

**О СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ
АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ И ЗАКОНАХ ОХЛАЖДЕНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АО2**

Б. А. ИТКИН, Э. К. СТРЕЛЬБИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Скорость нарастания температуры в обмотке статора асинхронного двигателя при заторможенном роторе — T_{V3} является одной из основных характеристик машины. В целях повышения надежности в электродвигателях новой серии АО2 снижена скорость нарастания температуры до $7^\circ\text{C}/\text{сек}$ [1]. Для проектировщиков электропривода не менее важной величиной при выборе защиты является скорость нарастания температуры в обмотке статора при стоянке двигателя на двух фазах — T_{V2} . При оценках влияния износа двигателя от аварийных режимов на его эксплуатационную надежность, кроме значений T_{V3} , T_{V2} , необходимо знать фактический закон охлаждения обмотки $\Theta_{\text{охл.}} = f(t)$ после прекращения короткого замыкания. Если приближенные значения T_{V3} для некоторых двигателей новой серии и известны, то данные по T_{V2} и $\Theta_{\text{охл.}} = f(t)$ совершенно отсутствуют.

В статье приводятся фактические значения скорости нарастания температуры, нагрева и охлаждения для наиболее распространенных двигателей новой серии АО2-52-4; АС2-42-4; АО2-32-4; АОЛ2-11-4.

Обычно расчетное значение скорости нарастания температуры при заторможенном роторе определяется по известной формуле ВНИИЭМ

$$T_{V3} = \frac{\Delta^2}{200}, \quad (1)$$

где Δ — плотность тока при коротком замыкании двигателя на 3-х фазах.

Опытное значение T_{V3} находится из выражения

$$T_{V3} = \frac{\Theta}{t}, \quad (2)$$

где Θ — измеренное значение перегрева в обмотке статора за время t — действия 3-фазного короткого замыкания.

Надо отметить, что в ряде случаев определенные по (1) и (2) T_{V3} не дают нужной точности при расчете нагрева и не полно отражают реальный физический процесс, происходящий в обмотке статора при рассматриваемом режиме. Так, формула (1) дает однозначное значение T_{V3} и получена, исходя из предположения отсутствия

теплоотдачи и неизменности величины тока и сопротивления статора за время короткого замыкания. По (2) определяется среднее значение скорости нарастания температуры за рассматриваемый промежуток времени. Проведенные нами экспериментальные исследования нагрева асинхронных двигателей АО2 при аварийных режимах показали, что в общем случае нельзя принимать допущение о неизменности скорости нарастания температуры в процессе всего короткого замыкания.

При $t > 5 \div 10$ секунд T_V уменьшается в процессе короткого замыкания ввиду действия фактора теплоотдачи и изменения величины тока. Поэтому значение T_{V3} , определенное по (1), можно рассматривать как начальную скорость нарастания температуры T_{V0} . Опытные значения T_{V0} и расчета по (1) при подстановке фактической плотности тока отличаются не более чем на $2 \div 3\%$.

Отсутствие точных данных по T_{V3} и T_{V2} объясняется трудностью измерения температуры обмотки в процессе аварийного режима. Имеется схема [2], которая позволяет производить измерение средних температур обмоток электрических машин R_{06} методом сопротивления без отключения электродвигателя от сети 380 вольт. Поскольку скорость нарастания температуры в режимах короткого замыкания велика измерение R_{06} стрелочными приборами может дать значительную погрешность.

Схема [2] нами была дополнена установкой гальванометров осциллографа Н700, что позволило производить непрерывную запись омического сопротивления и способствовало повышению точности измерения. Обработка данных осциллограмм методом наименьших квадратов показала, что изменение превышения температуры при коротком замыкании можно представить полиномом 2-й степени от времени

$$\Theta = bt - at^2 + c, \quad (3)$$

где a , b и c — коэффициенты уравнения (3). Исходя из физической мощности процесса, коэффициент b является начальной скоростью нарастания температуры T_{V0} .

Коэффициент c — начальное превышение температуры обмотки. Закон изменения скорости нарастания температуры находится дифференцированием (3):

$$T_V(t) = \frac{d\Theta}{dt} = T_{V0} - 2at. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены фактические законы изменения превышения температуры в обмотке статора при 3- и 2-фазных коротких замыканиях как с холодного, так и с горячего состояния исследованных двигателей, полученные обработкой экспериментальных данных по методу наименьших квадратов.

Осциллографирование тока короткого замыкания и последующая математическая обработка данных показала, что изменение тока в процессе аварийного режима описывается уравнением

$$I(t) = I_{\text{нач}} - \kappa_1 t + \kappa_2 t^2, \quad (5)$$

где $I_{\text{нач}}$ — начальный ток короткого замыкания,
 κ_1 , κ_2 — коэффициенты уравнения.

В табл. 2 даются законы изменения тока при аварийных режимах, полученные обработкой экспериментальных данных по методу наименьших квадратов.

Таблица 1

| Тип двигателя | Вид к. з. | Уравнение превышения температуры | |
|---------------|-----------|----------------------------------|------------------------------|
| | | с холодного | с горячего |
| АО2-52-4 | 3-фазн. | $6,2t - 0,0192t^2 + 0,83$ | $6,189t - 0,0125t^2 + 41,6$ |
| | 2-фазн. | $3,667t - 0,0048t^2 + 4,6$ | $3,554t - 0,00207t^2 + 42,7$ |
| АО2-42-4 | 3-фазн. | $5,863t - 0,0117t^2$ | $5,343t - 0,00762t^2 + 43,9$ |
| | 2-фазн. | $3,249t - 0,073t^2 - 0,163$ | $3,056t - 0,00737t^2 + 51,6$ |
| АО2-32-4 | 3-фазн. | $4,512t - 0,0159t^2 + 1,36$ | $4,407t - 0,0193t^2 + 18,4$ |
| | 2-фазн. | $3,31t - 0,0151t^2$ | $3,278t - 0,0148t^2 + 39,8$ |
| АОЛ2-11-4 | 3-фазн. | $3,975t - 0,0215t^2 + 2,1$ | $3,658t - 0,0197t^2 + 49$ |
| | 2-фазн. | $3,02t - 0,0137t^2 + 0,42$ | $2,545t - 0,0128t^2 + 44,7$ |

Таблица 2

| Тип двигателя | Вид к. з. | Уравнение тока короткого замыкания | |
|---------------|-----------|------------------------------------|-------------------------------|
| | | с холодного | с горячего |
| АО2-52-4 | 3 фазн. | $146,17 - 0,92t + 0,0079t^2$ | $140 - 0,634t + 0,0015t^2$ |
| | 2-фазн. | $124,48 - 0,5t + 0,00199t^2$ | $118,87 - 0,457t + 0,0156t^2$ |
| АО2-42-4 | 3-фазн. | $85,8 - 0,438t + 0,00221t^2$ | $82,1 - 0,847t + 0,0151t^2$ |
| | 2-фазн. | $63,7 - 0,109t + 0,00055t^2$ | $59,46 - 0,138t + 0,00072t^2$ |
| АО2-32-4 | 3-фазн. | $41,48 - 0,232t + 0,00139t^2$ | $37,08 - 0,166t + 0,0003t^2$ |
| | 2-фазн. | $34,56 - 0,113t + 0,00055t^2$ | $31,92 - 0,105t + 0,00042t^2$ |
| АОЛ2-11-4 | 3-фазн. | $7,84 - 0,0523t + 0,00032t^2$ | $7,2 - 0,051t + 0,00034t^2$ |
| | 2-фазн. | $6,8 - 0,036t + 0,00022t^2$ | $6,06 - 0,026t + 0,00012t^2$ |

Надо отметить, что погрешность в расчете превышения температуры при коротком замыкании двигателя по обычно применяемой формуле [3]

$$\Theta = (235 + \vartheta_n)(l^{K_1 \Delta t} - 1), \quad (5)$$

где ϑ_n — начальная температура обмотки;

$K_1 = 1,98 \cdot 10^{-5}$ (для обмоток из меди) и опытными данными может достигать 20 ÷ 30%. При расчете Θ по (3) погрешность не более нескольких процентов за счет возможного разброса параметров двигателя в табл. 1, 2 и исследуемого того же типа.

Для расчета износа изоляции электрических машин от аварийных режимов необходимо знать температуру обмотки как в процессе нагревания, так и охлаждения. Вопрос о законе охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя после прекращения действия корот-

кого замыкания является малоизученным. В [3] принимают, что остывание в первом приближении выражается

$$\Theta_{\text{охл}} = \Theta_{\text{мах}} l^{-\frac{t}{T}}, \quad (6)$$

где $\Theta_{\text{мах}}$ — максимальное превышение температуры обмотки при коротком замыкании;

T — постоянная времени обмотки.

Проведенные нами исследования показали, что расчет кривой охлаждения по (6) приводит к большим ошибкам. Аналитически найти зависимость $\Theta_{\text{охл}} = f(t)$ довольно затруднительно. Величина T изменяется в процессе охлаждения и зависит от конечной температуры обмотки и перепада температур между железом статора, изоляцией и меди обмотки.

Математическая обработка экспериментальных данных показала, что закон изменения превышения температуры обмотки после аварийного режима довольно точно выражается уравнением

$$\Theta_{\text{охл}} = \Theta_{\text{мах}} \cdot l^{-\frac{t}{T_0 + mt - nt^2}}, \quad (7)$$

где T_0 — начальное значение постоянной времени охлаждения обмотки статора,

m и n — коэффициенты уравнения.

Для рассматриваемых двигателей значения

$$T_0 = 0,8 \div 2,2 \text{ мин.}; \quad m = 1,4 \div 2,5; \quad n = 0,5 \div 0,9.$$

Аналитические расчеты скорости нарастания температуры, превышения температуры при коротком замыкании и охлаждения после аварийного режима обмотки статора асинхронного двигателя по существующим методикам не дают желаемой точности.

Полученные нами уравнения (3), (4), (5), (7) с опытными значениями коэффициентов позволят значительно повысить точность этих расчетов для рассматриваемых двигателей, что крайне важно при выборе защиты и расчета износа двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Гольдберг. Повышение надежности работы электродвигателей серии А и АО мощностью до 100 квт. Новые серии электрических машин переменного тока. ЦИНТИ, 1963.

2. А. М. Шарипов. Устройство для измерения омических сопротивлений обмоток электрических машин при наличии переменной э. д. с. Сборник ЦИТЭИН, № Э-61-72/21, 1961.

3. Г. Готтер. Нагревание и охлаждение электрических машин. ГЭИ, 1961.