

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА УРОВЕНЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДЛИНЕ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ЗАКРЫТЫХ НЕВЕНТИЛИРУЕМЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

М. Н. УЛЯНИЦКИЙ, В. В. САЛОМАТОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

По данным сравнительных расчетов [1] при $\nu_k = (0,8-1,2)$ и $2i_c/i_n < 0,25-0,3$ теплообмен с коллектором не играет существенной роли в распределении температуры в якоре¹. Незначительное влияние на характер температурного поля по длине обмотки оказывает также теплоотвод по валу и через пазовый клин. В целом исключение из теплового расчета всех рассмотренных факторов при указанном соотношении $\vartheta_k, \vartheta_{я ср}, i_c, i_n$ вызывает изменение в основном лишь среднего уровня температуры обмотки якоря. Учитывая это, в тепловой расчет, предложенный в [1], можно внести ряд упрощений и провести исследование влияния отдельных параметров на нагрев якоря по упрощенной методике.

Полагая $I_c = I_T + I_n$ и объединяя выводы обмотки к коллектору с лобовыми соединениями, можно рассматривать обмотку якоря как стержень постоянного сечения, имеющий пять участков: пазовая часть, торцевые и находящиеся под изоляцией бандажа части лобовых соединений со стороны привода и со стороны коллектора. При этом общий вид дифференциальных уравнений теплопроводности отдельных участков обмотки и граничные условия остаются такими же, как и в [1]. Однако значения некоторых коэффициентов A', m изменяются. В соответствии с принятыми допущениями имеем:

1. Для пазовой части обмотки

$$A'_1 = \frac{k_c q_c + q_m}{\lambda_m i_n}, \quad k_c = \frac{\lambda_n \Pi}{\lambda_n \Pi + \alpha b_k \Delta_n}, \quad m^2_1 = \frac{\Lambda}{\lambda_m f_n}, \quad \Lambda = k_c \alpha b_k.$$

2. Для находящихся под изоляцией бандажа частей лобовых соединений со стороны привода и коллектора

$$m^2_2 = \frac{\Lambda_l}{\lambda_m f_n}, \quad \Lambda_l = \frac{\alpha \lambda_l b_l}{\lambda_l + \alpha \Delta_l}, \quad A_1^2 = \frac{q_m}{\lambda_m f_n}.$$

3. Для торцевой части лобовых соединений со стороны привода

$$m^2_3 = \frac{\alpha b_T}{\lambda_m f_n}, \quad A_1^3 = A_1^2.$$

4. Для торцевой части лобовых соединений со стороны коллектора $B = A_1^2$

¹ Условные обозначения приняты те же, что и в [1].

Вывод формул для расчета $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4$ выполняется так же, как и в [1]. В результате имеем

$$\vartheta_1 = \frac{(P_5 P_3 - 1)(P_3 + P_4) + (P_1 + P_2 P_3) a_1}{(P_2 P_5 - 1) P_5 a_3 - P_2 a_1^2}, \quad \vartheta_2 = \frac{\vartheta_1 P_5 a_3 - P_3 - P_4}{a_1}$$

$$\vartheta_3 = \vartheta_1 \frac{1}{\operatorname{ch} m_2 l_H} + P_4, \quad \vartheta_4 = \frac{\vartheta_2 + P_1}{P_4}.$$

Здесь

$$a_1 = \frac{m_1 \operatorname{sh} m_2 l_H}{m_2 \operatorname{sh} m_1 l_H}, \quad a_2 = \frac{m_3 \operatorname{sh} m_2 l_H}{m_2 \operatorname{ch} m_3 l_T}, \quad a_3 = \frac{\operatorname{ch} m_2 l_H - 1}{\operatorname{ch} m_2 l_H},$$

$$P_1 = a_3 A_3 \operatorname{sh} m_3 l_T + A_2 (\operatorname{ch} m_2 l_H - 1), \quad P_2 = a_2 \operatorname{sh} m_3 l_T + \operatorname{ch} m_2 l_H,$$

$$P_3 = A_2 (\operatorname{ch} m_2 l_H - 1) + a_1 A_1 (\operatorname{ch} m_1 l_H - 1) \quad P_4 = A_2 a_3 + \frac{B l_T}{m_2} \operatorname{th} m_2 l_H,$$

$$P_5 = a_1 \operatorname{ch} m_1 l_H + \operatorname{ch} m_2 l_H.$$

Среднее превышение температуры обмотки якоря определяется из следующего выражения:

$$\vartheta_{я\text{ ср}} = \frac{\int_{-0,5l}^{-(0,5l_H + l_H)} \vartheta_{TK} dx + \int_{-0,5l}^{-0,5l_H} \vartheta_{LK} dx + \int_{-0,5l}^{0,5l_H} \vartheta_{n} dx + \int_{0,5l_H}^{0,5l_H + l_H} \vartheta_{л} dx + \int_{0,5l_H + l_H}^l \vartheta_{r} dx}{1}$$

Для выяснения уровня и характера распределения температуры по длине обмотки якоря с помощью ЭЦВМ «Минск-1» был проведен ряд расчетных вариантов по упрощенной методике расчета. Исследовалось влияние соотношения потерь в меди и стали, теплового сопротивления изоляции, конструктивных параметров якоря и величины коэффициента теплоотдачи. За основной вариант был принят расчет по данным якоря серийного двигателя типа ПБ42.

Согласно расчетным данным при изменении значений электромагнитных нагрузок в пределах, рекомендуемых для закрытых машин, наиболее значительное влияние на уровень и характер распределения температуры в обмотке оказывают потери в меди. Так, при уменьшении плотности тока от 5 а/мм^2 до 3 а/мм^2 $\vartheta_{я\text{ ср}}$ снижается примерно в два раза, а точка с максимальной температурой перемещается от конца лобовых соединений со стороны коллектора в пазовую часть обмотки (рис. 1, а). В то же время при изменении индукции в зубцах в диапазоне $1,35-1,15 \text{ тл}$ значения $\vartheta_{я\text{ ср}}$ отличаются не более, чем на $5-6\%$.

При этом положение точки с максимальной температурой не меняется (рис. 1, а).

Однако в целом потери в стали оказывают на $\vartheta_{я\text{ ср}}$ существенное влияние. В машинах рассматриваемого типа значения коэффициента k_c , характеризующего влияние r_c на нагрев обмотки, согласно расчетам находятся в пределах чисел $0,9-0,98$ (верхний предел относится к низковольтным машинам). Таким образом, потери в стали почти полностью идут на нагрев меди.

Сравнительно слабое влияние на нагрев обмотки якоря оказывает пазовая изоляция: изменение ее теплопроводности в два раза (от $1,73 \cdot 10^{-3}$ до $0,865 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$) вызывает увеличение $\vartheta_{я\text{ ср}}$ всего на $0,7\%$.

Несколько большую роль играет тепловое сопротивление изоляции под бандажом лобовых соединений. При уменьшении теплопроводности этой изоляции в два раза $r_{с\text{я}} \vartheta$ возрастает на $4,5\%$. Изменение теплопро-

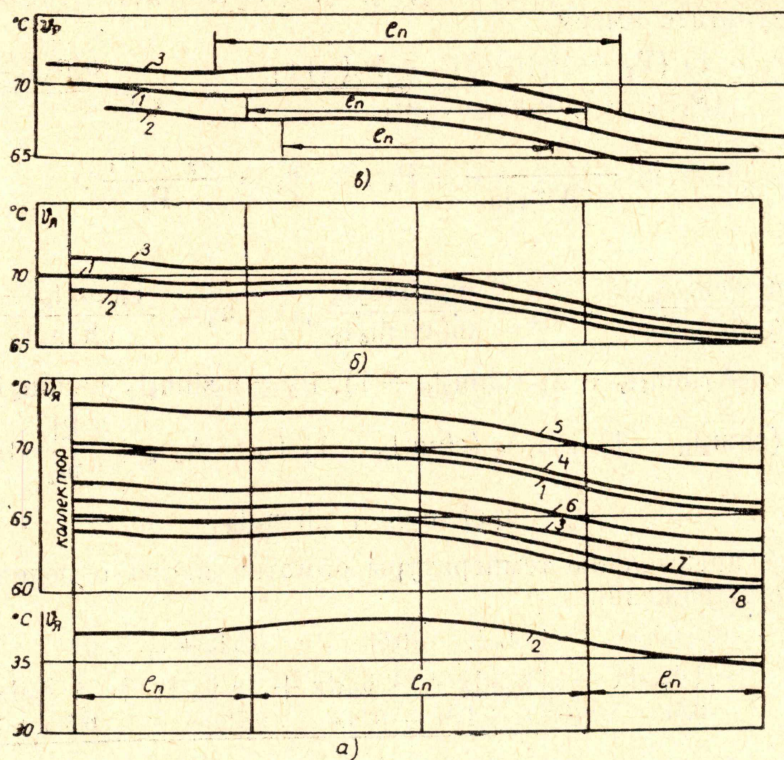


Рис. 1. Расчетные кривые распределения температуры по длине обмотки якоря.
 1 — основной вариант ($j = 5 \text{ а/мм}^2$, $b_z = 1,35 \text{ тл}$, $\lambda_{\text{по}} = \lambda_{\text{до}} = 1,725 \cdot 10^{-3} \text{ вт/}^\circ\text{С см}^2$, $\Delta_{\text{по}} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, $\Delta_{\text{до}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, $b_{\text{до}} = 1,5 \text{ см}$);
 а) 2 — $j = 3 \text{ а/мм}^2$, 3 — $b_z = 1,15 \text{ тл}$, 4 — $\Delta_{\text{п}} = 2\Delta_{\text{по}}$,
 5 — $\Delta_{\text{л}} = 2\Delta_{\text{до}}$, 6 — $\Delta_{\text{п}} = 0$, 7 — $b_{\text{л}} = 1,15 \text{ в}_{\text{до}}$,
 8 — $\Delta_{\text{п}} = \Delta_{\text{л}} = 0$;
 б) 2 — $l_{\text{т}}/l_{\text{и}} = 0,3$, 3 — $l_{\text{т}}/l_{\text{и}} = 0,5$;
 в) 2 — $l_{\text{п}}/2l_{\text{л}} = 1,2$, 3 — $l_{\text{п}}/2l_{\text{л}} = 0,8$.

водности изоляции в рассматриваемых пределах не приводит к значительным изменениям распределения температуры в обмотке якоря.

Нагрев обмотки якоря существенно зависит от условий охлаждения лобовых соединений. Так, с увеличением их поверхности теплоотдачи на 15% $\vartheta_{\text{я ср}}$ уменьшается примерно на 6,5%. При этом отношение максимальной и средней температур (коэффициент неравномерности нагрева — КН) практически не меняется.

При постоянной длине лобовых соединений уменьшение соотношения $l_{\text{т}}/l_{\text{и}}$ приводит к снижению уровня температуры обмотки и вызывает такое же изменение характера температурного поля, как и уменьшение плотности тока (рис. 1, б). Отклонение величины отношения $l_{\text{т}}/l_{\text{и}}$ от среднего в диапазоне его наиболее часто встречающихся значений 0,3—0,5 приводит к изменению $\vartheta_{\text{я max}}$ примерно на 1,6%, $\vartheta_{\text{я ср}}$ — на 1,3%, КН — на 0,5%.

С увеличением отношения $l_{\text{п}}/2l_{\text{л}}$ температура обмотки якоря возрастает (рис. 1, в). Причем отклонение величины этого отношения от среднего в диапазоне чисел 1,4—0,6 дает изменение $l\vartheta_{\text{я max}}$ и $\vartheta_{\text{я ср}}$ примерно на 2—2,5%. Значение КН в этих случаях практически остается постоянным.

Пропорциональное увеличение или уменьшение длины пазовой и лобовой частей витка практически не вызывает изменения $\vartheta_{\text{я ср}}$. Однако $\vartheta_{\text{я max}}$ и КН в этом случае не остаются постоянными. С уменьшением

длины витка их значения уменьшаются, при этом степень изменения определяется всеми рассмотренными выше факторами.

С увеличением коэффициента теплоотдачи поверхности якоря неравномерность температурного поля несколько возрастает. Например, при увеличении α в полтора раза коэффициент КН увеличивается на 2%.

В целом результаты проведенных аналитических исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Наиболее существенное влияние на характер распределения температуры по длине обмотки якоря оказывает величина плотности тока.

2. Потери в стали влияют на нагрев обмотки якоря почти в такой же степени, как и потери в меди.

3. Изменение соотношений $l_T/l_{и}$ и $l_{п}/2l_{л}$ в диапазоне их наиболее часто встречающихся значений, а также пропорциональное увеличение (уменьшение) длины l_T , $l_{и}$, $l_{п}$ на 15—20% не оказывает существенного влияния на распределение температуры по длине обмотки якоря и $\theta_{я ср}$.

4. Положение максимально нагретой точки обмотки якоря не является постоянным. В зависимости от соотношения потерь в меди и стали и конструктивных параметров якоря точка с максимальной температурой будет находиться либо на конце лобовых соединений со стороны коллектора, либо в пазовой части обмотки между серединой пакета и его торцем со стороны коллектора.

4. Тепловое сопротивление изоляции обмотки якоря примерно на порядок меньше сопротивления теплоотдачи с поверхности якоря.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Н. Ульяницкий, В. В. Саломатов. К тепловому расчету якоря закрытых невентилируемых машин постоянного тока. Статья в настоящем сборнике.