

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 виде¹:

1. Для пазовой части

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

$$C_{1(2)} = \frac{\left(\theta_{2(1)} - \frac{k_c P_0' + P_0}{k_c \frac{Bi\psi_n}{\varepsilon}} \right) e^{\frac{\varepsilon_n}{2} \sqrt{k_c \frac{Bi\psi_n}{\varepsilon}}} - \left(\theta^{(2)} - \frac{k_c P_0' + P_0}{k_c \frac{Bi\psi_n}{\varepsilon}} \right) e^{-\frac{\xi_n}{2} \sqrt{k_c \frac{Bi\psi_n}{\varepsilon}}}}{2 \operatorname{sh} \left(\xi_n \sqrt{k_c \frac{Bi\psi_n}{\varepsilon}} \right)}$$

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 .

$$C_1 = \frac{\theta_{4(3)} - \theta_{2(1)} e^{-\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}} - \frac{P_0}{\gamma \text{Bi} \psi_L} \left(1 - e^{-\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}} \right)}{2 \text{sh} (\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}) e^{\frac{\xi_n}{2} \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}}};$$

$$C_2 = \frac{\theta_{2(1)} e^{\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}} - \theta_{4(3)} \frac{P_0}{\gamma \text{Bi} \psi_L} \left(1 - e^{\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}} \right)}{2 \text{sh} (\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}) e^{-\frac{\xi_n}{2} \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}}}.$$

3. Для торцевой части лобовых соединений со стороны привода

$$\theta_T = C_1 e^{\xi \sqrt{\text{Bi} \psi_L}} + C_2 e^{-\xi \sqrt{\text{Bi} \psi_L}} + \frac{P_0}{\text{Bi} \psi_L};$$

$$C_{1(2)} = \frac{\theta_4 - \frac{P_0}{\text{Bi} \psi_L}}{2 \text{sh} (\xi_T \sqrt{\text{Bi} \psi_L})} e^{\pm 0,5 \sqrt{\text{Bi} \psi_L}}.$$

4. Для торцевой части лобовых соединений со стороны коллектора

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

$$C_2 = \theta_3 - \frac{P_0}{2} \left(\frac{\xi_n}{2} + \xi_n \right) \left(\frac{1}{2} + \xi_T \right); \quad C_1 = -\frac{P_0}{2}.$$

$$\text{Здесь:}^1 \quad \theta_n = \frac{\vartheta_n}{t_K}; \quad \theta_{л(лк)} = \frac{\vartheta_{л(лк)}}{t_K}; \quad \theta_{т(тк)} = \frac{\vartheta_{т(тк)}}{t_K};$$

$$\xi = \frac{x}{l}; \quad \xi_n = \frac{l_n}{l}; \quad \xi_{\pi} = \frac{l_{\pi}}{l}; \quad \xi_T = \frac{l_T}{l}; \quad P_0 = \frac{q_m l^2}{\lambda_m f_n t_K}; \quad P_0' = \frac{q_c l^2}{\lambda_m f_n t_K};$$

$$\text{Bi} = \frac{\alpha l}{\lambda_m}; \quad \xi = \frac{\Pi}{b_K}; \quad \psi_n = \frac{\Pi l}{f_n}; \quad \psi_L = \frac{b_L l}{f_n};$$

$$\kappa_c = \frac{1}{1 + \frac{\alpha \Delta_n b_K}{\Pi \lambda_n}}; \quad \gamma = \frac{1}{1 + \frac{\alpha \Delta_L}{\gamma_L}};$$

$$\theta_1 = \frac{(P_2 P_5 - 1)(P_3 + P_4) + (P_1 + P_2 P_3) a_1}{(P_2 P_5 - 1) P_5 a_2 - P_1 a_1^2}; \quad \theta_2 = \frac{\theta_1 P_5 a_2 - P_3 - P_4}{a_1};$$

$$\theta_3 = \frac{\theta_1}{\text{ch} \xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}} - P_4; \quad \theta_1 = \frac{\theta_2 + P_1}{P_2};$$

$$a_1 = \frac{\text{sh} \left(\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L} \right) \sqrt{\frac{\kappa_c \psi_n}{\xi \gamma \psi_L}}}{\text{sh} \left(\xi_n \sqrt{\frac{\kappa_c \text{Bi} \psi_n}{\epsilon}} \right)}; \quad a_2 = \frac{\text{ch} (\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}) - 1}{\text{ch} (\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L})}$$

$$a_3 = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \text{th} (\xi_T \sqrt{\text{Bi} \psi_L}) \cdot (\text{sh} \xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L});$$

$$P_1 = \left[a_3 + \frac{a_2}{\gamma} \text{ch} \left(\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_n} \right) \right] \frac{P_0}{\text{Bi} \psi_L}; \quad P_2 = a_3 + \text{ch} (\xi_n \sqrt{\gamma \text{Bi} \psi_L}).$$

$$P_3 = \frac{a_2 P_0}{\gamma Bi \psi_L} \operatorname{ch}(\xi_n \sqrt{\gamma Bi \psi_L}) + \frac{(k_c P_0' + P_0)}{k_c \frac{Bi \psi_n}{\epsilon}} \left(\operatorname{ch} \left(\xi_n \sqrt{k_c \frac{Bi \psi_n}{\epsilon}} \right) - 1 \right),$$

$$P_4 = \frac{a_2 P_0}{\gamma Bi \psi_L} + \frac{P_0 \xi_T}{\sqrt{\gamma Bi \psi_L}} \operatorname{th}(\xi_n \sqrt{\gamma Bi \psi_L}); P_5 = \operatorname{ch}(\xi_n \sqrt{\gamma Bi \psi_L}) +$$

$$+ a_1 \operatorname{ch} \left(\xi_n \sqrt{k_c \frac{Bi \psi_n}{\epsilon}} \right).$$

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

$$\theta = f(P_0, P_0', Bi, \psi_n, \psi_L, k_c, \gamma, \Sigma \xi_n, \xi_n, \xi_T).$$

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 ξ_n , ξ_n и ξ_T 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:

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

$$\epsilon = 2,5-5,0; \psi_L = 40-110; \psi_L/\psi_n = 0,17-0,4,$$

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 неventилируемых 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 ограни-

чить задачи тепловых расчетов определением одного лишь среднего превышения температуры обмотки.

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

Характер распределения температуры по длине обмотки якоря не зависит от величины критериев Ro' и Ro и определяется лишь их соотношением. При варьировании отношениями Ro'/Ro и $\psi_L/\psi_{\text{п}}$, а также симплексом ϵ значения KH изменяются в 1,5—2,5 раза. Комплексы k_c и γ не оказывают значительного влияния на форму кривой $\vartheta_{я}=f(l)$; при их изменении значения KH 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 $\vartheta_{я\text{ср}}$ оказывает величина комплекса ψ_L . Средние превышения температуры обмотки якоря, соответствующие различным значениям этого комплекса, могут отличаться в 2,0—2,8 раза. Разность между $\vartheta_{я\text{ср}}$ при различных значениях комплексов k_c и γ не превышает соответственно 2,5 и 10%.

Минимальная величина $\vartheta_{я\text{ср}}$ соответствует верхнему пределу значений комплексов ψ_L , γ , $\psi_L/\psi_{\text{п}}$ 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 неventилируемых машин постоянного тока, статья в настоящем сборнике.