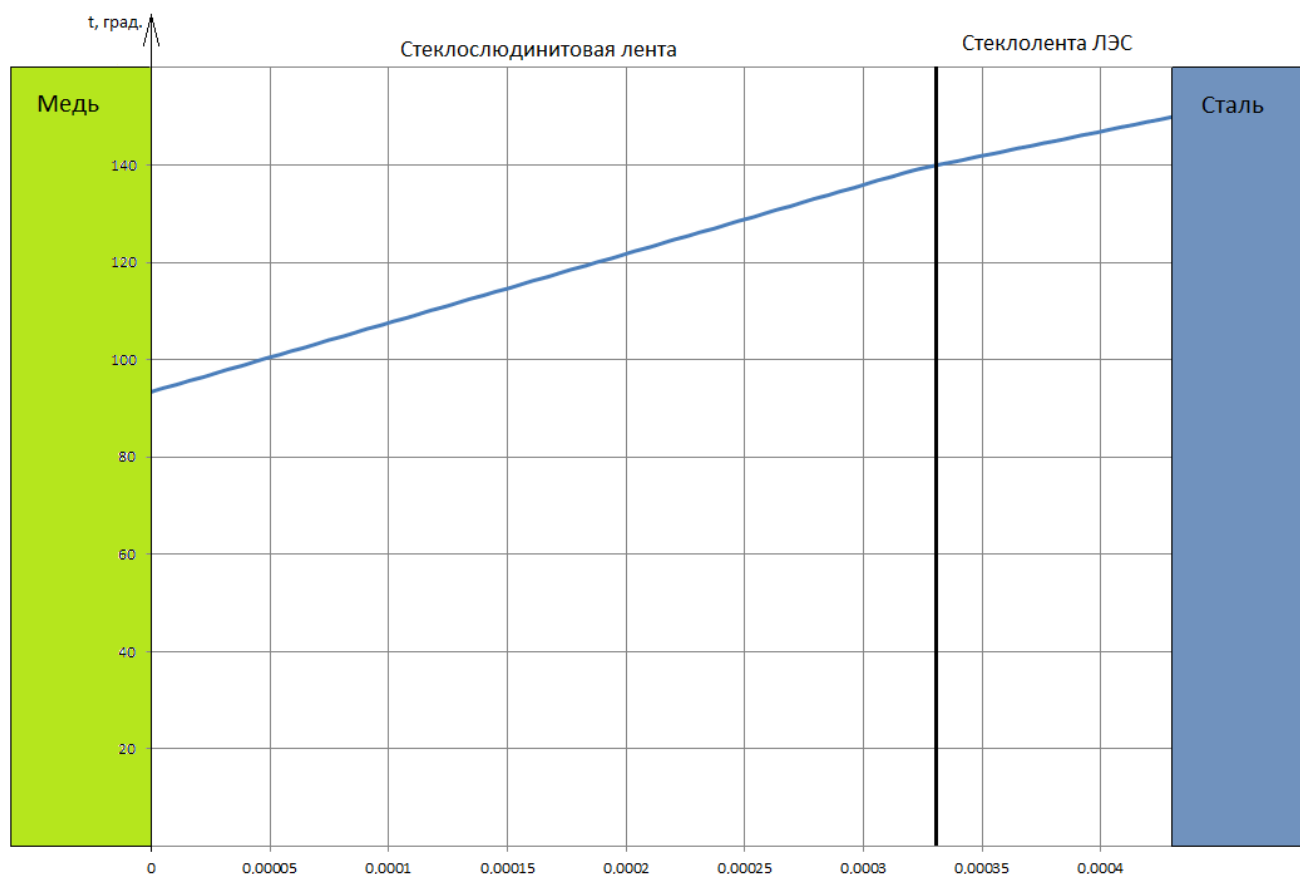


Рисунок 2 – Распределение температуры в изоляции пазовой части обмотки статора двигателя НТА-1200

Картина распределения температуры между сталью и обмоткой главного полюса для тягового двигателя постоянного тока на примере ТЛ-2К1 представлена на рис. 3. Изоляция обмотки главного полюса выполнена из следующих материалов: материал 1 – асбестовая бумага со следующими свойствами $\lambda_1 = 0,19 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}C)$, $\rho_1 = 770 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_1 = 815 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}C)$; материал 2 – стеклослюдинитовая лента, $(\lambda_2 = 0,12 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}C)$, $\rho_2 = 815 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_2 = 1300 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}C)$) 3 –лента ЛЭС($\lambda_3 = 0,17 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}C)$, $\rho_3 = 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_3 = 1600 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}C)$); материал. На границе со сталью главного полюса $\theta_n = 90^{\circ}C$, на границе с обмоткой полюса $\theta_n = 104^{\circ}C$, начальная температура $\theta_o = 20^{\circ}C$.

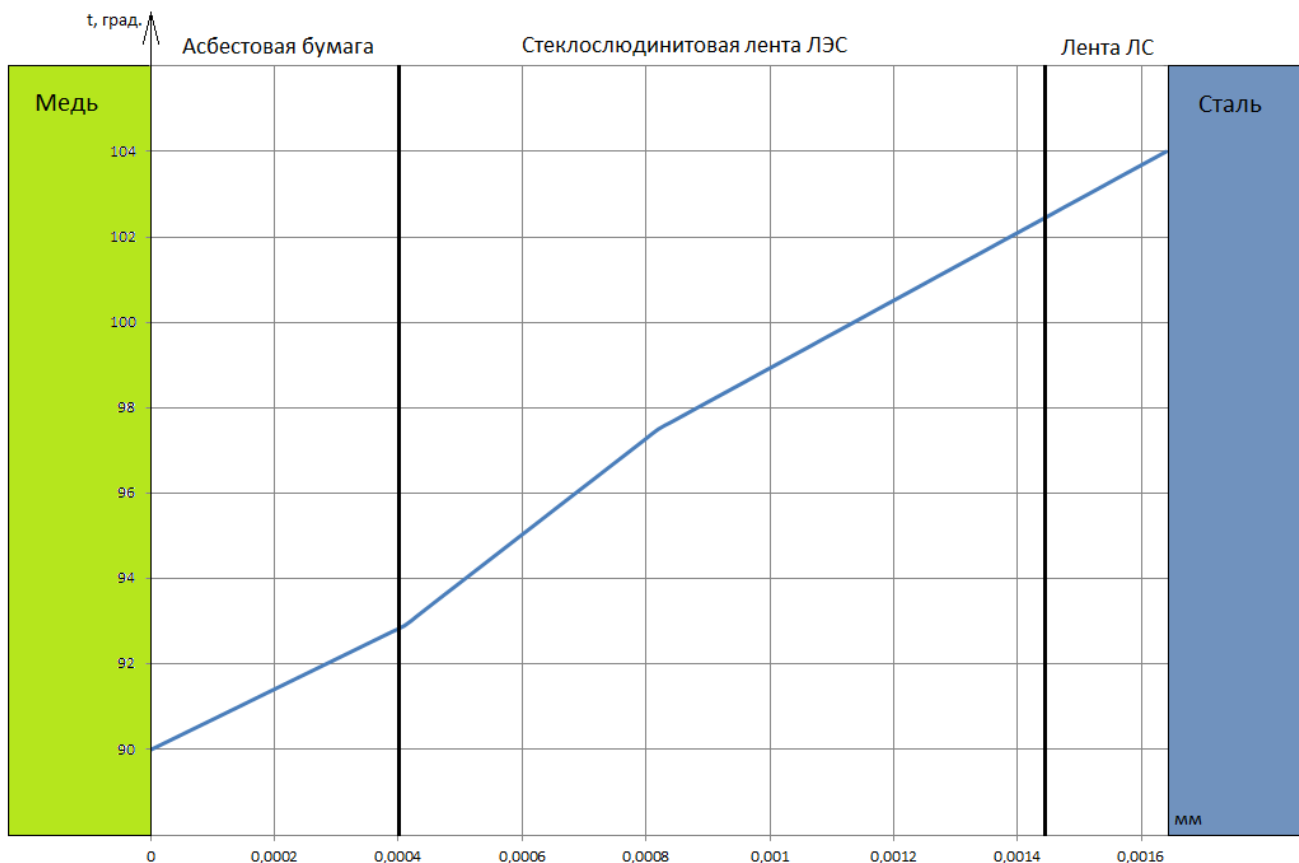


Рисунок 3 – Распределение температуры в изоляции обмотки главного полюса двигателя ТЛ-2К

Аналогичная картина температурного поля наблюдается также между обмоткой и сталью добавочного полюса, обмоткой в пазу и сталью якоря тягового двигателя постоянного тока ТЛ-2К.

Данные кривые были рассчитаны через 10, 30, 60 секунд. Расчеты показали, что все распределения температуры по толщине изоляции проходят по одной характеристике. Из чего можно сделать вывод, что это является следствием достаточно высоких температур и малой толщины изоляции.

Кривая имеет линейный характер, рост температуры происходит плавно без значительных скачков, т.е. температура внутри изоляционных слоев паза не превышает граничные температуры. Это дает возможность судить о величине температуры, как по температуре обмотки машины, так и по температуре сердечника. Особенно актуальным это является для стальных сердечников статора асинхронного двигателя и якоря машины постоянного тока, в случаях ухудшенного охлаждения.

Данные расчеты могут служить основой для определения остаточного ресурса изоляции двигателя и позволяют легко перейти к практической реализации прогнозирования ресурса ТЭД по тепловому состоянию.

Список литературы:

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности: учебное пособие для вузов / А.В. Лыков. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.: ил.

2. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет; Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 173 с.: ил.