

## НЕСИММЕТРИЯ НАГРЕВА КОРПУСА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ВНЕШНИМ ОБДУВОМ

В. А. ЖАДАН, Д. И. САННИКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Широкое распространение электрических машин закрытого обдуваемого исполнения, в особенности асинхронных двигателей, и необходимость снижения их веса на единицу мощности требует глубокого изучения ряда специальных вопросов их охлаждения.

Одна из особенностей охлаждения корпуса машины при наружном одностороннем обдуве заключается в значительной неравномерности распределения теплоотдачи и температуры оболочки по длине. Воздушный поток при входе в междуреберные каналы имеет высокую скорость и степень турбулентности. Затем по мере продвижения вдоль ребер станины скорость потока снижается вследствие рассеяния потока и затухания вихрей. Измерения скоростей воздуха, проведенные на двигателе А02-42-2 с помощью трубок полного и статического напора, показали, что скорость воздуха снижается от начала к концу канала в 3—4 раза. В других типах двигателей, преимущественно большей мощности, с более удачно выбранными параметрами вентиляционной системы это снижение составляет, по литературным данным, 1,5—2, что также является значительной величиной.

Вследствие снижения коэффициента теплоотдачи станины от вентилятора к стороне привода возникает значительный перекося кривой распределения температуры (рис. 1). Перекося температурной кривой наблюдается и вдоль обмотки статора, но значительно менее выраженный ввиду большой аксиальной теплопроводности проводников. Так, лобовые части обмотки со стороны привода в машинах серии А02 3 и 4 габарита нагреты на 5—9 проц. больше, чем со стороны вентилятора.

Вопрос о том, от чего и в какой степени зависит неравномерность нагрева машины и как она влияет на условия охлаждения машины в целом, заслуживает специального рассмотрения.

Для анализа данного явления, кроме опытных данных, необходимо аналитическое выражение температурной кривой. Рассматривая оболочку машины как теплопроводящий стержень, к которому с одной стороны (изнутри машины) подводится тепловой поток, распределенный по определенному закону, а с другой стороны отводится тепло в соответствии с распределением коэффициента теплоотдачи, можно составить следующее дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{d^2\tau}{di^2} = R[G(i) \cdot \tau(i) - Q(i)]. \quad (1)$$

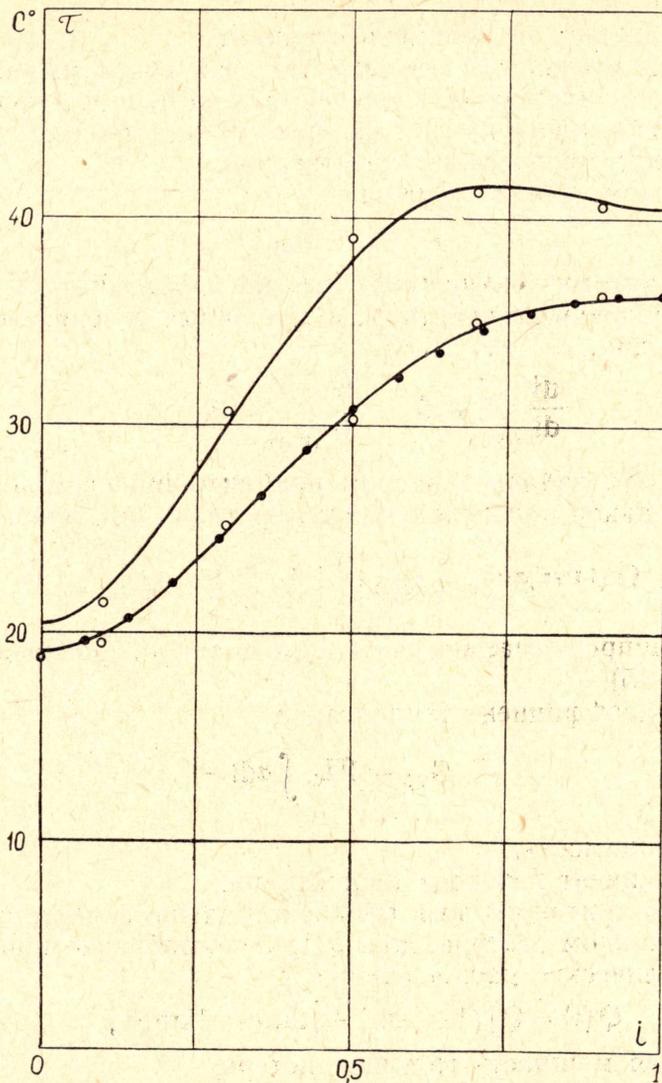


Рис. 1. Распределение перегрева по длине корпуса.

- 1 — тепловая модель,
- 2 — электродвигатель А02-42-4,
- o — опыт,
- — расчет по методу конечных отрезков,
- — по формулам (8), (12) — (16).

Здесь  $\tau$  — перегрев корпуса над окружающим воздухом;

$i$  — координата, отсчитываемая со стороны вентилятора и выраженной в относительных единицах (за единицу принята длина стержня);

$R$  — полное аксиальное тепловое сопротивление стержня;

$G(i)$  — закон распределения тепловой проводимости от стержня к охлаждающему воздуху;

$Q(i)$  — закон распределения притока тепла.

Подогревом воздуха в малых машинах можно пренебречь, в машинах средней мощности он может быть учтен путем введения дополнительного перегиба температурной кривой, полученной из решения уравнения (1):

По предлагаемому методу влияние подшипниковых щитов учитывается путем добавления к длине станины  $l_c$  с каждой стороны отрезков

$$l_{щ} = \frac{S_{щ}}{\Pi_c}, \quad (2)$$

где  $S_{ш}$  — поверхность охлаждения щита.

$\Pi_c$  — охлаждаемый периметр станины.

При этом дополнительное аксиальное тепловое сопротивление щитов получает несколько заниженное значение, однако ввиду меньшей неравномерности температурной кривой на крайних участках стержня получаема погрешность является несущественной.

Таким образом, длина стержня

$$l = l_c + 2l_{ш}. \quad (3)$$

Благодаря принятому допущению отпадает необходимость в рассмотрении нагрева оболочки по участкам, и граничные условия получают наиболее удобный вид:

$$\frac{d\tau}{di} \Big|_{(i=0)} = 0; \quad \frac{d\tau}{di} \Big|_{(i=1)} = 0. \quad (4)$$

Для рассмотрения задачи в первом приближении целесообразно принять линейный закон распределения теплоотдачи по длине:

$$G(i) = \alpha \Pi_c = G_{ср} \left[ \left( 1 + \frac{k}{2} \right) - ki \right] \quad (5)$$

на основании аппроксимации фактического закона распределения.

В формуле (5)

$\alpha = f(i)$  — коэффициент теплоотдачи

$$G_{ср} = \Pi_c \int_0^1 \alpha di \quad (6)$$

общая проводимость,

$k$  — коэффициент перекоса теплоотдачи.

Ввиду того, что приток тепла к оболочке больше в месте соприкосновения ее с сердечником статора, для  $Q(i)$  целесообразно принять симметричное параболическое распределение

$$Q(i) = Q[(1 - 2m) + 12mi - 12mi^2], \quad (7)$$

где  $Q$  — полная мощность греющих потерь,

$m$  — коэффициент неравномерности тепловыделения.

При подстановке (5) и (7) в (1) получается неоднородное дифференциальное уравнение с переменным коэффициентом, решение которого не выражается в табличных функциях. В теоретических работах по исследованию нагрева электрических машин решение уравнения подобного вида, насколько известно, не рассматривалось.

Для практических целей вполне достаточно получить приближенное решение уравнения, имеющее допустимую погрешность в реальных пределах изменения параметров.

Опытные данные, результаты численного решения уравнения (1), а также соображения общего порядка приводят к выводу, что кривая распределения перегрева  $\tau(i)$  может иметь не более трех экстремумов: в крайних точках, согласно граничным условиям, и в средней части. На этом основании можно упрощенно представить основные особенности этого распределения с помощью многочлена четвертой степени, удовлетворяющего граничным условиям (4),

$$\tau(i) = \tau_0 + (30\tau_{ср} - 18\tau_0 - 12\tau_1)i^2 - (60\tau_{ср} - 32\tau_0 - 28\tau_1)i^3 + (30\tau_{ср} - 15\tau_0 - 15\tau_1)i^4, \quad (8)$$

где  $\tau_0$  и  $\tau_1$  — значения перегрева на концах стержня,

$$\tau_{ср} = \int_0^1 \tau(i) di \quad \text{— средний перегрев.}$$

После дифференцирования и подстановки (8) в уравнение (1) в левой части получается многочлен второй степени вида

$$M_2(i) = a_0 + a_1 i + a_2 i^2,$$

в правой части — многочлен пятой степени

$$M_5(i) = b_0 + b_1 i + b_2 i^2 + b_3 i^3 + b_4 i^4 + b_5 i^5,$$

Выделим из  $M_5(i)$  члены со степенью выше второй

$$M_\partial(i) = b_3 i^3 + b_4 i^4 + b_5 i^5,$$

и подберем для  $M_\partial(i)$  аппроксимирующий трехчлен второй степени в интервале  $0 < i < 1$

$$M_a = b_0' + b_1' i + b_2' i^2,$$

пользуясь методом наименьших квадратов.

Квадрат общего среднеквадратичного расхождения

$$D = \int_0^1 [M_a(i) - M_\partial(i)]^2 di$$

имеет минимум при значениях коэффициентов аппроксимирующего трехчлена, удовлетворяющих уравнениям

$$\frac{\partial D}{\partial b_0'} = 0; \quad \frac{\partial D}{\partial b_1'} = 0; \quad \frac{\partial D}{\partial b_2'} = 0. \quad (9)$$

Решение системы (9) дает следующие значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} b_0' &= \frac{1}{20} b_3 + \frac{3}{35} b_4 + \frac{3}{28} b_5, \\ b_1' &= -\frac{3}{5} b_3 - \frac{32}{35} b_4 - \frac{15}{14} b_5, \\ b_2' &= \frac{3}{2} b_3 + \frac{12}{7} b_4 + \frac{25}{14} b_5. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, уравнение (1) обращается в следующее тождество:

$$a_0 + a_1 i + a_2 i^2 = (b_0 + b_0') + (b_1 + b_1') i + (b_2 + b_2') i^2.$$

Из решения системы уравнений

$$\begin{aligned} b_0 + b_0' - a_0 &= 0, \\ b_1 + b_1' - a_1 &= 0, \\ b_2 + b_2' - a_2 &= 0. \end{aligned}$$

Относительно  $\tau_{cp}$ ,  $\tau_0$  и  $\tau_1$  после ряда преобразований получается

$$\Delta\tau = \frac{\tau_1 - \tau_0}{2} = \tau_y \frac{k \left( \frac{5}{12} - \frac{1}{3} \frac{m}{1 + 42n} \right)}{1 + 10n - k^2 \left( \frac{1}{12} + \frac{5}{84} \cdot \frac{1}{1 + 42n} \right)}, \quad (12)$$

$$\tau_{cp} = \tau_y + \Delta\tau \frac{k}{5}, \quad (13)$$

$$\tau_{01} = \frac{\tau_0 + \tau_1}{2} = \tau_{cp} - \frac{1}{1 + 42n} \left( \frac{7}{5} \tau_y m - \Delta\tau \frac{k}{4} \right), \quad (14)$$

$$\text{где } \tau_y = \frac{Q}{G_{cp}} \quad (15)$$

условный средний перегрев оболочки без учета неравномерности,

$$n = \frac{1}{RG_{cp}} \quad (16)$$

безразмерный коэффициент, представляющий по смыслу величину, обратную критерию Био.

Как показывают поверочные расчеты, аппроксимация по методу наименьших квадратов дает минимальную погрешность по сравнению с другими способами аппроксимации: по точкам, по средним значениям на интервалах и т.д.

На рис. 1 представлены результаты расчета по предлагаемому методу (кривые) в сопоставлении с результатами численного решения уравнения (•) и с данными опыта (o) для двигателя А02-42-4 (кривая 1) и для тепловой модели (оболочки со встроенным нагревателем) машины А02 4-го габарита (кривая 2).

Совпадение с опытом вполне удовлетворительное. Погрешность приближенного аналитического метода решения уравнения (1) по сравнению с точным, как было установлено путем сравнения с результатами численного интегрирования в реальном диапазоне изменения параметров, пропорциональна коэффициенту  $K$  и увеличивается с уменьшением параметра  $n$ , то есть с увеличением размеров машины и скорости охлаждающего воздуха. Однако для машин предельных габаритов при максимально возможной неравномерности обдува наибольшее расхождение результатов решения в отдельных точках не превышает 3%  $\tau_{cp}$ , а для  $\tau_{cp}$  — не более 0,5%. Таким образом, предлагаемый метод решения уравнения теплопроводности является практически точным.

Анализ полученных формул показывает, что неравномерность охлаждения корпуса приводит к повышению его среднего перегрева по сравнению с условным на несколько процентов, неравномерность тепловыделения уменьшает влияние неравномерности обдува и не вызывает повышения среднего перегрева.

Полученные зависимости могут быть использованы для решения обратной задачи: по опытной картине распределения температуры вдоль корпуса, зная потери  $Q$  и тепловое сопротивление  $R$ , определить коэффициенты перекося теплоотдачи, неравномерности тепловыделения и уточнить значение общей тепловой проводимости  $G_{cp}$ . Для этой цели на основании формул (9) — (13) получено

$$k = \frac{\tau_{cp} + \frac{1}{10p}}{\frac{\Delta\tau}{5} + \frac{\tau_{01} + 0,75\tau_{cp}}{42p\Delta\tau}}, \quad (17)$$

$$\tau_y = \tau_{cp} - \Delta\tau \frac{k}{5}, \quad (18)$$

$$m = \frac{5}{7} \cdot \frac{1}{\tau_y} \left[ (\tau_{cp} - \tau_{01}) (1 + 42n) + \Delta\tau \frac{k}{4} \right], \quad (19)$$

$$G_{cp} = \frac{Q}{\tau_y}, \quad (20)$$

где

$$p = \frac{1}{RQ} = \frac{n}{\tau_y}. \quad (21)$$

Обработка результатов испытаний значительного количества двигателей и тепловых моделей серии А02 при различной скорости вращения

3 и 4-го габаритов показывает, что для данных машин неравномерность обдува характеризуется величиной

$$k = 1,05—1,15,$$

неравномерность тепловыделения составляет в среднем

$$m = 0,3.$$

Таблица 1

Результаты обработки данных испытания тепловой модели двигателя А02-42

Скорость вращения об/мин.	$\tau_{\text{ср}}$	$\Delta\tau$	$\tau_{01}$	k	Расхождение со средним, %	$G_{\text{э}}$	$G_{\text{ср}}$	$\frac{G_{\text{ср}} - G_{\text{э}}}{G_{\text{ср}}}$
	град.	град.	град.					%
750	46,6	12,6	45,0	1,109	+1,7	21,5	22,8	5,7
1000	36,2	10,1	34,6	1,049	-3,8	27,7	29,5	6,1
1500	28,3	9,3	26,8	1,242	+4,8	35,4	38,0	6,9
2000	23,3	7,9	22,4	1,109	+1,7	43,0	46,3	7,1
2500	21,4	7,0	20,8	1,043	-3,8	46,8	50,2	6,8

среднее — 1,09

На рис. 2. показано изменение перегрева в отдельных точках по длине корпуса при различной скорости вращения вентилятора. Данные

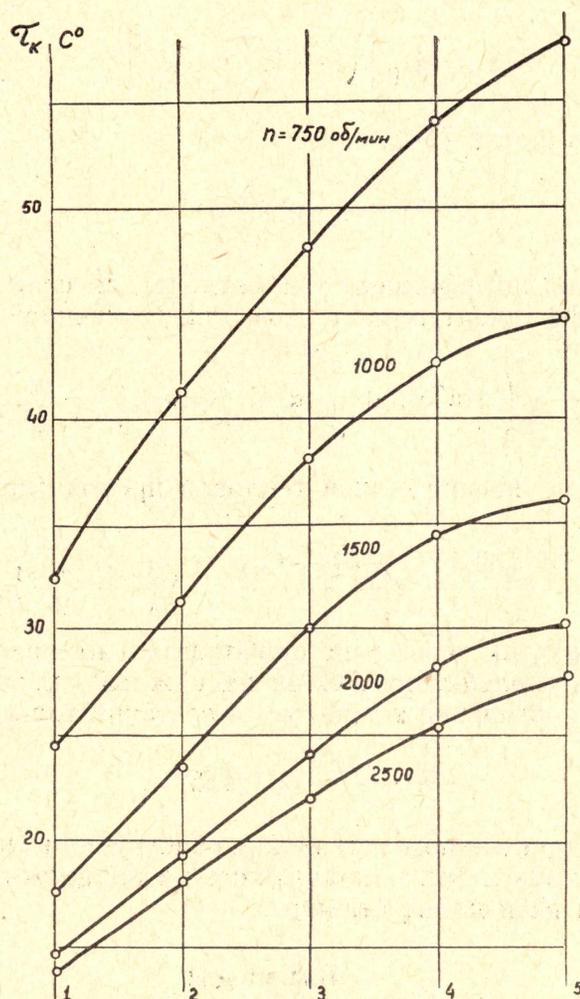


Рис. 2. Распределение температуры по длине корпусов модели при различной скорости вращения

получены при испытании тепловой модели двигателя А02-42 с нагревателем мощностью 1000 вт.

Обработка данных опыта по формулам (14) — (17), как видно из табл. 1, показывает, что коэффициент неравномерности теплоотдачи  $k$  не зависит от скорости вращения, а снижение эффективной проводимости

$$G_э = \frac{Q}{\tau_{ср}} \quad (22)$$

за счет несимметрии охлаждения по сравнению со средней проводимостью  $G_{ср}$  увеличивается с увеличением скорости. Таким образом, предлагаемая методика дает определенный эффект при анализе опытных данных.

Одним из приложений предлагаемой методики может служить предварительная оценка изменения эффективности обдува при увеличении длины станины, производимом с целью увеличения мощности двигателя без изменения высоты центров вала. Учитывая, что распределение коэффициента теплоотдачи по длине фактически не является линейным и скорость убывания  $\alpha$  по мере удаления от вентилятора замедляется, можно предположить, что при небольшом увеличении длины станины коэффициент теплоотдачи на добавочном отрезке длины остается таким же, как и в конце основного участка. Таким образом, на основном участке ( $0 < i < 1$ )

$$\alpha' = \alpha_{ср} \left[ \left( 1 + \frac{k}{2} i \right) - ki \right], \quad (23)$$

на добавочном участке ( $1 < i < 1 + \Delta$ )

$$\alpha'' = \alpha_{ср} \left( 1 - \frac{k}{2} \right), \quad (24)$$

где  $\alpha_{ср}$  — средний коэффициент теплоотдачи для основного участка.

Средний коэффициент теплоотдачи для удлиненной станины

$$\alpha'_{ср} = \frac{1}{1 + \Delta} \left( \int_0^1 \alpha' di + \int_1^{1+\Delta} \alpha'' di \right) = \alpha_{ср} \left( 1 - \frac{k}{2} \frac{\Delta}{1 + \Delta} \right). \quad (25)$$

Относительное увеличение общей тепловой проводимости за счет добавочного участка

$$\Delta_G = \frac{\alpha'_{ср} \Pi_{сл} (1 + \Delta) - G_{ср}}{G_{ср}} = \Delta \left( 1 - \frac{k}{2} \right). \quad (26)$$

Полученная формула позволяет приблизительно подсчитать, что, например, для двигателей типа А02-42 на каждый процент увеличения длины станины повышение теплоотдачи составит только

$$1 - \frac{1,09}{2} = 0,455\% .$$

В связи с этим при данном изменении конструкции необходимо одновременно принимать меры, направленные на поддержание высокой скорости обдува на всей длине станины.

### Выводы

1. Предлагаемая методика приближенного расчета распределения температуры по длине корпуса закрытых машин, учитывающая нера-

вномерность охлаждения и тепловыделения по длине машины, обеспечивает хорошее совпадение результатов расчета с опытными данными.

2. Использование метода наименьших квадратов для приближенного аналитического решения дифференциальных уравнений теплопроводности позволяет успешно решать практические задачи расчета температурного поля.

3. Разработанный метод расчета температуры корпуса может успешно использоваться для анализа опытных данных.