

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПАЗОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Л. Н. ВЭРЭШ, М. А. САННИКОВА

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

При проектировании электрических машин важную роль играют тепловые расчеты. Их точность зависит в основном от точности определения теплофизических констант, в частности удельной теплопроводности изоляционных материалов.

Кроме повышения точности теплового расчета и возможности учета условий отвода тепла от обмотки при выборе изоляции, исследования теплопроводности изоляции преследуют еще одну цель.

Характеристики материалов, как известно, имеют некоторый разброс. Разброс теплопроводности, наряду с другими причинами, приводит к разбросу нагрева обмотки. Чтобы этот разброс не привел к преждевременному выходу из строя машин с положительным отклонением рабочей температуры обмотки, приходится снижать допускаемый средний перегрев обмотки. Исследование теплопроводности изоляции позволит более обоснованно выбирать этот запас. Открывается возможность снижения запаса благодаря введению контроля теплопроводности изоляции и отбраковки партий с пониженной теплопроводностью.

В задачу исследования на первом этапе входит экспериментальное определение теплопроводности электроизоляционных материалов, применяемых в качестве пазовой изоляции статоров асинхронных двигателей и оценка точности полученного результата.

Измерение коэффициента теплопроводности проводится при помощи плоского прибора методом одной пластины с охранным кольцом. Идея этого метода основана на простейшем тепловом режиме твердого тела простейшей формы. В качестве такого тела выбрана пластинка исследуемого материала, ограниченная параллельными плоскостями. В исследуемом образце изотермические плоскости нормальны к потоку тепла, следовательно,

$$P = \lambda (\Theta_1 - \Theta_2) \frac{F}{\Delta_i}, \quad (1)$$

где P — количество тепла, проходящее в единицу времени через поверхность; Δ_i — толщина исследуемого образца; F — площадь исследуемого образца; $(\Theta_1 - \Theta_2)$ — перепад температуры.

Разработанная нами установка предназначена для исследования различных листовых изоляционных материалов и комбинированной многослойной изоляции. Количество тепла P выделяется главным на-

гревателем, представляющим собой спираль из нихрома в металлическом корпусе. Для максимального снижения утечки тепла применяется экранирующее кольцо, снабженное нагревателем, и дополнительный нижний нагреватель. Такая конструкция гарантирует, что величина P , принятая при расчете λ , т. е. количество тепла, которое фактически проходит через образец за единицу времени, равно мощности главного нагревателя.

Вся система заключена в ящик, заполненный хорошим теплоизоляционным материалом, в данном случае стекловатой. Питание нагревателей осуществляется постоянным током, мощности регулируются независимо. Для измерения температур различных частей применяются 20 термопар «медь—константан».

Теплопроводность изоляции определяется на основании формулы (1)

$$\lambda = \frac{U \cdot I \cdot \Delta l}{\Delta \Theta \cdot F},$$

где U и I — напряжение и ток главного нагревателя,

$$U \cdot I = P [bm].$$

Систематическая ошибка измерения теплопроводности определяется погрешностью измерительных приборов.

δ_a и δ_b — относительная погрешность амперметра и вольтметра в цепи главного нагревателя;

δ_Δ — относительная погрешность микрометра, которым измеряется толщина изоляции;

δ_Θ — относительная погрешность измерения перепада температуры

$$\delta_\Theta = \frac{2(\Delta_n + \Delta_T)}{\Delta \Theta}, \quad (2)$$

где Δ_n — погрешность измерения температуры потенциометром;

Δ_T — погрешность термометра, применявшегося при градуировке термопар.

Погрешность измерения площади образца F ввиду малости не учитывается.

По условиям опыта $\delta_a = 0,5\%$; $\delta_b = 0,2$; $\delta_\Delta = 1,0\%$; $\Delta_n = 0,4^\circ \text{C}$; $\Delta_T = 0,05^\circ \text{C}$; $\Delta \Theta = 25^\circ \text{C}$.

$$\delta_\Theta = \frac{2(0,4 + 0,05)}{25} \cdot 100 = 3,6\%.$$

Таким образом, систематическая ошибка измерений лежит в пределах

$$\delta = \delta_a + \delta_b + \delta_\Delta + \delta_\Theta = 5,3\%.$$

Случайная ошибка измерений вызывается неточной компенсацией утечек тепла от главного нагревателя, неравномерностью нагрева пластин, между которыми помещается испытуемый образец, неравномерностью толщины образца и другими подобными факторами. Величина случайной ошибки может быть уменьшена до любого заданного значения путем увеличения числа опытов, однако это значение должно быть сбалансировано с систематической ошибкой. Достаточно ограничиться следующим требованием к гарантированной случайной ошибке

$$\Delta x \leq \frac{\delta}{2}. \quad (3)$$

В данном конкретном случае можно принять $\Delta x = 2,5\%$ при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Для определения необходимого числа опытов была предварительно найдена среднеквадратическая погрешность единичного измерения. Для

этого один образец изоляции был испытан несколько раз; перед каждым опытом он вынимался из прибора и затем снова устанавливался, причем в другом положении; мощность нагревателя в разных опытах была различной. В результате достаточно большого числа измерений был найден среднеквадратичный разброс $S = 5,5\%$.

С помощью таблицы необходимого числа измерений [2] при

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{S} = \frac{2,5}{5,5} = 0,45 \quad \text{и} \quad \alpha = 0,95$$

с применением интерполяции найдено необходимое число опытов $n = 23$.

Таким образом суммарная гарантированная ошибка с надежностью 0,95 не превышает

$$\Sigma = \Delta x + \delta = 2,5 + 5,3 = 7,8\%.$$

В табл. 1 приведены результаты измерения удельной теплопроводности для двух типов пазовой изоляции электрических машин:

1. Однослойная изоляция из стеклоскапоновой лакоткани марки ЛСЭ толщиной 0,165 мм в непропитанном состоянии.

2. Двухслойная изоляция из электрокартона марки ЭВ толщиной 0,199 мм и лавсановой пленки толщиной 0,051 мм. Этот вид изоляции испытывался в непропитанном состоянии и после пропитки в лаке МЛ92, причем качество пропитки опытных образцов контролировалось по отсутствию пузырьков между слоями. При испытании определялась эквивалентная теплопроводность слоистой изоляции.

Опытные образцы имели форму квадратов $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Каждый образец испытывался один раз.

Таблица 1
Распределение теплопроводности образцов
пазовой изоляции по разрядам

Разряд интервал $\left(\Delta\lambda = 0,01 \frac{\text{Вт}}{\text{м град}}\right)$	Число измерений в разряде		
	стеклоскапоновая ткань	двухслойная изоляция электрокартон—лавсан	
		до пропитки	после пропитки
0,05-0,06	-	3	
0,06-0,07	1	0	
0,07-0,08	1	1	
0,08-0,09	1	3	
0,09-0,10	2	1	2
0,10-0,11	2	3	11
0,11-0,12	0	6	6
0,12-0,13	4	5	3
0,13-0,14	3	1	1
0,14-0,15	4		
0,15-0,16	2		
0,16-0,17	1		
0,17-0,18	0		
0,18-0,19	1		
0,19-0,20	1		
Общее число измерений	23	23	23

В результате измерений найдено среднее значение теплопроводности $\bar{\lambda}$, среднеквадратический разброс теплопроводности, погрешность определения среднего значения

$$\bar{\sigma}_{\lambda} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot \frac{100}{\bar{\lambda}} \% \quad (4)$$

вследствие разброса характеристик образцов.

Результаты обработки опытных данных сведены в табл. 2.

Таблица 2

Теплопроводность изоляции и ее разброс

Тип изоляции	λ , $\frac{вт}{м \cdot град}$	σ , %	$\sigma_{\bar{\lambda}}$, %
Однослойная изоляция ЛСЭ (стеклоэскапоновая ленточная без пропитки)	0,13	25	4,9
Двухслойная изоляция электрокартон — лавсан до пропитки	0,10	25	5,2
После пропитки в лаке МЛ-92	0,16	6,2	1,3

Анализ опытных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Пропитка в лаке не только повышает эквивалентную теплопроводность, но и существенно снижает ее разброс, в приведенном примере — в 4 раза; причем разброс теплопроводности, полученной на различных образцах, приближается по величине к разбросу при многократных измерениях на одном образце.

2. Показатели разброса теплопроводности могут использоваться для контроля качества пропитки изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Осипова. Экспериментальное исследование процессов теплообмена «Энергия», 1969.
2. А. Н. Зайдель. Элементарные оценки ошибок измерений. «Наука», 1968.