

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ВЫСОКООБОРОТНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА РОТОРЕ

Опытное конструкторское бюро машиностроения «Африкантов»

Рассмотрены особенности конструкции электрических машин с постоянными магнитами на роторе, предназначенных для привода высокооборотных механизмов. Предлагаются конструктивные решения, направленные на ограничение диаметра ротора и осевой длины, необходимые для уменьшения механических нагрузок, обусловленных высокой частотой вращения ротора. По сеточной модели варианта двигателя рассчитана угловая характеристика и анализируется влияние на её форму реактивных моментов, обусловленных различием магнитного сопротивления ротора по продольной и поперечной осям.

Ключевые слова: синхронная машина, постоянные магниты, ротор, угловая характеристика.

В последние годы, благодаря разработке и промышленному освоению новых магнитотвёрдых материалов, обладающих высокими удельными энергетическими показателями и относительно умеренной ценой, электрические машины с постоянными магнитами (с магнитоэлектрическим индуктором) получают всё более широкое применение. Использование высокооборотных магнитоэлектрических машин совместно с частотным преобразователем обеспечивает рост единичной мощности агрегата, высокую надёжность за счёт бесконтактного исполнения, стабильность частоты вращения и качество энергетических характеристик за счёт незначительного потребления реактивной мощности.

Преимущество синхронных машин с постоянными магнитами на роторе, обеспечивающими чередование вдоль его окружности полюсов противоположной полярности, перед индукторными машинами с расположением магнитов на статоре и/или на роторе состоит в модуляции потока по направлению, а не только по величине. За счёт этого переменно-полюсная машина, как и обычная, с электромагнитным возбуждением, в принципе, способна обеспечить более высокие удельные показатели по мощности и моменту, чем индукторные аналоги.

Конструктивными признаками высокооборотных машин являются:

- ограниченный внешний диаметр ротора и большой диаметр отверстия под вал;

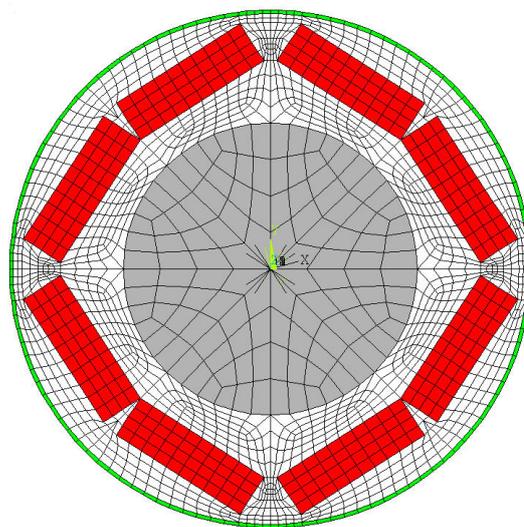


Рис. 1. Ротор высокооборотной магнитоэлектрической машины (сеточная модель)

- ограниченная осевая длина, во избежание возникновения резонансных частот изгибных колебаний вала на частотах, равных или ниже синхронной;
- относительно большая протяжённость полюсного деления.

Указанные признаки относятся к машинам с частотой вращения ротора до нескольких десятков тысяч об/мин.

Вследствие небольшого числа полюсов магнитной системы, не превышающего четырёх, магниты каждого приходится делать составными, повернутыми друг относительно друга на некоторый угол, так что они не образуют общей плоскости. В отличие от многополюсных низкооборотных машин с V -образным расположением двух магнитов на каждом полюсе [1], магниты высокооборотной машины целесообразно расположить с обратным V -образным профилем магнитов (рис. 1, сеточная модель). Так они занимают меньшее пространство между валом и внешней поверхностью ротора, что позволяет, с одной стороны увеличить диаметр вала, повышая тем самым механическую прочность ротора, а с другой стороны, уменьшить его внешний диаметр, ограничивая тем самым способные его разрушить радиальные усилия.

Особенностью конструкции роторов с V -образным расположением магнитов является наличие перемычек из магнитомягкого материала, замыкающих в магнитной цепи «южные» и «северные» полюса магнитов. С одной стороны, они увеличивают поток рассеяния, который ограничен лишь участками локального насыщения этих перемычек в области стыка полюсов противоположной полярности, что ухудшает использование магнитов. Однако, с другой стороны, наличие дополнительных путей рассеяния предохраняет магниты от размагничивания упрощает сборку ротора и улучшает форму кривой индукции в зазоре под полюсами, приближая её к синусоидальной.

Свойства магнита в составе магнитной системы электрической машины описываются кривой размагничивания (кривая 2 на рис. 2). Кроме остаточной индукции B_r , её характеристикой является коэрцитивная сила по индукции H_{CB} , в отличие от характерной точки петли гистерезиса (кривая 1), которая называется

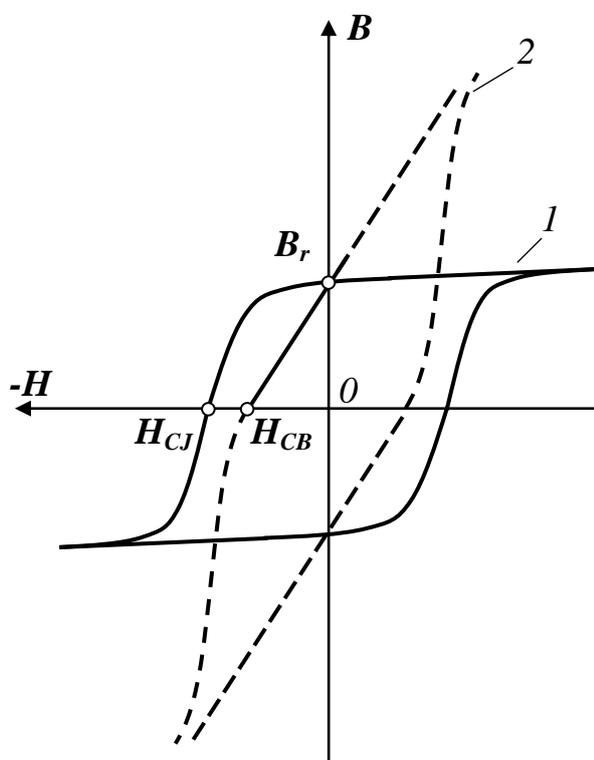


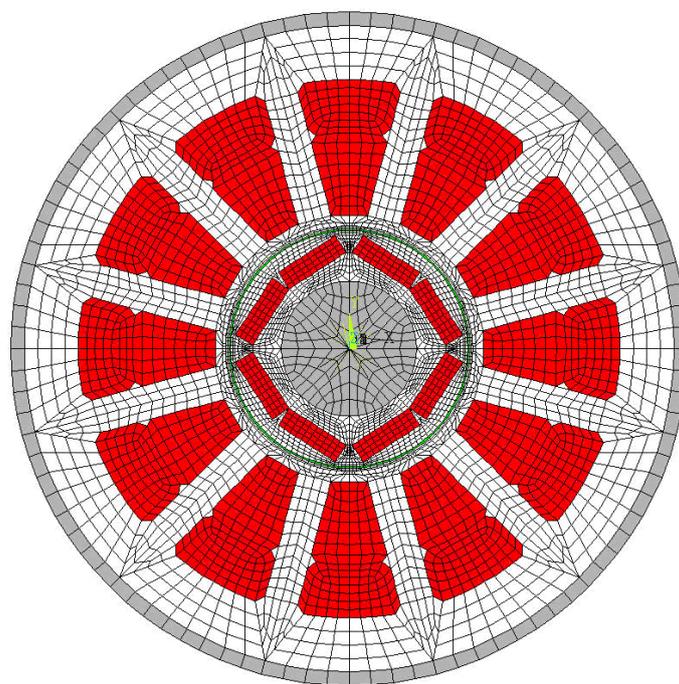
Рис. 2. Петли гистерезиса магнитотвёрдого материала по намагниченности (кривая 1) и индукции (кривая 2)

коэрцитивной силой по намагниченности и обозначается как H_{CJ} . При этом H_{CB} всегда меньше, чем H_{CJ} . Кривые размагничивания характеризуются значением максимальной энергии $(BH)_{max}$ [кДж/м³]. Этот параметр позволяет сравнивать по энергонасыщенности материалы различных марок, структуры и химического состава [2].

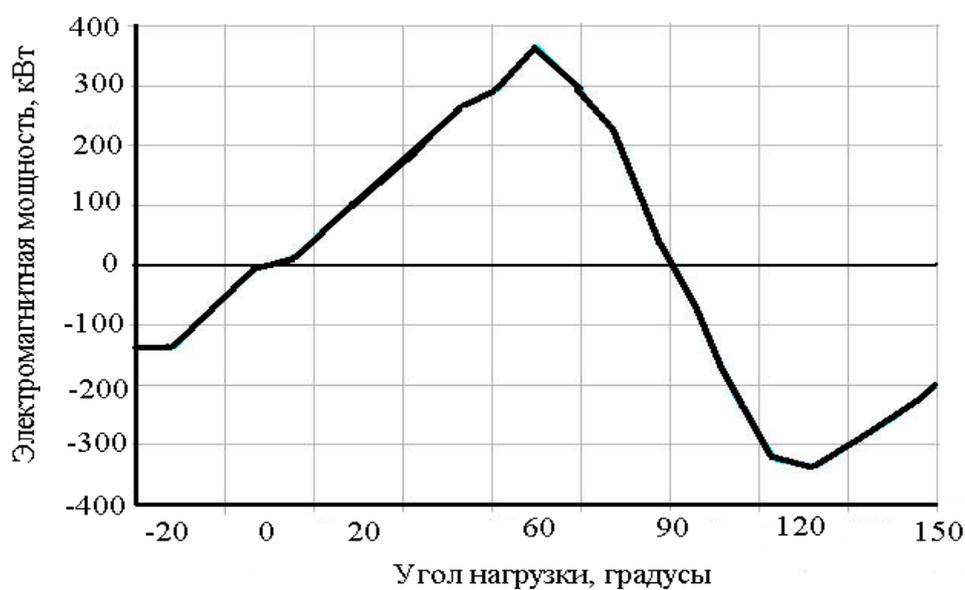
Наиболее распространённым и доступным материалом для изготовления постоянных магнитов электрических машин в настоящее время являются ферриты (бария и стронция). Однако в единичных ответственных изделиях и миниатюрных машинах также нашли применение значительно более энергонасыщенные, но и весьма дорогие магниты на основе сплавов $SmCo_5$ и $NdFeB$, характеризующиеся возможностью создания сильных магнитных полей в малых габаритах.

Несмотря на то, что существует немало методов расчёта электрических машин с постоянными магнитами, наибольшую детализацию расчётной модели, осо-

бенно в зонах локального насыщения ферромагнитных участков ротора, а следовательно, и точность вычислений, обеспечивает метод конечных элементов и сеточная модель магнитной цепи машины, реализующая этот метод.



а)



б)

Рис. 3. Угловая характеристика высокооборотной магнитоэлектрической синхронной машины с обратным расположением V-образных магнитов на полюсах и её сеточная модель

Постоянные магниты в сеточной модели электромагнитного устройства могут быть представлены двумя способами:

1) посредством характеристик собственно магнитотвёрдого материала в виде кривой размагничивания или прямой магнитного возврата;

2) посредством эквивалентного электромагнита. В этом случае он замещается катушкой без потерь, охватывающей сердечник той же формы, что и замещаемый магнит. Проводимость сердечника следует принять равной проводимости магнитотвёрдого материала Λ_M

$$\Lambda_M = \frac{B_r}{H_{CB}} \frac{S_M}{l_M} = \frac{B_r S_M}{F_M},$$

где l_M – длина магнита в направлении намагничивания; S_M – площадь поперечного сечения магнита в направлении, перпендикулярном направлению намагничивания.

Расчёты показывают, что в обоих случаях достигаются примерно одинаковые, в пределах методической погрешности, результаты [1].

Для сокращения длины вылета лобовых частей статора, а следовательно, и общей осевой длины, чтобы заблокировать влияние высших изгибных частот колебаний вала, можно прибегнуть к большему укорочению шага, чем это принято в обычных машинах переменного тока. Для этого следует задать укорочение шага β не таким, каким его принимают в обычных двухслойных обмотках машин переменного тока: не более $\beta > 2/3$ полюсного деления, а $\beta=2/3$, $\beta=1/2$ полюсного деления и менее. В пределах шаг катушек обмотки статора пазам может быть выбран равным одному зубцовому делению $\beta = 1$, т.е. обмотка может быть явнополюсной. Однако такое решение уместно лишь при очень ограниченном числе пазов на полюс и фазу q , поскольку уже при $q = 2$ коэффициент укорочения становится недопустимо малым. В трёхфазной машине он составляет $K_y = 0,5$, а в обмотках с числом фаз, превышающим три, принимает ещё меньшие значения, что приведёт к избыточному расходу обмоточной меди и росту потерь.

Особенностью магнитоэлектрических машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами является заметно бóльшая магнитная проводимость для поперечного потока, по сравнению с проводимостью для продольного потока, имеющего место при совпадении осей полюсов ротора и фазы обмотки статора, так что

$$X_d < X_q,$$

с образованием соответствующего реактивного момента, пропорционального разности указанных индуктивных сопротивлений. Под его влиянием угол нагрузки, соответствующий максимуму развиваемого момента и мощности, на угловой характеристике смещается в область значений $\theta_m > \frac{\pi}{2}$, а сама характеристика имеет более пологую восходящую, в отличие от характеристик неявно- и явнополюсной машин с электромагнитным возбуждением (рис. 3, б).

Избыточное действие поля реактивного момента приведёт к искажению результирующей угловой характеристики, в ней возможно появление локальных минимумов и даже участков с противоположным значением мощности и момента. Для уменьшения влияния реактивного момента путём выравнивания параметров X_d и X_q следует ограничивать радиальный размер полюсных наконечников, а воздушный зазор не должен быть чрезмерно малым. Его следует выбирать в два-три раза большим, чем в машинах с электромагнитным возбуждением такой же мощности и момента. Последнее условие удачно вписывается в конструкцию высокооборотных машин, где для обеспечения высокой механической прочности целесообразно укрепить ротор внешней оболочкой (рубашкой) из титана или других высокопрочных материалов.

В показанной на рис. 3, а машине был задан зазор между статором и ротором 3 мм. Несмотря на значительную его величину, благодаря применению магнитов из сплава NdFeB, удалось достичь приемлемого значения постоянной Арнольда S_A (она характеризует использование объёма внутри расточки статора),

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{P} \approx \frac{1}{AB_\delta} = 0,00014 \left[\frac{\text{М}^2}{\text{Н}} \right],$$

где D - диаметр расточки статора; l_δ - пакета статора в осевом направлении (осевая длина воздушного зазора); Ω - частота вращения ротора, об/мин; A - линейная нагрузка, А/м; B_δ - индукция в зазоре, Тл.

Выводы

1. Создание высокооборотных машин с использованием современных магнитотвёрдых материалов на основе сплавов NdFeB, SmCo₅, Sm₂Co₁₇, СА (феррит стронция), несомненно, является одним из перспективных направлений современного электромашиностроения.

2. Наряду с низкой величиной индуктивных сопротивлений, особенностью параметров машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами является обратное соотношение X_d и X_q , и связанная с этим соотношением форма угловой характеристики, с углом нагрузки, соответствующим максимуму момента и мощности, смещённым за пределы $\pi/2$.

3. В условиях ограниченного по условиям прочности объёма роторного пространства высокооборотной машины под установку постоянных магнитов может оказаться перспективной конструкция ротора с обратным V-образным профилем магнитов на полюсах, с катушками обмотки якоря, более укороченными, чем это принято в обычных машинах переменного тока.

Библиографический список

1. Смирнов А.Ю. Исследование момента герметичной индукторной машины // Электротехника. 2007. №1. С. 51–55.
2. Постоянные магниты: справочник / под ред. Ю.М. Пятиня. – М.: Энергия, 1971. – 376 с.

*Дата поступления
в редакцию 15.10.2013*

A. Yu. Smirnov

THE DESIGN AND ANALYSIS FEATURES OF HIGH RPM WITH ROTOR-PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINES

OKBM Afrikantov

The design features of high rpm permanent magnet synchronous machines are examined. Design solution to limit rotor diameter and axial overall axial length are proposed to reduce mechanical loads from high speed rotation. By FEM of motor release usage was calculated angle load characteristic and analyzing the influence due to different magnetic resistance of rotor: along lengthwise and cross axis on it's shape.

Key words: synchronous machine, permanent magnet, rotor, load angle characteristic.