

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТИПА АО

В. А. Жадан, Ю. В. Копылов, Д. И. Санников

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Исследование нагрева закрытых обдуваемых асинхронных двигателей проводилось на двигателях ныне выпускаемой серии АО2 и на опытных образцах двигателей серий Д и АО4, имеющих высоту центров 132 мм, в номинальном режиме при установившемся нагреве.

Температурное поле испытуемых двигателей определялось с помощью медно-константановых термопар, заложенных в различные части двигателей. В обмотку статора закладывалось 40—60 термопар; в ротор — 10—20 термопар; в двигатель АО2-42-4 было заложено 12 термопар, позволяющих измерить перепад температуры в пазовой изоляции; перегрев поверхности спинки статора определялся в средней части его 12 термопарами, расположенными равномерно по окружности. Перегрев станины и подшипниковых щитов измерялся по 64 термопарам. Показания термопар ротора измерялись при вращающемся двигателе через токосъемное устройство. Места закладки термопар и температурные поля соответствующих двигателей приведены на рис. 1—3. Здесь приведены усредненные по окружности перегревы ротора, станины и подшипниковых щитов; перегревы обмотки статора усреднены по окружности статора и по высоте паза.

Объяснение характера кривых и расчет параметров, характеризующих разброс температуры между отдельными термопарами, заложенными в обмотку статора и станину, приведены в [2].

Наиболее нагретой частью двигателя является ротор. Температура по длине и окружности ротора меняется мало. В среднем ротор 4-полюсных машин нагрет больше статора на 25—30°C. Перепад в изоляции паза меняется по длине от 5 до 8°C, однако термопары, измеряющие температуру наружной поверхности изоляции, установлены так, что головки их могут вдавливаться в изоляцию. Поэтому перепад в пазовой изоляции в действительности в 1,15—1,25 раза больше.

В [2] отмечалось, что головки лобовых частей представляют собой монолитную конструкцию, которая имеет затрудненные условия охлаждения. Установка дистанционных прокладок между секциями позволяет воздуху свободно проходить в образованных при этом каналах и улучшает теплоотдачу лобовых частей. Так, в двигателе АО2-42-4 их средний перегрев уменьшается в результате на 2,8°C, или 4,4%; перегрев пазовой части обмотки статора уменьшается только на 0,8°C, или 1,4%.

Это показывает, что улучшение теплоотдачи от лобовых частей несколько уменьшает температуру обмотки в целом.

Если, наоборот, увеличить тепловое сопротивление от лобовых ча-



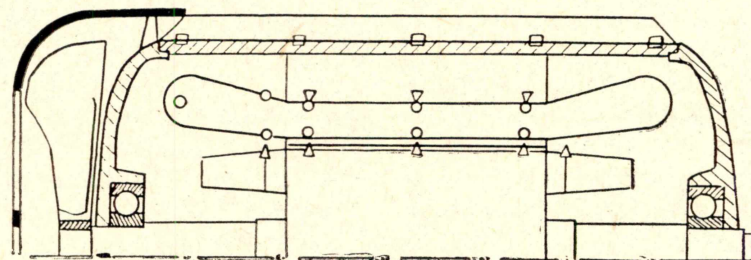
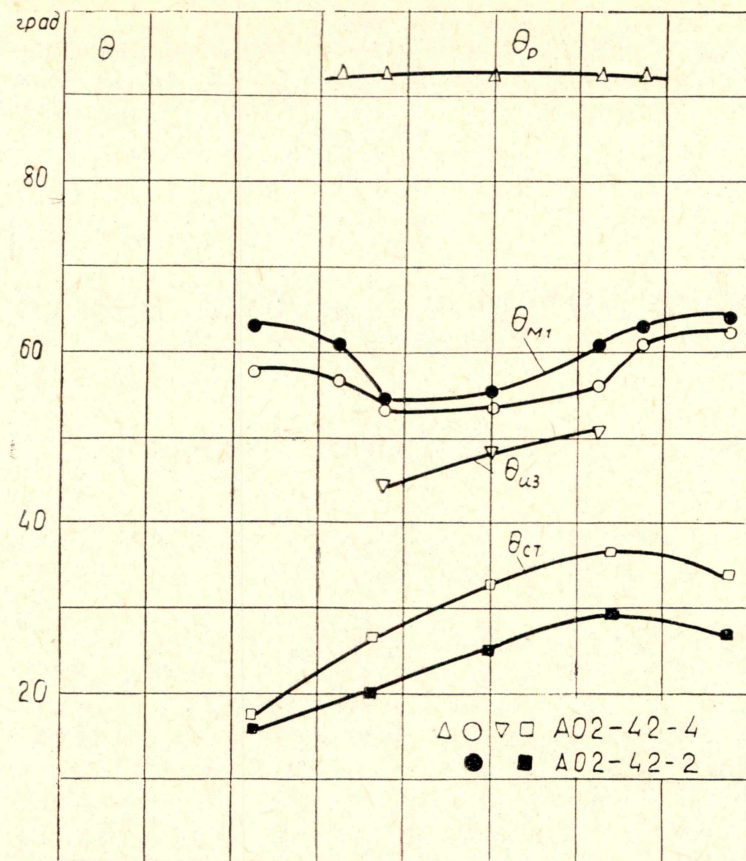


Рис. 1. Температурное поле двигателей А02-42-4 и А02-42-2

стей к внутреннему воздуху, например, путем покрытия асбестом, то их средняя температура увеличивается на  $4^{\circ}\text{C}$ , а пазовой части — на  $3,6^{\circ}\text{C}$ . При этом перепад температур от лобовых частей к пазовой части увеличивается с  $5,2$  до  $5,6^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, тепловой поток из лобовых частей в пазовую возрастает незначительно. Таким образом, ухудшение отвода тепла от лобовых частей к внутреннему воздуху не играет существенной роли. Повышение температуры обмотки статора в данном опыте объясняется следующей причиной: дополнительная изоляция на лобовых частях затруднила циркуляцию воздуха и ухудшила теплоотдачу от ротора, температура его поднялась на  $8^{\circ}\text{C}$ , и увеличилась доля тепла, передаваемая от ротора к статору через зазор, что вызвало дополнительный нагрев пазовой части обмотки.

Циркуляция воздуха внутри двигателя обеспечивается крыльчаткой, отлитой заодно с короткозамыкающим кольцом ротора. Известно, что интенсивность перемешивания воздуха зависит от размеров и количества крыльшек. Поскольку испытания проводились на серийном двигателе А02-42-4, то в данном случае можно было изменять ширину кры-



льшек только в сторону уменьшения от начального значения 46 мм; высота и число крыльшек не менялись. При уменьшении ширины крыльчатки в 2 раза средний перегрев обмотки статора увеличился на 3,8%, перегрев ротора увеличился на 5,9%; при полностью сточенной крыльчатке средний перегрев обмотки статора увеличился на 11,6%, перегрев ротора — на 15%. Повышение перегрева ротора при этом происходит вследствие уменьшения поверхности охлаждения крыльчатки, а статора — за счет увеличения теплового потока от ротора через зазор и ухудшения обдува лобовых частей. Хотя при уменьшении ширины крыльчатки уменьшаются внутренние вентиляционные потери, влияние их на тепловое состояние двигателя незначительно по сравнению с другими видами потерь. Обнаружить оптимальную ширину крыльшек, как это показано в [1], не удалось; по-видимому она больше, чем в существующей конструкции двигателя.

Конструкция внутреннего вентилятора, образованного крыльчаткой, такова, что доля воздушных потоков, циркулирующих по путям утечки и не участвующих в охлаждении лобовых частей обмотки статора, значительна. Кроме того, между статором и станиной имеются места, где практически отсутствует перемешивание воздуха. Поэтому для упорядочения движения воздуха внутри машины было предложено установить диск на пути утечек, то есть сделать вентилятор двухдисковым и тем самым направить воздух в решетку, создаваемую лобовыми частями при выходе из паза. В результате перегрев лобовых частей обмотки статора понизился на 1,5°С, а средний перегрев обмотки статора — на 0,6°С, или на 1%.

Весьма важным тепловым параметром для закрытых двигателей является проводимость между спинкой пакета статора и станиной, которая в сильной степени зависит от состояния контактируемых поверхностей, контактного давления и т. п. Исследования на различных машинах показывают, что перепад температур в зазоре между пакетом и станиной может колебаться от 3 до 7°С.

В серии АО2 пакет статора по наружному диаметру не обрабатывается, и средний перепад между пакетом и станиной составляет 5,7°С. Чтобы определить, как влияет класс обработки на перепад температуры, были изготовлены и испытаны 6 двигателей, у которых пакет статора обрабатывался по классу  $\nabla 6$ . Перепад температуры составил 5,4°С, то есть остался практически неизменным. По-видимому, более жесткие требования к обработке посадочных поверхностей пакета статора и станины не обеспечат существенного уменьшения перепада температур между ними.

Характер температурного поля (рис. 2) опытного образца двигателя D — 132 М-4 такой же, как у двигателя серии АО2. В целом температура обмотки статора и станины выше, чем в двигателях серии АО2.

Температурное поле первых опытных образцов двигателей серии АО4 приведено на рис. 3.

Наиболее нагретые точки статорной обмотки находятся в лобовых частях со стороны, противоположной вентилятору. Повышение температуры нагретой точки над средней температурой обмотки складывается из двух составляющих:

$$\Delta\theta_M = \partial\theta_{M1} + \partial\theta_{M2}, \quad (1)$$

где  $\partial\theta_{M1}$  — превышение полусуммы температур концов лобовых частей над средней температурой обмотки, вызванное притоком тепла от лобовых частей к пазовой части.

$\partial\theta_{M2}$  — перекося температурного поля обмотки вследствие несимметрии охлаждения корпуса, то есть полуразность температур лобовых частей.



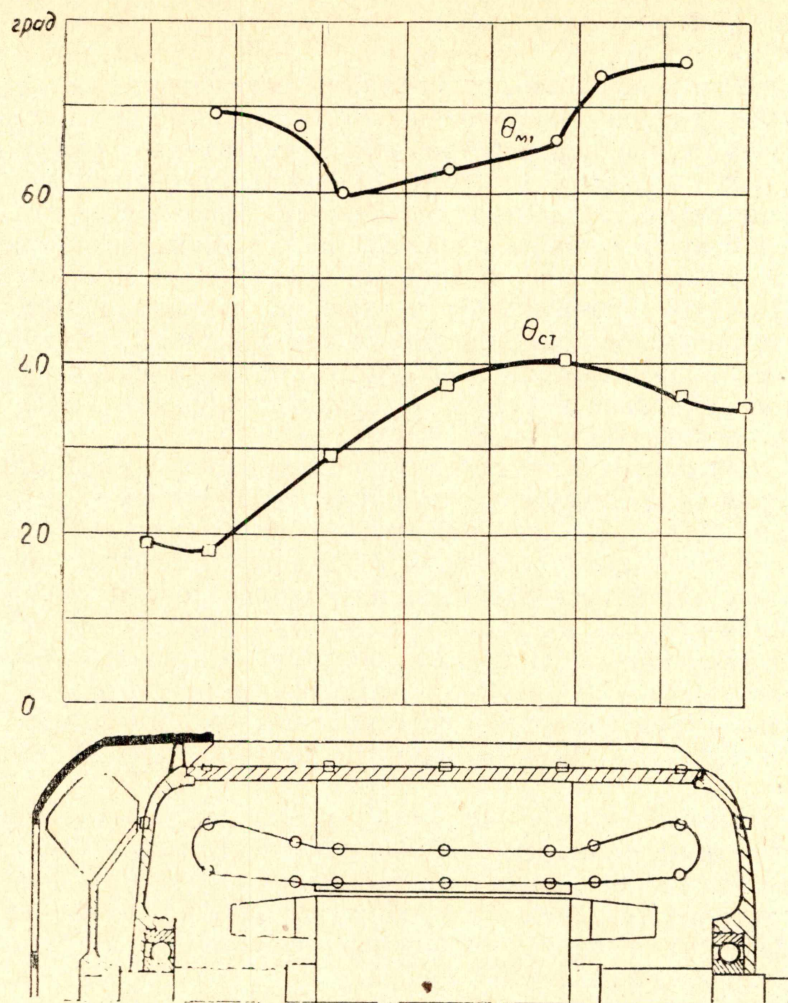


Рис. 2. Температурное поле двигателя D—132M-4

Первая составляющая может быть рассчитана при условии симметричного охлаждения статора на основании допущения о параболическом характере распределения температуры по длине лобовой части. Опуская математические выкладки, в конечном виде имеем

$$\partial\theta_{M1} = P_{M1}k_{л} \frac{1}{24S_M\lambda_{Cu}} \cdot \frac{l_{л}^2(l_{л} + 3l)}{(l_{л} + l)^2} \quad (2)$$

Здесь  $P_{M1}$  — потери в меди обмотки статора,  
 $k_{л}$  — составляет 0,75 для двухполюсных машин и 0,95 для остальных,  
 $S_M$  — суммарное сечение меди;  
 $\lambda_{Cu}$  — теплопроводность меди;

$l_{л}$  и  $l$  — длины лобовой и активной части обмотки статора.

Вторая составляющая определяется через перекося температурного поля станины с учетом теплового сопротивления между обмоткой и станиной и выравнивающего действия аксиальной теплопроводности обмотки.

Коэффициент перекося теплоотдачи корпуса [3] рекомендуется вычислять по формуле, учитывающей длину станины

$$k = 0,92 + 0,7 \left( \frac{L_{ст}}{D_{ст}} - 1 \right), \quad (3)$$



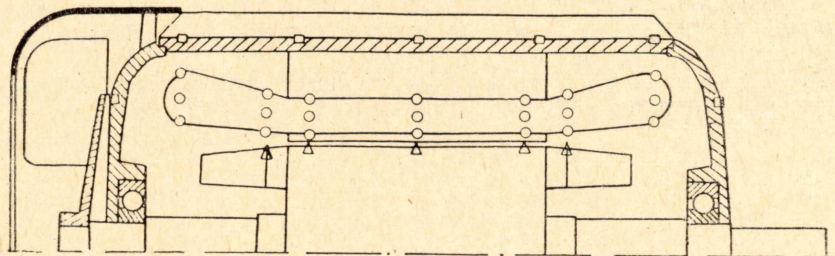
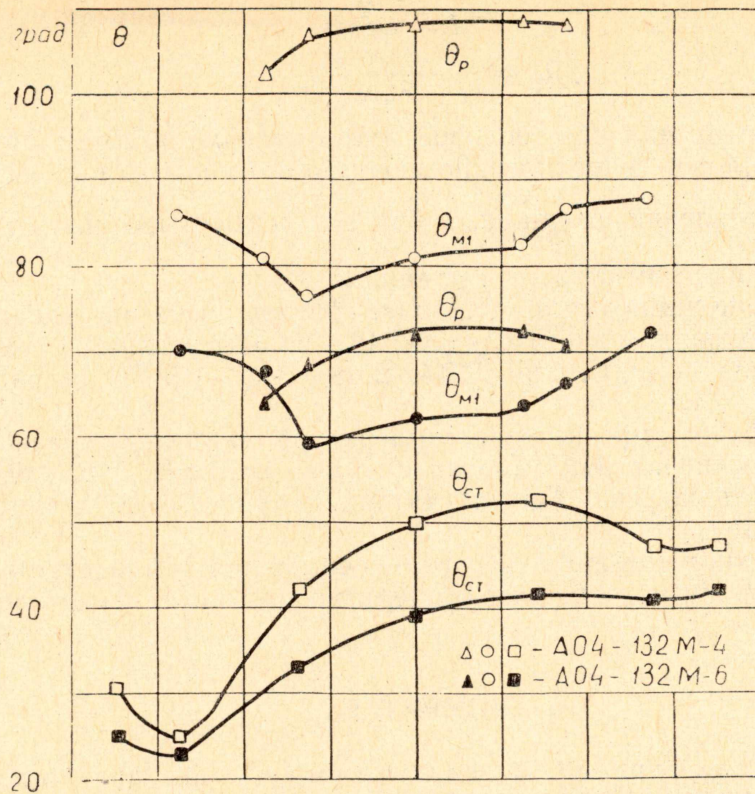


Рис. 3. Температурное поле двигателей А04-132М-4 и А04-132М-6

где  $L_{CT}$  и  $D_{CT}$  — длина и наружный диаметр станины.

Перекося температурного поля станины, равный полуразности температур по ее краям, вычисляется по упрощенной формуле [3]

$$\Delta\tau = \theta_0 \frac{0,4 k}{1 + \frac{10}{R_{CT} G_a}}, \quad (4)$$

где  $R_{CT}$  — аксиальное тепловое сопротивление станины,  
 $G_a$  — тепловая проводимость от оболочки к воздуху.  
 Составляющая перегрева горячей точки

$$\partial\theta_{M2} = \Delta\tau \frac{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{l}{L_{CT}}\right)}{1 + \frac{12 R_{MC}}{R_M}}. \quad (5)$$

Здесь



$$R_m = \frac{l + \frac{2}{3} l_L}{S_m \lambda_{Cu}}$$

— расчетное аксиальное тепловое сопротивление обмотки статора.

$R_{mc}$  — тепловое сопротивление между обмоткой и станиной, состоящее из сопротивлений изоляции, зубца на  $\frac{1}{3}$  высоты, спинки статора и зазора между пакетом статора и станиной.

Превышение температуры наиболее горячей точки над средней температурой обмотки для двигателя АО2-42-4 по опыту (рис. 1) составляет  $4,5^\circ\text{C}$ , по расчету —  $4,6^\circ\text{C}$ ; для АО2-42-2 по опыту —  $5,7^\circ\text{C}$ , по расчету —  $6,1^\circ\text{C}$ .

Таким образом, превышение температуры наиболее горячей точки над средней температурой обмотки статора, которым характеризуется неравномерность нагрева обмотки статора по длине, имеет значительную величину (до 10%).

Предложенная методика расчета превышения температуры наиболее нагретой точки над средней температурой обмотки имеет достаточную точность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Л. Заутнер, И. И. Фейгельман, М. М. Анджейко, В. И. Борисович. Оптимальная длина вентиляционных лопаток короткозамкнутого ротора взрывонепроницаемых асинхронных двигателей. «Электротехника», 1965, № 7.
2. В. А. Жадан, Д. И. Санников, Р. Я. Кляйн. Исследование температурных полей закрытых обдуваемых электродвигателей. Известия ТПИ, т. 172, 1967.
3. В. А. Жадан, Д. И. Санников. Несимметрия нагрева корпуса электрических машин с внешним обдувом. Известия ТПИ, т. 172, 1967.