

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

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

Расширение применения электромагнитных подшипников (ЭМП) в различных областях техники тесно связано с необходимостью совершенствования способов поиска оптимальных решений для каждого конкретного случая. Сравниваются различные типы ЭМП по критериям удельной массы и энергопотребления. Это позволяет объективно оценить технический уровень принимаемых решений и выбрать предпочтительный рабочий вариант. Кроме того, анализ динамических процессов управления ЭМП показывает, что быстродействие определяется установленной (выходной) мощностью аппаратуры управления. Эти факторы необходимо учитывать при сравнении наиболее распространённых типов магнитных систем ЭМП с различным числом зубцов (полюсов). Приведённые данные могут представлять интерес для разработчиков и потребителей ЭМП.

Ключевые слова: электромагнитные подшипники, магнитные системы, энергопотребление, быстродействие.

При решении вопросов выбора оптимальных соотношений между геометрическими размерами и энергетическими параметрами радиальных и осевых электромагнитных подшипников (РМП и ОМП), кроме опубликованных ранее методик проектирования и поверочных расчётов [1, 2], целесообразно ещё дополнительно рассмотреть некоторые общие положения, вытекающие из анализа существующих электромагнитных и динамических процессов этих устройств.

С точки зрения потребителя для электромагнитных подшипников (ЭМП) основными техническими характеристиками являются массогабаритные и энергетические параметры ОМП и РМП. Связь и взаимовлияние этих параметров для РМП и ОМП в зависимости от действующей на них статической нагрузки была частично рассмотрена при разработке упомянутых выше методик. Однако применение для оценки критерия по показателям удельной массы и энергопотребления в связи с их новизной требует пояснения. Кроме того, анализ динамики управления токами в катушках электромагнитов тоже может повлиять на выбор оптимальных решений, поэтому необходимо отдельно рассмотреть эти вопросы.

Обычно быстродействие электромагнита в создании тягового усилия оценивается по величине постоянной времени нарастания тока в обмотке, но при управлении с обратной связью по току в подходах к оценке быстродействия необходимо учитывать характеристики аппаратуры управления.

Целью данной статьи является анализ влияния на быстродействие и удельные показатели ЭМП некоторых конструктивных параметров электромагнитов и характеристик аппаратуры управления при сравнении магнитных систем РМП и ОМП с различным числом зубцов (полюсов).

Формула Максвелла для определения тягового усилия двухполюсного электромагнита F_H , действующего на ротор, при плоскопараллельном и равномерном распределении индукции B_H в зазоре между полюсом площадью S_M и ротором имеет вид

$$F_H = \frac{B_H^2 S_M}{\mu_0}, \quad (1)$$

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

Такая форма записи соотношения (1) связывает тяговое усилие с геометрическими размерами магнитопровода в виде площади S_M и состоянием магнитной цепи, характеризуемым индукцией B_H . Это удобно для проектирования и электромагнитных расчётов ЭМП. Однако при анализе динамических свойств чаще используют выражение для F_H , полученное из энергетических соотношений, которое отражает зависимость тягового усилия от индуктивности электромагнита L и номинального тока I_H , протекающего по обмотке. Это выражение имеет следующий вид:

$$F_H = \frac{L I_H^2}{2\delta}, \quad (2)$$

где δ – зазор между статором и ротором.

Если считать, что обмотка возбуждения электромагнита с числом витков w при токе I_H создает индукцию B_H в зазоре δ , то можно записать:

$$B_H = \mu_0 I_H \frac{w}{2\delta}. \quad (3)$$

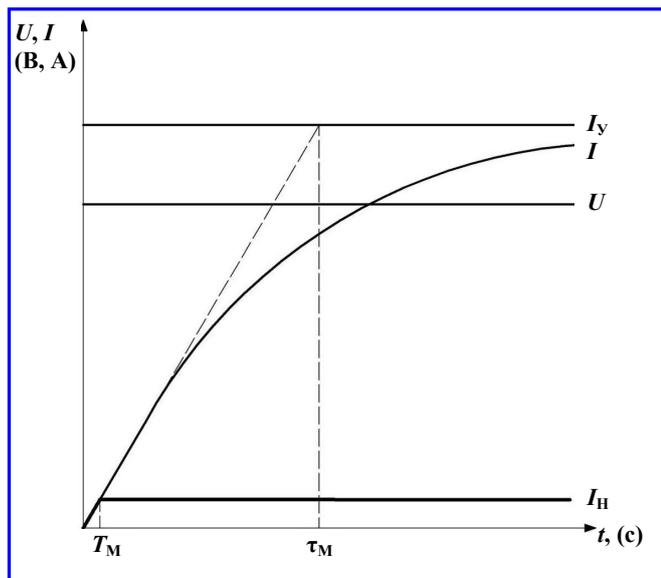


Рис. 1. Переходная характеристика электромагнита

Из уравнения (1), (2), и учитывая (3), получим выражение для индуктивности L в следующем виде:

$$L = \frac{\mu_0 w^2 S_M}{2\sigma} \quad (4)$$

Обычно динамические свойства электромагнита характеризуют постоянной времени τ_M , равной отношению индуктивности L к омическому сопротивлению обмотки R , т. е.

$$\tau_M = \frac{L}{R} \quad (5)$$

Однако системы управления ЭМП для повышения быстродействия рабочего органа (РО) используют форсировку с отрицательной обратной связью по току в обмотке электромагнита.

Процессы, протекающие в РО, зависят от параметров аппаратуры и электромагнита.

При форсировке обмотка электромагнита подключается к источнику питания с напряжением U , и в ней начинает нарастать ток I , который без обратной связи может достигать установившегося значения, определяемого соотношением

$$I_y = \frac{U}{R} \quad (6)$$

Однако обратная связь по току ограничивает величину I на уровне номинального значения I_H , соответствующего заданной входной величине РО.

На переходной характеристике, показанной на рис. 1, жирной линией отражён процесс изменения тока в обмотке до I_H . Поскольку $I_H \ll I_y$, то и постоянная времени T_M для детерминированной модели РО оказывается значительно меньше τ_M , т. е. $T_M \ll \tau_M$. Из рассмотрения рис. 1 следует, что величина T_M определяется соотношением I_H и I_y и составляет:

$$T_M = \frac{\tau_M I_H}{I_y} \quad (7)$$

Аппаратура управления ЭМП, обеспечивающая регулирование тока в обмотках электромагнита, характеризуется следующими основными максимальными выходными параметрами: напряжением питания U_M и током I_M канала управления, произведение которых называют установленной мощностью аппаратуры управления, определяемой из соотношения следующего вида:

$$P_A = U_M I_M \quad (8)$$

Если значение I_M оценить в долях от I_M , то с использованием коэффициента $k_A < 1$ имеем

$$I_H = k_A I_M \quad (9)$$

В результате подстановки (5) и (6) в (7) получаем

$$T_M = L \frac{I_H}{U}$$

или с учётом (8) имеем

$$T_M = \frac{L I_H^2}{k_A U I_M} = \frac{2 F_H \delta}{k_A P_A} \quad (10)$$

Таким образом, соотношение (10) для постоянной времени апериодического звена, соответствующего электромагниту с обратной связью по току управляемому от аппаратуры, показывает, что при выбранных значениях k_A и δ быстродействие зависит в основном от величины соотношения F_H и P_A , а не от постоянной времени τ_M , которой принято характеризовать быстродействие автономного электромагнита.

В связи с этим при сравнении различных магнитных систем ЭМП, имеющих одинаковые нагрузки F_H , но отличающихся количеством зубцов (полусов), следует учитывать, что их быстродействие при условии сохранения «установленной»

мощности и параметров аппаратуры остаётся практически неизменным.

Наиболее приемлемыми для сравнения различных по конструкции однотипных ЭМП являются удельные массовые и энергетические показатели, о которых коротко упоминалось в [2] по методике поверочного расчёта ЭМП. Однако в связи с появлением в печати публикаций, затрагивающих вопросы сравнения ЭМП различных разработчиков, целесообразно более подробно остановиться на рассмотрении этих критериев.

Показатель удельной массы ЭМП характеризует уровень затрат активных материалов электромагнита, приходящихся на единицу создаваемого тягового усилия. Поскольку суммарная масса ЭМП состоит из активных частей статора G_S и ротора G_R , то для определения удельной массы G_1 можно воспользоваться соотношением следующего вида:

$$G_1 = \frac{(G_S + G_R)}{F}, \text{ кг/кН},$$

где F – нагрузка, действующая на ЭМП.

Обычно показатель удельной массы определяют для двух характерных режимов, соответствующих номинальной нагрузке – F_H и максимальной нагрузке (грузоподъёмности) – F_M , т. е. $G_{1H} = \frac{(G_S + G_R)}{F_H}$ и

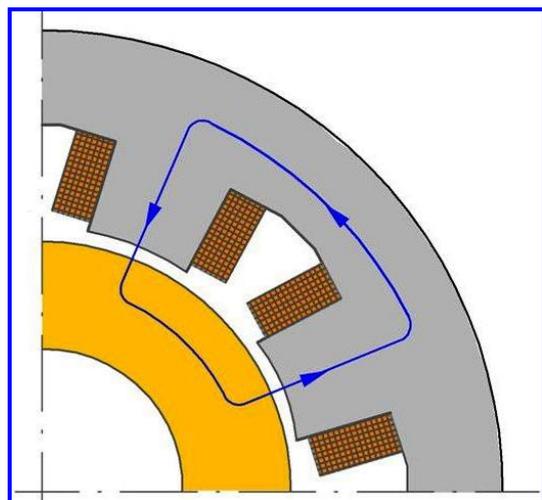
$$G_{1M} = \frac{(G_S + G_R)}{F_M}. \text{ Следует отметить, что для одно-}$$

значности сравнения различных типов ЭМП необходимо пользоваться показателем G_{1M} , так как он соответствует предельному режиму, в котором магнитная система ЭМП близка к насыщению, и тем самым лимитирована величина возможной нагрузки. Для режима номинальной нагрузки показатель $G_{1H} > G_{1M}$ и зависит от принятых запасов по F_H по отношению к F_M . Выбор соотношения F_H/F_M зависит от условий работы ЭМП и может быть различным, что повлияет на величину G_{1H} и, соответственно, на объективность оценки сравниваемых вариантов.

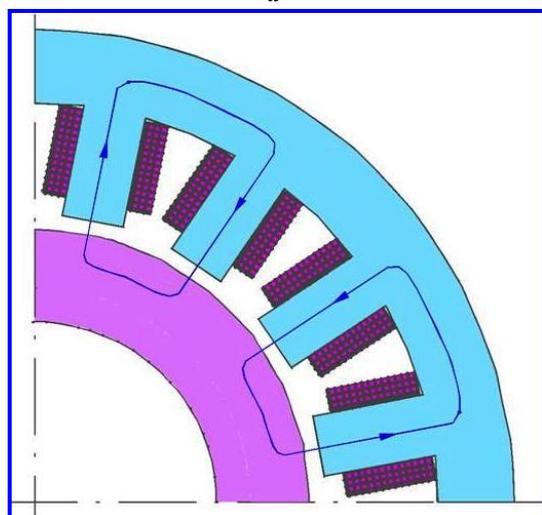
Рассмотрим некоторые изменения удельной массы G_{1M} для различных типов ЭМП. Общий характер изменения G_{1M} с ростом воздействующей на ЭМП нагрузки F_M , как отмечалось в [3], посвящённой ЭМП для крупных машин, можно в первом приближении представить в виде соотношения $G_{1M} = k\sqrt{F_M}$, где k – постоянный коэффициент пропорциональности. Несмотря на прогнозируемый рост

G_{1M} с увеличением F_M , следует отметить, что с увеличением числа зубцов (поллюсов) магнитной системы ЭМП при неизменном значении F_M можно добиться некоторого снижения G_{1M} . Это обусловлено закономерным уменьшением высоты спинки в магнитопроводе, которое сопряжено со снижением магнитного потока в спинке при увеличении числа зубцов. В результате общие габаритные размеры и соответственно масса многополюсных магнитных систем ЭМП при одинаковых F_M оказываются ниже, чем у систем с меньшим числом зубцов (поллюсов).

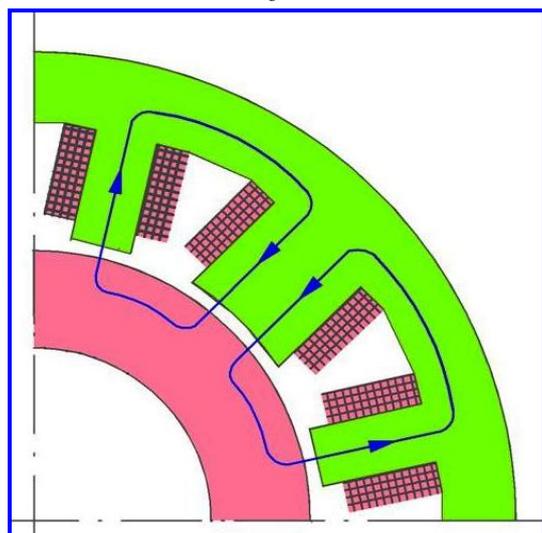
Однако многополюсные ЭМП обычно обладают большим энергопотреблением, затрачиваемым на возбуждение рабочего магнитного потока, по сравнению с ЭМП, имеющими меньшее число полюсов. Для оценки и сравнения уровня энергопотребления ЭМП можно воспользоваться удельным показателем энергопотребления, аналогичным рассмотренному выше для массы. Таким показателем является удельное энергопотребление обмоток статора P_{1BH} , характеризующее долю общих потерь в статоре в номинальном режиме P_{BH} , приходящихся на единицу создаваемого тягового усилия F_H . Исходя из этого, значение P_{1BH} может быть получено из соотношения следующего вида: $P_{1BH} = P_{BH} / F_H$. Поскольку в номинальном режиме основную нагрузку F_H обычно воспринимают только две верхние зоны РМП или один из электромагнитов ОМП, то в обмотках этих частей протекает основной ток I_H , а в обмотках разгруженных в это время противоположных частей протекает ток, который значительно меньше, чем I_H , и его влиянием на величину потерь можно пренебречь. В результате для определения энергопотребления P_{BH} в номинальном режиме можно воспользоваться относительно простыми выражениями для РМП: $P_{BH} = 2I_H^2 R$, а для ОМП: $P_{BH} = I_H^2 R_A$, где R , R_A – сопротивление обмотки зоны РМП и обмотки одного ОМП соответственно. При небольших изменениях нагрузки F_H , действующей на ЭМП, в пределах линейности магнитной системы, где насыщение практически не сказывается, можно считать, что удельное энергопотребление сохраняется неизменным и соответствует значению номинального режима. Однако в режиме максимальной нагрузки оно может существенно возрасти за счёт насыщения магнитопровода. В связи с чем при сравнении различных типов ЭМП следует рассматривать режим номинальной нагрузки. Кроме того, наиболее продолжительным по времени работы является номинальный режим, и поэтому корректнее по удельному энергопотреблению в этом режиме судить о тепловом состоянии и общем уровне энергопотребления ЭМП.



a



b



v

Рис. 2. Магнитные цепи рабочих зон РМП:
a – с 8 зубцами; *b* – с 16 зубцами;
v – с 12 зубцами

Рассмотрим некоторые общие тенденции изменения удельного энергопотребления, возникающего при сопоставлении различных магнитных систем ЭМП. По мере увеличения числа зубцов (полюсов) магнитных систем РМП и ОМП обычно уровень удельного энергопотребления возрастает, даже несмотря на закономерное сравнительное увеличение общего объёма обмотки в доле полной массы статора. При одинаковых нагрузках и соответственно равной общей площади зубцов, обращённой к ротору, у сравниваемых ЭМП сечение проводников в катушках уменьшается, так как общее число катушек в обмотке возрастает с увеличением числа зубцов.

В результате полное сопротивление обмоток зоны РМП или одного ОМП и, соответственно, удельное энергопотребление обычно возрастают, в первом приближении, пропорционально увеличению числа зубцов магнитных систем ЭМП.

В качестве примера сравним несколько типов РМП с различным числом зубцов, для каждого из которых магнитные цепи рабочих зон показаны на рис. 2.

Эти типы РМП охватывают большинство известных случаев применения ЭМП в различных машинах и агрегатах, включая крупные машины с массой ротора более 1,5 т. В целом представленные варианты можно разделить на два класса по типу магнитопровода: с одинаковыми зубцами – РМП 1 и с разными – РМП 2. Общая оценка этих вариантов магнитных систем уже проводилась в опубликованных ранее работах [1, 2] при проектировании и расчётах, а в данном случае проведено дополнительно более детальное количественное сопоставление некоторых характеристик параметров и удельных показателей, полученных из расчётов.

В табл. 1 приведены результаты поверочных электромагнитных расчётов отмеченных типов РМП при воздействии на них одинаковых нагрузок: в номинальном режиме – 10 кН и в максимальном – 18 кН (см. п. 2 табл. 1). Общие габаритные размеры РМП (см. п. 3 табл. 1) с увеличением числа зубцов несколько уменьшаются за счёт снижения внешнего диаметра и общей длины статора, происходящего из-за уменьшения спинки магнитопровода и вылета лобовых частей катушек возбуждения. Кроме того, внутренний диаметр пакета ротора у многополюсных магнитных систем РМП получается больше, чем у РМП с 8 зубцами. Соответственно уменьшается масса РМП с увеличением числа зубцов. В результате показатель удельной массы у РМП с 8 зубцами оказывается примерно на 60% выше, чем у РМП с 16 и 12 зубцами (см. п. 10 табл. 1). Однако показатель удельного энергопотребления у РМП с 16 зубцами получается примерно в 2 раза больше, чем у РМП с 8 зубцами (см. п. 11 табл. 1). Можно снизить это энергопотребление, сохранив удельную массу РМП с 16 зубцами, если выбрать магнитную систему РМП с 12 зубцами, которая технологически сложнее, так как имеет разные по размерам зубцы и, соответственно, катушки возбуждения. Удельное энергопотребление в номинальном режиме у РМП с 12 зубцами оказывается только на 16% больше, чем у РМП с 8 зубцами, а удельная масса меньше на 60%.

Хотя потери в пакете ротора на перемагничивание в номинальном режиме у РМП с 12 и 16 зубцами по сравнению с РМП, имеющим 8 зубцов, из-за роста частоты перемагничивания примерно на 40% оказываются выше (см. п. 12 табл. 1). В целом применение РМП с 12 зубцами сопряжено с увеличением энергопотребления примерно на 56%, но может оказаться целесообразным, если технологические сложности смогут окупиться отмеченным преимуществом по удельной массе.

Кроме рассмотренной оценки по удельным показателям, представляет интерес сопоставление и других технических данных отмеченных типов РМП.

По уровню использования магнитной системы рассматриваемые РМП практически не отличаются между собой. При максимальной нагрузке (см. п. 5 табл. 1) индукция в некоторых частях магнитопровода достигает значений до 1,6 Тл, соответствующих насыщению применяемых материалов. При номинальном режиме индукция в магнитопроводе снижается в среднем до 1,2 Тл. Индукция в зазоре между статором и ротором (см. п. 4 табл. 1) изменяется, соответственно, от 1,2 до 0,9 Тл.

Особенно следует обратить внимание на постоянство быстродействия рассматриваемых РМП в системе управления. Поскольку ток в катушках в номинальном режиме для всех типов РМП составляет около 10 А (см. п. 6 табл. 1), что соответствует примерно 1/3 от максимально допустимого значения, установленного для аппаратуры управления, то для управления может быть использована аппаратура с одинаковой установленной мощностью P_A . В этом случае при управлении рассматриваемыми РМП с отрицательной обратной связью по току можно улучшить быстродействие. Из соотношения (10) вытекает, что постоянная времени T_M звена соответствующего РО, несмотря на разницу исходных постоянных времени τ_M (см. п. 9 табл. 1), для сравниваемых вариантов получаются одинаковыми и почти в 50 раз меньше, чем τ_M .

Проведённое сравнение РМП позволяет судить о характере изменения параметров и свойств, происходящих в зависимости от числа зубцов магнитных систем. Аналогично сравним ОМП с наиболее распространёнными двумя типами магнитных систем, имеющими в поперечном сечении П- и Ш-образные профили, магнитные цепи которых схематически показаны на рис. 3.

Некоторые расчётные данные по этим типам ОМП сведены в табл. 2. Для удобства сравнения расчёты выполнены при одинаковых значениях номинальной и максимальной нагрузок (см. п. 1 табл. 2), соответственно 50 и 80 кН, определяющих коэффициент перегрузки 1,6. Основные габаритные размеры

Таблица 1

Сравнение РМП

№ п/п	Параметр	Тип магнитопровода		
		РМП 1	РМП 2	РМП 1
1	Число зубцов, шт.	8	12	16
2	Нагрузка, кН номинальная максимальная	10	10	10
		18	18	18
3	Габаритные размеры статора, мм диаметр внутренний диаметр внешний длина пакета длина общая	275	275	275
		475	420	420
		200	200	200
		249	230	230
4	Индукция в зазоре, Тл номинальная максимальная	0,88	0,89	0,89
		1,18	1,2	1,2
5	Индукция в магнитопроводе, Тл номинальная максимальная	1,26	1,1	1,16
		1,65	1,47	1,55
6	Ток в катушках, А номинальная максимальная	10	9,6	9,9
		16,6	13,8	15,4
7	Энергопотребление, Вт номинальное максимальное	103	114	195
		281	234	473
8	Индуктивность, Гн номинальная	0,15	0,16	0,16
9	Постоянная времени, с номинальная	0,3	0,26	0,16
10	Удельная масса, кг/кН номинальная максимальная	25,2	15,7	15,7
		14	8,7	8,7
11	Удельное энергопотребление, Вт/кН номинальное максимальное	10,3	11,4	19,5
		15,6	13,5	26,3
12	Потери в роторе, Вт номинальные	134	187	187

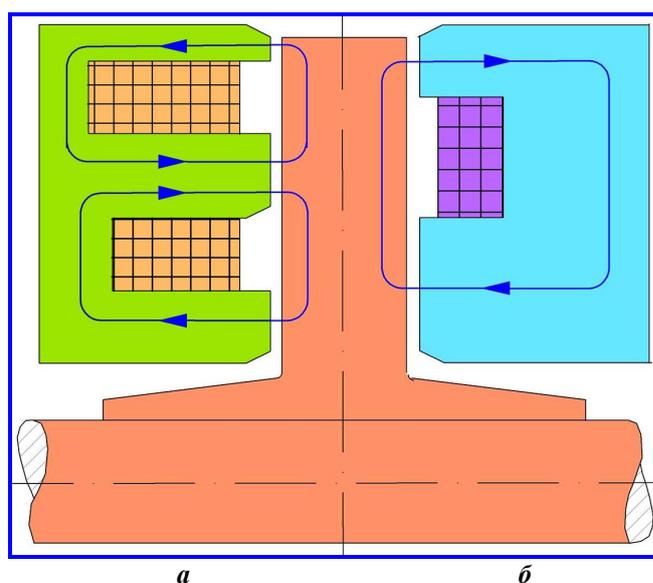


Рис. 3. Магнитные цепи ОМП:
а – Ш-образная; б – П-образная

Таблица 2

Сравнение ОМП

№ п/п	Параметр	Тип магнитопровода	
		П-образный	Ш-образный
1	Нагрузка, кН номинальная максимальная	50	50
		80	80
2	Габаритные размеры электромагнита, мм диаметр внешний диаметр внутренний длина электромагнита	440	440
		192	192
		90	90
3	Индукция в зазоре, Тл номинальная максимальная	1,15	1,2
		1,45	1,52
4	Индукция в магнито-проводе, Тл номинальная максимальная	1,12	1,3
		1,51	1,61
5	Ток в катушке, А номинальный максимальный	12,1	12,3
		16,3	18,5
6	Энергопотребление, Вт номинальное максимальное	131	243
		236	548
7	Индуктивность, Гн номинальная	0,57	0,56
8	Постоянная времени, с номинальная	0,64	0,35
9	Удельная масса, кг/кН номинальная максимальная	4,4	4,1
		2,7	2,6
10	Удельное энергопотребление, Вт/кН номинальное максимальное	2,62	4,9
		2,95	6,85

статорных частей у каждого типа электромагнита ОМП (см. п. 2 табл. 2) приняты одинаковыми, что упрощает сравнение. Соответственно показатели удельной массы у рассматриваемых типов ОМП практически не отличаются друг от друга (см. п. 9 табл. 2). Судя по уровню индукций в материале магнитопровода (см. п. 4 табл. 2), Ш-образная магнитная система является более использованной, чем П-образная, что сказывается на величине тока в катушках, хотя разница в токах очень небольшая (см. п. 5 табл. 2). Однако величина энергопотребления у Ш-образного ОМП примерно в 2 раза больше, чем у П-образного (см. п. 6 табл. 2) из-за разницы в омическом сопротивлении катушек. Соответственно удельное энергопотребление Ш-образного ОМП примерно в 2 раза выше, чем у П-образного.

Следует отметить, что по динамическим свойствам сравниваемые ОМП при одинаковой установленной мощности аппаратуры практически не отличаются друг от друга по аналогии с РМП из

рассмотренного выше соотношения (10), несмотря на разницу исходных постоянных времени электромагнитов (см. п. 8 табл. 2), получаем одинаковые постоянные времени T_M для детерминированного звена, представляющего оба типа форсированных ОМП. Однако анализ влияния вихревых токов, возникающих в массивных ферромагнитных магнитопроводах ОМП, показывает, что в Ш-образных системах по сравнению с П-образными это влияние проявляется в меньшей степени, что может создать предпочтение для выбора первых.

Проведённое сопоставление различных типов ЭМП и рассмотренные их отдельные преимущества и недостатки позволяют воспользоваться некоторыми общими подходами при выборе предпочтительного типа ЭМП и сделать выводы.

Выводы

1. Для объективного сопоставления различных типов ЭМП предлагается воспользоваться удельными показателями массы и энергопотребления, которые только совместно могут характеризовать общий уровень разработки.

2. По мере увеличения числа зубцов РМП возможное снижение показателя удельной массы обычно сопровождается значительным ростом удельного энергопотребления, что требует применения интенсивного охлаждения.

3. Динамические свойства электромагнита, как РО САУ ЭМП, при форсированном управлении током в катушках практически не зависят от числа зубцов магнитной системы и определяются установленной мощностью аппаратуры управления.

4. Сравнение наиболее распространённых магнитных систем ОМП показывает, что при одинаковой удельной массе многополюсные электромагниты имеют повышенное удельное энергопотребление, но могут иметь предпочтение для применения в крупных машинах.

Литература

1. Методика проектирования электромагнитных подшипников / В. П. Верещагин, А. В. Рогоза, Т. Н. Савинова // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 113. – № 6. – С. 3 – 12.
2. Методика поверочного расчёта электромагнитных подшипников / В. П. Верещагин, А. В. Рогоза, Т. Н. Савинова // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 117. – № 4. – С. 3 – 12.
3. Особенности проектирования магнитных подшипников для крупных машин / В. П. Верещагин, А. В. Рогоза // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – Т. 106. – С. 15 – 18.

Поступила в редакцию 11.07.2011

Владимир Петрович Верещагин, д-р техн. наук, главный научн. сотрудник, т. (495) 365-50-73, e-mail: vniiem@vniiem.ru.
Александр Валерьевич Рогоза, аспирант, начальник научно-производственного комплекса, т. (495) 366-04-79, e-mail: vniiem@vniiem.ru.