

*А.М. МАЛЕЕВ*, магистр, НТУ "ХПИ", Харьков

*Б.А. ЕГОРОВ*, канд. техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ", Харьков

## **ПРОБЛЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4П 280 ПУТЕМ КОМБИНАЦИИ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ И СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОДШИПНИКОВЫХ ЩИТОВ**

Розглядається проблема охолодження гранично навантажених двигунів постійного струму серії 4П 280 у зв'язку зі збільшеною довжиною магнітопроводу.

Проблема охладнения электрических машин стоит особенно остро для так называемых "предельных машин", в которых в прежнем габарите стремятся получить наилучшие энергетические показатели.

**Введение.** В электрической машине существует шесть потоков энергии и вещества: электрический, магнитный, силовой, тепловой, охлаждающий и смазочный. Первые три достаточно хорошо исследованы и изучены, но три другие – тепловой, охлаждающий и смазочный – объекты аэрогидродинамики и теплообмена, изучены меньше.

**Цель работы** – анализ режимов теплообмена и конструктивных решений по улучшению охладнения нагруженных двигателей.

**Мероприятия по улучшению охладнения электрических машин.** Для получения лучших характеристик новых серий машин, максимально улучшенных с точки зрения энергетики, нужно применять меры для интенсификации теплоотдачи и снижения температуры машин. А выбор конструктивных мероприятий всегда базируется на тепловом расчете, который еще в ходе проектирования должен дать возможность вычислить распределение температуры в машине и оценить влияние на него различных факторов.

Для обеспечения высоких значений единичной мощности в предельных машинах применяют увеличение отношения активной длины якоря к его диаметру. В машине типа 4П 280 это отношение достигает 1,65. Улучшая динамические свойства двигателя с одной стороны, такое нововведение увеличивает сопротивление охлаждающему потоку воздуха. Это усложняет задачу полноценного отвода тепла от машины.

При увеличении длины машины воздух, который поступает в

двигатель из окружающего пространства, проходит большее расстояние и успевает сильнее нагреться от обмотки, а соответственно, часть ее, находящаяся дальше от коллектора (и от входных окон), практически не будет охлаждаться. Появляется риск перегрева обмотки, ее пробоа и выхода машины из строя.

Источниками тепла в электрических машинах являются места сосредоточения потерь. Потери определяются в ходе электромагнитного расчета при проектировании машины.

Рассмотрим вентиляционные потери. и потери на трение деталей о воздух (или другой газ или жидкость) Основную долю вентиляционных потерь составляет мощность привода вентилятора

$$P_{\text{мех.вн}} = Q \cdot H_{\text{T}} = Q \cdot H_{\text{п}} / \eta_{\text{Г}} \cdot \eta_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход воздуха (связан с геометрическими параметрами вентилятора);  $H_{\text{T}}$  – теоретический напор вентилятора,  $H_{\text{п}}$  – фактический напор,  $\eta_{\text{Г}}$  и  $\eta_{\text{мех}}$  – гидравлический и механический коэффициент полезного действия.

Потери на трение деталей о воздух особенно значительны в высокоскоростных машинах. Эти потери имеют место как на цилиндрической поверхности, вращающейся в расточке статора, так и на торцевых поверхностях ротора или расположенных вблизи них лобовых частях обмотки, короткозамыкающих кольцах, вентиляторах, коллекторах и других элементах, вращающихся в относительно свободном пространстве. Расчет потерь на трение о воздух диска, цилиндра и конуса производится по формулам:

$$P_{\text{д.тр}} = c_{\text{fd}} \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot R^5; \quad (2)$$

$$P_{\text{ц.тр}} = c_{\text{fc}} \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot R^4 \cdot L; \quad (3)$$

$$P_{\text{к.тр}} = c_{\text{fk}} \cdot \pi \cdot \rho \cdot \omega^3 \cdot R^5 \cdot \left(1 + \frac{L}{R}\right), \quad (4)$$

где  $c_{\text{fd}}$ ,  $c_{\text{fc}}$ ,  $c_{\text{fk}}$  – коэффициенты трения (обычно определяются из опыта);  $R$  и  $L$  – внешний радиус и длина вращающегося тела;  $\omega$  – угловая скорость;  $\rho$  – плотность среды.

При расчетах электрических машин эти формулы могут применяться лишь условно, так как приходится иметь дело с очень сложными по форме телами со значительной шероховатостью поверхностей. Для этого целесообразно будет применить программу FEMM.

Потери на трение при турбулентном течении жидкости в зазоре

между вращающимся ротором и статором при наличии осевого течения определяется формулой:

$$P_{з.тр} = \frac{\pi}{16 \cdot 102} \cdot c_{fp} \cdot \rho \cdot \omega_p^3 \cdot D_p^4 \cdot l_p, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где  $D_p$  и  $l_p$  – диаметр и длина ротора,

$$\omega_p = 2\omega_{\phi 1} / D_p. \quad (6)$$

Для расчета коэффициента сопротивления  $c_{fp}$  можно использовать формулу Альтшуля

$$c_{fp} = 0,05 \cdot \left( \frac{h_p}{\delta_1} + \frac{100}{Re_p} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где  $h_p/\delta_1$  – относительная шероховатость поверхностей ротора;  $\delta_1$  – воздушный зазор;  $Re_p$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – кинематическая вязкость среды;  $h_p$  – высота бугорков шероховатой поверхности.

Охлаждение машины постоянного тока осуществляется воздухом из окружающего пространства, который через два входных окна попадает в двигатель. В камере над коллектором воздушный поток делится на две струи – одна попадает в межполюсные каналы и зазор между полюсами и поверхностью якоря, вторая – в зазор между коллектором и крышкой подшипника в каналы коллектора, камеру под лобовыми частями и осевые каналы якоря. Пройдя через машину, воздух выбрасывается вентилятором через выходные окна, закрытые сеткой, в окружающую среду.

**Конструктивные решения.** Для улучшения охлаждения применяют следующие конструктивные решения: пакетирование сердечника якоря для дополнительного охлаждения обмотки между пакетами (радиальная система вентиляции), увеличение числа аксиальных отверстий в листах сердечника якоря, принудительная вентиляция от вентилятора-наездника, применение в качестве охлаждающей среды водорода (обладает высокой теплопроводностью, теплоемкостью и низкой плотностью), дистиллированную воду, воздух, сжатый предварительно в компрессоре до давления в 20-40 атмосфер в несколько раз больше объемной теплоемкости водорода. При этом воздух намного безопаснее водорода, который, накапливаясь в так называемых "карманах", дает гремучий газ. Искрение щеточно-коллекторного узла может привести к взрыву в машине с водородным охлаждением.

Радиальные системы охлаждения бывают радиально-согласные и

радиально-встречные. При этом они могут быть асимметричными и симметричными относительно середины машины в зависимости от организации вентиляционных контуров.

Довольно часто в крупных машинах используется сочетание радиальной и аксиальной систем охлаждения. Это улучшает охлаждение обмотки, лежащей в пазах, особенно в крупных электрических машинах. При использовании комбинированной аксиально-радиальной системы вентиляции охладитель идет по аксиальным каналам, поглощая тепло от обмотки, которая дополнительно охлаждается воздухом через радиальные каналы по длине машины. Таким образом, мы частично компенсируем эффект утраты теплоотводящих свойств воздуха, идущего по аксиальным каналам. В рассмотренном двигателе серии 4П 280 не применялась радиальная система вентиляции, так как это недопустимо удлинит бы машину.

Существенную роль в улучшении вентиляции электрической машины играет уточнение расчета вентиляционных каналов.

В двигателях отрезка серии 4П 280 реализована принудительная вентиляция как от постороннего (ICA37) вентилятора, так и от пристроенного (ICA36) вентилятора-наездника. Содержание пыли в охлаждающем воздухе не должно превышать  $0,4 \text{ мг/м}^3$ .

В листах якоря находится два ряда отверстий для аксиальной вентиляции. Рассматривая конструктивные нововведения отрезка серии 4П 280, направленные на улучшение охлаждения, следует отметить новую форму сварных подшипниковых щитов, напоминающих по форме магнитопровод. Эти щиты обеспечивают подвод и отвод охлаждающего воздуха сверху, снизу или сбоку, что позволяет удобно разместить вентилятор-наездник.

Отверстия для аксиальной вентиляции должны быть ровными, без выступов, для чего листы якоря должны быть максимально идентичными. Выступы являются препятствием на пути воздушного потока. В таком случае образуются турбулентные и ламинарные завихрения воздуха, которые уменьшают полезную площадь прохождения потока и увеличивают шум в электрической машине.

Как возможное улучшение вентиляционных свойств можно отметить увеличение сечения аксиальных каналов якоря в половине сердечника. Это расширение увеличило бы тягу, а значит, улучшило бы охлаждение машины при использовании того же вентилятора-наездника. Но с другой стороны, это нововведение осложнит машину в

технологическом отношении (применение другого штампа) и увеличит время на ее изготовление, что отрицательно скажется на ее экономических показателях.

**Выводы.** В результате анализа уточнены рекомендации по охлаждения нагруженных двигателей.

**Список литературы:** 1. *Борисенко А. И., Данько В. Г., Яковлев А. И.* Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. 2. *В.А. Кожевников, И.П. Кольцов.* Развитие теории и конструкции машин постоянного тока. Ленинград, Издательство "Наука", Ленинградское отделение. 1985г. 3. *П.С. Сергеев, Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов.* Проектирование электрических машин". – М.: Энергия, 1970.



**Малєєв Олексій Михайлович**, магістр. Захистив диплом бакалавра за спеціальністю інженера-електромеханіка в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, в 2009 р. Працює на кафедрі "Електричні машини" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2009 р.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами вентиляції та охолодження електричних машин постійного струму, особливо – гранично навантажених.



**Егоров Борис Олексійович**, доцент, кандидат технічних наук. Захистив диплом інженера та дисертацію кандидата технічних наук в Харківському Політехнічному Інституті за фахом електричні машини відповідно у 1968, 1975 р. У 1980 отримав ступінь доцента. Працює на кафедрі "Електричні машини" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 1968 р.

Наукові інтереси пов'язані з застосуванням комп'ютерної техніки у покращенні параметрів машин постійного струму та з розрахунком за допомогою ЕОМ магнітних полів.

*Поступила в редколлегию 15.12.2009*