

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБМОТКЕ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ЕЕ ОХЛАЖДЕНИИ ПО ДЛИНЕ

В. Г. Рязанов

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Основным методом опытного определения теплового состояния электрических машин мощностью до 5000 квт является измерение среднего сопротивления обмоток, имеющих выводы.

В мощных электрических машинах, имеющих интенсивную вентиляцию активных частей, и особенно в быстроходных, с относительно длинными лобовыми частями, может иметь место значительная неравномерность нагрева обмотки по длине витка. Поскольку в высоковольтных машинах постановка термодатчиков непосредственно на активную медь сопряжена со значительными технологическими и конструктивными трудностями, обычно предпочитают производить достаточно подробные измерения перегревов зубцовой зоны активной стали заложенными в зубцы термодатчиками и затем прибавлением к ним расчетных перепадов температуры в изоляции обмотки определять тепловое состояние обмотки в пазовой части. В дальнейшем сопоставление среднего измеренного перегрева обмотки с перегревом пазовой части позволяет определить средний перегрев лобовых частей.

Часто оказывается, что средние уровни перегревов пазовой и лобовой частей отличаются значительно, поэтому при среднем перегреве обмотки, близком к предельно допустимому для данного класса изоляции, надежность работы изоляции в более нагретом участке обмотки бывает весьма сомнительная. В этом случае появляется необходимость представить распределение перегревов меди более точно, с учетом аксиальных потоков тепла в обмотке, выравнивающих перегревы участков с различной интенсивностью охлаждения. Рассмотрим способ расчета перегревов обмотки с учетом аксиальных потоков тепла при обработке результатов измерений.

Расчет более прост при симметричной аксиальной системе вентиляции. Выделим два участка обмотки: от середины сердечника до торца и от торца до головок (рис. 1).

Уравнение Пуассона для каждого участка:

$$\lambda f \frac{d^2\vartheta}{dx^2} - (\vartheta - \vartheta_c)\Lambda = -p, \quad (1)$$

где λ и f — коэффициент теплопроводности и сечение меди,

ϑ — превышение температуры меди обмотки над входящим воздухом,

ϑ_c — превышение температуры окружающей обмотку среды (стали сердечника или воздуха) над входящим воздухом,

λ — проводимость для теплоотдачи в окружающую среду на единицу длины обмотки, p — потери в меди на единицу длины обмотки.

Граничные условия для каждого участка:

$$-\lambda f \frac{d\vartheta}{dx} \Big|_{x=l} = 0 \quad (2)$$

$$-\lambda f \frac{d\vartheta}{dx} \Big|_{x=0} = \mp q. \quad (3)$$

В (3) q — аксиальный тепловой поток (принят положительным в сторону лобовой части), и здесь и дальше верхний знак относится к пазовому участку.

Решение (1) с учетом (2) и (3)

$$\vartheta = \vartheta_c + \frac{p}{\Lambda} \mp q \frac{\operatorname{ch}(l-x)m}{\lambda f m \cdot \operatorname{sh} ml}, \quad \text{где } m = \sqrt{\Lambda/\lambda f}. \quad (4)$$

Из (4) средний перегрев меди

$$\vartheta_{\text{ср.}} = \frac{1}{l} \int_0^l \vartheta dx = \vartheta_c + \frac{1}{\Lambda} \left(p \mp \frac{q}{l} \right) \quad (5)$$

и перегрев меди на торце сердечника

$$\vartheta_T = \vartheta_c + \frac{p}{\Lambda} \mp q \frac{1}{\lambda f m \operatorname{th} ml}. \quad (6)$$

Присвоим лобовой и пазовой частям соответственно индекс 1 и 2. Тогда, с учетом очевидного равенства

$$\vartheta_{T1} = \vartheta_{T2} \quad (7)$$

из выражений (6) следует

$$q = \lambda f \frac{(\vartheta_{c2} - \vartheta_{c1}) + \left(\frac{p_2}{\Lambda_2} - \frac{p_1}{\Lambda_1} \right)}{\frac{1}{m_1 \operatorname{th} m_1 l_1} + \frac{1}{m_2 \operatorname{th} m_2 l_2}}. \quad (8)$$

Однако в нашем распоряжении еще имеется измеренная величина среднего перегрева обмотки

$$\vartheta_{\text{ср. обм.}} = \frac{\vartheta_{\text{ср.1}} \cdot l_1 + \vartheta_{\text{ср.2}} \cdot l_2}{l_1 + l_2}, \quad (9)$$

по которой, с учетом (5), также можно определить q

$$q = \frac{\Lambda_1 \cdot \Lambda_2}{\Lambda_2 - \Lambda_1} \left[\vartheta_{\text{ср. обм.}} (l_1 + l_2) - l_1 \left(\frac{p_1}{\Lambda_1} + \vartheta_{c1} \right) - l_2 \left(\frac{p_2}{\Lambda_2} + \vartheta_{c2} \right) \right]. \quad (10)$$

Недостатком каждого из выражений (8) и (10), взятого в отдельности, является то обстоятельство, что наряду с измеряемыми величинами ϑ_{c1} и ϑ_{c2} и легко рассчитываемыми по измеренному сопротивлению обмотки и току потерями p_1 и p_2 , мы пользуемся расчетными величинами Λ_1 и Λ_2 . Причем, если величина Λ_2 известна достаточно хорошо, то надежный расчет Λ весьма затруднителен из-за неопределенности коэффициента теплоотдачи с поверхности катушек и самой величины их теплоотдающей поверхности (наличие распорок, вязок, бандажей). Поэтому совместное решение (8) и (10) относительно q и Λ позволяет опре-

делить не только q , а следовательно, и распределение перегревов меди по (4), но и величину Λ_1 , что само по себе весьма ценно.

При необходимости повысить точность обработки можно уточнить величину p_1 и p_2 по полученным из (5) средним перегревам участков и повторить расчет.

Приведем пример обработки опытных данных. Двигатель типа АЗ-500/6000, асинхронный, 500 квт, 6 кв, 57 а, 3000 об/мин.

Параметры при расчете на половину машин, на один паз: $l_1 = 0,439$ м, $l_2 = 0,23$ м, $f = 3,28 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $\Lambda_2 = 6,55 \text{ вт/м}^\circ\text{С}$. Опытные данные и результаты расчетов q и Λ_1 — в табл. 1.

Таблица 1

Номер режима	Характеристика режима	Ток	Температура входящего воздуха	$\vartheta_{\text{ср.обм}}$	$v_{\text{с1}}$	$v_{\text{с2}}$	p_1	p_2	λ_1	q	$\frac{q}{p_2 l_2}$
		а	$^\circ\text{С}$	$^\circ\text{С}$	$^\circ\text{С}$	$^\circ\text{С}$	вт/м	вт/м	вт/м $^\circ\text{С}$	вт	—
1	Питание обмотки постоянным током	57,0	23,6	40,9	8,6	17,3	138,5	138,5	4,11	1,0	0,031
2	Частичная нагрузка	45,1	23,7	39,2	6,4	40,0	86,3	89,8	3,78	9,3	0,45
3	Номинальный режим	57,2	25,0	58,7	8,8	54,5	148,5	154,0	4,01	12,5	0,352
4	Номинальный режим	56,9	16,6	59,9	8,6	54,5	$\frac{143,5}{141,0}$	$\frac{149,0}{153,5}$	$\frac{3,67}{3,65}$	$\frac{11,1}{11,4}$	$\frac{0,325}{0,323}$

В табл. 1 величины удельных потерь определены при среднем перегреве обмотки $\vartheta_{\text{ср.обм}}$. Во второй строке режима 4 произведено их уточнение по результатам первого просчета. В величине p_2 учтены добавочные потери в меди.

Результаты расчета перегревов меди представлены на рис. 1 для режима 4.

Из приведенного примера можно сделать некоторые выводы:

1. Величина аксиального теплового потока составляет в номинальном режиме 32% от потерь в пазовой части, т. е. при расчетном перепаде температуры в изоляции $23,5^\circ\text{С}$ ($= \frac{p_2}{l_2}$) аксиальный поток снижает среднюю температуру пазовой части на $7,5^\circ\text{С}$, при этом максимальная температура ниже на $5,5^\circ\text{С}$.

2. Из четырех режимов получена средняя величина $\Lambda_1 = 3,89 \frac{\text{вт}}{\text{м}^\circ\text{С}}$ при относительной погрешности до $\pm 6\%$, определяемой в основном точностью измерений. Действительно, в режиме 4 измерен более высокий перегрев меди, чем в режиме 3, несмотря на меньшие величины температуры входящего воздуха и тока.

3. Уточнение величин p по результатам первого просчета практически не отразилось на величинах перегревов и λ_1 . Изложенный метод применим к статорным или роторным обмоткам, в том числе в машинах с другими системами вентиляции. Например, при симметричной ра-

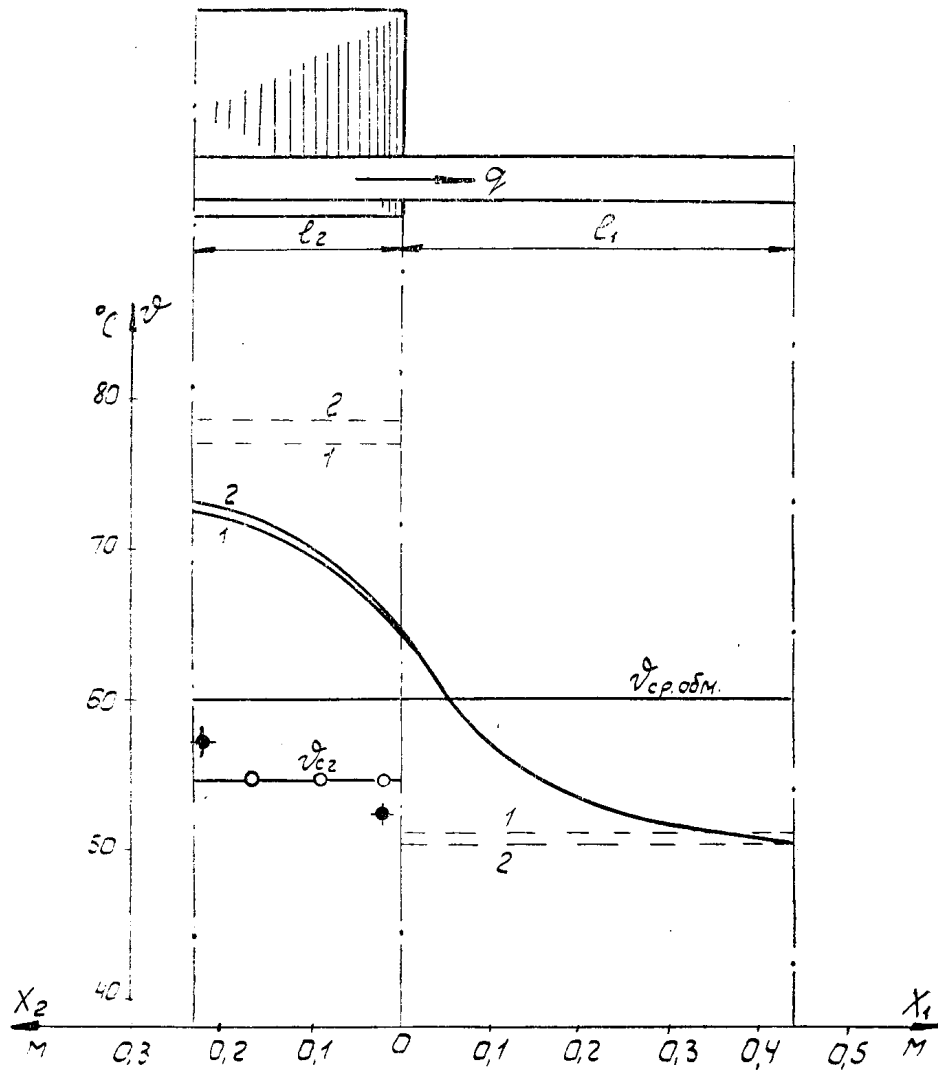


Рис. 1. — — — расчет по (4), — — — расчет по (4) и (9) без учета q , ($q=0$), ◆ измеренные перегревы зубцов, 1 — расчет первого приближения, 2 — расчет второго приближения

диальной системе вентиляции можно пользоваться вышеприведенными выражениями, если положить:

$$\Lambda_2 = \Lambda_{\text{п}} \cdot (1 - \beta) + \Lambda_{\text{к}} \cdot \beta, \quad (11)$$

$$\vartheta_{\text{с2}} = \frac{\vartheta_{\text{п}} \cdot \Lambda_{\text{п}} \cdot (1 - \beta) + \vartheta_{\text{к}} \cdot \Lambda_{\text{к}} \cdot \beta}{\Lambda_{\text{п}} \cdot (1 - \beta) + \Lambda_{\text{к}} \cdot \beta}, \quad (12)$$

где

- $\vartheta_{\text{п}}$ — измеренный средний по длине сердечника перегрев стали,
- $\vartheta_{\text{к}}$ — измеренный средний перегрев воздуха в районе обмотки в радиальных каналах,
- $\Lambda_{\text{п}}$ и $\Lambda_{\text{к}}$ — расчетные удельные проводимости обмотки соответственно на участке пакета и в радиальном канале по-прежнему на единицу длины обмотки,

$$\beta = \frac{b_{\text{к}}}{b_{\text{п}} + b_{\text{к}}} \text{ — относительная ширина радиального канала.}$$