

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

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

Рассмотрены основные расчетные соотношения и рекомендации по выбору главных размеров электромагнитных подшипников машин различной мощности. По величине нагрузки, действующей на подшипники, представленная методика проектирования позволяет определить близкие к оптимальным проектные варианты конструкции электромагнитных подшипников.

Ключевые слова: электромагнитные подшипники, проектирование, грузоподъемность, размеры.

В течение последних двадцати лет некоторые вопросы проектирования электромагнитных подшипников (ЭМП) рассматривались в ряде статей, опубликованных по результатам работ в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» [1], и частично затронуты в монографии Ю.Н. Журавлева [2], касающейся, в основном, общих принципов построения систем управления. Однако с расширением фронта работ по ЭМП возникла необходимость в обобщении и систематизации имеющихся данных, что привело к разработке методик проектирования и поверочных расчетов ЭМП. В данной статье рассматривается только первый этап, связанный с проектированием ЭМП.

Обычно для центрирования роторов машин применяют ЭМП двух видов:

- радиальные электромагнитные подшипники (РМП), каждый из которых обеспечивает центрирование по двум взаимно перпендикулярным поперечным осям;
- осевой электромагнитный подшипник (ОМП), который ограничивает перемещение ротора в осевом направлении.

Процесс проектирования ЭМП включает решение двух взаимосвязанных задач.

Во-первых, определяются основные размеры ЭМП, которые необходимы для парирования нагрузки, действующей на ротор машины.

Во-вторых, проводятся поверочные электромагнитные расчеты для различных проектных вариантов ЭМП с целью сопоставления и выбора из них оптимального рабочего варианта.

Основной исходной величиной при решении первой задачи является нагрузка, которую должен воспринимать ЭМП. По характеру воздействия следует различать два вида нагрузки: длительно действующую (номинальную) нагрузку F_M и кратковременную максимальную нагрузку (грузоподъемность) F_M . Номинальная нагрузка обычно меньше, чем грузоподъемность ЭМП, и лимитирована,

как правило, тепловым состоянием, т. е. потерями мощности в катушках возбуждения ЭМП и степенью охлаждения электромагнита. Грузоподъемность, в отличие от номинальной нагрузки, ограничена насыщением материала и размерами магнитной системы ЭМП, определяющими площадь полюсов статора, взаимодействующую с ротором.

Соотношение между F_M и F_H обычно определяет перегрузочную способность ЭМП и обозначается коэффициентом k_{Π} , т. е.

$$k_{\Pi} = F_M / F_H. \quad (1)$$

Выбор значения k_{Π} зависит от характера и достоверности определения эксплуатационных нагрузок, воздействующих на ротор со стороны рабочих органов машины и соединительных элементов с другими машинами, а также от величины запаса, которая закладывается при расчете по взаимному согласованию с проектировщиком машины в целом. Часто на первом этапе проектирования принимают $k_{\Pi} = 1,5$.

Исходя из принятых величин нагрузок, можно приступить к определению основных размеров магнитной системы электромагнита.

В первом приближении можно считать, что магнитная сила притяжения F , создаваемая полюсом электромагнита, имеющим площадь S , при однородном магнитном поле с индукцией B на поверхности, определяется выражением следующего вида:

$$F = B^2 S / 2\mu_0, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Из этого соотношения видно, что величина удельного тягового усилия ограничена индукцией насыщения материала магнитопровода. При использовании в качестве материала магнитопровода РМП тонколистовой электротехнической стали с индукцией насыщения $B_M = 1,6$ Тл величина предельного удельного тягового усилия, создаваемого 1 см^2 площади полюса, может достигать $F_1 = 100 \text{ Н/см}^2$. В ОМП магнитопровод обычно изготавливают из массивной магнитомягкой стали с индукцией насыщения около $B_M = 1,8$ Тл и, соответственно, удельное тяговое усилие может достигать $F_1 = 120 \text{ Н/см}^2$.

В реальных конструкциях магнитопроводов РМП и ОМП максимальная индукция в зазоре между статором и ротором B_{0M} из-за распушения магнитного потока оказывается ниже, чем индукция насыщения B_M и, соответственно, величина удельного тягового усилия снижается для РМП до $F_{1M} = 80 \text{ Н/см}^2$, а для ОМП $F_{1M} = 100 \text{ Н/см}^2$.

Кроме того, расчетная величина индукции в зазоре B_{0P} может быть еще ниже, чем B_{0M} из-за возможного насыщения отдельных участков магнитопровода. В общем случае отношение индукции B_{0M} к расчетному значению индукции B_{0P} будем характеризовать коэффициентом индукции k_B , т. е. $k_B = B_{0M}/B_{0P}$. Выбор величины этого коэффициента зависит от конструкции применяемой магнитной системы ЭМП, формы полюсов, толщины спинки магнитопровода и других факторов, которые определяют наиболее насыщенные участки магнитопровода.

В первом приближении для конкретной магнитной системы РМП и ОМП значение k_B можно принять равным соотношению площадей и магнитных потоков насыщенного участка магнитопровода и зубца, обращенного к ротору. Для магнитопроводов с трапецевидными зубцами и равномерным насыщением по высоте полюсов и в спинках можно принять $k_B = 1$. При зубцах с параллельными стенками, из-за насыщения в основании зубца, следует принимать $k_B = 1,1$.

В результате для проектируемого РМП и ОМП следует принять расчетную величину удельного тягового усилия:

$$F_{1P} = F_{1M} / k_B^2. \quad (3)$$

Исходя из принятой величины F_{1P} и требуемой величины грузоподъемности F_{ZM} , приходящейся на один зубец, можно ориентировочно определить площадь зубца ЭМП, обращенную к ротору:

$$S_Z = F_{ZM} / F_{1P}. \quad (4)$$

Поскольку для определенного типа магнитной системы ЭМП существуют некоторые ограниченные пределы возможного изменения различных размеров отдельных элементов, то для полученной площади зубцов могут быть установлены соответствующие основные размеры проектируемого варианта ЭМП.

Рассмотрим наиболее распространенные типы магнитных систем РМП и ОМП.

Магнитные системы РМП

Конструктивно магнитная система РМП состоит из неподвижного пакета статора с катушками возбуждения и вращающегося ротора, который притягивает статор. Катушки возбуждения расположены на статорных зубцах, обращенных к ротору. Для обеспечения управления РМП по каждой из двух взаимно-перпендикулярных осей статор разделен на четыре зоны, которые притягивают ротор в своем направлении. Если магнитная система выполнена с общим количеством зубцов Z , то на каждую рабочую зону РМП будет приходиться по $Z_3 = Z/4$. В общем случае $Z_3 = 2; 4; 6$ и т. д. – четные числа.

При выборе числа зубцов магнитной системы РМП следует учитывать существующие взаимосвязи с другими параметрами. Например, число зубцов влияет на габаритные размеры РМП и величину электрических потерь в их катушках. Стремление снизить габаритные размеры ЭМП сопряжено с необходимостью увеличения числа зубцов магнитной системы и соответствующего изменения катушек, что, естественно, вызывает увеличение потерь мощности на возбуждение рабочих магнитных потоков. В результате за счет выбора числа зубцов можно варьировать величиной энергопотребления и габаритными размерами ЭМП, сохраняя их грузоподъемность.

Магнитные системы РМП с $Z = 8$ и, соответственно, $Z_3 = 2$ обычно применяют для роторных машин средней мощности, у которых масса ротора не превышает двух тонн.

Для крупных машин с массой ротора более пяти тонн обычно магнитные системы РМП выполняют с числом зубцов $Z = 16$ и более. Кроме того, в некоторых случаях может оказаться целесообразным применение в РМП магнитных систем с разными по размерам зубцами, которые рассматривались в [3] по ЭМП для крупных машин. Перечисленные магнитные цепи РМП представлены на рис. 1, 2 и 3.

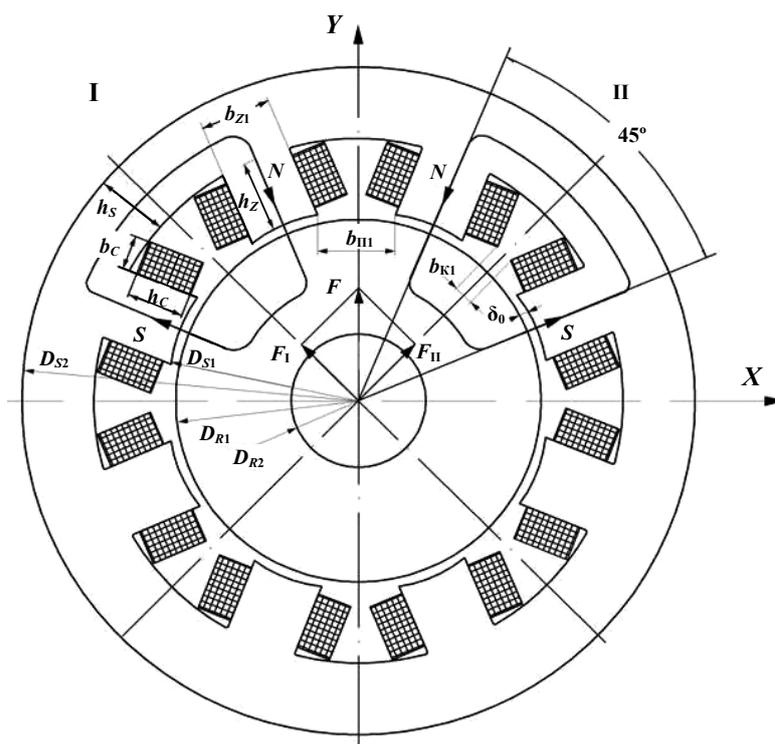


Рис. 1. Конструкция РМ с $Z = 8$

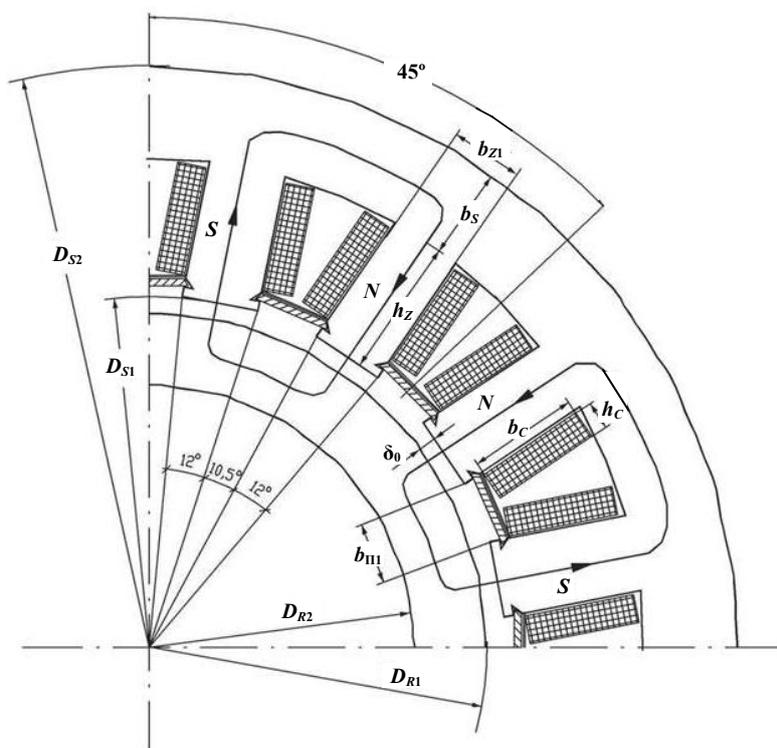


Рис. 2. Магнитная цепь РМ с $Z = 16$

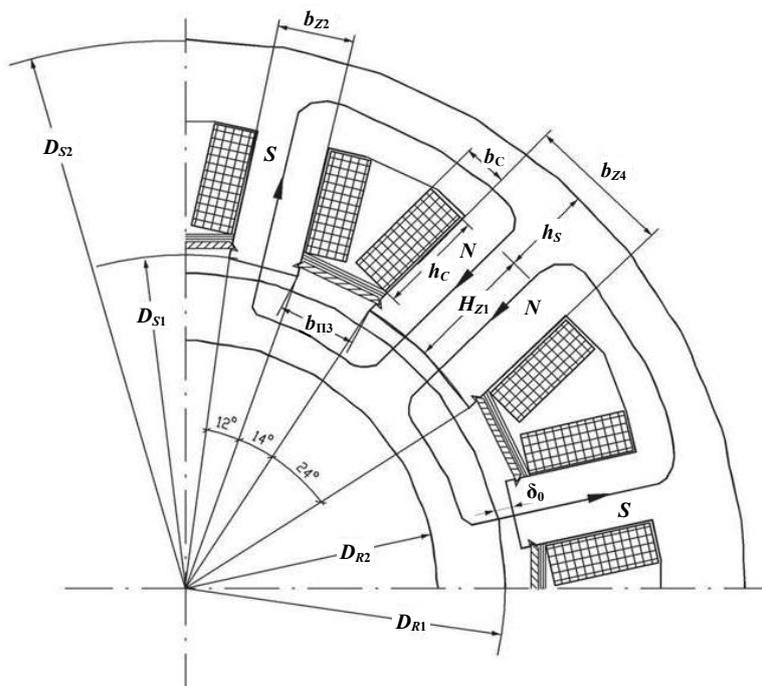


Рис. 3. Магнитная цепь РМП с $Z = 12$

Наиболее распространенным по распределению нагрузки между зонами в РМП (в машинах с горизонтальным расположением вала) является случай, когда воздействующее по вертикальной оси усилие, например, сила веса ротора, приходящаяся на опору, распределена между двумя верхними зонами РМП, оси которых направлены под углом 45° к вертикальной оси. В этом случае каждая из двух верхних нагруженных зон РМП воспринимает часть нагрузки. Для режима максимальной нагрузки это соотношение имеет следующий вид:

$$F_{3M} = 0,707 F_M.$$

Каждую пару зубцов рабочей зоны РМП, по которым протекает одинаковый рабочий магнитный поток, можно рассматривать как автономную двухполюсную магнитную систему, в которой каждый зубец создает тяговое усилие F_Z . Максимальное значение этого усилия F_{ZM} связано с грузоподъемностью опоры F_M соотношением следующего вида:

$$F_{ZM} = 0,707 F_M / Z_3 k_p, \quad (5)$$

где k_p – коэффициент, учитывающий распределение зубцов в зоне, выбирается в соответствии с нижеприведенными данными:

Число зубцов Z	8	16	24
Коэффициент распределения k_p	0,924	0,906	0,903

С учетом соотношения (5) выражение (4) для требуемой площади зубца РМП будет иметь следующий вид:

$$S_Z = 0,707 F_M / F_{1P} Z_3 k_p. \quad (6)$$

Определим основные размеры элементов магнитопровода РМП, которые соответствуют требуемой площади зубца, полученной из уравнения (6). При этом важно отметить, что анализ существующих магнитных систем РМП позволяет установить ряд соотношений между отдельными размерами и параметрами, которые близки к оптимальным, или обусловлены технологией изготовления.

Главными размерами РМП будем считать внутренний диаметр пакета статора D_{S1} (диаметр расточки) и длину пакета L_{S1} . Эти размеры, главным образом, определяют все другие размеры магнитопровода РМП: размеры зубцов, пазов, внешний диаметр и т. д.

Обозначим соотношение между L_{S1} и D_{S1} коэффициентом длины k_L , т. е.

$$k_L = L_{S1} / D_{S1}.$$

Практика применения РМП в машинах различной мощности показывает, что значение k_L следует выбирать в пределах $0,6 \div 0,4$.

При этом необходимо учитывать влияние некоторых конструктивных факторов. Например, увеличение общей длины машины в связи с применением ЭМП не должно быть чрезмерным и негативно влиять на динамику ротора. Кроме того, конструкция катушек возбуждения, зависящая от соотношения размеров и числа зубцов РМП, должна соответствовать оптимальному значению потерь мощности на возбуждение рабочего магнитного потока (отношение длины катушки к ее ширине должно быть не больше 5). Следовательно, с ростом грузоподъемности РМП и соответственно с увеличением числа зубцов, т. е. для РМП крупных машин, следует принимать значение $k_L = 0,4 \div 0,5$.

Если обозначить соотношение между площадью, занятой зубцами, и общей площадью магнитопровода в расточке коэффициентом k_S , то можно определить площадь зубца S_Z через главные размеры РМП из выражения:

$$S_Z = \pi k_S k_L D_{S1}^2 / Z. \quad (7)$$

Приравнявая соотношения (6) и (7), получим выражение для определения диаметра расточки РМП:

$$D_{S1} = \sqrt{0,9 \frac{F_M}{F_{1P} k_S k_P k_L}}.$$

Для наиболее распространенных типов РМП, у которых обычно используют жесткие катушки возбуждения, намотанные на шаблон и затем установленные на зубцы, можно на основе существующего опыта принять значение коэффициента $k_S = 0,6$, а для крупных машин $k_S = 0,5$.

Таким образом, для заданного значения грузоподъемности F_M , выбранных значений удельных нагрузок F_{1P} и коэффициентов k_S , k_P , k_L можно определить главные размеры РМП. Эти размеры являются базовыми для расчета и выбора остальных размеров элементов магнитопровода РМП.

Прежде всего, следует проверить выбор числа зубцов Z магнитной системы РМП. В дополнение к рассмотренным выше общим рекомендациям необходимо учесть, что изменение Z с увеличением грузоподъемности и ростом D_{S1} должно соответствовать следующим данным:

Диаметр расточки D_{S1} , мм	≤ 300	400 – 500	≥ 600
Число зубцов Z	8	16	≥ 24

Величину зазора между статором и ротором РМП выбирают с учетом следующих соображений и факторов. С одной стороны, зазор должен быть минимальным, чтобы сократить потери на возбуждение рабочего магнитного потока. С другой стороны, он должен быть достаточным, чтобы часть зазора, около 40% от общей величины, можно было использовать для зазора страховочного подшипника, который ограничивает соприкосновение ротора о статор при отказах или выключении ЭМП. В оставшуюся часть зазора должны укладываться возможные неточности и колебания ротора, возникающие из-за динамических воздействий на грузок, нарушений соосности деталей, точности изготовления, балансировки и т. п.

Для выбора величины зазора δ_0 при проектировании РМП можно воспользоваться данными, характеризующими существующее на практике изменение зазора δ_0 от диаметра расточки D_{S1} для наиболее распространенных типов машин с ЭМП и представленными ниже:

Зазор между ротором и статором δ_0 , мм	0,5	0,8	1,2	1,5
Диаметр расточки РМП D_{S1} , мм	50	275	400	600

После выбора величины зазора определим размеры катушек возбуждения, которые необходимы для создания рабочего магнитного потока. Исходным параметром для этого является допустимая плотность тока i_C в проводах катушек, которая обычно ограничена предельными рабочими температурами и интенсивностью охлаждения РМП. В первом приближении для катушек с классом изоляции Н и при охлаждении ЭМП воздушным потоком со скоростью около 0,2 м/с можно принять для номинального режима расчетную величину $i_{CP} = 3$ А/мм², а для крупных машин $i_{CP} = 4$ А/мм².

Поскольку при создании рабочего магнитного потока в номинальном режиме насыщение магнитопровода обычно не превышает 25%, то намагничивающую силу катушки AW при выбранном зазоре δ_0 в первом приближении можно определить из соотношения

$$AW = 8 \cdot 10^2 B_{0H} \delta_0 k_H, \quad (8)$$

где $B_{0H} = B_{0P} / k_H^{0,5}$ – индукция в зазоре при номинальной нагрузке в Тл; δ_0 – зазор между статором и ротором в мм; $k_H = 1,25$ – коэффициент насыщения магнитопровода.

Исходя из полученного значения намагничивающей силы AW и принятой плотности тока i_{cp} , можно определить площадь поперечного сечения катушки возбуждения S_C , пользуясь соотношением

$$S_C = AW / i_{cp} k_C, \quad (9)$$

где k_C – коэффициент заполнения катушки медью, который зависит от типа провода и изоляции катушки и, в первом приближении, может быть принят 0,6.

При заданном номинальном токе в катушке I_H число витков в катушке W выбирается из условия обеспечения требуемой намагничивающей силы, полученной из уравнения (8), т. е.

$$W = AW / I_H. \quad (10)$$

Затем находим расчетные значения площади сечения проводника катушки q_p , используя для этой цели уравнение (9), преобразованное к виду:

$$q_p = S_C \frac{k_C}{W}. \quad (11)$$

По полученному значению q_p и с учетом условий работы выбираем тип обмоточного провода и стандартные значения обмоточного провода катушки, а также определяем минимально допустимый радиус его изгиба R_C .

Размеры зубцов и пазов магнитопровода РМП для выбранных значений D_{S1} , Z , k_S могут быть определены из соотношений следующего вида:

– для ширины зубца в расточке по дуге

$$b_{z0} = \pi D_{S1} \frac{k_S}{Z};$$

– для линейного размера зубца

$$b_{z1} = D_{S1} \sin\left(\pi \frac{k_S}{Z}\right); \quad (12)$$

– для ширины паза по расточке

$$b_{п1} = b_{z1} \frac{(1 - k_S)}{k_S}. \quad (13)$$

У магнитных систем РМП, выполненных с трапецевидными зубцами, ширина зубца увеличивается к основанию примерно на 20% и составляет

$$b_{z2} = k_z b_{z1},$$

где $k_z = 1, 2$ – коэффициент расширения зубца, для прямоугольных зубцов $k_z = 1$.

Поскольку для обеспечения свободной установки катушек на зубцы между катушками соседних зубцов должен быть предусмотрен промежуток $b_{к1}$, то ширина катушки:

$$b_C = \frac{b_{п1} - b_{к1}}{2}.$$

Высоту катушки h_C , исходя из полученной площади поперечного сечения S_C , определим из соотношения

$$h_C = S_C / b_C.$$

Для установки катушки на зубец так, чтобы она не касалась ротора и была надежно закреплена на зубце с помощью клина, высота зубца h_z должна быть выбрана больше, чем высота катушки h_C , на величину выступа h_B , т. е.

$$h_z = h_C + h_B,$$

где $h_B = h_K + h_P$, h_K – высота клина с учетом изоляционных прокладок; h_P – высота буртика, на который опирается клин. На первом этапе проектирования можно применять $h_B = 5$ мм.

Если высоту спинки h_S в магнитопроводе РМП принять равной ширине зубца у основания, т. е. $h_S = b_{z2}$, то для определения внешнего диаметра статора D_{S2} можно воспользоваться выражением

$$D_{S2} = D_{S1} + 2(h_z + h_S).$$

Для определения общей длины статора РМП, которая больше длины пакета L_{S1} за счет вылета лобовых частей катушек и соединений между катушками, можно использовать приближенное соотношение:

$$L_S = L_{S1} + 2(b_C + R_C).$$

Предельное значение внутреннего диаметра пакета ротора D_{R2} определяется из условия равенства площадей зубца и поперечного сечения спинки пакета ротора, которое может быть представлено в следующем виде:

$$D_{R2} \leq D_{S1} - 2(\delta_0 + b_{Z1}).$$

Длина пакета ротора L_{R2} выбирается обычно больше длины пакета статора, чтобы перекрыть возможные неточности и температурные деформации вала ротора по длине. Обычно должно выполняться условие

$$L_{R2} \geq L_{S1} + 4\delta_0.$$

Как отмечалось выше, кроме рассмотренных магнитных систем РМП с одинаковыми зубцами целесообразно привести некоторые расчетные соотношения для систем с разными зубцами.

Магнитная система РМП с $Z = 12$ занимает среднее положение между системами с $Z = 8$ и $Z = 16$. По энергозатратам на возбуждение она ближе к системе с $Z = 8$, чем система с $Z = 16$, а по габаритам она практически соответствует системе с $Z = 16$. В ряде случаев применение РМП с $Z = 12$, несмотря на более сложную технологию изготовления, может оказаться предпочтительным. Каждая рабочая зона такой магнитной системы, как показано на рис. 3, состоит из двух малых и одного большого зубцов.

При определении размеров зубцов и пазов магнитопровода с $Z = 12$ будем руководствоваться рядом следующих соотношений:

– ширина большого зубца выбирается в 2 раза больше, чем ширина у малого, т. е.

$$b_{Z3} = 2b_{Z1},$$

где b_{Z1} – ширина зубца РМП с $Z = 16$ из уравнения (12);
– расчетная высота у малых и больших зубцов принимается одинаковой, т. е. $h_{Z1} = \text{const}$;
– ширина всех пазов в расточке выбирается одинаковой, т. е. $b_{П3} = \text{const}$;
– ширина паза, в отличие от уравнения (13) для системы с одинаковыми зубцами, определяется из соотношения:

$$b_{П3} = 4 \frac{b_{Z1}(1 - k_s)}{3k_s}.$$

В связи с увеличением площади паза в системе с $Z = 12$, по сравнению системой РМП, имеющей $Z = 16$, и, соответственно, с увеличением площади поперечного сечения катушек можно получить, как это уже отмечалось для РМП крупных машин, существенное снижение потерь мощности на возбуждение рабочего магнитного потока.

Магнитные системы ОМП

Обычно магнитная система ОМП состоит из двух неподвижных цилиндрических электромагнитов торцевого типа с катушками возбуждения и вращающегося между ними диска, которые притягивают электромагниты, каждый в свою сторону. Катушки возбуждения располагаются в пазах, обращенных к диску, как это показано на рис. 4. Изменения величины и знака управляющего силового воздействия на диск достигаются за счет перераспределения тока между катушками возбуждения электромагнитов.

При проектировании ОМП в первую очередь проводится выбор типа магнитной системы электромагнита, создающего тяговое усилие. Сравниваются два варианта магнитных систем электромагнитов: с П- и Ш-образными магнитопроводами. В электромагните с П-образным магнитопроводом, показанным на рис. 4, тяговое усилие создается двумя полюсами, внутренним и наружным, площади которых соответственно обозначены $S_{П1}$ и $S_{П2}$. Второй тип магнитной системы с Ш-образным магнитопроводом, показанный на рис. 5, имеет три полюса, внутренний, средний и наружный, площади которых обозначены соответственно $S_{П1}$, $S_{П3}$ и $S_{П2}$.

Анализ условий обеспечения максимума тягового усилия ОМП показывает, что в магнитопроводе должно выдерживаться соотношение площадей полюсов:

– в П-образной системе $S_{П1} = S_{П2} = S$;

– в Ш-образной системе $S_{П3} = S_{П1} + S_{П2} = S$.

В результате, ориентируясь на исходные уравнения (1) – (4), можно получить соотношение, связывающее в ОМП грузоподъемность F_M с площадью полюса S , в общем виде для обоих типов ОМП:

$$S = 0,5 \frac{F_M}{F_{1P}}. \quad (14)$$

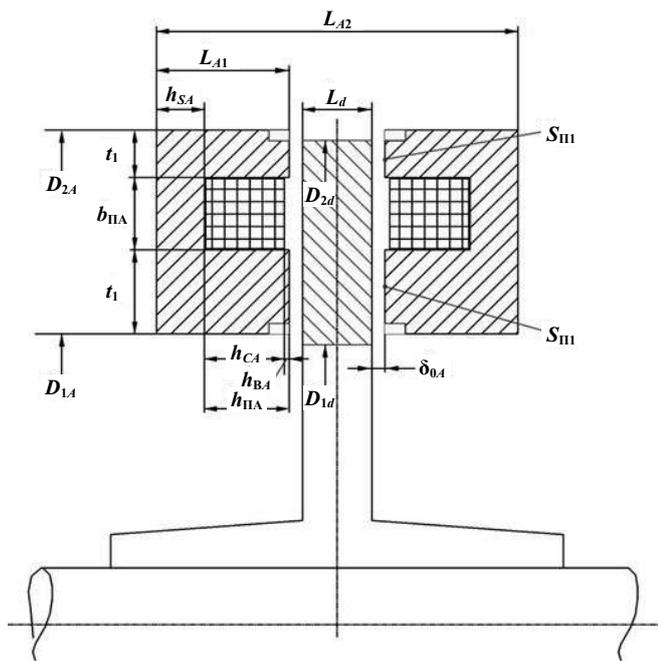


Рис. 4. П-образная магнитная цепь ОМП

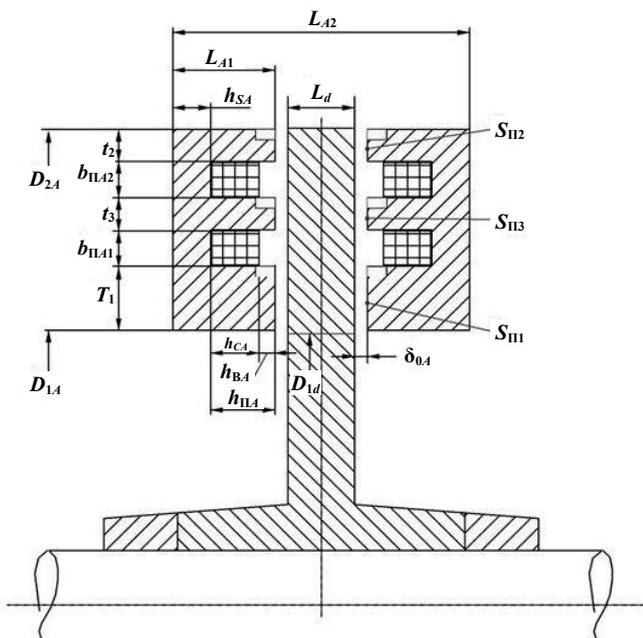


Рис. 5. Ш-образная магнитная цепь ОМП

По аналогии с выбором основных размеров РМП определим размеры ОМП, удовлетворяющие полученному из уравнения (14) значению площади полюса. В качестве главных размеров ОМП, определяющих площадь электромагнита, обращенную к диску, примем внутренний D_{1A} и внешний D_{2A} диаметры электромагнита. Кроме того, соотношение

площади, занятой полюсами, $2S$ к общей площади, равной $\pi D_{2A}^2 - D_{1A}^2 / 4$, обозначим коэффициентом площади полюсов ОМП – k_{SA} , т. е.

$$k_{SA} = \frac{8S}{\pi(D_{2A}^2 - D_{1A}^2)}. \quad (15)$$

Анализ существующих магнитных систем ОМП позволяет установить ряд соотношений между основными размерами, которые близки к оптимальным и мало меняются от образца к образцу и могут быть использованы при проектировании ОМП. В частности, соотношение между D_{2A} и D_{1A} , которое обозначим коэффициентом диаметров $k_{DA} = D_{1A}/D_{2A}$, обычно изменяется в пределах $0,6 \div 0,7$, в зависимости от выбранной компоновки ОМП в машине.

Изменение коэффициента k_{SA} возможно в пределах $0,5 \div 0,6$ в зависимости от типа магнитной системы. В традиционных магнитных системах ОМП с открытыми пазами значение k_{SA} можно связать с выбором типа магнитной системы. Причем, меньшее значение соответствует Ш-образной системе.

В результате, из уравнения (15) можно получить соотношение, связывающее площадь полюса S с внешним диаметром D_{2A} :

$$S = 0,4D_{2A}^2 k_{SA} (1 - k_{DA}^2). \quad (16)$$

Приравнявая уравнения (14) и (16), получим итоговое выражение для определения внешнего диаметра электромагнита ОМП:

$$D_{2A} = \sqrt{1,25F_M / F_{1PA} k_{SA} (1 - k_{DA}^2)}.$$

Выбор значений удельной нагрузки F_{1PA} на первом этапе проектирования осуществляется с учетом ряда существующих общих конструктивных особенностей магнитных систем ОМП. Обычно зубцы и пазы в П- и Ш-магнитопроводах выполняются с параллельными стенками и на коронках зубцов иногда имеются небольшие скосы для установки защитных шайб, закрывающих пазы. В результате, по аналогии с РМП, имеющими зубцы с параллельными стенками, следует принимать коэффициент индукции $k_{BA} = 1,1$ для П-системы и $k_{BA} = 1,2$ для Ш-магнитной системы ОМП, где влияние магнитных потоков рассеяния проявляется в большей степени.

Соответственно, по уравнению (3) расчетные значения удельной грузоподъемности составят для П- и Ш-систем $F_{II,P} = 90 \text{ Н/см}^2$ и $F_{III,P} = 80 \text{ Н/см}^2$.

Выбор значений коэффициентов k_{SA} и k_{DA} можно связать с величиной F_M . Обычно для машин средней мощности применяются ОМП с $F_M < 50$ кН, а для крупных машин – $F_M > 50$ кН. Учитывая это, в качестве первого приближения для проектируемого варианта ОМП можно воспользоваться следующими данными:

Грузоподъемность ОМП, кН	< 50	> 50
Тип магнитной системы	П	Ш
k_{SA}	0,6	0,5
k_{DA}	0,7	0,6
F_{1P} , Н/см ²	90	80

После определения внешнего и внутреннего диаметров, являющихся базовыми размерами ОМП, переходим к расчету остальных размеров для каждого типа магнитной системы. Исходя из значения площади полюса S , полученного из уравнения (14), и выбранных диаметров D_{2A} и D_{1A} , находим размеры полюсов ОМП.

В П-образном магнитопроводе ширина внутреннего t_1 и внешнего t_2 полюсов определяются из соотношений:

$$t_1 \cong k_{ZA} \frac{S}{\pi D_{1A}}; \quad (17)$$

$$t_2 \cong k_{ZA} \frac{S}{\pi D_{2A}}, \quad (18)$$

где k_{ZA} – коэффициент, учитывающий увеличение ширины полюса за счет шлицов, который в первом приближении можно принять $k_{ZA} = 1,0 \div 1,1$ в соответствии с принятой конструкцией шлицов магнитопровода.

Для Ш-образного магнитопровода в уравнениях (17) и (18) величину S следует принять равной половине значения, полученного из уравнения (14), а ширину среднего полюса t_3 можно определить из соотношения:

$$t_3 \cong k_{ZA} \frac{S}{\pi(D_{1A} + D_{2A} + 2(t_1 - t_2))}.$$

Длина магнитопровода L_{A1} определяется из условия возможности размещения катушек возбуждения и обеспечения прохождения рабочего магнитного потока через спинку магнитопровода.

Величина зазора между электромагнитами и диском ротора в ОМП обычно выбирается на 10% больше, чем в РМП, т. е. $\delta_{0A} = 1,1\delta_0$.

При создании рабочего магнитного потока намагничивающая сила катушки AW должна преодолеть два зазора δ_{0A} и уравнение (11) для ОМП будет иметь следующий вид:

$$AW_A = 0,16B_{0HA}\delta_{0A}k_{HA},$$

где $B_{0HA} = B_{0PA}/k_{ПА}^{0,5}$ – индукция в зазоре ОМП при номинальной нагрузке, а $k_{HA} = 1,25$ – коэффициент насыщения магнитопровода ОМП.

Площадь поперечного сечения катушки возбуждения ОМП определим по аналогии с выражением (9) для РМП:

$$S_{CA} = AW_A/i_{CPA}k_{CA},$$

где k_{CA} – коэффициент заполнения катушек ОМП медью, который несколько выше, чем у катушки РМП, и может быть принят равным 0,7.

Число витков W_{CA} и расчетные сечения провода q_{PA} катушки ОМП при заданном номинальном токе I_{HA} , определим из соотношений, аналогичных уравнениям (10) и (11) для РМП:

$$W_{CA} = AW_A/I_{HA};$$

$$q_{PA} = S_{CA}k_{CA}/W_{CA}.$$

Определим размеры пазов магнитопровода ОМП для размещения катушек, имеющих поперечное сечение S_{CA} . Ширина пазов для выбранных значений D_{1A} , D_{2A} , t_1 , t_2 , t_3 и в зависимости от типа магнитопровода может быть определена из следующих соотношений:

– для П-образного магнитопровода

$$b_{ПА} = 0,5(D_{2A} - D_{1A}) - t_1 - t_2;$$

– для Ш-образного магнитопровода

$$b_{ПА1} = b_{ПА2} = 0,25[D_{2A} - D_{1A} - 2(t_1 + t_2 + t_3)].$$

Ширина катушки

$$b_{CA} = b_{ПА} \text{ или } b_{CA} = b_{ПА1},$$

высота катушки

$$h_{CA} = S_{CA} / b_{CA}.$$

Для надежного закрепления катушек в пазу глубина паза $h_{ПА}$ должна быть выбрана больше, чем принята h_{CA} , на величину выступа h_{BA} , т. е.

$$h_{ПА} = h_{CA} + h_{BA},$$

где $h_{BA} = h_{КА} + h_{РА}$, $h_{КА}$ – высота клина (заливки); $h_{РА}$ – высота буртика; на первом этапе проектирования можно принять $h_{BA} = 3 \div 4$ мм.

Если высоту спинки h_{SA} в магнитопроводе ОМП принять на 10% больше, чем ширина внутреннего полюса t_1 , то для определения длины электромагнита L_{A1} можно воспользоваться соотношением

$$L_{A1} = h_{ПА} + h_{SA},$$

где $h_{SA} = 1,1t_1$.

При осевом размере диска L_d , равном ширине внутреннего полюса, т. е. $L_d = t_1$, общая

длина ОМП, состоящего из двух электромагнитов и диска,

$$L_{A2} = 2L_{A1} + L_d + 2\delta_{0A}.$$

Таким образом, на основе рассмотренных расчетных соотношений могут быть разработаны один или несколько проектных вариантов РМП, отличающихся значениями параметров или коэффициентов в пределах оговоренной выше возможной вариации. Для этих вариантов проводятся в дальнейшем поверочные электромагнитные расчеты по определению основных электромеханических характеристик РМП и ОМП, позволяющих более полно провести сопоставление и оценить проектные варианты с целью выбора оптимального.

Литература

1. Магнитный подвес роторов электрических машин и механизмов. Труды ВНИИЭМ. – М.: ВНИИЭМ, 1989. – Т. 89. – 135 с.
2. Журавлёв Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.: ил.
3. Особенности проектирования магнитных подшипников для крупных машин / Верещагин В.П., Рогоза А.В. / Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – Т. 106. – С. 15 – 18.

Поступила в редакцию 17.11.2009

Владимир Петрович Верещагин, д-р техн. наук, главный науч. сотрудник, т. 365-50-73.
Александр Валерьевич Рогоза, аспирант, начальник научно-производственного комплекса, т. 366-04-79.
Татьяна Николаевна Савинова, младший науч. сотрудник, т. 366-26-10.
 E-mail: vniiem@vniiem.ru.