

К ТЕПЛОВОМУ РАСЧЕТУ ЯКОРЯ ЗАКРЫТЫХ НЕВЕНТИЛИРУЕМЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

М. Н. УЛЯНИЦКИЙ, В. В. САЛОМАТОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В закрытых машинах постоянного тока максимальную тепловую нагрузку обычно имеет обмотка якоря. В данной работе приводится метод расчета температурного поля по длине обмотки якоря с учетом тепловой связи с коллектором и отвода тепла по валу и через пазовый клин. Температура в поперечном сечении паза и в радиальном направлении пакета считается постоянной; передача тепла в радиальном направлении пакета и теплоотдача с его торцевой поверхности не учитываются.

Расчет проводится на одно зубцовое деление. Обмотка рассматривается как стержень, имеющий семь участков (рис. 1): верхние и нижние выводы к коллектору, пазовая часть, части лобовых соединений со стороны привода и коллектора, находящиеся под изоляцией бандажа, и торцевые части лобовых соединений со стороны привода и коллектора.

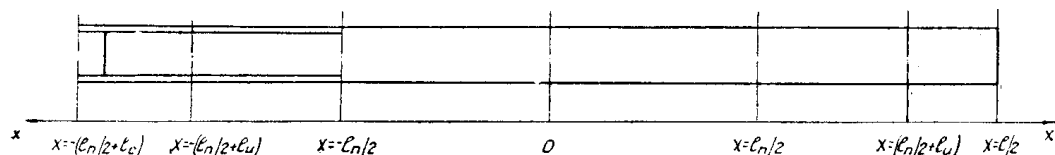


Рис. 1. Расчетная схема обмотки якоря.

В расчете предполагается, что от торцевых частей лобовых соединений со стороны коллектора, закрытых сверху выводами секций, и от нижних выводов обмотки к коллектору тепло отводится только вдоль проводов.

В соответствии с уравнениями тепловых балансов [4] уравнения кривых распределения температур по длине отдельных участков обмотки якоря имеют следующий вид:

для торцевой части лобовых соединений со стороны коллектора и нижних выводов

$$\vartheta = -\frac{B}{2}x^2 + T_1x + T_2. \quad (1)$$

для остальных частей обмотки, принимаем $\frac{A'}{m^2} = A$,

$$V = C_1 \exp(mx) + C_2 \exp(-mx)$$

Значения постоянных интегрирования определяются при следующих граничных условиях:

1) для пазовой части обмотки

$$x = -\frac{l_{\Pi}}{2} \quad \vartheta_{\Pi} = \vartheta_1, \quad x = \frac{l_{\Pi}}{2} \quad \vartheta_{\Pi} = \vartheta_2,$$

$$C_{1(2)} = \frac{(\vartheta_{2(1)} - A_1) \exp m_1 \frac{l_{\Pi}}{2} - (\vartheta_{1(2)} - A_1) \exp \left(-m_1 \frac{l_{\Pi}}{2} \right)}{2 \operatorname{sh} m_1 l_{\Pi}},$$

$$A_1' = \frac{k_c q_c + q_m}{\lambda_m f_{\Pi}}, \quad k_c = \frac{1}{1 + \frac{(\alpha b_K + \Lambda_B) \Delta_{\Pi}}{\lambda_{\Pi} \Pi}}, \quad \Lambda_B = \frac{\alpha_B \lambda_B l_B \pi D_B}{z (\alpha_B \delta_B l_B + \lambda_B l_{\Pi})},$$

$$m_1^2 = \frac{\Lambda}{\lambda_m f_{\Pi}}, \quad \Lambda = \Lambda_{Fe} + \Lambda_K, \quad \Lambda_{Fe} = k_c (\alpha b_K + \Lambda_B), \quad \Lambda_K = \frac{\alpha b_{ш} \lambda_K}{\alpha \Delta_K + \lambda_K};$$

2) для участка лобовых соединений со стороны привода под изоляцией бандажа

$$x = \frac{l_{\Pi}}{2} \quad \vartheta_{\Pi} = \vartheta_1, \quad x = \frac{l_{\Pi}}{2} + l_{И} \quad \vartheta_{\Pi} = \vartheta_4,$$

$$C_1 = \frac{\vartheta_4 - \vartheta_2 \exp(-m_2 l_{И}) - A_2 [1 - \exp(-m_2 l_{И})]}{2 \exp m_2 \frac{l_{\Pi}}{2} \operatorname{sh} m_2 l_{И}}, \quad m_2^2 = \frac{\Lambda_{\Pi}}{\lambda_m f_{\Pi}},$$

$$C_2 = \frac{\vartheta_2 \exp m_2 l_{И} - \vartheta_4 + A_2 (1 - \exp m_2 l_{И})}{2 \exp \left(-m_2 \frac{l_{\Pi}}{2} \right) \operatorname{sh} m_2 l_{И}}, \quad A_2^1 = \frac{q_m}{\lambda_m f_{\Pi}},$$

$$\Lambda_{\Pi} = \frac{b_{\Pi} \alpha \lambda_{\Pi}}{\alpha \Delta_{\Pi} + \lambda_{\Pi}};$$

3) для участка лобовых соединений со стороны коллектора под изоляцией бандажа

$$x = -\frac{l_{\Pi}}{2} \quad \vartheta_{\text{лк}} = \vartheta_2, \quad x = -\left(\frac{l_{\Pi}}{2} + l_{И} \right) \quad \vartheta_{\text{лк}} = \vartheta_3,$$

$$C_1 = \frac{\vartheta_1 \exp m_3 l_{И} - \vartheta_3 + A_3 (1 - \exp m_3 l_{И})}{2 \exp \left(-m_3 \frac{l_{\Pi}}{2} \right) \operatorname{sh} m_3 l_{И}},$$

$$C_2 = \frac{\vartheta_3 - \vartheta_1 \exp(-m_3 l_{И}) - A_3 [1 - \exp(-m_3 l_{И})]}{2 \exp m_3 \frac{l_{\Pi}}{2} \operatorname{sh} m_3 l_{И}},$$

$$m_3^2 = \frac{\Lambda_{\text{лк}}}{\lambda_m f_{\text{л}}}, \quad \Lambda_{\text{лк}} = \frac{\alpha \lambda_{\text{л}} b_{\text{лк}}}{\alpha \Delta_{\text{л}} + \lambda_{\text{л}}}, \quad A_3' = A_2';$$

4) для торцевой части лобовых соединений со стороны привода

$$x = \frac{l_{\Pi}}{2} + l_{И} \quad \vartheta_{\Gamma} = \vartheta_4, \quad x = \frac{l_{\Pi}}{2} \quad \frac{d\vartheta_{\Gamma}}{dx} = 0,$$

$$C_{1(2)} = \frac{\vartheta_4 - A_4}{2 \operatorname{ch} m_4 l_{\Gamma}} \exp \left[\left(\mp \right) m_4 \frac{l_{\Pi}}{2} \right], \quad m_4^2 = \frac{\alpha b_{\Gamma}}{\lambda_m f_{\Pi}}, \quad A_4' = A_2'.$$

5) для верхних выводов обмотки к коллектору

$$x = -\frac{l_{\Pi}}{2} \quad \vartheta_{\text{В}} = \vartheta_1, \quad x = -\left(\frac{l_{\Pi}}{2} + l_{\text{С}}\right) \quad \vartheta_{\text{В}} = \vartheta_{\text{К}},$$

$$C_1 = \frac{\vartheta_1 \exp m_5 l_{\text{С}} - \vartheta_{\text{К}} + A_5(1 - \exp m_5 l_{\text{С}})}{2 \exp\left(-m_5 \frac{l_{\Pi}}{2}\right) \operatorname{sh} m_5 l_{\text{С}}},$$

$$C_2 = \frac{\vartheta_{\text{К}} - \vartheta_1 \exp(-m_5 l_{\text{С}}) - A_5[1 - \exp(-m_5 l_{\text{С}})]}{2 \exp m_5 \frac{l_{\Pi}}{2} \operatorname{sh} m_5 l_{\text{С}}},$$

$$m_5^2 = \frac{\Lambda_{\text{С}}}{\lambda_{\text{mf}} l_{\text{С}}}, \quad \Lambda_{\text{С}} = \frac{\alpha \lambda_{\text{С}} B_{\text{С}}}{\alpha \Delta_{\text{С}} + \lambda_{\text{С}}}, \quad A_5' = A_2';$$

6) для нижних выводов к коллектору

$$x = -\left(\frac{l_{\Pi}}{2} + l_{\text{С}}\right) \quad \vartheta_{\text{Н}} = \vartheta_{\text{К}}, \quad x = -\frac{l_{\Pi}}{2} \quad \vartheta_{\text{Н}} = \vartheta_1,$$

$$T_1 = \vartheta_1 \frac{1}{l_{\text{С}}} - \vartheta_{\text{К}} \frac{1}{l_{\text{С}}} - \frac{B_1}{2} (l_{\Pi} + l_{\text{С}}),$$

$$T_2 = \vartheta_1 \left(1 + \frac{l_{\Pi}}{2l_{\text{С}}}\right) - \vartheta_{\text{К}} \frac{l_{\Pi}}{2l_{\text{С}}} - \frac{B_1}{2} \left(\frac{l_{\Pi}}{2}\right)^2 \left(1 + \frac{2l_{\text{С}}}{l_{\Pi}}\right), \quad B_1 = A_2';$$

7) для торцевой части лобовых соединений со стороны коллектора

$$x = -\left(\frac{l_{\Pi}}{2} + l_{\text{Н}}\right) \quad \vartheta_{\text{ТК}} = \vartheta_3, \quad x = -\frac{l}{2} \quad \frac{d\vartheta_{\text{ТК}}}{dx} = 0,$$

$$T_1 = -B_2 \frac{l}{2}, \quad T_2 = \vartheta_3 - \frac{B_2}{2} \left(\frac{l_{\Pi}}{2} + l_{\text{Н}}\right) \left(\frac{l}{2} + l_{\text{Т}}\right),$$

$$B_2 = A_2'.$$

Значения $v_1, v_2, v_3, v_4, v_{\text{К}}$ определяются из условия непрерывности тепловых потоков в сечениях обмотки $x = \pm \left(\frac{l_{\Pi}}{2} + l_{\Pi}\right)$, $x = \pm \frac{l_{\Pi}}{2}$ и уравнения теплового баланса коллектора.

$$\vartheta_{\text{К}} \alpha_{\text{К}} S_{\text{К}} = q_{\text{К}} + \lambda_{\text{mf}} \left(\frac{d\vartheta_{\text{В}}}{dx} + \frac{d\vartheta_{\text{Н}}}{dx} \right)_{x = -\left(\frac{l_{\Pi}}{2} + l_{\text{С}}\right)}.$$

$$\vartheta_1 = \frac{\left(\frac{a_1}{f_{\Pi}} P_6 P_7 + P_5 P_9\right) (P_1 P_3 - 1) + (P_1 P_4 + P_2) \frac{P_5}{m_2}}{\left(P_5 P_8 - \frac{a_1}{f_{\Pi}} P_6^2\right) (P_1 P_3 - 1) - \frac{a_2}{a_1} P_5 P_1},$$

$$\vartheta_2 = \frac{m_2 \vartheta_1 \frac{a_2}{a_1} P_1 + (P_1 P_4 + P_2)}{m_2 (P_1 P_3 - 1)},$$

$$\vartheta_3 = \frac{m_3 \vartheta_1 + (a_5 + B_1 l_{\text{Т}}) \operatorname{sh} m_3 l_{\text{Н}}}{m_3 \operatorname{ch} m_3 l_{\text{Н}}},$$

$$\vartheta_4 = \frac{\vartheta_2 + \frac{P_2}{m_2}}{P_1}, \quad \vartheta_{\text{К}} = \lambda_{\text{mf}} \frac{\vartheta_1 P_6 + P_7}{P_5}.$$

Здесь

$$a_1 = \frac{\text{sh} m_1 l_{\text{п}}}{m_1}, \quad a_2 = \frac{\text{sh} m_2 l_{\text{н}}}{m_2}, \quad a_3 = \frac{\text{sh} m_5 l_{\text{с}}}{m_5},$$

$$a_4 = \frac{A_1}{a_1} (\text{ch} m_1 l_{\text{п}} - 1), \quad a_5 = \frac{A_2}{a_2} (\text{ch} m_2 l_{\text{н}} - 1),$$

$$a_6 = \frac{A_5}{a_3} (\text{ch} m_3 l_{\text{с}} - 1), \quad P_1 = \text{ch} m_2 l_{\text{н}} + a_2 m_4 \text{th} m_4 l_{\text{т}},$$

$$P_2 = (a_5 + m_4 A_4 \text{th} m_4 l_{\text{т}}) \text{sh} m_2 l_{\text{н}}, \quad P_3 = \text{ch} m_2 l_{\text{н}} + \frac{a_2}{a_1} \text{ch} m_1 l_{\text{п}},$$

$$P_4 = (a_1 + a_2) \text{sh} m_2 l_{\text{н}}, \quad P_5 = \left(\frac{\alpha_{\text{к}} S_{\text{к}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{f_{\text{с}}}{\text{th} m_5 l_{\text{с}}} + \frac{f_{\text{с}}}{l_{\text{с}}} \right) \lambda_{\text{м}}^2,$$

$$P_6 = \left(\frac{1}{a^3} + \frac{1}{l_{\text{с}}} \right) \lambda_{\text{м}} f_{\text{с}}, \quad P_7 = (a_6 + 0,5 B_1 l_{\text{с}}) \lambda_{\text{м}} f_{\text{с}} + q_{\text{к}},$$

$$P_8 = \left(\frac{f_{\text{п}}}{a_1} \text{ch} m_1 l_{\text{п}} + \frac{f_{\text{с}}}{a_3} \text{ch} m_5 l_{\text{с}} + f_{\text{л}} m_3 \text{th} m_3 l_{\text{н}} + \frac{f_{\text{с}}}{l_{\text{с}}} \right) \frac{a_1}{f_{\text{п}}},$$

$$P_9 = \left(f_{\text{п}} a_4 + f_{\text{л}} a_5 + f_{\text{с}} a_6 + 0,5 f_{\text{с}} B_1 + \frac{a_5 + B_1 l_{\text{т}}}{\text{ch} m_3 l_{\text{н}}} f_{\text{л}} \right) \frac{a_1}{f_{\text{п}}}.$$

Проверка рассмотренного метода расчета показала, что расчетные значения температур имеют достаточно близкое совпадение с данными опыта (рис. 2). За температуру окружающей среды в расчетах принималась средняя температура корпуса [5].

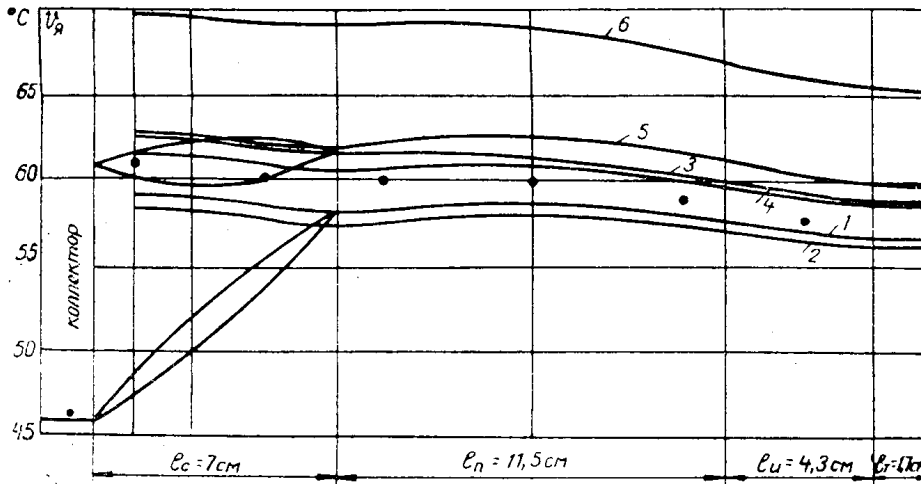


Рис. 2. Распределение температур по длине обмотки якоря закрытого невентилируемого двигателя типа ПБ42.
($2f_{\text{с}}/f_{\text{п}}=0,17$, $\theta_{\text{к}}=45^{\circ}\text{C}$)

● — опыт. Расчетные кривые:

- 1 — основной вариант; 2 — $\theta_{\text{к}}=0,8 \theta_{\text{я ср}}$, $2f_{\text{с}}/f_{\text{п}}=0,3$; 3 — $\theta_{\text{к}}=\theta_{\text{я ср}}$;
- 4 — без учета отвода тепла по валу;
- 5 — без учета отвода тепла через пазовый клин;
- 6 — без учета тепловой связи с коллектором, отвода тепла по валу и через пазовый клин.

Для выяснения влияния на характер распределения температуры тепловой связи якоря с коллектором, отвода тепла по валу и через пазовый клин был проведен ряд расчетных вариантов.

Теплообмен между коллектором и обмоткой якоря определяется в основном разностью их температур, а также соотношением площадей поперечных сечений секций и выводов. Длина последних в маломощных машинах изменяется в сравнительно небольших пределах и поэтому играет меньшую роль.

Наиболее сильную тепловую связь с коллектором при прочих равных условиях будут иметь обмотки с жесткими секциями и всыпные обмотки низковольтных машин, у которых отношение площадей поперечных сечений секций достигает значения 0,5—1,0.

По данным сравнительных расчетов, при всыпных обмотках с $2f_c/f_n \leq 0,3$ и $\vartheta_k = (0,8 \div 1,2) \vartheta_{я\text{ ср}}$ коллектор оказывает влияние в основном лишь на средний уровень температуры. Пренебрежение теплообменом с коллектором в этих случаях приводит к изменению разности между значениями температур в отдельных точках по длине обмотки якоря примерно на 1—2%.

При расчете отвода тепла по валу основное затруднение вызывает определение величины теплового сопротивления контактной зоны между валом и пакетом якоря. Контакт между твердыми телами всегда имеет дискретный характер. Причем даже при сравнительно сильном сжатии площадь фактического контакта составляет незначительную долю от площади соприкосновения, определяемой геометрическими размерами соприкасающихся тел [1].

Величина теплового сопротивления контактной зоны вал-пакет в общем случае зависит от чистоты обработки сопрягаемых поверхностей, класса точности и характера посадки, твердости материалов, а также от возможных технологических отклонений при изготовлении машины (несоосность, эллипсность, перекося и т. д.).

В связи с неопределенностью условий, характеризующих тепловое сопротивление контактной зоны, расчет отвода тепла по валу можно провести только приближенно.

Для более полного представления об участии вала в отводе потерь якоря были выполнены расчеты при крайних случаях: $\delta_B = 0$ и $\delta_B = \dots$. Полученные при этом значения температур показали расхождения, не превышающие 2—2,5%, а характер температурного поля практически оставался неизменным (рис. 2).

По данным сравнительных расчетов отвод тепла через пазовый клин влияет в основном лишь на уровень температуры обмотки (рис. 2). Погрешность расчета $v_{я\text{ ср}}$ в этом случае достигает 5—6%. Пренебрежение в расчетах зависимостью потерь в меди от непостоянства температуры по длине обмотки вносит погрешность примерно 0,1—0,2%.

Среднее превышение температуры обмотки якоря можно получить из следующего выражения:

$$\vartheta_{я\text{ ср}} = \frac{\int_{-0,5l}^{-(0,5l_н+l_н)} \vartheta_{ТК\text{ ср}} dx + \int_{-(0,5l_н+l_н)}^{-0,5l_н} \vartheta_{л\text{ ср}} dx + \int_{-0,5l_н}^{0,5l_н} \vartheta_{п} dx + \int_{0,5l_н}^{0,5l_н+l_н} \vartheta_{л} dx + \int_{0,5l_н+l_н}^{0,5l} \vartheta_{Т} dx}{1}$$

Здесь, принимая $l_c = l_T + l_n$,

$$\vartheta_{ТК\text{ ср}} = \frac{f_{ТК}}{f_n} \vartheta_{ТК} + \frac{f_c}{f_n} \vartheta_n + \frac{f_c}{f_n} \vartheta_B, \quad \vartheta_{л\text{ ср}} = \frac{f_l}{f_n} \vartheta_l + \frac{f_c}{f_n} \vartheta_n + \frac{f_c}{f_n} \vartheta_B.$$

Среднее превышение температуры пакета якоря определяется из соотношения:

$$\vartheta_{Fe\text{ ср}} = K_c \left(q_c \frac{\Delta_n}{\Pi \lambda_n} + \frac{1}{l_n} \int_{-0,5l_n}^{0,5l_n} \vartheta_n dx \right).$$

Заключение

Приведенные аналитические соотношения достаточно точно отражают в количественном и качественном отношении рассматриваемое физическое явление: распределение температуры по длине обмотки якоря закрытых неventилируемых машин постоянного тока при стационарном тепловом режиме. Учитывая это, можно рекомендовать разработанный метод расчета для использования в аналитических исследованиях влияния различных факторов на средний уровень и характер распределения температур по длине обмотки якоря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин. Контактный теплообмен, Госэнергоиздат, 1963.
2. А. И. Борисенко, А. И. Яковлев. Методика теплового расчета быстроходных электродвигателей постоянного тока, Известия вузов, «Электромеханика», 1965, № 5.
3. С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. Справочник по теплопередаче, Госэнергоиздат, 1959.
4. М. Н. Уляницкий. Исследование нагрева закрытых машин постоянного тока с естественным охлаждением, Диссертация, ТПИ, 1966.
5. М. Н. Уляницкий. К тепловому расчету закрытых электрических машин с естественным охлаждением, «Электричество», 1965, № 5.