

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

УДК 621.313

МЕТОДИКА ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

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

Рассмотрены основные положения и соотношения между параметрами и размерами для выполнения поверочного расчета радиальных и осевых электромагнитных подшипников. При определении усилий, создаваемых электромагнитами, учтено влияние насыщения магнитопровода, изменения зазора между статором и ротором и влияние магнитного потока рассеяния пазов. Полученные результаты использованы при разработках ФГУП «НПП ВНИИЭМ» электромагнитных подшипников для различных типов машин.

Ключевые слова: электромагнитные подшипники, магнитные системы, расчёты.

Процесс разработки новых электромеханических устройств, к которым относятся электромагнитные подшипники (ЭМП), обычно состоит из двух основных этапов. На первом этапе, как следует из ранее опубликованной статьи [1], в которой рассмотрены некоторые вопросы проектирования ЭМП, определяются основные размеры электромагнитов, необходимые для создания требуемых усилий. На втором этапе, которому посвящена данная статья, выполняются поверочные электромагнитные расчеты для некоторых проектных вариантов ЭМП с целью сопоставления и выбора из них рабочего варианта.

В качестве исходных данных для второго этапа используется часть общих технических требований, вытекающих из условий работы ЭМП, и ряд конкретных данных (по основным размерам, типу материала магнитопроводов, типу провода, размерам обмоток и т. п.), полученных при проектировании. Кроме того, эти данные должны быть откорректированы с учетом результатов предварительной конструктивной проработки вариантов, выбранных для дальнейшего сопоставления.

По аналогии с методикой поверочного расчета для электрических машин [2] исходные данные для поверочного расчета ЭМП должны включать пункты, приведенные в таблице.

Целью поверочного электромагнитного расчета ЭМП является определение энергетических показателей и нагрузочных характеристик, представляющих зависимость создаваемого тягового усилия от тока, протекающего в катушках, и от отклонений ротора из центрального положения по данной оси. Движение ротора по поперечной оси в пределах зазора в страховочных подшипниках, как показывают соответствующие исследования [3], мало влияет на величину тягового усилия, создаваемого по данной оси. Этим влиянием можно пренебречь. Однако составляющая усилия, возникающего по поперечной оси, от зоны данной оси может оказывать заметное влияние и проявляться как «отрицательная» позиционная жесткость. Она может быть оценена, ориенти-

ровочно, в 10 – 15 % от «отрицательной» жесткости подшипника, действующей по данной оси.

Решение расчетных задач с достаточной для практических целей точностью связано с необходимостью исследования существующих картин распределения магнитных полей в электромагнитах и с изучением протекающих электромагнитных процессов в ЭМП. Для анализа сложных электромеханических устройств с циклической симметрией, к числу которых относятся магнитные системы ЭМП, в последние годы в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» [4] широко применяют метод конечных суперэлементов (МКСЭ). Многополюсная магнитная система ЭМП в соответствии с этим методом может быть представлена состоящей из суперэлементов (СЭ), имеющих одинаковую конфигурацию и отличающихся не только местом расположения в общей активной части, но и значениями соответствующих базовых функций. В качестве такого СЭ в магнитной системе радиального электромагнитного подшипника (РМП) примем сектор активной части зубцово-пазовой области магнитопровода, примыкающей к одному из зубцов двухполюсной магнитной системы, которую при симметричном расположении ротора относительно зубцов в первом приближении можно рассматривать как консервативную магнитную систему. Для примера рассмотрим магнитную цепь рабочей зоны РМП с $Z = 8$, у которой каждый из зубцов зоны, взаимодействующий с ротором, создает только часть общего тягового усилия. Тяговые усилия в целом определяются суммарным воздействием всех зубцов зоны с учетом их пространственного расположения. В частности, для расчета доли усилия, приходящейся на один зубец, можно воспользоваться коэффициентом распределения k_p , значение которого в зависимости от числа зубцов РМП приведено в работе [1]. Кроме того, при смещении ротора из центрального положения вдоль оси зоны изменение величины зазора между зубцами и ротором в РМП зависит от углового положения зубца относительно оси зоны, что необходимо учитывать в значениях базовых функций СЭ при применении МКСЭ для РМП.

Исходные данные для поверочного расчета ЭМП

Параметры	Обозначение
1	2
Технические данные	
Длительно действующая (номинальная) нагрузка, кН Кратковременно действующая (максимальная) нагрузка, кН Коэффициент перегрузки Направление воздействия нагрузки ЭМП (α , град – угол между направлением нагрузки и осями ЭМП), мин^{-1} Скорость вращения ротора Рабочая температура обмотки	F_H F_M $k_{\Pi} = F_M / F_H$ n_M / n_H номинальная / максимальная $T, ^\circ\text{C}$
Статор РМП	
Марка стали, толщина и тип изоляции листов Диаметр (расточки) статора, мм: – внутренний – внешний Длина пакета статора, мм Общая длина статора, мм Тип магнитопровода: – с одинаковыми зубцами – с разными зубцами Число зубцов РМП1, шт. Расчетное число зубцов статора РМП2, шт. Общее число разных зубцов, шт. Тип зубцов Ширина зубца, мм: – в расточке – у основания Высота зубца, мм Размеры паза согласно чертежу	D_{S1} D_{S2} L_{S1} L_{S2} РМП1 РМП2 Z_0 Z Z_p , в том числе малых – Z_M и больших – Z_B прямоугольный или трапецеидальный b_{Z1} b_{Z2} h_Z
Ротор РМП	
Марка стали, толщина и тип изоляции листов Зазор между статором и ротором, мм Зазор до страховочного подшипника, мм Внешний диаметр ротора, мм Внутренний диаметр пакета, мм Длина пакета, мм	δ_0 δ_1 $D_{R1} = D_{S1} - 2\delta_0$ D_{R2} L_{R2}
Катушки РМП	
Марка и размер провода Число витков катушки Число катушек в зоне Число параллельных проводников в катушке Средняя ширина окна малой и большой катушки, мм Ширина стороны катушки, мм Высота катушки, мм Радиус гибки провода, мм	W N_2 , в том числе малых – N_{21} и больших – N_{22} N_1 b_{C1M} и b_{C1B} b_C h_C R_C

Окончание таблицы на стр. 5

Окончание таблицы

1	2
Электромагнит осевого магнитного подшипника (ОМП)	
Марка стали магнитопровода Тип магнитопровода Диаметр электромагнита, мм: – внутренний – внешний Длина электромагнита, мм Формы зубцов Ширина зубцов, мм: – внутреннего – внешнего – среднего Ширина шлица, мм: – внутреннего – внешнего – среднего Диаметр внешнего паза, мм: – внешний – внутренний Диаметр внутреннего паза, мм: – внутренний – внешний Диаметр шлица зубца, мм: – внешнего – среднего – внутреннего Глубина и ширина пазов, мм: – внутреннего – внешнего Зазор до страховочного подшипника, мм Зазор между диском и электромагнитом, мм	П- или Ш-образные D_{1A} D_{2A} L_{A1} прямоугольная или со шлицами t_1 t_2 t_3 $t_{ш1}$ $t_{ш2}$ $t_{ш3}$ $D_{22} = D_{2A} - 2t_2$ $D_{12} = D_{22} - 2b_{ПА2}$ $D_{11} = D_{1A} + 2t_1$ $D_{21} = D_{11} + 2b_{ПА1}$ $D_{32} = D_{2A} - 2t_{ш2}$ $D_{33} = D_{21} + 2t_{ш3}$ $D_{31} = D_{1A} + 2t_{ш1}$ $h_{ПА1}$ и $b_{ПА1}$ $h_{ПА2}$ и $b_{ПА2}$ δ_{1A} δ_{0A}
Ротор (диск) ОМП	
Марка стали диска Диаметр диска, мм: – внешний – внутренний Осевая длина диска, мм	$D_{2d}, D_{2d} = D_{2A} - 2t_{ш2}$ D_{1d} L_d
Катушки ОМП	
Марка и размер провода Число витков каждой катушки Число параллельных проводников в катушке Средний диаметр катушек малой и большой, мм Ширина стороны катушки, мм Высота катушки, мм	$W_A, W_{A1} = W_{A2} = W_A$ N_{1A} D_{C1} и D_{C2} b_{CA1} и b_{CA2} h_{CA1} и h_{CA2}

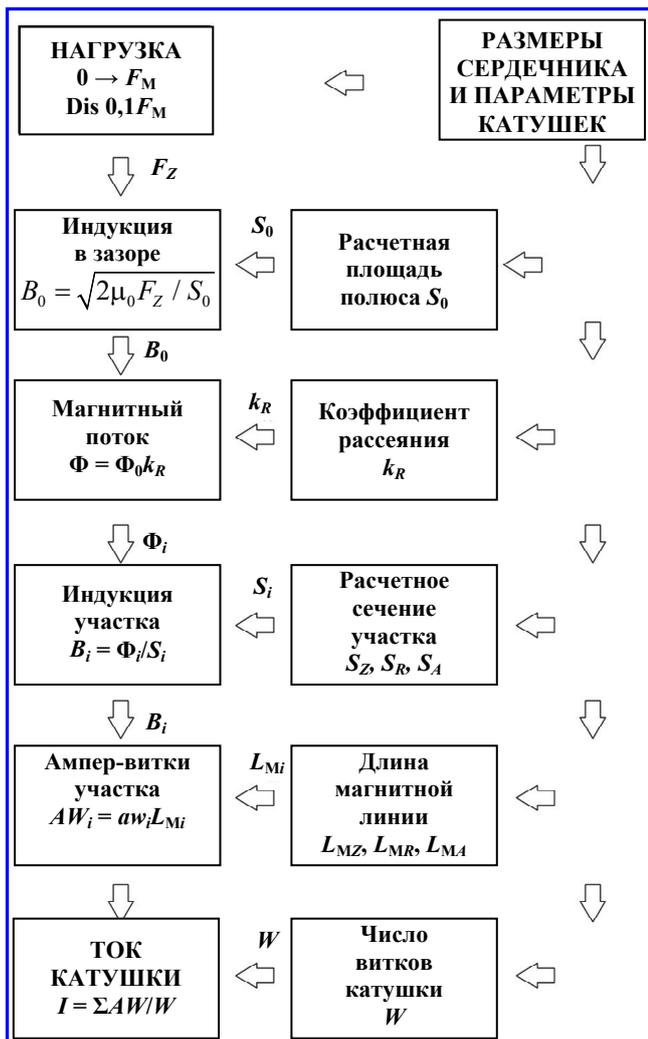


Рис. 1. Алгоритм поверочного расчета

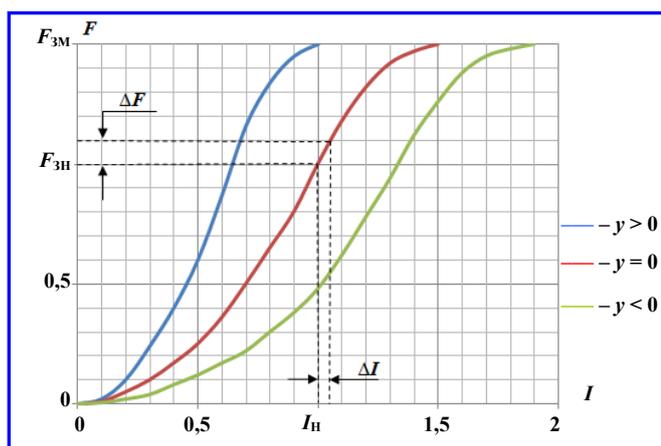


Рис. 2. Нагрузочные характеристики ЭМП

На первом этапе до рассмотрения ЭМП в целом решение задачи сосредоточено внутри СЭ. Анализ картины распределения магнитного поля

между зубцом и ротором в ЭМП показывает, что для определения тягового усилия, создаваемого зубцом, в первом приближении, можно рассмотреть взаимодействие плоских поверхностей зубца и ротора с однородным магнитным полем в зазоре, сосредоточенным в пределах расчетной ширины полюса $b_0 = b_z + 2\delta$. Расчетная длина полюса статора $L_0 = L_{S1} + 2\delta$. В результате определим расчетную площадь полюса S_0 , которая в соответствии с принятым алгоритмом поверочного расчета ЭМП, представленным на рис. 1, позволяет установить для каждого значения тягового усилия зубца F_Z свое значение расчетной индукции в зазоре B_0 , являющейся базовой функцией для расчета магнитной цепи. При рассмотрении магнитной цепи СЭ, как обычно, разделим ее на участки, для которых могут быть применены простые расчетные соотношения между основными магнитными параметрами и размерами, позволяющие определить магнитные напряжения участков. Суммируя магнитные напряжения отдельных участков магнитопровода и зазора по пути протекания потоков, находим общие ампер-витки AW и соответствующее значение тока в катушке I , необходимое для создания заданного тягового усилия. Обычно расчет проводится для нескольких значений тягового усилия зубца, соответствующих изменению общей нагрузки ЭМП в пределах от 0 до F_M , и для разных величин зазора, соответствующих центральному положению ротора и отклонениям до страховочного подшипника.

Полученные данные расчетов позволяют построить нагрузочную характеристику и определить энергетические показатели для отдельной рабочей зоны или ЭМП в целом. Общий вид нагрузочной характеристики ЭМП показан на рис. 2. Средняя кривая соответствует центральному положению ротора, а крайние – отклонениям до страховочного подшипника.

Из нагрузочной характеристики электромагнита для центрального положения ротора ($y = 0$) в точке F_{zn} , соответствующей номинальной нагрузке, для малых отклонений ΔF и ΔI может быть определена токовая жесткость $c_i = \Delta F / \Delta I$, которая отражает регулировочные свойства электромагнита, как исполнительного органа системы управления ЭМП.

Таким образом, рассмотренные основные подходы к решению задач и ряд пояснений к алгоритму поверочного электромагнитного расчета дают общее представление о порядке расчета. Однако этого недостаточно для проведения расчетов или подготовки расчетных программ, поэтому целесообразно привести некоторые расчетные соотношения по конкретным типам магнитных систем РМП и ОМП.

Магнитная система РМП

Среди разнообразия магнитных систем РМП, отличающихся количеством и конструкцией зубцов, можно выделить два основных типа. Первый (РМП1) состоит из одинаковых зубцов и катушек, а второй (РМП2) – из разных (больших и малых) зубцов. Оба типа магнитных систем РМП были рассмотрены в работе [1]. Отличие магнитной системы РМП2 от РМП1 состоит в том, что однополярные зубцы в центре рабочей зоны РМП1 при переходе к РМП2 объединены в большие зубцы, на которых располагаются большие катушки. Поскольку большой зубец представлен как два малых, то в качестве единого СЭ для магнитной системы РМП2 может быть, в первом приближении, принят малый зубец. С учетом этого вводится расчетное число зубцов статора Z , которое для РМП2 составляет $Z = Z_M + 2Z_B$, а для РМП1 – $Z = Z_0$. Однако при таком подходе необходимо учитывать разницу между РМП1 и РМП2, возникающую в расчете длины магнитных силовых линий в спинках ротора и статора из-за изменения расположения зубцов.

Рассмотрим расчетные модели магнитных цепей для рабочих зон РМП1 с $Z = 8$, показанную на рис. 3, и РМП2 с $Z = 12$, показанную на рис. 4.

Участок зазора между зубцом и ротором, в соответствии с принятым упрощенным равномерным распределением индукции полюса B_0 , будем характеризовать расчетной площадью полюса $S_0 = b_0 L_0 10^{-2}$, см².

При таком подходе тяговое усилие зубца F_Z (кН) связано с B_0 и S_0 соотношением следующего вида:

$$B_0 = 5(F_Z/S_0)0,5, \text{ Тл.}$$

Магнитный поток в зазоре Φ_0 определим из соотношения $\Phi_0 = B_0 S_0 10^{-4}$, Вб. Для расчета полного магнитного потока Φ , протекающего в спинке магнитопровода РМП, воспользуемся коэффициентом рассеяния k_R , который как и в явнополюсных электрических машинах [5] в удобном для расчета виде может быть представлен эмпирическими зависимостями:

для РМП1

$$k_R = 1 + \frac{10\delta}{b_{111} + b_{z1}},$$

для РМП2

$$k_R = 1 + \frac{10\delta}{b_{113} + b_{z3}}.$$

В результате получим $\Phi = k_R \Phi_0$.

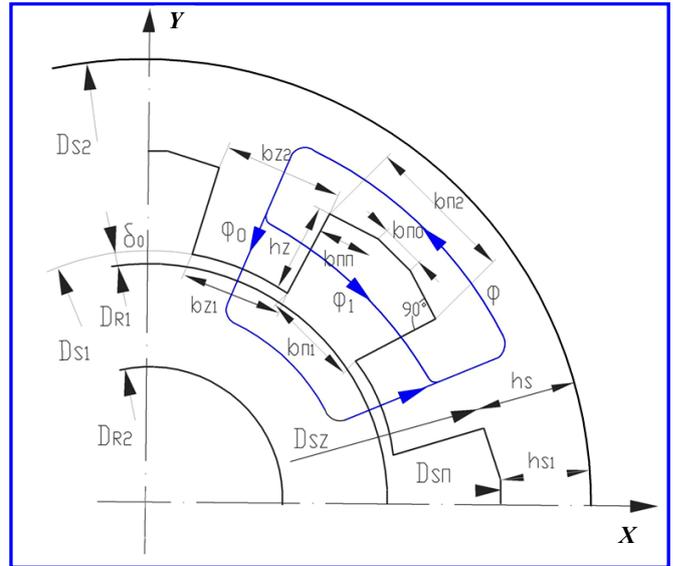


Рис. 3. Расчётная модель магнитной цепи для рабочей зоны РМП1 с $Z = 8$

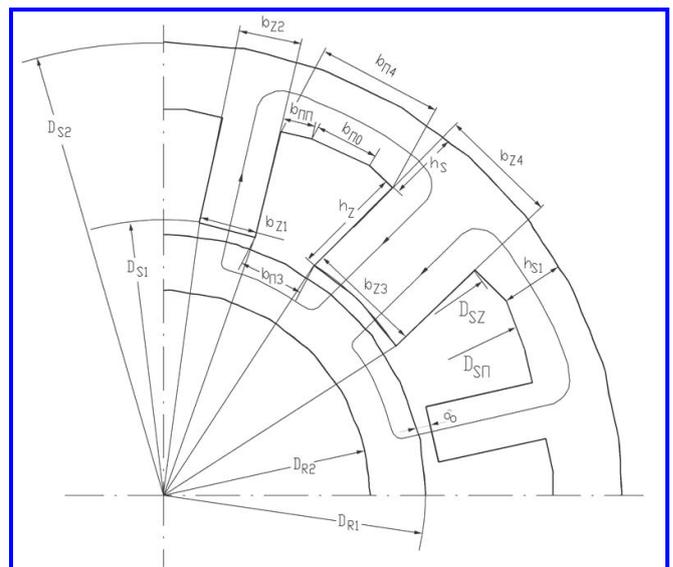


Рис. 4. Расчётная модель магнитной цепи для рабочей зоны РМП2 с $Z = 12$

Таким образом, определены магнитные потоки, протекающие по различным участкам магнитопровода, и для расчета индукции этих участков необходимо найти соответствующие значения площадей сечений. Поскольку площади сечений некоторых участков изменяются по пути потока (трапециевидные зубцы, сечение спинки при стандартной конфигурации паза (см. рис. 3), то по аналогии с подходами, принятыми в электрических машинах [5], воспользуемся расчетными значениями площадей сечения соответствующих участков. Для трапециевидного зубца расчетными значе-

ниями площадей сечения $S_{ZP} = b_{ZP}L_{S1}k_{F1}10^{-2}$, см², где $b_{ZP} = (b_{Z2} + 2b_{Z1})/3$ – расчетная ширина зубца; k_{F1} – коэффициент заполнения выбирается в соответствии с рекомендациями, приведенными в методике [2].

Для участка спинки, прилегающего к зубцу, площадь сечения спинки по мере приближения к середине паза уменьшается, так как плоскость дна паза для удобства размещения катушки обычно перпендикулярна к боковой поверхности зубца. В результате расчетное сечение этого участка спинки $S_{П.П} = h_{SP}L_{S1}k_{F1}10^{-2}$, см², где расчетная высота спинки $h_{SP} = (h_S + 2h_{S1})/3$; $h_S = 0,5(D_{S2} - D_{SZ})$ – высота спинки у основания зубца; $h_{S1} = 0,5(D_{S2} - D_{СП})$ – минимальная высота спинки. Площадь сечения участка спинки, соответствующего центральной части паза, составляет $S_{0P} = h_{S1}L_{S1}k_{F1}10^{-2}$, см². Площадь поперечного сечения спинки ротора определяется из соотношения $S_R = 0,5(D_{R1} - D_{R2})L_{R2}k_{F2}10^{-2}$, см², где k_{F2} – коэффициент заполнения пакета ротора выбирается в соответствии с рекомендациями, приведенными в методике [2].

Расчетная длина магнитных силовых линий соответствующих участков, приходящихся на один зубец, может быть принята:

– для участка спинки, соответствующего центральной части паза

$$L_{MS0} \cong 0,5b_{П0} \left(1 + \frac{h_{S1}}{D_{СП}} \right), \text{ мм};$$

– для участка спинки, примыкающего к зубцу

$$L_{MSП} \cong \left[1 + \frac{h_S}{D_{SZ}} \right] b_{П.П} + 0,785b_{Z2}, \text{ мм};$$

– для зубца

$$L_{MZ} = h_Z;$$

– для спинки ротора

$$L_{MR} \cong \frac{0,785(D_{R1} + D_{R2})}{Z} + 0,25(D_{R1} - D_{R2}),$$

где при РМП1 $Z = Z_0$, а при РМП2 $Z = Z_p$.

Причем при расчете длины магнитных силовых линий в РМП2 следует учитывать, что ширина паза возрастет по сравнению с РМП1 в соответствии с соотношением между расчетным и реальным числом зубцов Z_p / Z .

На основании полученных значений площадей сечений и соответствующих магнитных потоков для каждого участка рассчитывается величина индукции:

– в зубцах

$$B_Z = \Phi_0 / (S_{ZP}10^4), \text{ Тл};$$

– участка спинки статора у зубца

$$B_{СП} = \Phi_0 / (S_{П.П}10^4), \text{ Тл};$$

– участка спинки статора в центральной части

$$B_{S0} = \Phi / (S_{0P}10^4), \text{ Тл};$$

– участка спинки ротора

$$B_R = \Phi_0 / (S_R10^4), \text{ Тл}.$$

По этим значениям индукций на основании кривых намагничивания материала магнитопровода или зависимостей, аппроксимирующих эти кривые, находим удельные магнитные напряжения для зубцов aw_Z , участков спинки статора $aw_{СП}$, aw_{S0} и спинки ротора aw_R . Для определения суммарных магнитных напряжений участков полученные удельные значения умножаем на соответствующие длины магнитных силовых линий:

– зубец

$$AW_Z = 0,1aw_ZL_{MZ}, \text{ А};$$

– спинка статора

$$AW_{СП} = 0,1aw_{СП}L_{MSП}, AW_{S0} = 0,1aw_{S0}L_{MS0};$$

– спинка ротора

$$AW_R = 0,1aw_RL_{MR}.$$

Поскольку магнитное напряжение зазора δ при заданном значении индукции можно, в первом приближении, определить из соотношения $AW_0 = 8 \cdot 10^2 B_0 \delta$, то намагничивающая сила катушки полюса равная сумме магнитных напряжений всех участков магнитопровода получается:

$$AW = AW_0 + AW_Z + AW_{СП} + AW_{S0} + AW_R.$$

В результате значение тока I в катушке находим из соотношения $I = AW / W$.

Кроме того, для оценки степени насыщения магнитной цепи определим коэффициент насыщения K_H из соотношения:

$$K_H = AW / AW_0.$$

При расчете параметров катушек возбуждения РМП исходим из приведенных выше геометрических размеров и применяемого провода. Определим сечение провода по размерам проводника q и с учетом изоляции q_1 . Поскольку размер окна катушки обычно больше длины пакета L_{S1} на двойную величину радиуса гибки провода R_C и принятого вылета лобовой части l_C , то средняя длина витка катушки L_W определяется из соотношения:

$$L_W = 2[(L_{S1} + 2l_C) + \pi(R_C + b_C / 2) + (b_{C1} - 2R_C)]10^{-3}, \text{ м.}$$

В результате сопротивление обмотки зоны РМП при температуре 20°C

$$R_{20} = L_W W N_2 (\rho / q N_1), \text{ Ом,}$$

где ρ – удельное сопротивление провода (для меди $\rho = 1/56$).

Сопротивление обмотки зоны при рабочей температуре для основных типов проводов можно, в первом приближении, определить из соотношения

$$R_T = R_{20} (1 + 0,004(T - 20)).$$

Мощность, потребляемая катушками РМП в номинальном режиме, при равномерном распределении нагрузки между двумя зонами:

$$P_{в.н} = 2I_H^2 R_T.$$

Индуктивность обмотки зоны при центральном расположении ротора $L = \Phi N_2 W / I$ и, соответственно, постоянная времени:

$$- \tau_{20} = L / R_{20} \text{ при температуре } 20^\circ\text{C};$$

$$- \tau_T = L / R_T \text{ при рабочей температуре.}$$

Для оценки технических показателей РМП можно воспользоваться двумя удельными характеристиками.

Во-первых, значениями суммарной массы активных частей статора G_S и ротора G_R , приходящимися на единицу усилий, создаваемых при номинальной и максимальной нагрузке, т. е. G_{1H} и G_{1M} соответственно. Расчет этих величин из соот-

ношений $G_{1H} = (G_S + G_R) / F_H$ и $G_{1M} = (G_S + G_R) / F_M$ сопряжен с определением массы статора: $G_S = V_S \gamma_S$, где $V_S = 0,785 \cdot 10^{-3} (D_{S2}^2 - D_{S1}^2) L_{S2}$ – объем статора; $\gamma_S \cong 6,5 \cdot 10^{-3}$, кг/см³ – удельный вес статора; и массы ротора: $G_R = V_R \gamma_R$, где $V_R = 0,785 \cdot 10^{-3} (D_{R2}^2 - D_{R1}^2) L_{R2}$ – объем ротора; $\gamma_R = 7,8 \cdot 10^{-3}$, кг/см³ – средний удельный вес ротора.

Во-вторых, значением удельных потерь в статорных обмотках РМП при номинальном режиме $P_{1BH} = P_{BH} / F_H$, Вт/кН. Кроме того, для расчета потерь в роторе, возникающих при вращении его в магнитном поле статора с номинальной скоростью, и в действии номинальной нагрузки, в первом приближении, можно воспользоваться соотношением:

$$P_T = p_{1/400} B_{RH}^2 (f / 400)^{1,5} G_R / 2,$$

где $p_{1/400}$ – удельные потери на перемагничивание материала ротора при индукции 1 Тл и частоте 400 Гц; $f = p n_H / 60$ – частота перемагничивания при номинальной скорости; $p = Z / 4$ – число пар полюсов статора РМП.

В этой формуле масса ротора принята $G_R / 2$, так как при номинальной нагрузке практически работают только две верхние зоны, а потерями в нижних зонах в связи с малыми индукциями можно пренебречь.

Магнитная система ОМП

Рассмотрим два наиболее распространенных на практике типа магнитных систем ОМП: с П- и Ш-образными магнитопроводами статора. При проектировании этих систем [1] основным условием обеспечения максимума тягового усилия являлось определенное соотношение площадей полюсов:

– в П-образной системе равенство площадей полюсов;
– в Ш-образной системе равенство площади среднего полюса сумме площадей крайних полюсов. В этом случае общая нагрузка ОМП распределяется равномерно по полюсам. Однако в результате конструктивной проработки эти соотношения могут быть несколько нарушены и в поверочном расчете возникает необходимость учитывать существующие значения площадей. Кроме того, с изменением зазора между диском и статором электромагнита расчетные значения площадей полюсов меняются.

На примере наиболее общего вида Ш-образной магнитной системы ОМП, показанной на рис. 5, рассмотрим некоторые основные расчетные соотношения, которые могут быть адаптированы к конкретному конструктивному виду магнитной системы ОМП.

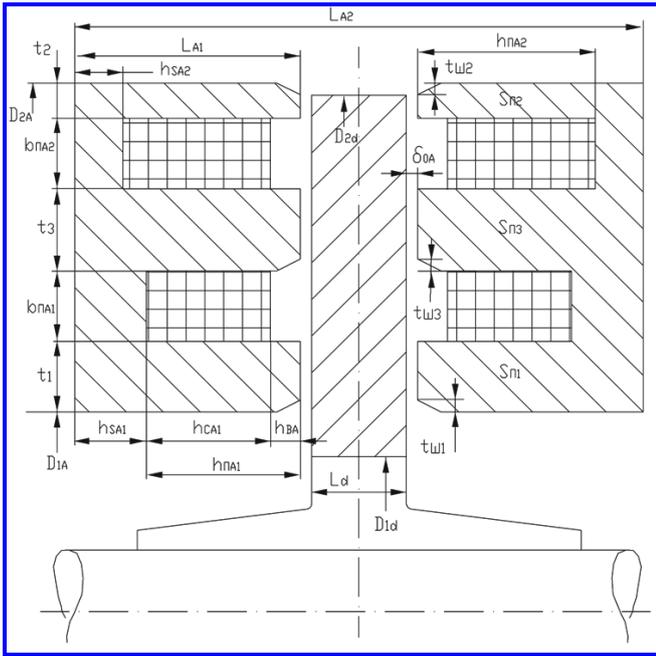


Рис. 5. Ш-образная магнитная система ОМП

Для принятой по аналогии с РМП модели распределения поля в зазоре, соотношения для расчетных площадей полюсов имеют следующий вид:
 – внутреннего

$$S_{\pi 1} = 0,785((D_{11} + 2\delta)^2 - (D_{31} + 2\delta)^2)10^{-2}, \text{ см}^2;$$

– среднего

$$S_{\pi 3} = 0,785((D_{12} + 2\delta)^2 - (D_{33} + 2\delta)^2)10^{-2}, \text{ см}^2;$$

– внешнего

$$S_{\pi 2} = 0,785((D_{32} + 2\delta)^2 - (D_{22} + 2\delta)^2)10^{-2}, \text{ см}^2.$$

В соответствии с полученными значениями расчетных площадей полюсов для выбранного ряда тяговых усилий F , следуя принятому алгоритму поворочного электромагнитного расчета (см. рис. 1), находим, в первом приближении, расчетные индукции в зазоре под полюсами магнитных систем ОМП:
 – П-образной

$$B_{0, A1} = 5 \left(F / S_{\pi 1} (1 + S_{\pi 1} / S_{\pi 2}) \right)^{0,5};$$

$$B_{0, A2} = B_{0, A1} S_{\pi 1} / S_{\pi 2};$$

– Ш-образной при $AW_1 = AW_2$

$$B_{0, A1} = B_{0, A2} = 5 \left(F / (S_{\pi 1} + S_{\pi 2} (S_{\pi 1} + S_{\pi 2})^2 / S_{\pi 3}) \right)^{0,5};$$

$$B_{0, A3} = B_{0, A1} (S_{\pi 1} + S_{\pi 2}) / S_{\pi 3}.$$

Для расчета магнитной цепи ОМП определим значения длин магнитных силовых линий и сечений отдельных участков магнитопровода. В качестве примера расчетные соотношения представим только для магнитной цепи, включающей участки внутреннего зубца и спинки статора и ротора, прилегающих к внутреннему пазу. Для остальных участков аналогичные соотношения могут быть получены путем соответствующей замены входящих расчетных размеров в приведенных соотношениях.

Площадь сечения внутреннего зубца у основания

$$S_{Z1} = 0,785 \cdot 10^{-2} (D_{11}^2 - D_{1A}^2), \text{ см}^2.$$

Площадь сечения выступа внутреннего зубца:
 – минимальная

$$S_{Z1M} = 0,785 \cdot 10^{-2} (D_{11}^2 - D_{31}^2), \text{ см}^2;$$

– расчетная

$$S_{Z1P} = (S_{Z1} + 2S_{Z1M})/3, \text{ см}^2.$$

Площадь сечения спинки статора над внутренним пазом:

– минимальная

$$S_{S1M} = 3,14 \cdot 10^{-2} h_{SA1} D_{11}, \text{ см}^2;$$

– расчетная

$$S_{S1P} = 3,14 \cdot 10^{-2} h_{SA1} (D_{21} + 2D_{11})/3, \text{ см}^2.$$

Площадь сечения спинки ротора под внутренним пазом:

– минимальная

$$S_{R1M} = 3,14 \cdot 10^{-2} L_d (D_{11} + 2\delta), \text{ см}^2;$$

– расчетная

$$S_{R1P} = 3,14 \cdot 10^{-2} L_d ((D_{33} - 2\delta) + 2(D_{11} - 2\delta))/3, \text{ см}^2.$$

Длину магнитных силовых линий для потоков охватывающих внутренний паз определим по участкам. Для выступов внутреннего и среднего зубцов, поскольку их высота одинаковая, расчетную длину примем равной $L_{MB1} = L_{MB3} = 0,1h_{BA1}$, см. Средняя длина силовых линий в основной части

внутреннего и среднего зубцов составит соответственно: $L_{MZ1} = 0,1h_{ZA1}$ и $L_{MZ3} = 0,05(h_{ZA1} + h_{ZA2})$, см. В спинке статора, примыкающей к внутреннему пазу, с учетом переходов от зубца к основной части спинки, расчетную длину примем: $L_{MS1} = 0,1b_{\Pi A1} + 0,04(2h_{SA1} + t_1 + t_3)$, см. Для спинки ротора под внутренним пазом статора расчетную длину магнитной силовой линии, в первом приближении, определим из соотношения:

$$L_{MR1} = 0,1(b_{\Pi A1} + t_{\text{ш3}} - 2\delta) + 0,04(2L_d + t_1 + t_3 - t_{\text{ш3}} - t_{\text{ш1}} + 2\delta), \text{ см.}$$

При расчете магнитных потоков, протекающих в указанных участках магнитной цепи, воспользуемся полученными значениями индукции и площадей сечений. Магнитный поток в зазоре под внутренним полюсом $\Phi_{01} = B_{0A1}S_{\Pi 1}10^{-4}$. Для остальных участков, по которым протекает этот поток, значение индукций обратно пропорционально соответствующим площадям сечений. Например индукции в выступах зубцов и спинке ротора, прилегающих к внутреннему пазу, определяются по соответствующим соотношениям: максимальная индукция в выступе внутреннего зубца $B_{Z1M} = \Phi_{01}10^4 / S_{Z1M}$, а расчетная $B_{Z1P} = \Phi_{01}10^4 / S_{Z1P}$; максимальная индукция в спинке ротора $B_{R1M} = \Phi_{01}10^4 / S_{R1M}$, а расчетная $B_{R1P} = \Phi_{01}10^4 / S_{R1P}$. В спинке статора к магнитному потоку в зазоре Φ_{01} добавляется магнитный поток рассеяния внутреннего паза Φ_{R1} , и получается суммарный поток $\Phi_{S1} = \Phi_{01} + \Phi_{R1}$, который, в первом приближении, можно определить с использованием коэффициента рассеяния внутреннего паза K_{RA1} из соотношения:

$$\Phi_{S1} = K_{RA1}\Phi_{01},$$

где

$$K_{RA1} \cong 1 + 5 \cdot 10^{-3} \delta (D_{21} + 2D_{11}) (h_{CA1} + 2h_{BA}) \frac{S_{\Pi 1} + S_{\Pi 2} + S_{\Pi 3}}{b_{\Pi A1} S_{\Pi 1} S_{\Pi 3}}.$$

В результате находим значение индукций в основании внутреннего зубца и в спинке статора, используя конкретные значения сечений этих участков, соответственно из соотношений для зубца $B_{Z1} = \Phi_{01}10^4 / S_{Z1}$ и спинки: максимальная индукция $B_{S1M} = \Phi_{S1}10^4 / S_{S1M}$ и расчетная – $B_{S1P} = \Phi_{S1}10^4 / S_{S1P}$.

Для полученных расчетных значений индукций по кривым намагничивания материала магнитопровода находим удельные магнитные напряжения

соответствующих участков: выступов зубцов внутреннего aw_{B1} и среднего aw_{B3} , зубцов внутреннего aw_{Z1} и среднего aw_{Z3} , спинки статора под внутренним пазом aw_{S1} и спинки ротора под внутренним пазом aw_{R1} . При расчете суммарных магнитных напряжений участков умножаем полученные удельные значения напряжений на соответствующие расчетные длины магнитных силовых линий участков:

– зубцов
внутреннего

$$AW_{Z1} = aw_{Z1}L_{MZ1};$$

среднего

$$AW_{Z3} = aw_{Z3}L_{MZ3};$$

– выступа зубцов
внутреннего

$$AW_{B1} = aw_{B1}L_{MB1};$$

среднего

$$AW_{B31} = aw_{B3}L_{MB3};$$

– спинки статора

$$AW_{S1} = aw_{S1}L_{MS1};$$

– спинки ротора под внутренним зубцом

$$AW_{R1} = aw_{R1}L_{MR1}.$$

Суммарная намагничивающая сила катушки внутреннего паза при магнитных напряжениях зазоров под внутренним и средним зубцами, соответственно $AW_{01} = 8 \cdot 10^2 B_{0A1} \delta$ и $AW_{03} = 8 \cdot 10^2 B_{0A3} \delta$:

$$AW_1 = AW_{01} + AW_{03} + AW_{Z1} + AW_{Z3} + AW_{B1} + AW_{B3} + AW_{S1} + AW_{R1}.$$

Исходя из полученного значения намагничивающей силы, находим ток в катушке: $I = AW_1 / W_A$. Кроме того, для оценки степени насыщения магнитной системы ОМП по аналогии с РМП, определим коэффициент насыщения:

$$k_{HA} = AW_1 / AW_{01} + AW_{03}.$$

Для расчета активного сопротивления каждой катушки определим среднюю длину витка из соотношений:

– для малой катушки

$$L_{WA1} = \pi 10^{-3} D_{C1}, \text{ м};$$

– для внешней катушки

$$L_{WA2} = \pi 10^{-3} D_{C2}, \text{ м}.$$

Исходя из сечения провода катушек, соответственно, «голового» проводника q_{A1} и q_{A2} и по изоляции q_{1A1} и q_{1A2} , определим сопротивление малой и большой катушек при температуре 20°C из соотношений:

$$\bullet R_{20A1} = L_{WA1} W_A (\rho / N_{1A} q_{A1}), \text{ Ом};$$

$$\bullet R_{20A2} = L_{WA2} W_A (\rho / N_{1A} q_{A2}), \text{ Ом},$$

где ρ – удельное сопротивление провода.

Сопротивление катушек ОМП при рабочей температуре T , по аналогии с катушками РМП, можно рассчитать по формуле

$$R_{TA} = R_{20A}(1 + 0,004(T - 20)), \text{ Ом}.$$

Мощность, потребляемая катушками ОМП в номинальном режиме при рабочей температуре,

$$P_{ВНА} = I_{НА}^2 (R_{TA1} + R_{TA2}).$$

Индуктивность каждого электромагнита при центральном расположении ОМП относительно диска $L_A = (\Phi_{01} + \Phi_{02}) W_A / I$, Гн и, соответственно, постоянная времени составит:

$$\bullet \tau_{A20} = L_A / (R_{20A1} + R_{20A2}) \text{ при температуре } 20^\circ\text{C};$$

$$\bullet \tau_{AT} = L_A / (R_{TA1} + R_{TA2}) \text{ при рабочей температуре}.$$

Для общей оценки технического уровня ОМП, по аналогии с РМП, воспользуемся удельными показателями. Удельная масса двух электромагнитов ОМП и диска, приходящиеся на единицу номинальной и максимальной нагрузки составляет:

$$G_{1НА} = (2G_{SA} + G_d) / F_{НА} \text{ и } G_{1МА} = (2G_{SA} + G_d) / F_{МА},$$

где $G_{SA} = 0,785 \cdot 10^{-3} \gamma_{SA} (D_{2A}^2 - D_{1A}^2) L_{A1}$ – масса электромагнита; $\gamma_{SA} \cong 8 \cdot 10^{-3}$, кг/см³ – средний удельный вес электромагнита; $G_d = 0,785 \cdot 10^{-3} \gamma_d (D_{2d}^2 - D_{1d}^2) L_d$ – масса диска; $\gamma_d = 7,8 \cdot 10^{-3}$, кг/см³ – удельный вес диска.

Поступила в редакцию 20.10.2010

Владимир Петрович Верещагин, д-р техн. наук, гл. научн. сотрудник, т. (495)365-50-73.
Александр Валерьевич Рогоза, аспирант, начальник научно-производственного комплекса, т. (495)366-04-79.
Татьяна Николаевна Савинова, мл. научн. сотрудник, т. (495)366-26-10.
 E-mail: vniiem@vniiem.ru.

Удельные потери в катушках ОМП с учетом того, что в номинальном режиме величина тока в одном электромагните существенно больше, чем в противоположном, можно принять $P_{1ВНА} \cong P_{ВНА} / F_{НА}$, Вт/кН.

Заключение

На основе представленных расчетных соотношений в НПП ВНИИЭМ разработаны специальные компьютерные программы для выполнения поверочных электромагнитных расчетов РМП и ОМП. Результаты этих расчетов позволяют оценить степень использования магнитной системы по величине индукции в различных участках, и возможные запасы по грузоподъемности. Кроме того, по удельным показателям массы и энергопотребления можно судить о техническом уровне разрабатываемого ЭМП.

Характер полученных нагрузочных зависимостей в области изменения нагрузок до номинального значения практически соответствует квадратичной функции, что позволяет добиться высокой точности линеаризации нагрузочных характеристик при формировании структуры системы управления ЭМП, принятой в НПП ВНИИЭМ [6].

Литература

1. Методика проектирования электромагнитных подшипников / Верещагин В.П., Рогоза А.В., Савинова Т.Н. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 113. – № 6. – С. 3 – 12.
2. Вопросы расчёта электрических машин // Труды НИИЭП. – М.: ЦБТИ НИИЭП, 1959. – Т. 3.
3. К расчету усилий и параметров электромагнитного радиального подшипника / Вейнберг Д.М., Верещагин В.П., Сарычев А.П. // Труды ВНИИЭМ. – М.: ВНИИЭМ, 1989. – Т. 93. – С. 59 – 70.
4. Применение метода конечных суперэлементов для расчета электромагнитного поля магнитоэлектрической машины / Геча В.Я., Захаренко А.Б. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – Т. 106. – С. 19 – 23.
5. Сергеев П. С. Проектирование электрических машин / Виноградов Н.В., Горяинов Ф. А., Сергеев П.С.– Изд. 3-е. – М: Энергия, 1969. – 632 с.
6. Структура системы управления электромагнитными подшипниками / Верещагин В.П., Богданов Д.Н. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 114. – № 1. – С. 9 – 14.