ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 172 1967

АНАЛИЗ НАГРЕВА ЯКОРЯ ЗАКРЫТЫХ НЕВЕНТИЛИРУЕМЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДОМ ТЕОРИИ ТЕПЛОВОГО ПОДОБИЯ

М. Н. УЛЯНИЦКИЙ, В. В. САЛОМАТОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Как известно, теория подобия позволяет объединить все параметры, характеризующие физический процесс, в единые безразмерные комплексы (критерии подобия) и перейти от аналитической зависимости в форме связи между размерными величинами к аналитической зависимости в форме связи между критериями подобия. Это преобразование, во-первых, сокращает число переменных и, таким образом, облегчает анализ аналитических решений, и, во-вторых, дает возможность провести широкое научное обобщение результатов исследований и представить их в удобном виде для применения в инженерной практике.

Используя положения теории теплового подобия [1], можно, в соответствии с расчетной схемой обмотки якоря, принятой в [3], представить уравнения кривых распределения температур по длине отдельных участков обмотки в безразмерном виде [1]:

1. Для пазовой части

$$\theta_п = C_1 e^{\xi\sqrt{k_c\frac{Bi\psi_п}{\varepsilon}}} + C_2 e^{-\xi\sqrt{k_c\frac{Bi\psi_п}{\varepsilon}}} + \frac{k_c P_0' + P_0}{k_c\frac{Bi\psi_п}{\varepsilon}}.$$

$$C_{1(2)} = \frac{\left(\theta_{2(1)} - \dfrac{k_c P_0' P_0}{k_c\frac{Bi\psi_п}{\varepsilon}}\right) e^{\frac{\varepsilon_п}{2}\sqrt{k_c\frac{Bi\psi_п}{\varepsilon}}} - \left(\theta^{(2)} - \dfrac{k_c P_0' P_0}{k_c\frac{Bi\psi_п}{\varepsilon}}\right) e^{-\frac{\xi_п}{2}\sqrt{k_c\frac{Bi\psi_п}{\omega}}}}{2\,\mathrm{sh}\left(\xi_п\sqrt{k_c\frac{Bi\psi_п}{\xi}}\right)}$$

2. Для части лобовых соединений со стороны привода (коллектора), находящейся под изоляцией бандажа,

$$\theta'_{л(лк)} = C_{1(2)}\, e^{\xi\sqrt{\gamma Bi\psi_л}} + C_{2(1)}\, e^{-\xi\sqrt{\gamma Bi\psi_л}} + \frac{P_0}{Bi\gamma\psi_л};$$

---

[1] При переходе к безразмерным параметрам за определяющую температуру и определяющий размер принимались средняя температура корпуса t_K и длина полувитка обмотки якоря l.

$$C_1 = \frac{\theta_{4(3)} - \theta_{2(1)}\, e^{-\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}} - \dfrac{P_0}{\gamma Bi \psi_л}\left(1 - e^{-\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}}\right)}{2\, sh\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}\right) e^{\frac{\varepsilon_п}{2}\sqrt{\gamma Bi \psi_л}}};$$

$$C_2 = \frac{\theta_{2(1)} e^{\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}} - \theta_{4(3)} - \dfrac{P_0}{\gamma Bi \psi_л}\left(1 - e^{\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}}\right)}{2\, sh\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}\right) e^{-\frac{\xi_п}{2}\sqrt{\gamma Bi \psi_л}}}.$$

3. Для торцевой части лобовых соединений со стороны привода

$$\theta_т = C_1 e^{\xi \sqrt{Bi\psi_л}} + C_2 e^{-\xi \sqrt{Bi\psi_л}} + \frac{P_0}{Bi\psi_л};$$

$$C_{1(2)} = \frac{\theta_4 - \dfrac{P_0}{Bi\psi_л}}{2\, sh\left(\xi_т \sqrt{Bi\psi_л}\right)} e^{\pm 0{,}5 \sqrt{Bi\psi_л}}.$$

4. Для торцевой части лобовых соединений со стороны коллектора

$$\theta_{тк} = -\frac{P_0}{2}\xi^2 + C_1 \xi + C_2;$$

$$C_2 = \theta_3 - \frac{P_0}{2}\left(\frac{\xi_п}{2} + \xi_и\right)\left(\frac{1}{2} + \xi_т\right); \qquad C_1 = -\frac{P_0}{2}.$$

Здесь:[1] $\theta_п = \dfrac{\vartheta_п}{t_к}$; $\theta_{л(лк)} = \dfrac{\vartheta_{л(лк)}}{t_к}$; $\theta_{т(тк)} = \dfrac{\vartheta_{т(тк)}}{t_к}$;

$$\xi = \frac{x}{l}; \quad \xi_п = \frac{l_п}{l}; \quad \xi_и = \frac{l_и}{l}; \quad \xi_т = \frac{l_т}{l}; \quad P_0 = \frac{q_m l^2}{\lambda_m f_п t_к}; \quad P_0' = \frac{q_c l^2}{\lambda_m f_п t_к};$$

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_m}; \quad \varepsilon = \frac{\Pi}{b_к}; \quad \psi_п = \frac{\Pi l}{f_п}; \quad \psi_л = \frac{b_л l}{f_п};$$

$$\kappa_c = \frac{1}{1 + \dfrac{\alpha \Delta_п b_к}{\Pi \lambda_п}}; \quad \gamma = \frac{1}{1 + \dfrac{\alpha \Delta_л}{\gamma_л}};$$

$$\theta_1 = \frac{(P_2P_5 - 1)(P_3 + P_4) + (P_1 + P_2P_3)\, a_1}{(P_2P_5 - 1)\, P_5 a_2 - P_1 a_1^2}; \quad \theta_2 = \frac{\theta_1 P_5 a_2 - P_3 - P_4}{a_1};$$

$$\theta_3 = \frac{\theta_1}{ch\, \xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}} - P_4; \quad \theta_1 = \frac{\theta_2 + P_1}{P_2};$$

$$a_1 = \frac{sh\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}\right)\sqrt{\dfrac{\kappa_c \psi_п}{\xi \gamma \psi_л}}}{sh\left(\xi_п \sqrt{\kappa_c \dfrac{Bi \psi_п}{\varepsilon}}\right)}; \quad a_2 = \frac{ch\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}\right) - 1}{ch\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}\right)}$$

$$a_3 = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} th\left(\xi_т \sqrt{Bi\, \psi_л}\right) \cdot \left(sh\, \xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_л}\right);$$

$$P_1 = \left[a_3 + \frac{a_2}{\gamma} ch\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi \psi_п}\right)\right] \frac{P_0}{Bi \psi_л}; \qquad P_2 = a_3 + ch\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi\, \psi_л}\right).$$

$$P_3 = \frac{a_2 P_0}{\gamma Bi\,\psi_л} ch\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi\,\psi_л}\right) + \frac{(k_c P_0' + P_0)}{k_c \frac{Bi\psi_п}{\varepsilon}} \left(ch\left(\xi_п \sqrt{k_п \frac{Bi\psi_п}{\varepsilon}} \right) - 1 \right),$$

$$P_4 = \frac{a_2 P_0}{\gamma Bi\psi_л} + \frac{P_0 \xi_т}{\sqrt{\gamma Bi\psi_л}} th\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi\psi_л}\right); \; P_5 = ch\left(\xi_и \sqrt{\gamma Bi\psi_л}\right) +$$

$$+ a_1 ch\left(\xi_п \sqrt{k_c \frac{Bi\psi_п}{\varepsilon}}\right).$$

Таким образом, текущая температура представляется в виде функции от различных комбинаций одиннадцати безразмерных комплексов:

$$\theta = f(P_0, P_0', Bi, \psi_п, \psi_л, k_c, \gamma, \Sigma\xi_п, \xi_и, \xi_т).$$

Подобные явления, как известно, характеризуются равенством всех одноименных безразмерных комплексов или их комбинаций. Однако в машинах постоянного тока это условие не выполняется. Например, отношение $P'_0/P_0 = q_c/q_m$ в общем случае имеет неодинаковые числовые значения. Вследствие этого процессы нагрева якорей машин постоянного тока не представляют собой группы подобных явлений, хотя и относятся к явлениям одного класса [2].

В соответствии с теорией теплового подобия результаты отдельного опыта закономерно распространять только на подобные между собой процессы и явления. Следовательно, якорь каждой конкретной машины в каждом фиксированном режиме должен служить самостоятельным объектом исследований. В связи с этим получение общих выводов, характеризующих температурные поля в якорях машин исследуемого типа, требует анализа большого количества тепловых систем, не являющихся подобными.

Для решения этой задачи с помощью ЭЦВМ «Минск-1» было проведено большое количество расчетных вариантов при изменении безразмерных комплексов в диапазоне их значений, встречающихся в практике.

С учетом результатов аналитических исследований, приведенных в [2], в расчеты были внесены некоторые упрощения. Значения симплексов $\xi_п$, $\xi_и$ и $\xi_т$ принимались постоянными и равными их средним величинам, встречающимся в практике, соответственно 0,49; 0,183; 0,0745. При этом допущении погрешность, вносимая в расчетное определение температуры обмотки якоря, не превышает 1%.

Согласно результатам проведенных расчетов, при изменении безразмерных комплексов в следующих диапазонах:

$$Bi \leqslant 0{,}04;\; P_0 = 0{,}1-2{,}5;\; \frac{P_0'}{P_0} = 1{,}0-5{,}0;\; k_c = 0{,}85-0{,}98;\; \gamma = 0{,}7-0{,}91;$$

$$\varepsilon = 2{,}5-5{,}0;\; \psi_л = 40-110;\; \psi_л/\psi_п = 0{,}17-0{,}4,$$

значения максимального и среднего превышений температуры обмотки якоря над корпусом отличаются не больше чем на 8—10%.

По данным экспериментальных исследований среднее превышение температуры обмотки якоря над корпусом в закрытых невентилируемых машинах постоянного тока составляет примерно 40—60% от среднего превышения температуры обмотки над окружающим воздухом. В соответствии с этим в указанном диапазоне значений безразмерных комплексов максимальное и среднее превышения температуры обмотки над окружающим воздухом будут отличаться не больше чем на 5—6%. Таким образом, если при слабой тепловой связи обмотки якоря с коллектором значения безразмерных комплексов находятся в указанных пределах, то с точностью, вполне достаточной для практических расчетов, можно рассматривать якорь как одно тело и ограничить задачи тепловых расчетов определением одного лишь среднего превышения температуры обмотки.

Наиболее значительное влияние на характер распределения температуры по длине обмотки якоря оказывает комплекс $\psi_л$. При изменении этого комплекса в диапазоне, встречающемся на практике, значение коэффициента неравномерности температуры ($КН = \vartheta_{я\,max}/\vartheta_{я\,ср}$) меняется в 2—3 раза. С увеличением комплекса $\psi_л$ неравномерность температурного поля возрастает.

Характер распределения температуры по длине обмотки якоря не зависит от величины критериев Po' и Po и определяется лишь их соотношением. При варьировании отношениями P_0'/P_0 и $\psi_л/\psi_п$, а также симплексом ε значения КН изменяются в 1,5—2,5 раза. Комплексы κ_c и γ не оказывают значительного влияния на форму кривой $\vartheta_я = f(l)$; при их изменении значения КН отличаются не больше, чем на 0,8—1,2%. С увеличением критерия Bi неравномерность температурного поля возрастает.

Из безразмерных комплексов, характеризующих геометрию якоря, наибольшее влияние на $\vartheta_{я\,ср}$ оказывает величина комплекса $\psi_л$. Средние превышения температуры обмотки якоря, соответствующие различным значениям этого комплекса, могут отличаться в 2,0—2,8 раза. Разность между $\vartheta_{я\,ср}$ при различных значениях комплексов κ_c и γ не превышает соответственно 2,5 и 10%.

Минимальная величина $\vartheta_{я\,ср}$ соответствует верхнему пределу значений комплексов $\psi_л$, γ, $\psi_л/\psi_п$ и нижнему пределу значений симплекса ε.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. С. Эйгенсон. Моделирование, изд-во «Советская наука», 1952.
2. А. В. Лыков. Теория теплопроводности, Гостехиздат, 1952.
3. М. Н. Уляницкий, В. В. Саломатов. Аналитическое исследование влияния различных параметров на уровень и распределение температуры по длине обмотки якоря закрытых невентилируемых машин постоянного тока, статья в настоящем сборнике.