

Афанасов А. М. Формирование теплового потенциала якорных обмоток тяговых электромашин постоянного тока // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. - №36. – С. 13-18. (ISSN 2079-3944).

**УДК 621.313.001.4**

**А.М. АФАНАСОВ**, канд. техн. наук, докторант, ДНУЖТ,  
Днепропетровск

## **ФОРМИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТЕНЦИАЛА ЯКОРНЫХ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Наведено аналіз ступеня впливу електричних і магнітних втрат в якорях тягових електромашин на перегрів їх обмоток. Запропоновано використання безрозмірних питомих вагових коефіцієнтів, що визначають характер формування теплового потенціалу обмотки якоря.

Приведен анализ степени влияния электрических и магнитных потерь в якорях тяговых электромашин на перегрев их обмоток. Предложено использование безразмерных удельных весовых коэффициентов, определяющих характер формирования теплового потенциала обмотки якоря.

Степень адекватности тепловых процессов, протекающих в обмотках тяговых электромашин при их испытании, и в условиях эксплуатации во многом определяется принятой схемой испытаний. В соответствии с ГОСТ 2582-81 при приемо-сдаточных испытаниях методом взаимной нагрузки режимы работы обеих испытываемых электромашин считают действительными несмотря на то, что тепловая нагруженность их обмоток может различаться. Степень различия тепловой нагруженности обмоток испытываемых электромашин будет определяться принятым способом компенсации потерь в схеме взаимной нагрузки [1] и степенью зависимости тепловых потенциалов обмоток от потерь в различных активных частях электромашин.

Одним из важных условий обеспечения высокой информативности результатов тепловых испытаний является одинаковая тепловая нагруженность лимитирующих обмоток испытываемого двигателя и генератора. Тепловая перегрузка или недогрузка лимитирующей обмотки одной из испытываемых электромашин не даёт возможности адекват-

ной оценки результатов испытаний на нагрев в случае перегрева перегруженной обмотки или недогрева недогруженной.

Требование ГОСТ 2582-81 в части токовой нагруженности испытуемых двигателей и генераторов является формальным, так как не учитывает ни схемы испытания, ни то, какая из обмоток электромашины является лимитирующей. Такая формализация оправдана самим декларативным принципом ограничения температуры перегрева обмоток по классу их изоляции.

Рассмотрим влияние каждого вида потерь в якоре на перегрев его обмотки. Для упрощения анализа будем учитывать только электрические и магнитные потери в активных частях якоря электромашины. Общие добавочные потери при этом могут быть разделены на потери в меди и в стали, а следовательно отнесены к потерям, греющим медь и сталь соответственно. Для решения поставленной задачи будем использовать упрощённую тепловую схему замещения якоря [2], приведенную на рис. 1.

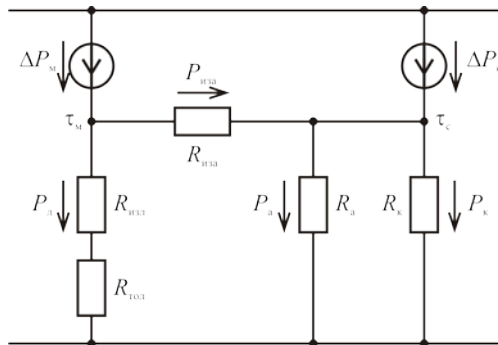


Рис. 1

В схеме приняты следующие обозначения:

$\tau_m$  – превышение температуры меди обмотки якоря;

$\tau_c$  – превышение температуры стали якоря;

$\Delta P_m$  – суммарные потери мощности в меди обмотки якоря;

$\Delta P_c$  – суммарные потери мощности в стали якоря;

$R_{иза}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{иза}$  сквозь изоляцию активной части проводников якоря;

$R_{\text{из.л}}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{\text{из.л}}$  сквозь изоляцию лобовых частей проводников якоря;

$R_{\text{тол}}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{\text{л}}$  конвективного рассеивания с поверхности лобовых частей обмотки якоря;

$R_{\text{а}}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{\text{а}}$  конвективного рассеивания с поверхности сердечника якоря;

$R_{\text{к}}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{\text{к}}$  конвективного рассеивания с поверхности внутренних вентиляционных каналов сердечника якоря.

Посредством теплового потока  $P_{\text{иза}}$  происходит кондуктивный теплообмен между медью и сталью якоря

$$P_{\text{иза}} = Y_{\text{из}} (\tau_{\text{м}} - \tau_{\text{с}}), \quad (1)$$

где  $Y_{\text{из}}$  – тепловая проводимость слоя изоляции обмотки якоря.

$$Y_{\text{иза}} = \frac{1}{R_{\text{иза}}}. \quad (2)$$

Передача тепла в окружающую среду от лобовых частей обмотки якоря носит кондуктивно-конвективный характер и может быть описана выражением

$$P_{\text{л}} = Y_{\text{л}} \tau_{\text{м}}, \quad (3)$$

где  $Y_{\text{л}}$  – эквивалентная тепловая проводимость лобовых частей, обусловленная теплопроводимостью и теплоотдачей.

$$Y_{\text{л}} = \frac{1}{R_{\text{из.л}} + R_{\text{тол}}}. \quad (4)$$

Конвективный теплообмен стали якоря с окружающей средой может быть описан уравнениями:

$$P_{\text{а}} = Y_{\text{а}} \tau_{\text{с}}, \quad (5)$$

где  $Y_{\text{а}}$  – тепловая проводимость, обусловленная конвективной теплоотдачей с поверхности стального пакета якоря;

$$P_{\text{к}} = Y_{\text{к}} \tau_{\text{с}}, \quad (6)$$

где  $Y_{\text{к}}$  – тепловая проводимость, обусловленная конвективной теплоотдачей с поверхности вентиляционных каналов сердечника якоря.

Тепловые проводимости конвективной теплоотдачи с поверхности пакета якоря и вентиляционных каналов в нем:

$$Y_a = \frac{1}{R_a}; \quad (7)$$

$$Y_k = \frac{1}{R_k}. \quad (8)$$

Для тепловой схемы замещения (рис. 1) будут справедливы выражения:

$$\Delta P_M - P_{\text{л}} - P_{\text{из а}} = 0; \quad (9)$$

$$\Delta P_{\text{из а}} + \Delta P_c - P_a - P_k = 0. \quad (10)$$

В результате совместного решения уравнений (1), (3), (5), (6), (9) и (10) после ряда преобразований получим выражение для определения установившегося значения температуры меди обмотки якоря в виде

$$\tau_M = \frac{\Delta P_M (Y_{\text{из а}} + Y_a + Y_k) + \Delta P_c Y_{\text{из а}}}{Y_{\text{л}} Y_{\text{из а}} + (Y_a + Y_k) Y_{\text{из а}} + (Y_a + Y_k) Y_{\text{л}}}. \quad (11)$$

Выражение (11) может быть представлено в виде

$$\tau_M = K_M \Delta P_M + K_c \Delta P_c, \quad (12)$$

где  $K_M$  и  $K_c$  – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния каждого из видов потерь в якоре на температуру его обмотки.

$$K_M = \frac{Y_{\text{из а}} + Y_a + Y_k}{Y_{\text{л}} Y_{\text{из а}} + (Y_a + Y_k) Y_{\text{из а}} + (Y_a + Y_k) Y_{\text{л}}}. \quad (13)$$

$$K_c = \frac{Y_{\text{из а}}}{Y_{\text{л}} Y_{\text{из а}} + (Y_a + Y_k) Y_{\text{из а}} + (Y_a + Y_k) Y_{\text{л}}}. \quad (14)$$

В относительных параметрах выражение (12) можно представить в виде

$$\tau_{\text{мотн}} = k_M \cdot p_M + k_c \cdot p_c, \quad (15)$$

где  $\tau_{\text{мотн}}$  – установившаяся температура меди обмотки якоря, отнесенная к установившемуся её значению  $\tau_{\text{мн}}$  при номинальном режиме;

$p_M$ ,  $p_c$  – удельные значения потерь в меди и стали, отнесенные к соответствующим потерям  $\Delta p_{\text{мн}}$ ,  $\Delta p_{\text{ст}}$  в номинальном режиме;

$k_M$  и  $k_c$  – удельные безразмерные весовые коэффициенты влияния потерь в меди и стали соответственно.

$$\tau_{\text{мотн}} = \frac{\tau_{\text{м}}}{\tau_{\text{мн}}} . \quad (16)$$

$$p_{\text{м}} = \frac{\Delta P_{\text{м}}}{\Delta P_{\text{мн}}} . \quad (17)$$

$$p_{\text{с}} = \frac{\Delta P_{\text{с}}}{\Delta P_{\text{сн}}} . \quad (18)$$

$$k_{\text{м}} = K_{\text{м}} \frac{\Delta P_{\text{мн}}}{\tau_{\text{мн}}} . \quad (19)$$

$$k_{\text{с}} = K_{\text{с}} \frac{\Delta P_{\text{сн}}}{\tau_{\text{мн}}} . \quad (20)$$

Нетрудно убедиться в справедливости выражения

$$k_{\text{м}} + k_{\text{с}} = 1 . \quad (21)$$

Отметим, что коэффициент  $k_{\text{м}}$  и  $k_{\text{с}}$  определяются самим исполнением электромашины и по сути являются конструктивными. Они могут быть рассчитаны для каждого типа тягового электродвигателя по чертежным размерам и данным квалификационных испытаний.

Для практических расчетов степени влияния перегрузки или недогрузки по току и магнитному потоку на температуру обмотки якоря испытуемой электромашины могут быть использованы известные формулы [3] для определения тепловых сопротивлений схемы замещения, приведенной на рис. 1.

$$R_{\text{изл}} = \frac{b_{\text{изл}}}{\lambda S_{\text{л}}} , \quad (22)$$

где  $b_{\text{изл}}$  – эквивалентная толщина изоляции лобовых частей;

$\lambda$  – удельная теплопроводность изоляции;

$S_{\text{л}}$  – площадь поверхности лобовых частей.

$$S_{\text{л}} = \pi D_{\text{а}} l_{\text{л}} , \quad (23)$$

где  $D_{\text{а}}$  – диаметр якоря;

$l_{\text{л}}$  – суммарная длина вылетов передней и задней частей обмотки.

$$R_{\text{гол}} = \frac{1}{\alpha S_{\text{л}}} , \quad (24)$$

где  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи.

$$\alpha = \alpha_0 \left( 1 + \sqrt[4]{v_B^2 + v_a^2} \right), \quad (25)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи в спокойной атмосфере;

$v_B$  – скорость охлаждающего воздуха в осевом направлении;

$v_a$  – линейная скорость якоря.

$$R_{иза} = \frac{b_{иза}}{\lambda z l_a p_{\Pi}}, \quad (26)$$

где  $b_{иза}$  – эквивалентная толщина изоляции активных частей проводников обмотки якоря;

$z$  – число пазов якоря;

$l_a$  – длина активной части якоря;

$p_{\Pi}$  – расчетный периметр паза.

$$p_{\Pi} = 1,33b_{\Pi} + 2h_z, \quad (27)$$

где  $b_{\Pi}$  и  $h_z$  – ширина и глубина паза соответственно.

$$R_a = \frac{1}{\alpha \pi D_a l_a}. \quad (28)$$

$$R_k = \frac{2}{\alpha m_k \pi d_k l_a}, \quad (29)$$

где  $m_k$  – число вентиляционных каналов;

$d_k$  – диаметр вентиляционного канала.

Необходимо отметить, что выражение (11), полученное в результате проведенного анализа, справедливо для установившегося режима и не подходит для определения температуры перегрева обмотки якоря в часовом режиме, который является нестационарным. В соответствии с ГОСТ 8582-81 приемо-сдаточные испытания тяговых электродвигателей электроподвижного состава проводят именно в часовом режиме. Учитывая монотонно возрастающий характер функции  $\tau_M = f(t)$  [2], можно сделать вывод о том, что выражение (15), записанное в относительных единицах, будет справедливо и для нестационарного часового режима. При этом все параметры, входящие в выражение (15) должны быть приведены к часовым значениям потерь мощности. При правильно определенных часовом и длительном режиме тягового электродви-

гателя реальное превышение температуры  $\tau_m$  будет одинаковым для обоих режимов и равным допустимому значению перегрева.

Определение превышения температуры  $\tau_m$  не является целью данного анализа, однако необходимо отметить, что решение этой задачи возможно только с учётом изменения сопротивления обмотки якоря в течение времени испытания. Потери  $\Delta P_m$  сами являются величинами, зависящими от температуры, а следовательно, и времени испытания [3].

$$\Delta P_m = [1 + 0,004(\tau_m + 5^\circ)] [I_a^2 r_a + \Delta P_{mk}] + \Delta P_{мп}, \quad (30)$$

где  $I_a$  – ток якоря;

$r_a$  – сопротивление обмотки якоря при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;

$\Delta P_{mk}$  – коммутационные потери;

$\Delta P_{мп}$  – потери в меди якоря от главного пазового поля.

Строго говоря, коэффициенты  $k_m$  и  $k_c$  для часового и длительно-го режимов будут отличаться. Однако, учитывая существенную сложность расчета нестационарных тепловых процессов, качественный анализ влияния различных видов потерь на значение превышения температуры обмотки якоря в часовом режиме испытания может быть проведен с использованием коэффициентов  $k_m$  и  $k_c$ , полученных для стационарного длительного режима нагрузки.

**Список источников информации:** 1. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.  
2. Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А., Горчаков Е.В. Тяговые электрические машины и трансформаторы. – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.  
3. Проектирование тяговых электрических машин/ под ред. М.Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.