

УДК 519.6; 21.3.0; 621.313

И. А. Федулов, магистрант № 21-ЭТФ-112М (СамГТУ)

А. С. Табачинский, к.т.н., ст. преподаватель (СамГТУ)

П. Ю. Грачев, д.т.н., профессор (СамГТУ)

г. Самара

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ АКТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С КОМПАКТНЫМИ ОБМОТКАМИ

Охлаждение электрических машин (о. э. м.) — это отвод тепла от различных узлов электрических машин (ЭМ), выделяющегося в результате магнитных, электрических и других потерь. Предельно допустимый нагрев определяется теплостойкостью материалов, используемых в ЭМ (изоляция, припой, смазка). Традиционный метод отвода тепла — охлаждение нагретых частей ЭМ циркулирующим промежуточным веществом, в качестве которого применяются воздух, различные газы (водород, гелий) и жидкости (трансформаторное масло, вода).

Воздушное о. э. м. в большинстве случаев достаточно эффективно, оно наиболее простое и доступное. О. э. м. специальными газами применяется там, где затраты энергии на воздушную вентиляцию весьма значительны (быстроходные электродвигатели, турбогенераторы и синхронные компенсаторы). В случае использования водорода система о. э. м. должна исключать возможность смешения водорода с воздухом и образования взрывоопасной гремучей смеси. Если же такая опасность существует, а воздушное охлаждение тем не менее нежелательно (например, в электродвигателях большой мощности), используют в качестве охлаждающей среды углекислый газ или гелий. Именно поэтому в магнитопроводе некоторых электрических машин делают вентиляционные каналы, через которые и проходит охлаждающий газ — для более эффективного охлаждения. Вентиляционные каналы называют аксиальными, если они расположены параллельно оси машины, и радиальными, если они расположены перпендикулярно этой оси.

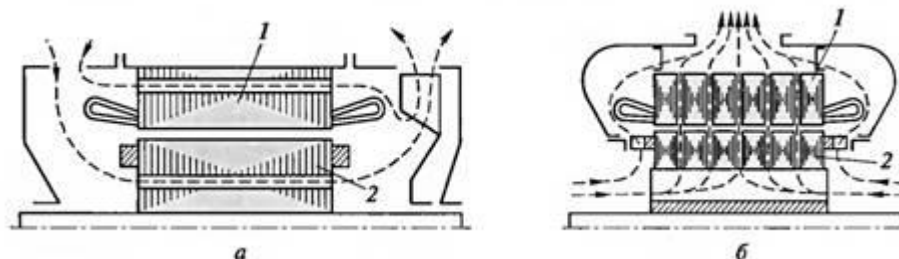


Рис. 1. Аксиальная (а) и радиальная (б) системы вентиляции: 1 — статор; 2 — ротор

Вода используется для охлаждения статоров ЭМ повышенной частоты, подшипников мощных электродвигателей и подпятников генераторов. Если существует опасность замерзания воды, то для о. э. м. применяют совол. Обмотки мощных трансформаторов охлаждают циркулирующим маслом.

Использование для непосредственного охлаждения обмоток электрических машин воды или масла еще более повышает эффективность системы. Во многих современных турбогенераторах обмотка статора охлаждается водой, которую пропускают по полым проводникам, а ротор имеет непосредственное водородное охлаждение.

В последние годы начала развиваться система испарительного охлаждения электрических машин, в которой перенос тепла от внутренних областей машины к периферии осуществляется с помощью тепловых труб, заполненных теплоносителем — веществом, находящимся в жидком состоянии при температуре окружающей среды и имеющим низкую температуру парообразования. Тем не менее, применение подобных систем жидкостного охлаждения в серийных машинах ограничено по причине их конструкции — форма лобовых частей, которые являются наиболее нагретой частью машины, не позволяет эффективно использовать каналы для протекания жидкости.

Известны исследования конструкций электрических машин с компактными лобовыми частями. Витки таких обмоток которой состоят из проводников с циклически изменяющимся прямоугольным поперечным сечением, а лобовые части расположены параллельно торцам сердечника. Это позволяет за счет существенного уменьшения вылета лобовых частей, уменьшить материалоемкость и массу электрических машин при одновременном сокращении активных потерь в обмотке. Снижение материалоемкости электрических машин представляется задачей особенно актуальной для автономных объектов, в том числе автомобильного транспорта. В ветроэнергетике, например, снижение материалоемкости, объема и массы электрооборудования установок делает более легкими и компактными их башни, снижает расходы при транспортировке ветроэлектрических установок в отдаленные города и поселки.

На статоре или роторе таких машин расположена двухслойная волновая сосредоточенная обмотка с прямоугольными активными и лобовыми проводниками одинаковой площади поперечного сечения, которые соединены перемычками уменьшенного прямоугольного сечения. Применение перемычек позволяет расположить все лобовые проводники витков, независимо от числа проводников в слое обмотки, параллельно друг другу и торцам сердечника без взаимного перекрещивания. Так удастся существенно уменьшить вылет лобовых частей обмоток машин, снизить

материалоемкость меди и конструкционной стали, и значительно сокращение длины проводника позволяет снизить активные потери и повысить КПД машины. Витки такой обмотки для варианта конструкции, когда перемычка имеет вдвое уменьшенное сечение, принадлежащие одной паре пазов, изображены на рис. 2.

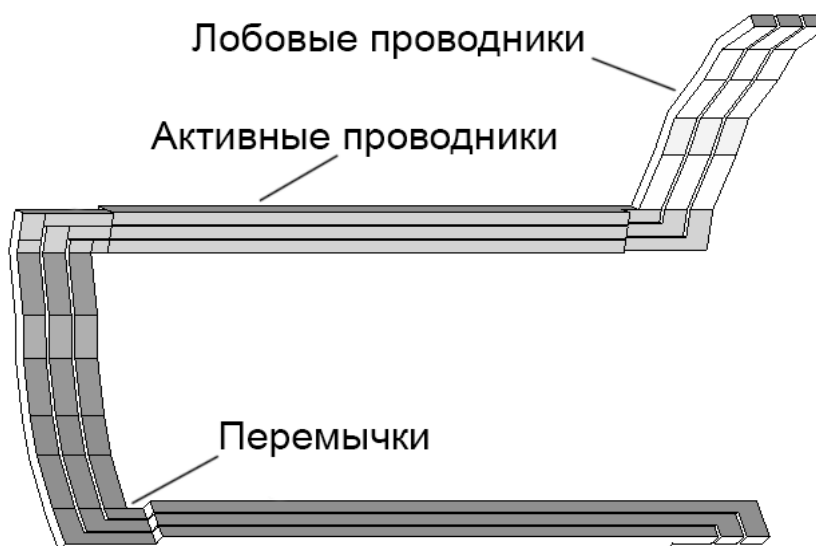


Рис. 2. 3D модель витка обмотки инновационной машины

Картина распределений плотности тока в моделируемых участках витков, показанная на рис. 3, позволяет сделать вывод, что наиболее высокая плотность тока достигается в точках сопряжения перемычек с лобовыми и активными проводниками. Также можно наблюдать низкую плотность тока в прямоугольных частях проводников, не соединенных с соседними. Распределение тепла известно благодаря решению связанной электромагнитной и тепловой задачи.

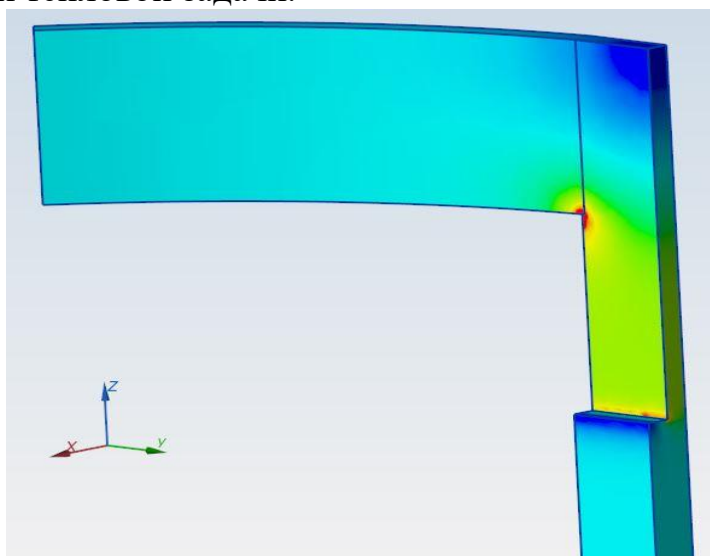


Рис. 3. Распределение плотности тока в участках витка

В табл. 1 приведены значения температуры проводников для стандартной и компактной обмотки для фазного тока  $I_{\phi} = 36$  А и удельной мощности тепловыделения  $506 \text{ кВт/м}^3$ . Можно видеть, что наличие перемычки уменьшенного сечения не приводит к значительному увеличению температурного градиента. Однако, локальное уменьшение сечения проводника приводит к возрастанию максимального значения температуры в лобовой части.

Таблица 1

	Стандартная обмотка	Компактная обмотка
$t_{\text{ак.пр}}, ^\circ\text{C}$	132,1	160
$t_{\text{лоб.пр}}, ^\circ\text{C}$	132,5	161,1

Лобовые проводники каждой группы обмотки статора могут быть связаны общей изоляцией для придания жесткости и повышения надежности. Это также способствует улучшению теплообмена в зоне лобовых частей обмотки статора между проводниками различных слоёв, а также окружающей средой и сталью сердечника. Другим конструктивных решением является размещение каналов жидкостного охлаждения на лобовых частях компактной обмотки. На рис. 4 приведен разрез статора с сердечником 1, компактной обмоткой 2 и каналами жидкостного охлаждения 3 и 4.

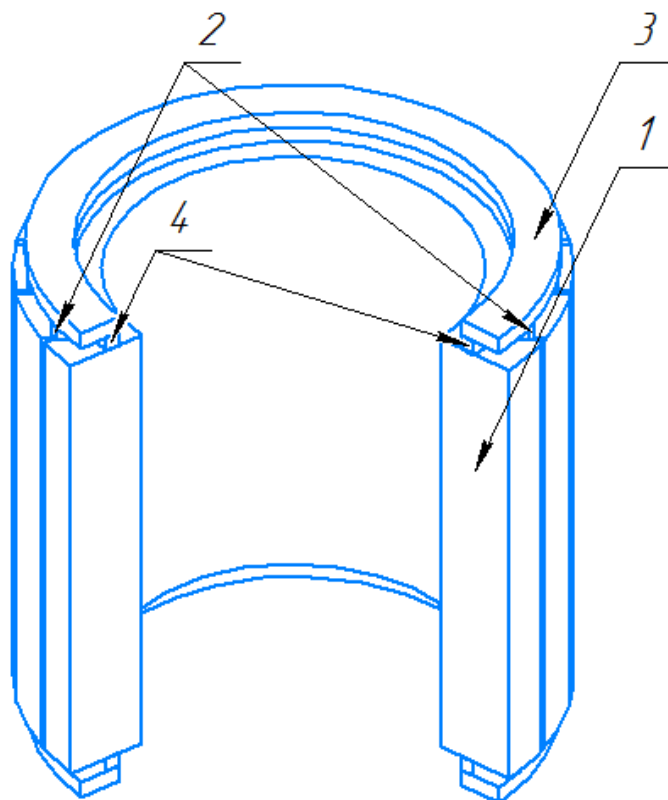


Рис. 4. Статор предложенной машины с жидкостным охлаждением

Таким образом, предлагается инновационная конструкция обмоток электрических машин, позволяющая значительно улучшить массо-габаритные характеристики машин и увеличить энергоэффективность. При одинаковых режимах работы и условиях охлаждения наблюдается некоторое увеличение температуры обмотки в лобовых частях. Поэтому предложено объединять лобовые проводники групп и фаз компактной обмотки общей изоляцией, а также выполнять лобовые части без воздушного зазора непосредственно на статоре машины. Конструктивные особенности компактной обмотки также позволяют использовать каналы жидкостного охлаждения в машинах любого номинала как для охлаждения активных частей машины, так и лобовых. Данное решение позволяет значительно увеличить номинальный фазный ток машины и увеличить её мощность.

Список литературы:

1. Филиппов И. Ф., Вопросы охлаждения электрических машин, М.—Л., 1964.
2. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электромашин и трансформаторы, 3 изд., М. 1968.
3. Костенко М. П., Пиотровский Л. М., Электрические машины, 3 изд., ч. 1—2, Л., 1973.

4. Лазовский Э.Н., Пантелеев В.И., Пахомов А.Н., Федоренко А.А. Математическая модель асинхронной машины в полярных координатах с учетом эффекта вытеснения тока ротора // Электричество. 2017. №5. С. 28-34.

5. Беспалов В.Я., Красовский А.Б., Панихин М.В., Фисенко В.Г. Исследование многополюсного асинхронного тягового частотно-регулируемого двигателя // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 5. С. 295-307.

6. Грачев П.Ю., Табачинский А.С., Беспалов В.Я. Электромеханический преобразователь с жидкостным охлаждением и электронным управлением. Патент на изобретение RU 2711084C2, 15.01.2020.

7. Грачев П.Ю., Табачинский А.С. Применение метода конечных элементов для расчета активного сопротивления обмоток электрических машин // Электричество. 2019. №12. С. 35-41.

**Информация об авторах:**

Федулов Иван Александрович, студент гр. № 21-ЭТФ-112М, СамГТУ, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, [ivanfedulov673@gmail.com](mailto:ivanfedulov673@gmail.com)

Табачинский Алексей Сергеевич, к.т.н., старший преподаватель СамГТУ, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244,

Грачев Павел Юрьевич, д.т.н., профессор, СамГТУ, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, [pgrachov@mail.ru](mailto:pgrachov@mail.ru)