

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Д. И. Санников, Р. Я. Кляйн

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Предлагаемая методика разработана для машин постоянного тока защищенного исполнения с самовентиляцией, имеющих диаметр якоря $D_a \leq 200$ мм и скорость вращения до 4000 об/мин. Якоря этих машин обычно делаются без вентиляционных каналов и имеют обмотку из мягких секций, что затрудняет охлаждение лобовых частей. Как показывают опыты, это обстоятельство, а также значительная аксиальная теплопроводность обмотки приводят к выравниванию распределения температуры по длине якоря, что позволяет значительно упростить методику теплового расчета, считая обмотку за одно равномерно нагретое тело.

Данная методика учитывает все важнейшие факторы в соответствии с принятыми в настоящее время воззрениями:

различие коэффициентов теплоотдачи на поверхностях сердечника и лобовых частей якоря;

тепловое сопротивление изоляции, как корпусной, так и витковой, и стали сердечника;

влияние бандажей на лобовых частях;

подогрев воздуха в машине;

связь обмотки с коллектором через выводы секций.

Учет последнего фактора применительно к мягким многовитковым секциям относится к особенностям данной методики, так же как и следующее: поскольку нижний слой лобовых частей обмотки не охлаждается, то тепловой поток от него распространяется вдоль проводников обмотки и переходит в верхний слой, создавая дополнительный внутренний перепад температуры в лобовых частях, что учитывается специальным тепловым сопротивлением.

Основное влияние на точность расчета оказывает правильный выбор теплофизических констант. На основании опытных данных можно рекомендовать следующие выражения для коэффициентов теплоотдачи активной части якоря, лобовых частей и коллектора:

$$\alpha_a = 0,77 v_a^{0,85} \cdot 10^{-3}, \frac{вт}{см^2 \cdot град} \quad (1)$$

$$\alpha_{л} = 1,3 \cdot 10^{-3} (1 + 0,85 v_a^{0,85}), \quad (2)$$

$$\alpha_{к} = 1,7 \cdot 10^{-3} (1 + v_{к}^{0,7}). \quad (3)$$

Здесь v_a и $v_{к}$ — окружные скорости якоря и коллектора, м/сек.

Коэффициенты теплопроводности изоляции: для класса А $\lambda_{и} = 0,001$ вт/см·град., для остальных классов $\lambda_{и} = 0,0016$.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности всыпной обмотки

$$\lambda_3 = \frac{2,5 \lambda_{и}}{\sqrt{k \frac{d'}{d} - 1}} \quad (4)$$

Здесь d' и d — диаметры изолированного и голого провода, для пазовой части $k=1,3$, для лобовой — $k=1,1$.

Размеры якоря, необходимые для расчета, указаны на рис. 1 и берутся в сантиметрах.

Тепловое сопротивление изоляции пазовой части обмотки (*град/вт*)

$$R_{иа} = \frac{1}{z l_a} \left[\frac{\Delta_{и}}{\Pi \lambda_{и}} + \frac{1}{12 \lambda_3 \left(\nu + \frac{1}{3\nu} \right)} \right], \quad (5)$$

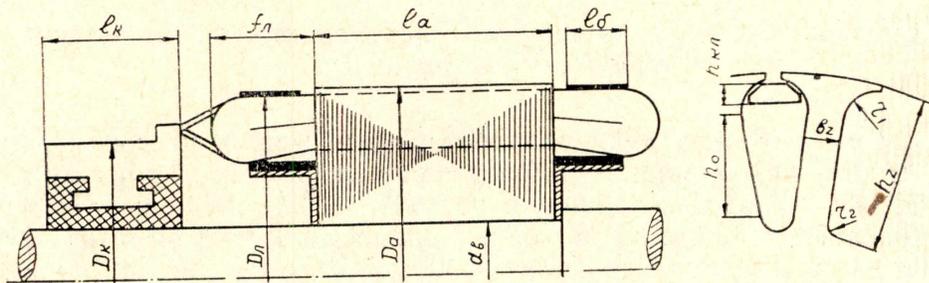


Рис. 1

где

z — число зубцов якоря,
 $\Delta_{и}$ — толщина пазовой изоляции,

$$\Pi = 2h_0 + \pi r_2 + \frac{2}{3} r_1 - \quad (6)$$

охлаждаемый периметр паза

$$\nu = \frac{h_0 - h_{кл}}{r_1 + r_2} + \frac{\pi}{4} - \quad (7)$$

(отношение средней высоты паза к средней ширине (без учета клина)).

Сопротивление зубцов якоря на 1/3 высоты

$$R_z = \frac{h_0 + 0,5r_1 + r_2}{3z l_a b_z \lambda_{Fe} k_{Fe}}, \quad (8)$$

$\lambda_{Fe} = 0,41$ *вт/см град* — теплопроводность стали,
 k_{Fe} — коэффициент заполнения стали.

Сопротивление между поверхностью активной части якоря и воздухом

$$R_a = \frac{1}{\pi D_a l_a \alpha_a}. \quad (9)$$

Коэффициент приведения потерь в стали к обмотке

$$k_F = \frac{1}{1 + \frac{R_{иа}}{R_a + R_z}}. \quad (10)$$

Расчетная толщина лобовых частей (без учета прокладок)

$$h_{л} = 0,24 \frac{(d')^2 N_{п} z l_{л}}{f_{л} D_{а}} \quad (11)$$

Здесь $N_{п}$ — число элементарных проводников в пазу,
 $l_{л}$ — длина лобовой части.

Расчетный вылет лобовых частей

$$f'_{л} = f_{л} + h_{л}.$$

Поверхность охлаждения

$$S_{л} = 0,95 \pi D_{а} f'_{л}.$$

Суммарная площадь сечения проводников

$$S_{м} = z N_{п} \frac{\pi}{4} (d')^2. \quad (14)$$

Тепловое сопротивление витковой изоляции (на одну сторону якоря)

$$R_{ил} = \frac{h_{л}}{12 \lambda_{э} S_{л}}. \quad (15)$$

Аксиальное тепловое сопротивление лобовых частей

$$R_{мл} = \frac{2 l_{л}}{S_{м} \lambda_{Cu}}. \quad (16)$$

Здесь $\lambda_{Cu} = 3,83$ — теплопроводность меди.

Учитывая, что максимальная разность температур верхнего и нижнего слоя наблюдается на расстоянии $2/3$ от конца вылета и превышение средней температуры лобовой части над температурой верхнего слоя составляет $\Delta \theta_{м}/3$, принимая, что от нижнего слоя передается в верхний 90% потерь, получаем, что соответствующее тепловое сопротивление составляет $R_{мл}/30$.

Тепловое сопротивление между поверхностью лобовых частей и воздухом с учетом изоляции под бандажом, имеющей толщину

$$R_{л\alpha} = \frac{1}{\alpha_{л} S_{л} \frac{f'_{л} - l_{б}}{f'_{л}} + S_{л} \frac{l_{б}}{f'_{л}} \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{л}} + \frac{\Delta_{б}}{\lambda_{и}}}} = \quad (18)$$

$$= \frac{1}{\alpha_{л} S_{л} \left(1 - \frac{l_{б}}{f'_{л}} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{и}}{\Delta_{б} \alpha_{л}}} \right)}. \quad (17)$$

Тепловая проводимость от коллектора к воздуху

$$G_{к} = \pi D_{к} l_{к} \alpha_{к}.$$

Тепловое сопротивление между коллектором и обмоткой определяется из следующих соображений. Выводы секций, уложенные вдоль поверхности лобовых частей, имеют с ними тепловую связь, характеризующуюся сопротивлением $R_{ил}$, аксиальное сопротивление выводов имеет величину $0,25 R_{мл} w_s$. Разность температур выводов и обмотки убывает от коллектора в сторону якоря по экспоненциальному закону с коэффициентом затухания

$$\beta = \frac{2}{l_{л}} \sqrt{\frac{0,25 R_{мл} w_s}{R_{ил}}}.$$

Сопротивление, равное отношению разности температур коллектора и конца вылета лобовых частей к тепловому потоку коллектор-обмотка, равно $R'_{кл} = R_{ил}\beta$.

Если определить среднюю температуру обмотки с учетом того, что выводы также входят в число проводников лобовых частей, то полученное сопротивление нужно умножить на отношение $(w_s - 1)/w_s$.

Наконец, ввиду того, что имеется участок выводов, непосредственно примыкающий к коллектору и не соприкасающийся с лобовыми частями, увеличиваем сопротивление на 20%. Таким образом, окончательно имеем

$$R_{кл} = 1,2 \frac{w_s - 1}{w_s} R_{ил}\beta = 0,6(w_s - 1) \sqrt{\frac{R_{мл} R_{ил}}{w_s}}. \quad (19)$$

Коэффициент связи коллектора с обмоткой

$$k_{кл} = \frac{1}{1 + G_k R_{кл}}. \quad (20)$$

Результирующая тепловая проводимость от обмотки якоря к воздуху

$$G_y = \frac{1}{R_\alpha + R_z + R_{иа}} + \frac{2}{R_{л\alpha} + \frac{1}{30} R_{мл} + R_{ил}} + k_{кл} G_k. \quad (21)$$

Приведенные потери якоря определяются по формуле

$$P_y = P_{мя} + k_F P_{ст} + 0,5 P_{доб} + k_{кл} 0,7 P_k, \quad (22)$$

где учитываются потери в обмотке $P_{мя}$ в стали $P_{ст}$, добавочные $P_{доб}$ и коллекторные P_k .

Подогрев воздуха в машине

$$\Delta \theta_f = \frac{0,9 P_{гр}}{100 V_p}. \quad (23)$$

Здесь $P_{гр}$ — суммарные греющие потери,

V_p — расход охлаждающего воздуха.

Превышение температуры обмотки якоря

$$\theta_y = \frac{P_y}{G_y} + \frac{\Delta \theta_f}{2}. \quad (24)$$

В качестве примера в таблице приведены результаты теплового расчета некоторых двигателей и сравнение их с опытными данными.

Выводы

1. Предлагаемая методика более точно учитывает температурные перепады между внутренними частями обмотки и охлаждаемыми поверхностями, а также связь с коллектором.

2. Погрешность расчета не превышает обычного разброса опытных данных.

Расчетные и опытные данные по нагреву якоря двигателей серии П

Тип двигателя	П12	П32	П41	П22*	П52 *	П62 *
Мощность, <i>квт</i>	0,45	2,2	3,2	2,9	12,4	37,0
Скорость вращения, <i>об/мин</i>	1500	1500	1500	3870	2750	3810
Напряжение, <i>в</i>	220	220	220	320	220	320
Перегрев обмотки, <i>град, расчет</i>	56,0	57,3	91,9	52,0	83,1	94,1
<i>опыт</i>	53,0	61,0	88,0	51,5	82,0	89,0
Расхождения, <i>град</i>	+3,0	-3,3	+3,9	+0,5	+1,1	+5,1
<i>%</i>	+5,6	-5,4	+4,4	+1,0	+1,3	+5,6

Примечание. * — модификация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. С. Гурин и М. Н. Курочкин. Проектирование машин постоянного тока. Госэнергоиздат, 1961.
2. А. И. Борисенко, А. И. Яковлев. Методика теплового расчета защищенных быстроходных двигателей постоянного тока. «Электромеханика», 1964, № 5.