

ПОТЕРИ И НАГРЕВ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Дудник М.З., Демченко Г.В.

Донецкий государственный технический университет

r504a@scita.dn.ua

The article account of the methodical of determining losses in the electromechanical converter of the rectifier reluctance traction motor and heating his winding, when necessity production of the specified electromechanical characteristics in overall dimensions of the base machine. The given material could be used in designing of traction drive of a mine electric locomotive.

В последние годы большое внимание уделяется вентильным двигателям без возбуждения со стороны ротора (вентильным реактивным двигателям). Наиболее необходимым в силу неблагоприятных условий эксплуатации является внедрение и замена ими традиционных машин, в частности коллекторных, в горной промышленности. При питании от источника постоянного тока целесообразно вместо коллекторного двигателя шахтного аккумуляторного электровоза применить вентильный реактивный двигатель (ВРД) [1]. На шахтах Украины наиболее распространенным является аккумуляторный магистральный электровоз АМ8Д, оснащенный двумя электродвигателями ДРТ-13. В силу стесненных условий рудничного электровоза, а также с учетом упрощения изготовления для станины предлагаемых двигателей целесообразным является использование корпуса базового двигателя. При этом возникает задача эффективного использования заданных габаритов базовой машины с целью получения требуемых электромеханических характеристик. Для обеспечения надежной работы ВРД в приводе электровоза в течение установленного периода эксплуатации необходимо произвести правильный выбор электромагнитных нагрузок и при этом должны выполняться требования по допустимому уровню нагрева активных частей машины. Для тяговых двигателей шахтных электровозов основными режимами являются продолжительный и часовой, а проверочные расчеты производятся для более напряженного часового режима работы.

Для электрических машин ведется расчет установившегося теплового режима, когда превышение температуры всех частей машины не меняется и теплота, выделяющаяся в машине, полностью рассеивается в окружающую среду. Известно, что распространение теплоты происходит от источника теплоты в направлении уменьшения температуры. При этом тепловой поток проходит через различные материалы, теплопроводность которых неодинакова. Теплопроводность материала определяет перепад температуры в нем. Перепадом температуры в металлах пренебрегают из-за высокой теплопроводности, а учитывают перепад температуры в изоляции обмоток и между охлаждающей средой. Теплопроводность воздуха намного меньше теплопроводности изоляционных материалов. Поэтому наличие воздушных прослоек в многослойной изоляции приводит к снижению теплопроводности изоляции машины. Устранению этого нежелательного явления способствует пропитка обмоток.

Отвод теплоты с поверхности нагретого тела происходит лучеиспусканием (излучением теплоты в окружающее пространство) и передача теплоты конвекцией, обусловленной движением воздуха относительно охлаждаемой поверхности. Превышение температуры нагретой поверхности относительно температуры охлаждающего воздуха с учетом всех видов теплоотдачи

$$\Delta \vartheta_{\text{пов}} = Q_{\text{пов}} / (S_{\text{пов}} \cdot \alpha_{\text{пов}}), \quad (1)$$

где $Q_{\text{пов}}$ - тепловой поток через поверхность охлаждения; $S_{\text{пов}}$ - площадь охлаждаемой поверхности; $\alpha_{\text{пов}}$ - коэффициент теплоотдачи поверхности.

Эксперименты по исследованию тепловых процессов в электрических машинах, а также многочисленные тепловые расчеты показывают, что физическая картина тепловых процессов в электрических машинах очень сложна и точное ее определение распределения температур путем теплового расчета практически невозможно. Поэтому во многих случаях проектирования вполне обосновано применение упрощенной методики теплового расчета, основанной на использовании коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, полученных по результатам экспериментального исследования значительного количества подобных машин [2,3].

Кроме оговоренных выше принимаются также следующие допущения: температура обмоток в рассматриваемом объеме двигателя одинакова; температура стали статора и ротора во всем объеме одинакова; электрические потери в меди обмоток и магнитные в стали оказывают одинаковое влияние на превышение температуры обмотки двигателя.

Базовый двигатель ДРТ-13 выполнен по степени защиты IP54 и способу охлаждения IC0040. Вентильный реактивный двигатель, поскольку изготавливается в корпусе базовой машины, также имеет степень защиты IP54. По способу охлаждения исследуемый двигатель с учетом явнополюсности вращающегося ротора, что в свою очередь улучшает циркуляцию внутреннего воздуха замкнутого объема по сравнению с условием вращения якоря коллекторного базового двигателя постоянного тока, можно отнести к способу IC0041.

С учетом ранее указанных допущений тепловой процесс в исследуемом двигателе можно представить в следующем виде. Электрические потери, возникающие в обмотке статора, передаются через тепловое сопротивление изоляции проводов как непосредственно во внутренний воздух двигателя, так и сердечникам полюса статора, от которых вместе с магнитными потерями в стали через охлаждаемую поверхность этих полюсов также во внутренний воздух. Часть указанных потерь также отводится и непосредственно в окружающую среду через сердечник ярама статора и поверхность станины. Подогретый же внутренний воздух, циркулируя по всему замкнутому объему закрытого двигателя, передает теплоту охлаждающей среде непосредственно через поверхность всего корпуса машины (рис. 1).

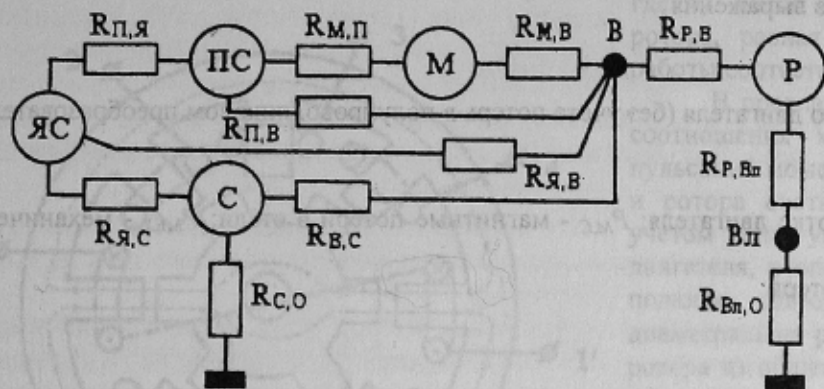


Рис. 1. Эквивалентная тепловая схема замещения ВРД

Узлы: М-обмотка (медь); ПС-полюс статора; ЯС-яро статора; Р-ротор; Вл-вал; С- станина; В - внутренний воздух машины. Термические сопротивления между: $R_{М,в}$ - обмоткой и воздухом; $R_{М,п}$ - обмоткой и полюсом статора; $R_{П,в}$ - полюсом статора и внутренним воздухом; $R_{Р,в}$ - ротором и внутренним воздухом; $R_{Р,вл}$ - ротором и валом; $R_{П,я}$ - полюсом статора и ярмом статора; $R_{я,в}$ - ярмом статора и внутренним воздухом; $R_{я,с}$ - ярмом статора и станиной; $R_{в,с}$ - внутренним воздухом и станиной; $R_{с,о}$ - станиной и окружающей средой; $R_{вл,о}$ - валом и окружающей средой.

Порядок поверочного расчета заключается в следующем: определяются площади поверхностей охлаждения и удельные тепловые потоки, приходящиеся на единицу этих площадей, а затем, зная экспериментальное значение коэффициентов теплопередачи и теплопроводности, определяются искомые превышения температуры.

Превышение наружной поверхности охлаждения многослойной катушки над температурой внутри катушки определяется выражением

$$\Delta \theta_K = k \cdot P_{КЭ} / (S_K \cdot \alpha_1), \quad (2)$$

где $P_{КЭ}$ - электрические потери в катушке; S_K - условная поверхность охлаждения катушки; k - коэффициент, учитывающий долю потерь, передаваемых воздуху внутри двигателя; α_1 - коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности охлаждения катушки.

Электрические потери в катушке

$$P_{КЭ} = I^2 \cdot R_{КТС}. \quad (3)$$

Перепад температуры в изоляции катушки

$$\Delta \theta_{ИЗ,К} = \frac{k \cdot P_{КЭ}}{S_K} \cdot \frac{b_{ИЗ,К}}{\lambda_{ЭКВ}}, \quad (4)$$

где $b_{ИЗ,К}$ - односторонняя толщина наружной изоляции катушки; $\lambda_{ЭКВ}$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности принимаемой изоляции катушки.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta \theta_K' = \Delta \theta_K + \Delta \theta_{ИЗ,К}. \quad (5)$$

Среднее превышение температуры обмотки двигателя над температурой охлаждающей среды

$$\Delta \theta_{О,Д} = \Delta \theta_K' + \Delta \theta_B, \quad (6)$$

где $\Delta \theta_B$ - среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды, определяемое из выражения

$$\Delta \theta_B = \Sigma P' / (S_{ДВ,Н} \cdot \alpha_B), \quad (7)$$

где $\Sigma P'$ - сумма всех потерь за исключением доли потерь в обмотке двигателя; $S_{ДВ,Н}$ - условная наружная поверхность охлаждения двигателя; α_B - коэффициент теплоотдачи этой поверхности.

Условная наружная поверхность охлаждения двигателя

$$S_{дв,н} = \pi D_{д,нар} \cdot l_{ст} + 2(\pi D_{д,нар}^2 / 4), \quad (8)$$

где $D_{д,нар}$ и $l_{ст}$ - соответственно наружные диаметр и длина станины двигателя.

Сумма потерь $\Sigma P'$ определяется из выражения

$$\Sigma P' = \Sigma P - 0,1P_{эл}, \quad (9)$$

где ΣP - сумма всех потерь исследуемого двигателя (без учета потерь в полупроводниковом преобразователе)

$$\Sigma P = P_{эл,д} + P_{МС} + P_{МЕХ} + P_{ДОБ}, \quad (10)$$

где $P_{эл,д}$ - электрические потери в обмотке двигателя; $P_{МС}$ - магнитные потери в стали; $P_{МЕХ}$ - механические потери; $P_{ДОБ}$ - добавочные потери.

В свою очередь, электрические потери

$$P_{эл,д} = P_{эл,ф} = I_{ф}^2 \cdot r_{ф75}, \quad (11)$$

где $P_{эл,ф}$ - электрические потери в одной фазе двигателя равны $P_{эл,д}$, поскольку в исследуемом двигателе в определенный момент времени включена только одна фаза; $I_{ф}$ - рабочий ток фазы; $r_{ф75}$ - активное сопротивление обмотки фазы при температуре 75 °С.

С учетом повторно-кратковременного режима включения обмоток статора каждой фазы для определения площади сечения проводника можно воспользоваться значением часто применяемого на практике эквивалентного тока [4], так как с помощью осциллографирования установлено, что кривые изменения токов в фазах близки к прямоугольным (рис. 2)

$$I_{ф,э} = I_{ЭКВ} = I_{Д} \cdot \sqrt{\frac{t_P}{(t_P + t_{П})}}, \quad (12)$$

где t_P - время работы фазы; $t_{П}$ - время паузы.



Рисунок 2 - Осциллограмма фазного тока исследуемого двигателя

Магнитные потери в стали двигателя от основной гармоники поля

$$P_{МС} = P_{М,П,С} + P_{М,П,Р} + P_{М,С,Р} + P_{М,Я,С}, \quad (13)$$

где $P_{М,П,С}$ - магнитные потери в стали полюсов статора; $P_{М,П,Р}$ - магнитные потери в стали полюсов ротора; $P_{М,С,Р}$ - магнитные потери в стали сердечника ротора; $P_{М,Я,С}$ - магнитные потери в стали яра статора.

Магнитные потери в элементах магнитопровода двигателя, выполненных из электротехнической стали, определяются согласно выражения

$$P_{М,С,Ч} = 2,3 P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} \cdot B_{С,Ч}^2 \cdot m_{С,Ч}, \quad (14)$$

где $P_{1,0/50}$ и β соответственно удельные потери и показатель степени при использовании определенной марки электротехнической стали; f - частота перемагничивания стали; $B_{С,Ч}$ - индукция в стальных элементах магнитопровода, определяемая путем расчета магнитного поля машины [5]; $m_{С,Ч}$ - масса стали соответствующих элементов.

Частота перемагничивания в стали вентильного реактивного двигателя определяется аналогично как и в индукторных машинах с безобмоточным ротором [6]

$$f = N_p \cdot n_2 / 60, \quad (15)$$

где N_p - число полюсов ротора; n_2 - частота вращения ротора, равная при часовом и длительном режимах работы соответственно 615 и 1000 мин⁻¹.

В предлагаемой машине с учетом рационального соотношения меди и стали, а также уменьшения пульсаций момента принимается число полюсов статора и ротора соответственно восемь и шесть (рис.3). С учетом ранее указанного режима работы исследуемого двигателя, в определенный момент времени из восьми полюсов статора в работе находится только два, диаметрально расположенных полюса, и два полюса ротора из общего их количества - шести. Учитывая эти обстоятельства, выражение определения суммы потерь в стали двигателя (13) примет следующий вид

$$P_{M,C} = \frac{1}{4} P_{M,П,C} + \frac{1}{3} P_{M,П,P} + P_{M,C,P} + P_{M,Я,C} \quad (16)$$

Распределение потерь в исследуемом ВРД, а также их зависимость от режима работы двигателя представлены в табл.1.

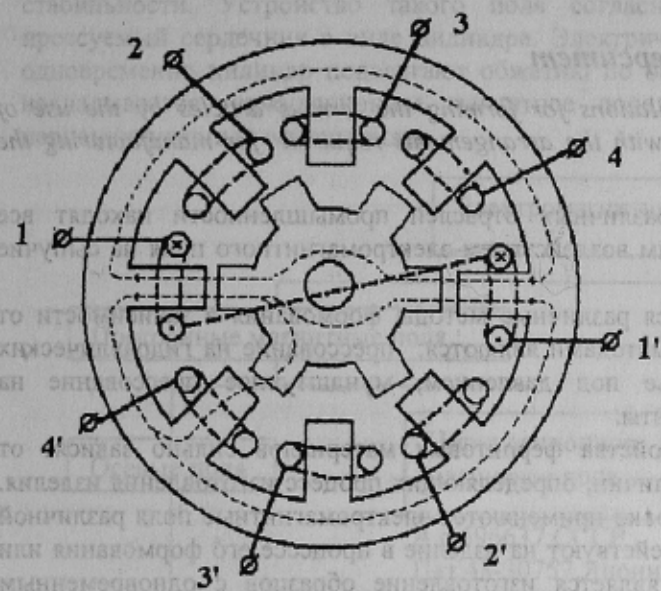


Рисунок 3 - Принципиальное устройство активной зоны электромеханического преобразователя ВРД

Таблица 1 - Распределение потерь в исследуемом вентильном реактивном двигателе

Потери	% от общих потерь в часовом режиме работы	% от общих потерь в длительном режиме работы	Факторы, влияющие на потери
Электрические, $P_{ЭЛД}$	25	12	Размер проводников обмотки двигателя
Магнитные в стали, $P_{МС}$	68	79	Марка стали, ее толщина и масса
Механические, $P_{МЕХ}$	4	5	Марка подшипников, конструкция подшипникового узла
Добавочные, $P_{ДОБ}$	3	4	Конструкция и технология изготовления двигателя

Предложенная методика нашла применение в процессе проектирования экспериментальных образцов ВРД. Проведенные расчеты показали, что для часового режима работы при плотности тока 5 А/мм² и предельных значениях индукции в сердечниках полюсов 1,6 Тл превышение температуры обмотки двигателя составляет 90-95 °С, что не выходит за пределы допустимых значений для данного класса нагревостойкости изоляции [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудник М.З., Чебаненко К.И., Васильев Л.А., Адауров В.В., Демченко Г.В. Вентильный привод рудничного электровоза // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика. - Выпуск 2: - Донецк: ДонГТУ, 1998. - С. 144-148.
2. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 296 с.
3. Проектирование электрических машин / Под ред. Копылова И.П. - М.: Энергия, 1980. - 496 с.
4. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины: В 2-х ч. Ч 2. - М.: Высш. шк., 1987. - 335 с.
5. Дудник М.З., Демченко Г.В., Шендриков В.Н. Численный метод расчета магнитного поля вентильного реактивного тягового двигателя // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика. - Выпуск 4: - Донецк: ДонГТУ, 1999. - С. 95-99.
6. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. - М.: Высш. шк., 1990. - 416 с.