

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

## **КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ В ЯКОРЯХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Наведено аналіз ступеня впливу електричних і магнітних втрат в якорях тягових електричних машинах 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 электрических машинах 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 прямо-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 дает возможности адекватной оценки результатов испытаний на нагрев в случае перегрева перегруженной обмотки или недогрева недогруженной.

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

Рассмотрим влияние каждого вида потерь в якоря на перегрев его

обмотки. Для упрощения анализа будем учитывать только электрические и магнитные потери в активных частях якоря электромашин, которые могут быть отнесены к потерям в меди и стали. Для решения поставленной задачи будем использовать упрощенную тепловую схему замещения якоря [2], приведенную на рис. 1.

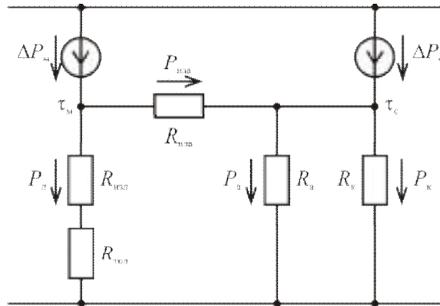


Рис. 1.

В схеме приняты следующие обозначения:  $\tau_i$  – превышение температуры меди обмотки якоря;  $\tau_{\bar{n}}$  – превышение температуры стали якоря;  $\Delta P_i$  – суммарные потери мощности в меди обмотки якоря;  $\Delta P_{\bar{n}}$  – суммарные потери мощности в стали якоря;  $R_{\bar{e}\zeta\bar{a}}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{\bar{e}\zeta\bar{a}}$  сквозь изоляцию активной части проводников якоря;  $R_{\bar{e}\zeta\bar{e}}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{\bar{e}\zeta\bar{e}}$  сквозь изоляцию лобовых частей проводников якоря;  $R_{\bar{o}\bar{i}\bar{e}}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{\bar{e}}$  конвективного рассеивания с поверхности лобовых частей обмотки якоря;  $R_{\bar{a}}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{\bar{a}}$  конвективного рассеивания с поверхности сердечника якоря;  $R_{\bar{e}}$  – тепловое сопротивление потоку  $P_{\bar{e}}$  конвективного рассеивания с поверхности внутренних вентиляционных каналов сердечника якоря.

Посредством теплового потока  $P_{\bar{e}\zeta\bar{a}}$  происходит кондуктивный теплообмен между медью и сталью якоря

$$P_{\bar{e}\zeta\bar{a}} = Y_{\bar{e}\zeta} (\tau_i - \tau_{\bar{n}}), \quad (1)$$

где  $Y_{\bar{e}\zeta}$  – тепловая проводимость слоя изоляции обмотки якоря,

$$Y_{\bar{e}\zeta} = \frac{1}{R_{\bar{e}\zeta\bar{a}}}. \quad (2)$$

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

$$P_{\dot{\epsilon}} = Y_{\dot{\epsilon}} \tau_i, \quad (3)$$

где  $Y_{\dot{\epsilon}}$  – эквивалентная тепловая проводимость лобовых частей, обусловленная теплопроводимостью и теплоотдачей,

$$Y_{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{R_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{\epsilon}} + R_{oi\dot{\epsilon}}}. \quad (4)$$

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

$$P_{\dot{a}} = Y_{\dot{a}} \tau_{\dot{n}}; \quad (5)$$

$$P_{\dot{\epsilon}} = Y_{\dot{\epsilon}} \tau_{\dot{n}}, \quad (6)$$

где  $Y_{\dot{a}}$  – тепловая проводимость, обусловленная конвективной теплоотдачей с поверхности стального пакета якоря;  $Y_{\dot{\epsilon}}$  – тепловая проводимость, обусловленная конвективной теплоотдачей с поверхности вентиляционных каналов сердечника якоря.

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

$$Y_{\dot{a}} = \frac{1}{R_{\dot{a}}}; \quad (7)$$

$$Y_{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{R_{\dot{\epsilon}}}. \quad (8)$$

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

$$\Delta P_i - P_{\dot{\epsilon}} - P_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{a}} = 0; \quad (9)$$

$$\Delta P_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{a}} + \Delta P_{\dot{n}} - P_{\dot{a}} - P_{\dot{\epsilon}} = 0. \quad (10)$$

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

$$\tau_i = \frac{\Delta P_i (Y_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{a}} + Y_{\dot{a}} + Y_{\dot{\epsilon}}) + \Delta P_{\dot{n}} Y_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{a}}}{Y_{\dot{\epsilon}} Y_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{a}} + (Y_{\dot{a}} + Y_{\dot{\epsilon}}) Y_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{a}} + (Y_{\dot{a}} + Y_{\dot{\epsilon}}) Y_{\dot{\epsilon}}}. \quad (11)$$

Выражение (11) может быть представлено в виде

$$\tau_i = K_i \Delta P_i + K_{\dot{n}} \Delta P_{\dot{n}}, \quad (12)$$

где  $K_i$  и  $K_{\dot{n}}$  – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния каждого из видов потерь в якоря на температуру его обмотки.

$$K_i = \frac{Y_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}} + Y_{\dot{a}} + Y_{\dot{e}}}{Y_{\dot{e}}Y_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}} + (Y_{\dot{a}} + Y_{\dot{e}})Y_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}} + (Y_{\dot{a}} + Y_{\dot{e}})Y_{\dot{e}}} \quad (13)$$

$$K_{\bar{n}} = \frac{Y_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}}}{Y_{\dot{e}}Y_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}} + (Y_{\dot{a}} + Y_{\dot{e}})Y_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}} + (Y_{\dot{a}} + Y_{\dot{e}})Y_{\dot{e}}} \quad (14)$$

В относительных параметрах выражение (12) имеет вид

$$\tau_{i \dot{a}\dot{o}\dot{i}} = k_i \cdot p_i + k_{\bar{n}} \cdot p_{\bar{n}}, \quad (15)$$

где  $\tau_{i \dot{a}\dot{o}\dot{i}}$  – установившаяся температура меди обмотки якоря, отнесенная к установившемуся ее значению  $\tau_{i \dot{a}}$  при номинальном режиме;  $p_i$ ,  $p_{\bar{n}}$  – удельные значения потерь в меди и стали, отнесенные к соответствующим потерям  $\Delta p_{i \dot{a}}$ ,  $\Delta p_{\bar{n}\dot{i}}$  в номинальном режиме;  $k_i$  и  $k_{\bar{n}}$  – удельные безразмерные весовые коэффициенты влияния потерь в меди и стали соответственно.

$$\tau_{i \dot{a}\dot{o}\dot{i}} = \frac{\tau_{i \dot{a}}}{\tau_{i \dot{a}}} \quad (16)$$

$$p_i = \frac{\Delta P_i}{\Delta P_{i \dot{a}}} \quad (17)$$

$$p_{\bar{n}} = \frac{\Delta P_{\bar{n}}}{\Delta P_{\bar{n}\dot{i}}} \quad (18)$$

$$k_i = K_i \frac{\Delta P_{i \dot{a}}}{\tau_{i \dot{a}}} \quad (19)$$

$$k_{\bar{n}} = K_{\bar{n}} \frac{\Delta P_{\bar{n}\dot{i}}}{\tau_{i \dot{a}}} \quad (20)$$

Нетрудно убедиться в справедливости выражения

$$k_i + k_{\bar{n}} = 1. \quad (21)$$

Отметим, что коэффициент  $k_i$  и  $k_{\bar{n}}$  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:

$$R_{\dot{\epsilon}\zeta\ddot{\epsilon}} = \frac{b_{\dot{\epsilon}\zeta\ddot{\epsilon}}}{\lambda S_{\ddot{\epsilon}}}; \quad (22)$$

$$S_{\ddot{\epsilon}} = \pi D_{\dot{a}} l_{\ddot{\epsilon}}, \quad (23)$$

где  $b_{\dot{\epsilon}\zeta\ddot{\epsilon}}$  – эквивалентная толщина изоляции лобовых частей;  $\lambda$  – удельная теплопроводность изоляции;  $S_{\ddot{\epsilon}}$  – площадь поверхности лобовых частей;  $D_{\dot{a}}$  – диаметр якоря;  $l_{\ddot{\epsilon}}$  – суммарная длина вылетов передней и задней частей обмотки;

$$R_{\dot{\sigma}\dot{\sigma}\ddot{\epsilon}} = \frac{1}{\alpha S_{\ddot{\epsilon}}}; \quad (24)$$

$$\alpha = \alpha_1 \left( 1 + \sqrt[4]{\mathbf{v}_{\dot{a}}^2 + \mathbf{v}_{\dot{a}}^2} \right), \quad (25)$$

где  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи в спокойной атмосфере;  $\mathbf{v}_{\dot{a}}$  – скорость охлаждающего воздуха в осевом направлении;  $\mathbf{v}_{\dot{a}}$  – линейная скорость якоря;

$$R_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{a}} = \frac{b_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{a}}}{\lambda z l_{\dot{a}} p_1}; \quad (26)$$

$$p_1 = 1,33b_1 + 2h_z, \quad (27)$$

где  $b_{\dot{\epsilon}\zeta\dot{a}}$  – эквивалентная толщина изоляции активных частей проводников обмотки якоря;  $z$  – число пазов якоря;  $l_{\dot{a}}$  – длина активной части якоря;  $p_1$  – расчетный периметр паза;  $b_1$  и  $h_z$  – ширина и глубина паза соответственно;

$$R_{\dot{a}} = \frac{1}{\alpha \pi D_{\dot{a}} l_{\dot{a}}}; \quad R_{\dot{\epsilon}} = \frac{2}{\alpha m_{\dot{\epsilon}} \pi d_{\dot{\epsilon}} l_{\dot{a}}}, \quad (28)$$

где  $m_{\dot{\epsilon}}$  – число вентиляционных каналов;  $d_{\dot{\epsilon}}$  – 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  $\tau_1 = f(t)$  [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 электродвигателя реальное превышение температуры  $\tau_i$  будет одинаковым для обоих режимов и равным допустимому значению перегрева.

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

$$\Delta P_i = [1 + 0,004(\tau_i + 5^\circ)] \left[ I_a^2 r_a + \Delta P_{i\epsilon} \right] + \Delta P_{i\gamma}, \quad (29)$$

где  $I_a$  – ток якоря;  $r_a$  – сопротивление обмотки якоря при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;  $\Delta P_{i\epsilon}$  – коммутационные потери;  $\Delta P_{i\gamma}$  – потери в меди якоря от главного пазового поля.

Строго говоря, коэффициенты  $k_i$  и  $k_{\bar{n}}$  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  $k_i$  и  $k_{\bar{n}}$ , полученных для стационарного длительного режима нагрузки.

**Список литературы:** 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.



**Афанасов Андрей Михайлович**, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера и диссертацию кандидата технических наук в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта по специальности "Электрический транспорт" в 1988, 1999 г.г. Докторант кафедры "Электроподвижной состав" Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта с 2008 г.

Научные интересы связаны с проблемами усовершенствования электроподвижного состава железнодорожного транспорта.

*Поступила в редколлегию 20.09.2010*