

УДК 621.313

К ОБОБЩЕНИЮ НЕКОТОРЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

И. Н. Железняк

(ОАО «Силловые машины», Филиал «Электросила»)

Представлены результаты некоторого обобщения тепловых расчетов электрических машин.

Рассматривается решение нестационарной задачи теплопроводности для максимальной температуры плоской однослойной однородной стенки.

Ключевые слова: крупные электрические машины, теплопроводность.

Одной из проблем при проектировании новых электрических машин является обработка (расчет) большого количества предварительных вариантов исполнения будущей машины за достаточно малое время. При использовании программ численных расчетов с использованием реальных геометрических моделей осуществить это сложно. Решение данной проблемы для тепловых расчетов стационарных режимов работы с успехом реализуется методом тепловых схем замещения, разработанным еще в первой половине XX века [1]. По-другому дело обстоит с нестационарными задачами. Здесь метод тепловых схем бессилён, и поэтому именно для нестационарных задач в свое время были предложены и решены упрощенные одномерные и двухмерные модели [2 – 5], представленные на рис. 1.

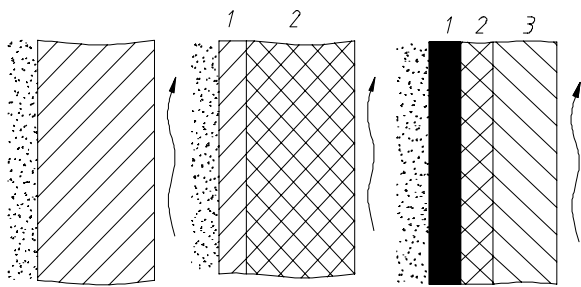


Рис. 1. Упрощенные расчетные модели:
a – однослойная пластина; **b** – двухслойная;
в – трехслойная

Ввиду специфики электрической машины: сложности ее геометрии, наличия большого количества материалов с разными теплофизическими свойствами и нередко некоторой неопределенности исходных данных для теплового расчета, наибольший интерес представляет тепловой расчет с точки зрения нахождения максимально нагретой точки. Не секрет, что именно максимальная темпе-

ратура является определяющей при выборе как конструкции электрической машины, так и ее системы охлаждения.

Ниже представлены результаты некоторого обобщения тепловых расчетов электрических машин.

Наиболее простой и понятный вид аналитического решения для максимально нагретой точки дан для однослойной пластины [4]:

$$T_{\max}(t) = T_0 + \frac{q_v L^2}{2\lambda} - \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{4q_v L^2}{\lambda \pi^2 (2m+1)^2} \frac{1}{2m+1} \times \sin\left(\frac{(2m+1)\pi}{2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 (2m+1)at}{4L^2}\right) \right], \quad (1)$$

где T_0 – температура охлаждаемой стенки, °С; q_v – объемное тепловыделение, Вт/м³; λ – средний коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); L – ширина пластины (координата точки с наибольшей температурой), м; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; t – время, с.

Достаточная точность обеспечивается первым членом ряда, что в относительных единицах приведено в [5]:

$$\theta_{\max}^*(Fo) = \frac{q_v L}{\alpha} \left(1 + \frac{Bi}{2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{BiFo}{1 + \frac{Bi}{2}}\right)\right]. \quad (2)$$

Для двухслойной модели, с учетом пренебрежения всеми членами ряда кроме первого [5], имеем:

$$\theta_{\max}^*(Fo) = \frac{q_v L_1}{\alpha} (1 + Bi) \left[1 - \exp\left(-\frac{BiFo}{(1 + Bi)\left(1 + \frac{1}{\sigma}\right)}\right)\right], \quad (3)$$

где $\sigma = \frac{c_2 \rho_2 \lambda_2}{c_1 \rho_1 \lambda_1}$ – относительная теплоемкость;

$Bi = \frac{\alpha L_2}{\lambda_2}$ – число Био; $Fo = \frac{\lambda_2 t}{c_2 \rho_2 L_2^2}$ – число Фурье;

α – коэффициент теплоотдачи. Индексы означают принадлежность к соответствующему слою модели.

Для трехслойной модели:

$$\theta^*_{\max}(Fo) = \frac{q_v L_1}{\alpha} (1 + Bi + RBi) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{Bi Fo}{(\eta_3 + 1/\sigma_3)(1 + Bi + RBi)}\right) \right], \quad (4)$$

где $\sigma_3 = \frac{c_3 \rho_3 \lambda_3}{c_1 \rho_1 \lambda_1}$ – относительная теплоемкость;

$R = \frac{\delta_3 \lambda_3}{\delta_2 \lambda_2}$; $Bi = \frac{\alpha L_3}{\lambda_3}$ – число Био; $Fo = \frac{\lambda_3 t}{c_3 \rho_3 L_3^2}$ – число

Фурье; $\eta_3 = \frac{1 + \frac{\delta_3}{2\lambda_3}}{1 + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}$ – весовой коэффициент.

Как можно видеть, структуры решений (2), (3), (4) сходны, отличия заключаются лишь в наличии до-

Таблица 1

Исходная двухслойная модель

№ слоя	1	2
Толщина, мм	80	80
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	547	500
Теплопроводность, Вт/(м·К)	10	25
Плотность, кг/м ³	7234	7600
Тепловыделение, Вт	5000	2500
Температура охлаждаемой стенки – 40 °С		

Таблица 2

Результат преобразования двухслойной модели в однослойную

Толщина, мм	160
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	5235
Теплопроводность, Вт/(м·К)	14,3
Плотность, кг/м ³	7417
Удельное тепловыделение, Вт/м ³	4,688·10 ⁴

полнительных множителей, характеризующих геометрические и теплофизические параметры слоев.

К сожалению, в описанных моделях имеются некоторые недостатки, не позволяющие применять их более широко.

Это пренебрежение тепловыделением в слоях 2 и 3 для двух и трехслойной модели, соответственно, и неучет теплопроводности слоя 1, теплоемкости слоя 2 в трехслойной модели.

Устранение этих недостатков в двух и трехслойных моделях сопряжены с резким усложнением как получения конечного результата, так и его интерпретации.

В связи со сказанным, целесообразно приводить двух и трехслойные модели к однослойным и пользоваться точными аналитическими формулами (1), (2).

Такое утверждение доказано численными экспериментами, проведенными в пакете ANSYS.

Размеры и параметры, взятые для проведения численных экспериментов, являются близкими к реальным для крупных электрических машин.

Результаты преобразования двухслойной модели в однослойную показаны в табл. 1 и 2. Преобразование трехслойной модели в однослойную показано в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Исходная трехслойная модель

№ слоя	1	2	3
Толщина, мм	50	10	100
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	386	1200	500
Теплопроводность, Вт/(м·К)	390	0,25	25
Плотность, кг/м ³	8890	2500	7600
Тепловыделение, Вт	1000	0	500
Температура охлаждаемой стенки – 40 °С			

Таблица 4

Результат преобразования трехслойной модели в однослойную

Толщина, мм	160
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	508
Теплопроводность, Вт/(м·К)	3,63
Плотность, кг/м ³	7684
Удельное тепловыделение, Вт/м ³	1,19·10 ⁴

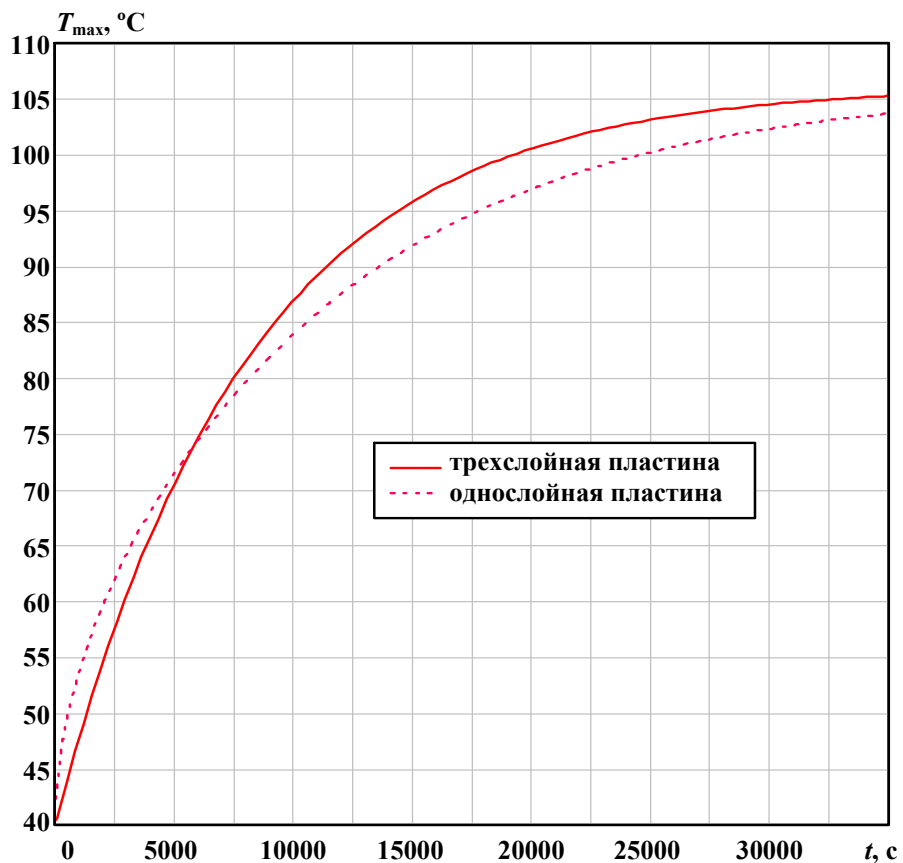


Рис. 2. Сравнение параметров трехслойной и эквивалентной однослойной пластины

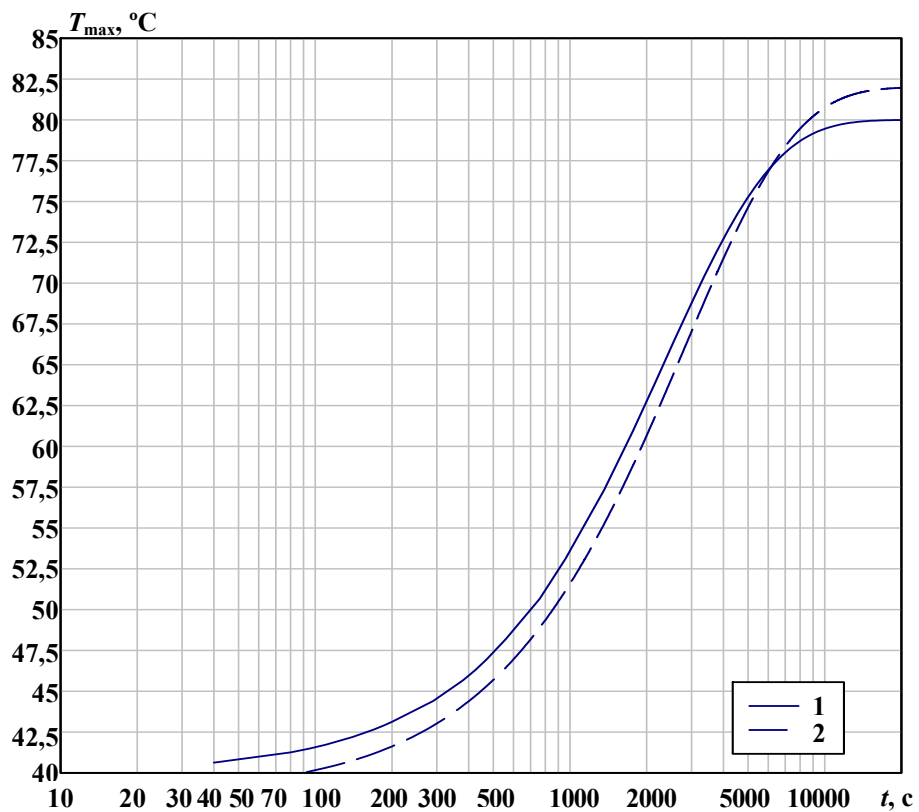


Рис. 3. Сравнение результатов расчета двухслойной модели и эквивалентной однослойной

Для проверки правильности пересчета теплофизических параметров к теплоизолированной стороне трехслойной и эквивалентной однослойной модели был приложен одинаковый тепловой поток величиной 1500 Вт/м^2 . Результат представлен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, для максимально нагретой точки модели преобразование теплофизических параметров практически не ощутимо в значениях установившейся температуры и постоянной времени нагрева. Наибольшая погрешность в скорости нарастания температуры наблюдается в начальный момент времени, что связано с инерционностью, вносимой изоляционным слоем 2 в трехслойной модели.

Результаты анализа преобразований показаны на рис. 3 и 4: кривая 1 – численное решение для двухслойной модели; кривая 2 – аналитическое решение для эквивалентной однослойной модели.

В данном случае имеем практически полное совпадение результатов, за исключением участков кривых с малыми величинами времени.

На рис. 4: кривая 1 – аналитическое решение для однослойной модели; кривая 2 – численное решение для однослойной модели; кривая 3 – численное решение для трехслойной модели.

Несовпадение численного и аналитического решения при малых значениях времени (кривые 1 и 2 на рис. 4) вызвано пренебрежением членами ряда, кроме первого в уравнении (1).

Из рис. 4 видно, что для трехслойной и эквивалентной однослойной модели достижение установившейся температуры происходит практически одновременно, однако наблюдается десятипроцентное расхождение по величине установившейся температуры. Это расхождение может быть учтено в конечной инженерной методике расчета.

В качестве итогового результата температуру максимально нагретой точки для n -слойной модели в общем виде можно записать:

$$\theta_{\max}^*(Fo, \eta^*) = \frac{\bar{q}_v L}{\alpha} \eta^* \left[1 - e^{-\eta^* Fo} \right],$$

где η^* – относительное число слоев расчетной модели.

Предложенный подход показывает принципиальную общность решений для максимально нагретой точки, что не исключает необходимости реализации конкретных решений для многослойных моделей.

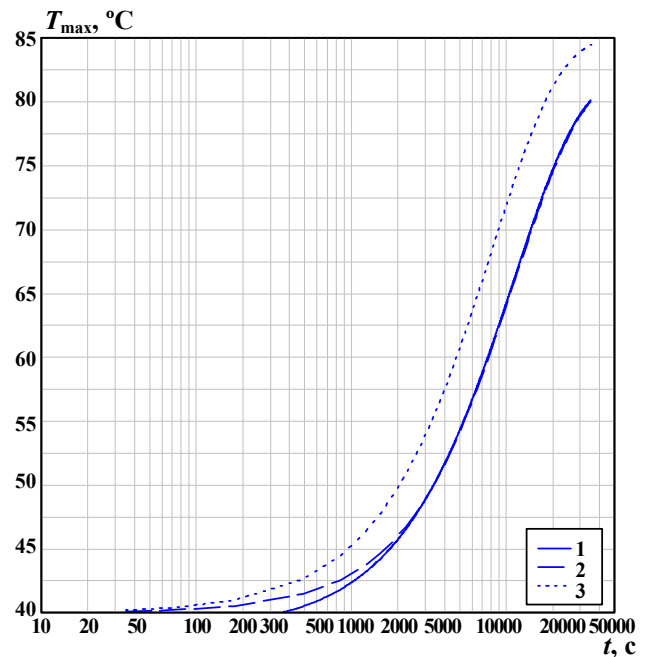


Рис. 4. Сравнение результатов расчета трехслойной модели и эквивалентной однослойной

Следует также иметь в виду, что такой подход позволяет получать зависимости максимальных температур от времени для n -слойных моделей с определенным набором теплофизических параметров. При произвольном наборе этих параметров получим недопустимые погрешности как по времени нагрева, так и по величине установившейся температуры. На эту тему были проведены исследования. Допустимый диапазон теплофизических параметров, обеспечивающий достаточную точность результатов по одномерным моделям, представлен в [5].

Изложенный метод применим для расчетов нестационарных тепловых режимов при рабочем проектировании крупных электрических машин.

Литература

1. Sodenberg R. Steady flow of heat in large turbine-generators / R. Sodenberg // Transactions AIEE. – 1931.
2. Карслоу Х. Теплопроводность твердых тел / Карслоу Х., Егер Д. – М.: Наука, 1964.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: ГИТТЛ, 1952.
4. Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергия, 1974.
5. Гуревич Э.И. Переходные тепловые процессы в электрических машинах / Э.И. Гуревич, Ю.Л. Рыбин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.