

**ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
С ЕСТЕСТВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

М. Н. УЛЯНИЦКИЙ

(Представлена научным семинаром электромеханического факультета)

В крупносерийном электромашиностроении задача определения перегревов обмоток обычно решается путем разработки методик теплового расчета применительно к одному определенному типу машин [1, 2]. Это позволяет полнее учитывать особенности и закономерности машин различных серий, что способствует получению необходимой точности тепловых расчетов.

В индивидуальном и мелкосерийном микромашиностроении в связи с многообразием типов машин определение перегревов обмоток требует методов более общего характера.

Следует отметить, что большая сложность общей физической картины распределения тепловых потоков в машине затрудняет учет всех условий, от которых зависит тепловой процесс. Поэтому выполнение совершенно точного теплового расчета не представляется возможным. Однако даже приближенный расчет позволяет оценить тепловую напряженность изоляции и значительно облегчает и сокращает по времени разработку новой машины. В связи с этим в инженерной практике вполне себя оправдывают упрощенные методики тепловых расчетов, учитывающие наиболее существенные особенности процесса нагрева, результаты аналитических исследований и экспериментально статистические данные.

Физической стороне процесса нагрева закрытых электрических машин наиболее точно соответствует теория двухступенчатого нагрева [3], согласно которой перегрев каждой обмотки определяется как сумма перегревов обмотки над корпусом и корпуса над окружающей средой.

Для маломощных машин с естественным охлаждением значение перегрева корпуса (Θ_k) можно получить, используя характеристики $\Theta_k = f(q)$, предварительно построенные для определенной температуры окружающего воздуха t_{oc} по следующим формулам:

$$q = \Theta_k \alpha = \frac{\sum P}{S}; \quad (1)$$

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_k; \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\varepsilon C_0}{\Theta_{\text{к}}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]; \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{к}} = 0,94 \frac{\lambda}{d_{\text{к}}^{0,332}} \left(\frac{\beta g \Theta_{\text{к}}}{\nu^2} Pr \right)^{0,226}. \quad (4)$$

Формулы (1) и (3) являются известными зависимостями. Выражение (4) получено автором при исследовании теплоотдачи свободной конвекции горизонтально и вертикально ориентированных гладких корпусов электрических машин в диапазоне значений

$$GrPr = 10^5 - 10^9,$$

$$l_{\text{к}}/d_{\text{к}} = 1,1 - 2,0.$$

На рис. 1 представлены характеристики $\Theta_{\text{к}} = f(q)$, построенные при $t_{\text{ос}} = +35^\circ\text{C}$ для широкой области значений $\Theta_{\text{к}}$ и $d_{\text{к}}$, встречаю-

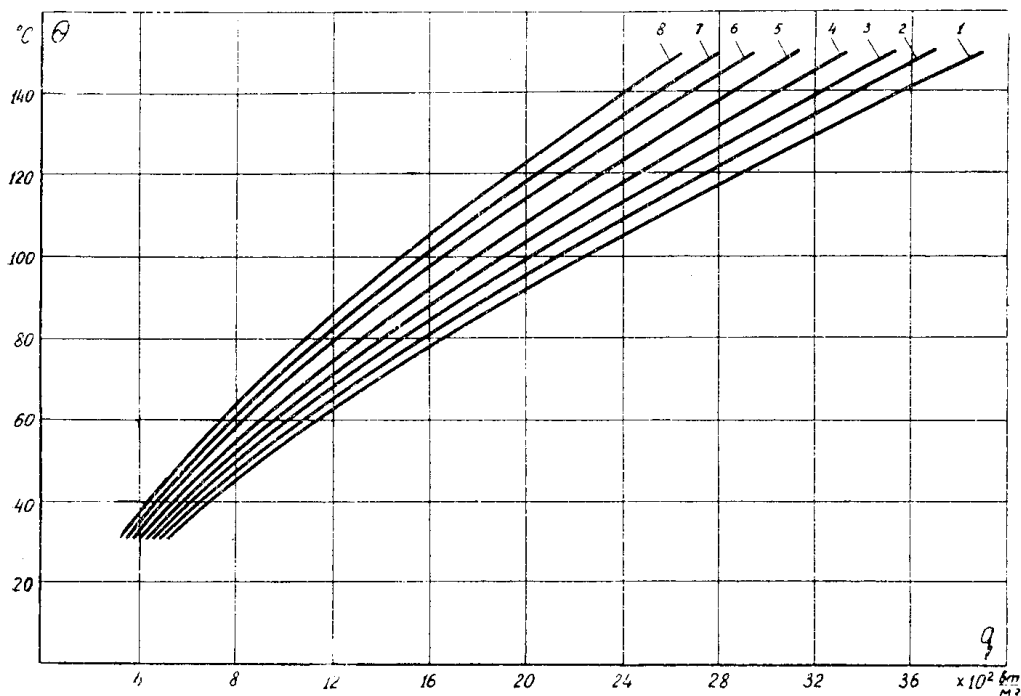


Рис. 1. Зависимость $\Theta_{\text{к}} = f(q)$ при $t_{\text{ос}} = +35^\circ\text{C}$. 1— $d_{\text{к}} = (30-40)$ мм; 2— $d_{\text{к}} = (40-50)$ мм; 3— $d_{\text{к}} = (50-70)$ мм; 4— $d_{\text{к}} = (70-100)$ мм; 5— $d_{\text{к}} = (100-150)$ мм; 6— $d_{\text{к}} = (150-220)$ мм; 7— $d_{\text{к}} = (210-330)$ мм; 8— $d_{\text{к}} = (330-500)$ мм;

щихся в практике. В каждом из указанных на рис. 1 диапазонов $d_{\text{к}}$ характеристика $\Theta_{\text{к}} = f(q)$ строилась при среднем значении диаметра. В принятых диапазонах значений $d_{\text{к}}$ пренебрежение зависимостью $\alpha_{\text{к}}$ от величины диаметра корпуса не оказывает существенного влияния на точность определения $\Theta_{\text{к}}$.

Аналитические и экспериментальные исследования, проведенные автором, а также анализ расчетных и опытных данных [1, 4, 5] позволяет сделать вывод, что в асинхронных двигателях, синхронных индукторных генераторах, синхронных реактивных и гистерезисных двигателях с неявнополюсным статором, а также в других аналогичных по конструкции машинах с естественным охлаждением значения

Θ_k составляют примерно 70—90% от средних перегревов обмотки статора.

Незначительное отличие величины перегрева статорных обмоток от Θ_k объясняется тем, что радиальные тепловые потоки в статоре не встречают существенных тепловых сопротивлений на своем пути к корпусу. Так, в пропитанных обмотках суммарный перепад температуры по витковой и пазовой изоляции составляет около 5—8%, в зубцах, спинке и корпусе — 5—7% и между статором и корпусом — 5—7% от величины перегрева обмотки статора.

Таким образом, для оценки тепловой напряженности статорных обмоток указанных типов машин в практических расчетах можно использовать следующее выражение:

$$\Theta_c = 1,25 \Theta_k. \quad (5)$$

При хорошей пропитке обмоток соотношение (5) будет справедливо и в условиях пониженных давлений. В этом случае значение коэффициента конвективной теплоотдачи корпуса определяется по формуле

$$\alpha'_k = \alpha_k \left(\frac{H'}{H} \right)^{0,452}, \quad (6)$$

которая получается с помощью элементарных преобразований из выражения (4).

Значение Θ_k при пониженном давлении можно найти либо методом последовательных приближений по формулам (1) — (4) и (6), либо из характеристик $\Theta_k = f(q)$, предварительно построенных для H' . Как видно из рис. 2, расчетные и опытные значения Θ_c и Θ_k хорошо согласуются.

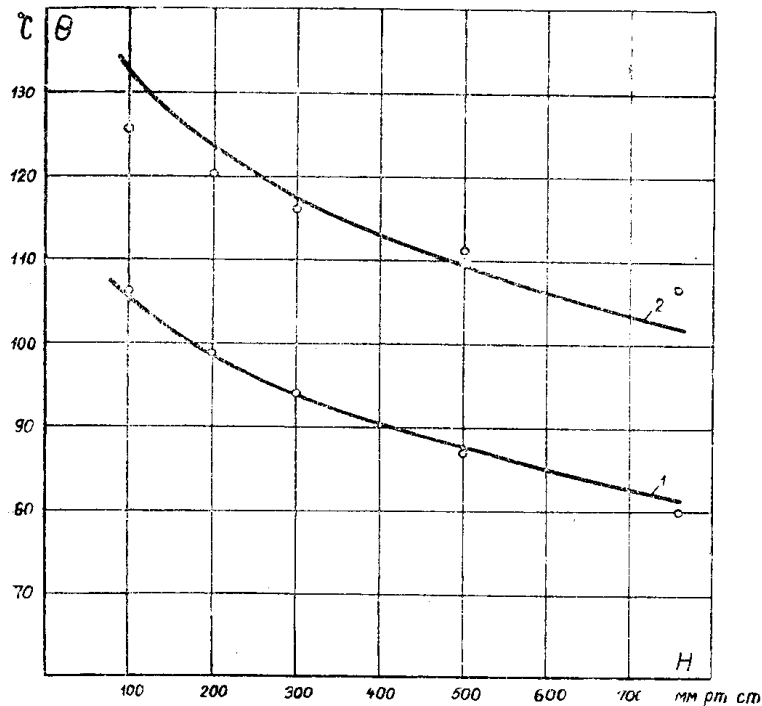


Рис. 2. Зависимость средних перегревов корпуса и статорной обмотки синхронно-гистерезисного двигателя от атмосферного давления при ΣP_{const} .
1 — перегрев корпуса по (1) — (4), (6); 2 — перегрев статорной обмотки по (5); \circ — опытные значения перегревов.

Обобщение результатов экспериментальных исследований машин постоянного тока с естественным охлаждением позволяет рекомендовать для определения перегревов обмоток ряд приближенных зависимостей:

для обмоток параллельного возбуждения без изоляционных прокладок между полюсами, станиной и катушками

$$\Theta_{\text{в}} = 1,4 \Theta_{\text{к}}; \quad (7)$$

для обмоток параллельного возбуждения с изоляционными прокладками между полюсами, станиной и катушками

$$\Theta_{\text{в}} = 1,95 \Theta_{\text{к}}. \quad (8)$$

Как показали опыты, соотношение между средними перегревами корпуса и обмотки якоря во многом зависит от распределения электромагнитных нагрузок. В рационально спроектированных закрытых машинах постоянного тока обмотка якоря нагревается больше, чем обмотка полюсов. При экспериментальном исследовании таких машин в режиме номинальной нагрузки были получены приближенные выражения:

$$\begin{aligned} \text{для машин с } d_{\text{к}}/d_{\text{я}} = 2 - 2,2 \\ \Theta_{\text{я}} = 2,25 \Theta_{\text{к}}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{для машин с } d_{\text{к}}/d_{\text{я}} = 2 - 1,8 \\ \Theta_{\text{я}} = 1,9 \Theta_{\text{к}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для машин с внутренним вентилятором значения перегревов обмоток, установленные по (7), (8), следует уменьшить на 15—20%, а значения перегревов, установленные по (9), (10), — на 10—15%.

Формулы (1) — (10) позволяют определить предварительные значения перегревов обмоток еще в начальной стадии проектирования машины. При этом необходимые для получения q суммарные потери можно найти по номинальной мощности и к. п. д., который предварительно выбирается по ГОСТ или ТУ, а площадь поверхности корпуса — определить на основании статистических данных о соотношении основных и габаритных размеров существующих машин.

Для машин переменного тока приближенные значения габаритных размеров можно получить из выражений:

$$\left. \begin{aligned} d_{\text{к}} &= (1,1) d_{\text{ст}} \\ l_{\text{к}} &= (2,2) l_{\text{ст}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

При рассмотрении соотношений между основными и габаритными размерами большого количества машин постоянного тока были установлены следующие зависимости:

для машин без изоляционных прокладок между полюсными катушками, полюсами и станиной

$$d_{\text{к}} = (1,7 - 1,9) d_{\text{я}}; \quad (12)$$

для машин с изоляционными прокладками между полюсными катушками, полюсами и станиной

$$d_{\text{к}} = (2,0 - 2,2) d_{\text{я}}. \quad (13)$$

Длину корпуса можно определить как

$$l_{\text{к}} = (1,35 - 1,75) d_{\text{к}}. \quad (14)$$

Нижний предел постоянных коэффициентов в (14) соответствует значениям $l_{\text{я}}/d_{\text{я}}$, близким к 0,7, верхний предел — значениям $l_{\text{я}}/d_{\text{я}}$, близким к 1,1 — 1,2.

Предварительные значения перегревов обмоток уточняются после проведения электрического расчета и окончательного определения габаритных размеров машины.

Выводы

Предлагаемые зависимости позволяют в первом приближении оценить перегрев корпуса еще в первоначальной стадии электрического расчета.

Для повышения точности в определении перегревов обмотки якоря машин постоянного тока желательнее получить зависимость между Θ_k и Θ_a с учетом величины удельного теплового потока на поверхности якоря.

Принятые обозначения

- q — удельный тепловой поток на поверхности корпуса;
 ΣP — сумма потерь в машине, вт;
 $S = S_1 + S_2$ — полная поверхность охлаждения машины, м²;
 S_1 — поверхность лап, м²;
 $S_2 = \frac{\pi d_k^2}{2} + \pi d_k l_k$ — поверхность корпуса, м²;
 d_k — диаметр корпуса, м;
 l_k — полная длина корпуса, включая подшипниковые щиты, м;
 α — суммарный коэффициент теплоотдачи поверхности корпуса, вт/°С·м²;
 α_a, α_k — коэффициенты теплоотдачи излучением и свободной конвекции, вт/°С·м²;
 $\varepsilon = 0,85$ — степень черноты поверхности корпуса;
 $C_0 = 5,77$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела, вт/°С·м²;
 T_1, T_2 — значения абсолютной температуры поверхности корпуса и окружающего воздуха, °К;
 λ — коэффициент теплопроводности воздуха, вт/°С·м;
 g — ускорение силы тяжести, м/сек²;
 ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/сек;
 $\beta = \frac{1}{T_2}$ — коэффициент объемного расширения воздуха, 1/°К;
 $Pr = \frac{a}{\nu}$ — критерий Прандля;
 a — коэффициент температуропроводности воздуха, м²/сек;
 $Gr = \frac{\beta g d_k^3 \Theta_k}{\nu^2}$ — критерий Грасгофа;
 $H = 760$ мм рт. ст. — нормальное атмосферное давление;
 H' — пониженное атмосферное давление, мм рт. ст.;
 $d_{ст} l_{ст}$ — наружный диаметр и длина пакета статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Борисенко, Е. И. Янтовский. Тепловой расчет закрытых асинхронных двигателей типов МА36 и ПЭД, «Вестник электропромышленности», № 5, 1958.
2. И. М. Постников, Г. Г. Счастливый. Тепловой расчет закрытых асинхронных двигателей типа АО, «Вестник электропромышленности», № 3, 1961.
3. А. Б. Иоффе. Тяговые электрические машины. Госэнергоиздат, 1957.
4. Е. М. Лопухина, Е. И. Ивонин, Н. П. Мушкетов. Сравнение опытных данных нагрева закрытых асинхронных микродвигателей с тепловыми расчетами, Изв. вузов «Электромеханика», № 12, 1959.
5. А. П. Борисов. К тепловому расчету закрытых микродвигателей, ЛПИ, научно-технический информационный бюллетень, № 8, 1960.