

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ ДЛЯ КРУПНЫХ МАШИН

В.П. Верещагин, А.В. Рогоза
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Представлены результаты оптимизационных расчетов магнитных подшипников для крупных электрических машин.
Ключевые слова: магнитный подшипник, газоперекачивающий агрегат, активный магнитный подвес.*

История практического применения активных магнитных подвесов (АМП) охватывает период около 80 лет. В 30-х годах XX в. впервые АМП был использован при создании устройств с бесконтактным подвесом стального шарика. В отечественной литературе опубликован ряд работ, в которых рассмотрены некоторые положения теории, расчета и примеры возможного применения АМП в некоторых типах машин.

Существенные практические успехи по промышленному освоению АМП были достигнуты в НПП ВНИИЭМ при создании электромеханических исполнительных органов для управления ориентацией крупных космических станций «Алмаз» и «Мир». Описанию этих устройств, рассмотрению особенностей разработки и изготовления АМП посвящен ряд научно-технических статей, в которых отражены принципиальные подходы к выбору основных решений по ключевым проблемам создания АМП. В [1], содержащей описание двух типов электромеханических исполнительных органов с АМП, представлены трехосный шаровой двигатель-маховик (ШДМ) и силовой двухступенной управляющий гироскоп (гиродин).

Основные этапы создания ШДМ и гиродина отражают процесс постепенного перехода от необычной конструкции трехкоординатного АМП сферического ротора к современной конструкции радиального и осевого электромагнитных подшипников (ЭМП) обычного двухопорного цилиндрического ротора. При создании АМП этих устройств было апробировано большинство технических решений по конструкции электромагнитов, датчиков и импульсным способам управления токами в катушках ЭМП.

Несмотря на специфику применения, особенности конструкции и разницу в основных характеристиках этих машин (ШДМ – сферический ротор-маховик массой 60 кг со скоростью вращения до 800 об/мин, гиродин – цилиндрический ротор-маховик массой 40 кг со скоростью вращения 10 тыс. об/мин), основные подходы по формированию структуры систем управления ЭМП этих машин были сохранены при создании образцов машин общепромышленного применения с массой ротора, превышающей исходную почти

в 20 раз (например экспериментальные образцы различных машин с массой ротора до 1000 кг и скоростью вращения до 30 тыс. об/мин).

Используя накопленный опыт в разработке ЭМП для космических станций, в начале 80-х годов XX в. ВНИИЭМ проводит работы по созданию ЭМП для замены традиционных масляных подшипников в компрессорах газоперекачивающих агрегатов (ГПА) мощностью 16 МВт (ротор массой 1200 кг, скорость вращения 6 тыс. об/мин), работающих на магистральных газопроводах объединения «Самаратрансгаз». К этому времени в мировой практике уже известны примеры применения ЭМП разработки французской фирмы «S2M» в аналогичных компрессорах ГПА, используемых на канадских газопроводах.

Успехи по применению ЭМП в ГПА привели не только к увеличению объемов выпуска ЭМП для ГПА различной мощности, но и к расширению сферы использования (ЭМП) для других машин. Целесообразность применения ЭМП должна быть экономически обоснована с учетом их относительной технической сложности и высокой стоимости по сравнению с традиционными типами опор качения или скольжения.

В течение последних 20 лет для оснащения ГПА различных компрессорных станций магистральных газопроводов ОАО «Газпрома» было изготовлено в НПП ВНИИЭМ и поставлено более 100 комплектов ЭМП. Конкретные данные по применению ЭМП в газовой промышленности представлены в [2]. Приведенные данные свидетельствуют о предпочтении комплектов ЭМП, изготовленных в НПП ВНИИЭМ, ОАО «Газпром» к применению в перспективных разработках ГПА. Кроме того, следует отметить, что в ряде электроприводных ГПА в качестве опор ротора электродвигателя тоже начинают применяться ЭМП, аналогичные подшипникам компрессора.

В мировой практике энергетического машиностроения известны случаи применения ЭМП в крупных агрегатах, у которых вес ротора превышает 5 тонн. Соответственно возрастают массогабаритные показатели у ЭМП этих машин. Задачи оптимизации при выборе этих параметров отличаются от подходов к решению аналогичных задач для

ЭМП ГПА. Решение этих задач для крупных машин становится особенно актуальным.

При сопоставлении различных конструктивных вариантов ЭМП по некоторым конкретным параметрам, в том числе по массогабаритным показателям, следует учитывать существующие взаимосвязи их с другими параметрами. Например, соотношение между габаритными размерами электромагнитов и величиной электрических потерь в их обмотках. Стремление снизить габаритные размеры ЭМП сопряжено с необходимостью увеличения числа полюсов магнитной системы, сокращения объемов обмоток, что, естественно, вызывает увеличение потерь мощности на возбуждение рабочих магнитных потоков. Пользуясь этим, можно за счет изменения величины энергопотребления варьировать габаритными размерами ЭМП, сохраняя их грузоподъемность.

Анализ существующих разработок ЭМП для крупных машин показывает, что обычно радиальные подшипники (РМП) этих машин выполняют с числом зубцов 16 и более, а осевые подшипники (ОМП) – с «Ш»-образной магнитной системой. На основании обобщенных данных можно предложить для оценочных проектных расчетов ряд приближенных соотношений, позволяющих по величине усилия, действующего на ЭМП, определить потери мощности в обмотках. Потери мощности в электромагнитах при номинальном токе приближенно можно записать так:

$$P \cong 4F_H^{0,5},$$

где P – потери, Вт; F_H – номинальная нагрузка, Н.

Рассмотрим некоторые ориентировочные соотношения между нагрузкой и размерами ЭМП, которыми можно руководствоваться при проведении оценочных проектных расчетов. Предельная нагрузка, которую может воспринимать ЭМП зависит от габаритных размеров ротора электромагнита и индукции насыщения материала из которого он изготовлен. Для тонколистовой электротехнической стали индукция насыщения достигает 1,5 Тл и удельное усилие, создаваемое 1 см² площади полюса, может составлять около 80 Н. В номинальном режиме обычно длительно действующая нагрузка допускается в 1,5 раза меньше и, соответственно, расчетное удельное усилие можно принять равным 50 Н. Исходя из этого, можно определить ориентировочные основные размеры РМП, необходимые для создания требуемого номинального усилия F_H . Поскольку соотношение между площадью, занятой полюсами, и общей площадью ротора, обращенной к электромагниту, обычно составляет 0,6, а длину ротора РМП по отношению к его диаметру для крупных машин следует принять равной 0,6, то можно определить ори-

ентировочную величину диаметра ротора РМП из простого соотношения следующего вида:

$$D_R = 2,5 \cdot 10^{-3} F_H^{0,5},$$

где F_H – номинальная нагрузка РМП, Н; D_R – диаметр ротора РМП, м.

В осевом магнитном подшипнике крупных машин для снижения габаритов и массы отношение внутреннего диаметра D_B электромагнита к внешнему D_H выбирается несколько ниже, чем в ОМП ГПА, и может быть принято равным 0,6. Расчетное удельное усилие в номинальном режиме при использовании магнитопровода и диска из низкоуглеродистых сталей с более высокой индукцией насыщения составляет 60 Н/см². В результате для ОМП, у которого площадь магнитопровода, обращенная к диску, равна 0,6 от общей площади электромагнита, получается выражение для определения ориентировочной величины внешнего диаметра электромагнита следующего вида:

$$D_H = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot F_H^{0,5}, \text{ мм.}$$

Габаритные размеры и массу ЭМП для крупных машин можно оценить пользуясь в первом приближении наиболее распространенными на практике соотношениями между внешним диаметром D_S и общей длиной L_S , характеризующими габаритные размеры ЭМП, и выбранными диаметрами ротора D_R для РМП или внешним диаметром D_H для ОМП. Например, внешний диаметр D_S магнитопровода статора РМП обычно в 1,5 раза больше, чем D_R , т.е. $D_S = 1,5D_R$. Общая длина статора L_S за счет выступающих частей полюсных катушек оказывается больше, чем длина сердечника ротора, в среднем на 30%, т.е. $L_S = 1,3L_R$. В результате для предварительной оценки объема, занимаемого РМП в целом, можно воспользоваться соотношением вида:

$$V_{MR} = 1,4D_R^3, \text{ м}^3.$$

Соответственно, для массы РМП при средней удельной массе $6 \cdot 10^3$ кг/м³ получаем соотношение:

$$G_{MR} = 0,84 \cdot 10^4 D_R^3, \text{ кг.}$$

Эти соотношения для проведения оценки более удобно представить в функции от величины номинального усилия F_H , действующего на РМП, в следующем виде:

$$V_{MR} = 2,2 \cdot 10^{-8} F_H^{1,5}, \text{ м}^3;$$

$$G_{MR} = 1,3 \cdot 10^{-4} F_H^{1,5}, \text{ кг.}$$

Аналогично можно получить соотношения для оценки объема и массы ОМП. Общая длина ОМП, состоящего из двух электромагнитов и диска, для крупных машин обычно составляет около 35% от внешнего диаметра электромагнита, т.е.

$$L_{SA} = 0,35D_H = 0,83 \cdot 10^{-3} F_H^{0,5}.$$

Ориентировочно объем ОМП, без учета внутренней полости, можно определить из соотношения следующего вида:

$$V_{MA} = 0,17D_H^3 = 2,31 \cdot 10^{-9} F_H^{1,5}, \text{ м}^3.$$

Соответственно общий вес ОМП с учетом, что плотность заполнения объема у ОМП выше, чем у РМП, и средний удельный вес близок к $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, можно определить из соотношения:

$$G_{MA} = 1,4 \cdot 10^3 D_H^3 = 1,8 \cdot 10^{-5} F_H^{1,5}, \text{ кг}.$$

Таким образом, у ЭМП крупных машин удельные массогабаритные показатели могут быть лучше, чем у ЭМП ГПА. Удельные показатели по объему и весу у РМП могут быть ниже примерно на 40%, а у ОМП – на 15%.

Однако удельные показатели по энергопотреблению обмоток возбуждения и потери на перемагничивание в роторе возрастут примерно на 50%, так как число полюсов в магнитной системе РМП возрастает в соответствии с ростом количества зубцов. Для оценки потерь в роторе РМП можно использовать выражения следующего вида:

$$P_T \cong 1,8 p_{1/400} F_H^{1,5} n^{1,5} p^{0,5} \cdot 10^{-11},$$

где F_H – номинальная нагрузка, Н; n – скорость вращения ротора, об/мин; p – число пар полюсов в магнитной системе РМП; $p_{1/400}$ – удельные потери на перемагничивание материала ротора, Вт/кг.

Задачи проектирования ЭМП обычно решаются в два этапа. На первом этапе, используя приведенные выше соотношения, по заданной величине номинальной нагрузки определяются основные размеры электромагнитов. На втором этапе проводятся оптимизационные электромагнитные расчеты для выбранных основных размеров и различных вариантов конструкции магнитопроводов. По результатам электромагнитных расчетов выбирается рабочий вариант ЭМП, для которого выполняется конструкторская разработка.

Рассмотрим два варианта конструкции магнитопровода РМП, которые целесообразно применять для крупных машин. В первом варианте магнитопровод РМП состоит из 16-ти одинаковых зубцов, на каждом из которых располагаются катушки возбуждения. Катушки возбуждения соединяются так, чтобы соседние зубцы попарно имели одинаковую полярность магнитного потока, т.е. каждые два зубца образуют как бы единый полюс. На рис. 1 в качестве примера представлена конфигурация магнитной системы одной из четырех одинаковых зон РМП. В результате из 16-ти зубцовой магнитной системы по внутреннему диаметру образуется $2p = 8$ – полюсная система, т.е. по два полюса на каждую зону. Один полюс, объединяющий два зубца, находится по центру зоны, а по краям зоны каждый из зубцов образует по половине полюса.

Во втором варианте магнитной системы РМП с целью снижения потерь мощности на возбуждение рабочего магнитного потока два центральных зубца зоны объединены в один большой зубец, с установленной на нем одной катушкой возбуждения, соответственно, имеющей ширину в два раза больше, чем катушка на крайних малых зубцах. Общее количество зубцов такой магнитной системы составляет $z = 12$, в том числе четыре больших и восемь малых зубцов. На каждую зону, как показано на рис. 2, приходится по одному большому и по два малых зубца.

На зубцах каждой зоны располагаются две малых и одна большая катушка возбуждения. В результате общее количество катушек в зоне у магнитной системы с 12-ю зубцами оказывается на 25% меньше, чем у системы с 16-ю зубцами. Кроме того, площадь поперечного сечения катушек в системе с 12-ю зубцами может быть увеличена примерно на 30%, так как возрастает площадь пазов, в которых размещаются катушки.

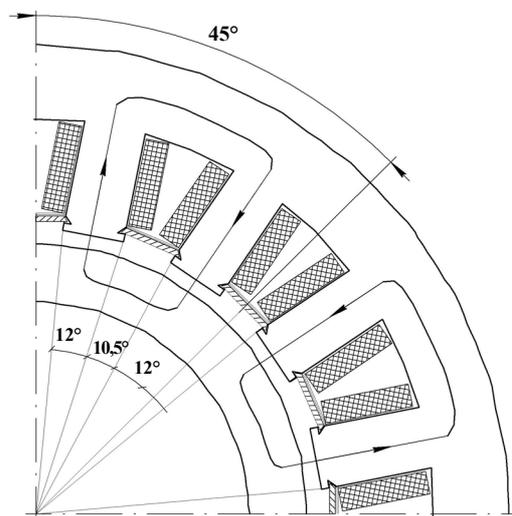


Рис. 1. Магнитная цепь РМП с 16-ю зубцами

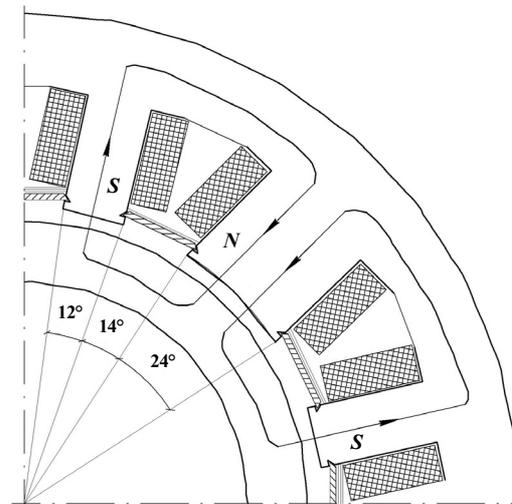


Рис. 2. Магнитная цепь РМП с 12-ю зубцами

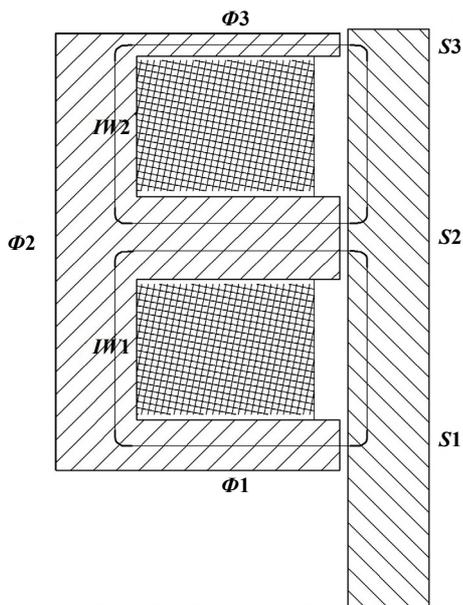


Рис. 3. Магнитная система ОМП

Таким образом, общее сопротивление катушек возбуждения зоны в системе с 12-ю зубцами оказывается примерно в 1,5 раза меньше, чем в аналогичной системе с 16-ю зубцами.

Следовательно, применение в РМП крупных машин магнитных систем с 12-ю зубцами по сравнению с системами, имеющими 16 зубцов, является предпочтительным по энергетическим соображениям. При одинаковых габаритах и нагрузках система с 12-ю зубцами имеет в 1,5 раза меньшие потери мощности на возбуждение, чем системы с 16-ю зубцами.

Однако технология изготовления РМП с разными зубцами и, соответственно, разными катушками возбуждения сравнительно сложнее, чем РМП с одинаковыми зубцами. В результате сопоставления различных конструктивных факторов в ряде случаев может оказаться оправданным применение последнего типа РМП, несмотря на повышенное энергопотребление. Об этом свидетельствуют примеры некоторых зарубежных разработок РМП для крупных машин. В целом, задача выбора оптимального типа магнитной системы РМП для крупных машин, кроме приведенных здесь соображений, должна учитывать факторы и условия конкретной разработки.

При проектировании ОМП с «Ш»-образной магнитной системой, применение которой в крупных машинах является предпочтительным, следует учитывать особенность распределения рабочего магнитного потока между зубцами. В магнитной системе, которая показана на рис. 3, тяговое усилие создается внутренним, средним и наружным полюсами, площади которых,

соответственно, обозначены S_1 , S_2 и S_3 . Поскольку намагничивающие ампер-витки обмоток $IW1$ и $IW2$ обычно равны между собой и зазоры под полюсами электромагнита одинаковые, то в первом приближении, без учета магнитных сопротивлений сердечника и диска, можно считать, что индукции под внутренним и наружным полюсами равны, т.е. $B_1 = B_3$. Магнитный поток среднего полюса равен сумме потоков крайних полюсов $\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_3$. Исходя из этого, получаем следующее выражение для индукции среднего полюса:

$$B_2 = \frac{B_1(S_1 + S_3)}{S_2}.$$

В результате выражение для тягового усилия ОМП с «Ш»-образной магнитной системой имеет следующий вид:

$$F = \frac{B_1^2}{2\mu_0} \left(S_1 + S_3 + \frac{(S_1 + S_3)^2}{S_2} \right).$$

Исходя из условия обеспечения одинаковых электромагнитных нагрузок полюсов, полагаем $B_2 = B_1 = B_3$ и получаем соотношение для площадей вида:

$$S_2 = S_1 + S_3.$$

Подставив это соотношение в предыдущее выражение для тягового усилия, получим:

$$F = \frac{B_1^2}{\mu_0} (S_1 + S_3).$$

Как следует из этого выражения, перераспределение площадей между крайними полюсами при сохранении постоянной суммарной величины $S_1 + S_3$ не оказывает влияния на тяговое усилие. Может оказаться выгоднее для снижения общей высоты магнитопровода уменьшить площадь внутреннего полюса S_1 по сравнению с S_3 , что позволит уменьшить общую толщину спинки. Однако это может отрицательно сказаться на внешних электромагнитные воздействия поля из-за нарушения симметрии.

Представленные здесь расчетные соотношения и результаты сравнительного анализа некоторых типов магнитных систем ЭМП являются основой специальных компьютерных программ проектных и поверочных расчетов, созданных в НПП ВНИИЭМ для ЭМП крупных машин.

Литература

1. Электромеханические исполнительные органы с магнитными опорами для управления ориентацией космических станций / Стома С.А., Верещагин В.П., Вейнберг Д.М. // Космический бюллетень. – 1995. – Т.2. – №1.
2. Применение электромагнитных подшипников в газовой промышленности / Руковицын И.Г., Сарычев А.П. // Компрессорная техника и пневматика. – 2008. – №1.

*Владимир Петрович Верещагин, д-р техн. наук, гл. научный сотрудник, т. 365-50-73.
Александр Валерьевич Рогоза, начальник научно-производственного комплекса, т. 366-04-79.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.*