

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Р. Я. КЛЯИН, Д. И. САННИКОВ

(Представлена объединенным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Температурное поле в обмотках электрических машин в установившемся номинальном режиме имеет неравномерный характер, обусловленный двумя причинами:

1) закономерностями явлений теплоотдачи и теплопроводности в различных частях машины при отсутствии случайных отклонений теплофизических условий,

2) случайными отклонениями условий тепловыделения и теплоотдачи в различных машинах одного типа, в различных катушках одной машины и т. д.

Первая причина вызывает определенное распределение температуры по длине машины и по сечению катушек. Хотя имеется значительный опыт исследования в данной области и разработаны методы приближенного расчета температурного поля, однако трудности предварительного определения теплофизических условий и другие причины приводят к необходимости продолжения экспериментальных исследований.

Вторая причина вызывает разброс нагрева однотипных машин и однотипных частей в пределах машины. Этот разброс в машинах постоянного тока малой мощности практически не был исследован, однако необходимость исследования очевидна, так как разброс должен учитываться при назначении температурных допусков.

Для получения достаточного объема информации при исследовании температурных полей в качестве объекта испытаний были выбраны модификации двигателей П32 и П52, предназначенные для работы в трех номинальных режимах, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Номинальные режимы	П32		П52	
	P_n , кВт	n , об/мин	P_n , кВт	n , об/мин
1-й режим	5,9	3900	19,5	3750
2-й режим	3,7	3000	12,4	3000
3-й режим	2,9	2500	9,3	2450

Для испытаний были изготовлены четыре двигателя П32 и два — П52 — с заложенными медно-константановыми термопарами в количестве до 250 в каждом двигателе. В якоре П32 имелось 47 термопар, П52 — 71 термопара; в полюсных катушках соответственно 64 и 128; в сердечниках полюсов и корпусе — по 52.

Испытания проводились в трех указанных номинальных режимах, измерение термо-эдс производилось при установившемся нагреве с помощью потенциометра Р2/1, кроме того, средняя температура обмоток определялась по методу сопротивления. Режимы повторялись 3—5 раз, после чего данные измерений усреднялись.

Температурное поле якоря

Термопары одной позиции располагались по окружности якоря в 4—8 точках для машины ПЗ2 и в 4—12 точках для П52. Концы термопар выводились через канал в валу двигателя к приставному токосъемнику.

На рис. 1 даны позиции термопар в обмотке якоря и показано распределение превышения температуры по длине обмотки в трех двигателях ПЗ2 во 2-м режиме, при этом показания термопар одной позиции усреднены. Данные измерений превышения температуры над температурой окружающей среды по обоим типам двигателей в трех номинальных режимах сведены в табл. 2, причем данные по однотипным машинам также усреднены.

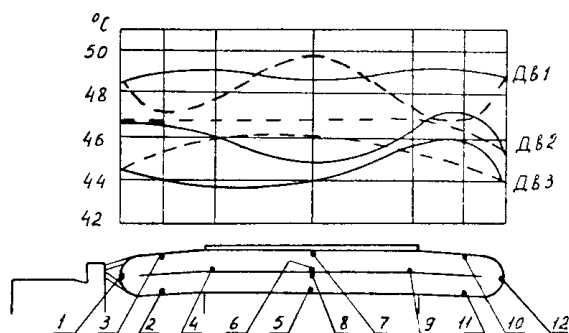


Рис. 1. Распределение температуры по длине обмотки якоря в двигателе ПЗ2

Таблица 2

№ поз. по рис.	ПЗ2			П52		
	Режим работы					
	1	2	3	1	2	3
1 поз.	53,3	47	42,8	88,6	76,2	74,6
2	53,6	46,9	41,8	85,9	80,5	72,6
3	54,1	47,3	42,4	88,4	86,4	77,2
4	54,1	47,0	42,3	84,1	83,3	73,0
5	54,1	48,4	43,3	80,3	79,1	66,3
6	55,7	47,7	42,4	82,6	79,8	69,7
7	54,5	46,5	42,6	83,2	82,1	69,3
8	55,4	47,3	42,5	86,7	80,0	73,9
9	52,0	47,4	42,0	85,2	83,1	73,0
10	53,1	47,9	41,6	74,3	76,6	67,0
11	51,9	46,3	40,6	101,2	86,1	84,6
12	55,2	46,9	42,5	85,2	79,5	74,3
Ср. знач. по термо- парам	53,9	47,3	42,2	85,5	81	73
Ср. знач. по сопр.	63,1	47,7	42	85,2	78,5	72

Из кривых рис. 1 и аналогичных кривых, полученных в других режимах, видно, что характер распределения температуры для разных однотипных машин различен, то есть подвержен влиянию случайных факторов, однако неравномерность распределения температуры по длине и по высоте обмотки примерно одинакова для всех машин, при усреднении данных по однотипным двигателям неравномерность уменьшается.

Среднеквадратический разброс нагрева $d\theta_{ям}$ между однотипными двигателями ПЗ2 в отдельных позициях в различных режимах лежит в пределах 1,8-5%, разброс среднего перегрева обмотки во 2-м режиме составляет 2,8% по термопарам и 1,8% по методу сопротивления, в других режимах разброс имеет близкие значения и не превосходит 4%. Для двигателей П52 ввиду наличия только двух опытных образцов данный разброс не определялся.

Среднеквадратическое отклонение температуры $d\theta_{яо}$ по окружности якоря в одной позиции составляет не более 2,5% для ПЗ2 и до 12,5% для П52.

Результирующее среднеквадратическое отклонение

$$\partial \theta_{яо} = \sqrt{\partial \theta_{ям}^2 + \partial \theta_{яг}^2} \quad (1)$$

составляет для ПЗ2 во 2-м режиме 3,8% в среднем для всех позиций и 6,0% для позиции с максимальным разбросом (позиция 12). Для машины П52 это отклонение оценивается в 13%.

Распределение температуры по длине обмотки характеризуется превышением температуры максимально нагретой точки над средней $\Delta\theta_{яг}$. Для машин ПЗ2 $\Delta\theta_{яг}$ составляет: в 1-м режиме 2,9%, во 2-м — 1,5 и в 3-м режиме 1,7%, для П52 соответственно 19, 10 и 17,5%.

Отсюда может быть найдено максимально возможное превышение температуры горячей точки над средней температурой обмотки якоря с 96%-ной вероятностью

$$\Delta\theta_{яmax} = 2\partial\theta_{я} + \Delta\theta_{яг} \quad (2)$$

В первом режиме, то есть при наибольшей нагрузке, $\Delta\theta_{яmax}$ составляет для двигателей ПЗ2 15% или 8°C, а для двигателей П52—45% или 38,5°C.

Распределение температуры по высоте обмотки в пазу, определившееся в двигателе П52, показано на рис. 2а и характеризуется относительной равномерностью.

Температурное поле обмоток главных и дополнительных полюсов

Термопары закладывались в каждой катушке в 4-х сечениях, расположенных посредине ее сторон: I — со стороны коллектора, III — с противоположной стороны, II и IV в боковых сторонах катушки. Расположение термопар в сечении обозначено на рис. 2б позициями А, В, С, D, Е. При рассмотрении распределения температуры по длине полувитка усреднялись показания термопар в каждом сечении на основании предположения о распределении температуры в сечении по закону эллиптического параболоида

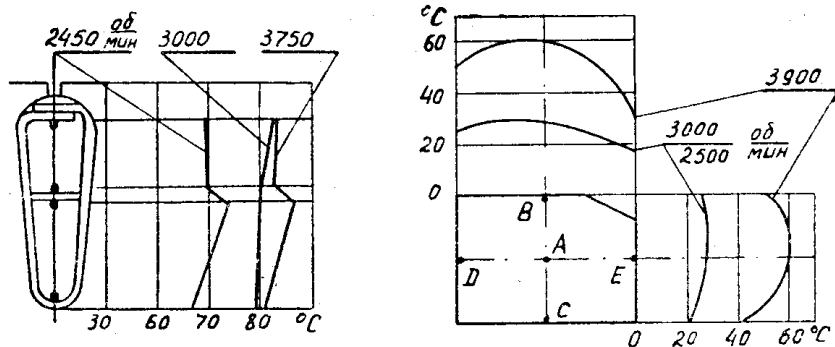


Рис. 2. Распределение температуры по высоте обмотки в пазу и в полюсных катушках

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{4\theta_A + \theta_B + \theta_C + \theta_D + \theta_F}{8} \quad (3)$$

Кроме того, усреднялась температура II и IV сечений. Значения усредненных превышений температуры представлены в табл. 3. Неравномерность распределения по длине для обоих двигателей незначительна, отклонение от среднего не превышает 2°C , а в относительном выражении — 3,5% для шунтовых катушек и 5% для катушек дополнительных полюсов.

Таблица 3

Сечения	П32					
	Шунтовые катушки			Катушки доп. пол.		
	I	II—IV	III	I	II—IV	III
1-й режим	50,9	52,2	50,8	22,1	23,8	23,0
2-й режим	25,0	25,7	24,8	21,1	21,4	21,6
3-й режим	25,8	26,6	25,5	20,8	21,4	20,8
	П52					
	I	II—IV	III	I	II—IV	III
	I	II—IV	III	I	II—IV	III
	I	II—IV	III	I	II—IV	III
1-й режим	74,5	74,8	73,8	42,4	41,4	40,6
2-й режим	61,3	58,4	59,6	41,9	41,4	39,1
3-й режим	57,3	54,5	54,8	37,8	37,7	36,9

Значительно большая неравномерность распределения температуры наблюдается в поперечном сечении катушек, как видно из графиков на рис. 3, где показано распределение температуры для двигателя П32 во 2-м режиме. Показания термопар усреднены по позициям во всех катушках. Сводные данные для обоих двигателей и всех трех режимов приведены в табл. 4. Неравномерность распределения температуры по сечению характеризуется коэффициентом максимального превышения температуры

$$k_m = \frac{\theta_A}{\theta_{\text{ср}}} \quad (4)$$

Таблица 4

Поз.	ПЗ2						П52					
	Шунтовые катушки			Катушки доп. пол.			Шунтовые ка- тушки			Катушки доп. пол.		
	Режимы работы						Режимы работы					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A	61,0	28,6	29,6	27,2	23,9	24,2	96,4	75,4	69,8	48,2	46,2	46,1
B	49,9	26,2	27,1	20,4	19,4	18,1	47,2	38,9	36,9	31,0	33,9	34,4
C	38,6	20,5	21,3	19,0	19,5	18,2	40,6	38,0	34,9	36,5	37,0	36,0
D	49,8	25,2	26,2	24,3	22,6	21,5	62,7	53,1	48,8	37	37,3	34,6
E	29,7	16,8	16,3	13,7	14,3	14,0	58,9	45,9	43,9	34,2	34,5	32,1
$\Theta_{ср}$	51,5	25,4	26,1	23,3	21,4	21,1	74,4	59,7	51,6	41,4	41,4	40,2
κ_m	1,18	1,13	1,15	1,17	1,12	1,15	1,3	1,26	1,35	1,16	1,13	1,15

Характер температурного поля в катушках определяется низкой теплопроводностью пучка круглых изолированных проводов в поперечном направлении и высокой — в продольном и свидетельствует о сравнительно равномерном распределении плотности теплового потока по поверхности катушек.

Разброс нагрева катушек по отдельным машинам и по позициям в каждой машине по имеющимся опытным данным не превосходит разброса, характерного для обмотки якоря.

Основные выводы

В машине третьего габарита температурное поле якоря характеризуется слабо выраженной неравномерностью и небольшим разбросом как по окружности якоря, так и между однотипными машинами. Указанные отклонения не превышают 3—6%. Однако результирующее максимальное отклонение может достигать значительной величины ($\Delta\Theta_{я\max} = 15\%$).

С возрастанием размеров машины все перечисленные отклонения существенно увеличиваются, в машине пятого габарита $\Delta\Theta_{я\max}$ достигает 45%. Наиболее нагретая точка обмотки якоря находится в нижнем слое лобовых частей со стороны, противоположной коллектору, или вблизи середины якоря.

В полюсных катушках наиболее нагретая точка находится вблизи центра поперечного сечения, и превышение температуры для нее над средним перегревом катушек составляет 12—35%, причем большие значения относятся к шунтовым катушкам и к машинам большего габарита. Распределение температуры по длине витка является равномерным. Максимально возможное превышение температуры горячей точки над средней температурой с учетом случайных отклонений может оцениваться величиной 25% для ПЗ2 и 50% для П52 в режиме с наибольшей нагрузкой.

Снижение неравномерности нагрева и разброса является, таким образом, одним из резервов повышения использования машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Митропольский. Техника статических вычислений. Физматгиз, 1961.
2. М. Н. Уляницкий. Анализ температурных полей машин постоянного тока серии П. «Изв. ТПИ», т. 132, 1965.