

И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ГИБРИДНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ШПИНДЕЛЕЙ

На основе анализа электромагнитных процессов в системе проводов с током получены исходные математические уравнения для расчета сил отталкивания и притяжения в гибридных магнитных подшипниках. *Гибридные магнитные подшипники; магнитная левитация; активные магнитные подшипники*

В современной технике широкое практическое применение для высокоскоростных шпинделей приобретает такой тип электромеханических устройств, как магнитные подшипники (МП). Важным преимуществом магнитных подшипников является отсутствие механического контакта между вращающейся частью механизма и неподвижной [1]. По способу создания магнитного поля в рабочем зазоре магнитные подшипники подразделяются на три класса:

- пассивные магнитные подшипники (ПМП) – неуправляемое электромеханическое устройство, предназначенное для фиксации роторной системы в заданном положении относительно неподвижной части, посредством магнитных потоков создаваемых постоянными магнитами. Согласно теореме Ирншоу, полный подвес движущегося тела с помощью ПМП невозможен. Ввиду этого ПМП используются в качестве вспомогательных опор для разгрузки роторных систем [2];

- активные магнитные подшипники (АМП) – управляемое электромеханическое устройство, предназначенное для фиксации роторной системы в заданном положении относительно неподвижной части, посредством магнитных потоков, создаваемых неподвижным электромагнитом. Используются в настоящее время практически во всех электрических машинах, эксплуатирующихся в области низких или высоких температур (от -150° до $+450^{\circ}$), стерильных условиях (космическая, химическая, медицинская промышленности) или обладающих высокой скоростью вращения рабочего элемента (высокоскоростные шпиндели, двигатели). Основным недостатком АМП является большой массогабаритный показатель, по сравнению с механическими аналогами [3];

- гибридные магнитные подшипники (ГМП) – электромеханическое устройство, предназначенное для фиксации роторной системы в заданном положении относительно неподвижной части посредством взаимодействия магнитных потоков постоянного магнита, установленного на подвижной части и неподвижного электромагнита.

ГМП, помимо того, что обладают основными преимуществами АМП, лишены присущих АМП недостатков.

Ввиду использования подвижного постоянного магнита ГМП требуется для создания равнозначного с АМП усилия меньший объем обмотки и, как следствие, они обладают меньшим энергопотреблением [4]. Таким образом, ГМП являются, по сравнению с АМП, технически и экономически более выгодными.

В связи с этим возникает необходимость многодисциплинарного математического моделирования сил, действующих в ГМП, что позволит в дальнейшем разработать упрощенную инженерную методику расчета ГМП, автоматизированный комплекс проектирования ГМП, а также методику выборки оптимальной конструкции ГМП для конкретных электромеханических преобразователей.

В основу расчетной модели принимается общий вариант конструктивного исполнения ГМП: бесполюсной, с гладким цилиндрическим постоянным магнитом и кольцевой обмоткой (рис. 1). В работе ввиду сложности расчетов используются обычные при решении такого класса задач допущения:

- величина немагнитного зазора намного меньше радиуса его кривизны;
- поле в немагнитном зазоре плоскопараллельное;
- магнитная проницаемость немагнитного зазора равна проницаемости вакуума μ_0 , стали сердечника $\mu_r = \infty$, магнитная проницаемость постоянных магнитов постоянна.

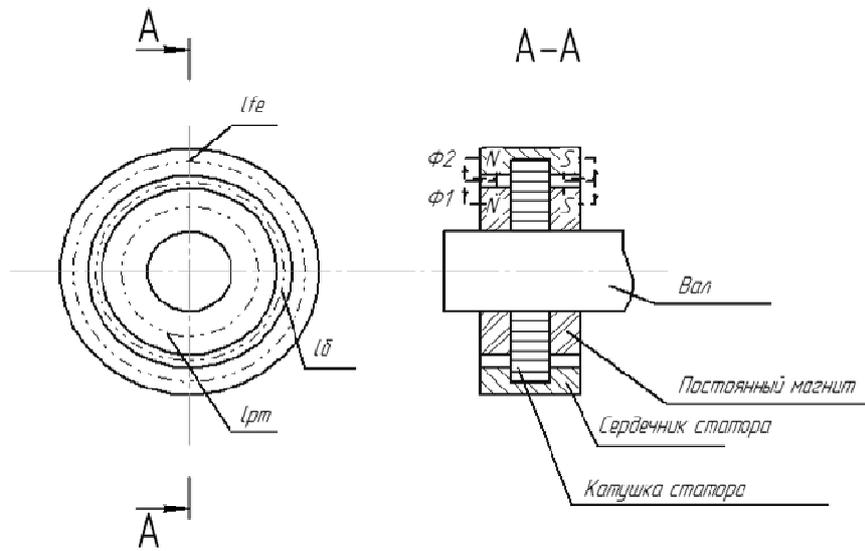


Рис. 1. Расчетная схема ГМП

Ввиду сложности аналитических расчетов систем с постоянными магнитами, производится замена системы с постоянными магнитами на систему проводов с током (рис. 2).

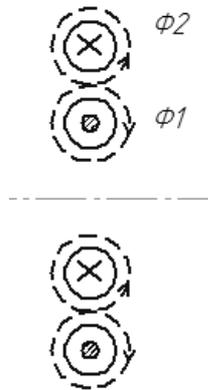


Рис. 2. Система проводов с током

Ввиду симметричности исходной системы проводов с током, расчетная модель для определения сил ГМП представляется в виде двухпроводной линии (рис. 3, 4).

Рассматриваются два варианта двухпроводной системы: токи протекают в одном направлении и токи протекают в разных направлениях.

Токи протекают в одном направлении, между проводами возникает сила притяжения (рис. 3). Элемент тока $I_1 d\vec{l}_1$ создает поле с индукцией $d\vec{B}_1$, которая согласно закону Био-Савара имеет вид:

$$d\vec{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 d\vec{l}_1 \times \vec{r}_{12}}{r_{12}^3}, \quad (1)$$

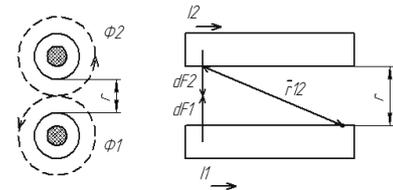


Рис. 3. Расчетная система проводов для отталкивающей силы

В точке \vec{r}_{12} всем током I_1 создается поле B_1

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dl_{r12} \sin \alpha}{r_{12}^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \alpha dl}{r_{12}^2}, \quad (2)$$

Замена $dl_1 = -y_0 \operatorname{ctg}^2 \varphi$. В результате:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi r}, \quad (3)$$

где I_1 – прямой ток, А; r – расстояние между проводами, м.

Согласно закону Ампера, сила притяжения имеет вид:

$$dF_2 = |I_2 d\vec{l} \times \vec{B}_1| = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r} dl_2, \quad (4)$$

так как $I_1 = I_2$

$$F = \frac{\mu_0 I_1^2}{2\pi r} l_2. \quad (5)$$

Согласно закону полного тока:

$$I = H_{\delta} l_{\delta} + H_{fe1} l_{fe1} + H_{fe2} l_{fe2}, \quad (6)$$

где H_{δ} , H_{fe1} , H_{fe2} – напряженность в зазоре между проводами, в первом и втором проводе, А/м; l_{δ} , l_{fe1} , l_{fe2} – средние линии зазора, первого и второго провода, м.

Учитывая, что:

$$B = \mu_0 \mu_r H, \quad (7)$$

$$I = \frac{B_\delta l_\delta}{\mu_0} + \frac{B_{fe1} l_{fe1}}{\mu_0 \mu_{fe1}} + \frac{B_{fe2} l_{fe2}}{\mu_0 \mu_{fe2}}, \quad (8)$$

где $B_\delta, B_{fe1}, B_{fe2}$ – индукция в зазоре между проводами, в первом и втором проводе, Тл; μ_{fe1}, μ_{fe2} – магнитная проницаемость первого и второго провода.

С учетом $\mu_r = \infty$, сила тока принимается:

$$I = \frac{B_\delta l_\delta}{\mu_0}. \quad (9)$$

С учетом выражения (9), выражение (5) принимает вид:

$$F = \frac{1}{2\pi} \frac{B_\delta^2 l_\delta^2}{\mu_0 r} l_2. \quad (10)$$

Таким образом, притягивающая сила ГМП на 2 зазора:

$$F = \frac{1}{4\pi} \frac{B_\delta^2 l_\delta^2}{\mu_0 r} l_2. \quad (11)$$

Токи протекают в разных направлениях, между проводами возникает сила отталкивания (рис. 4).

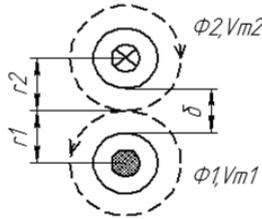


Рис. 4. Расчетная система проводов для отталкивающей силы

Уравнение линий напряженности имеет вид [5]:

$$V_M = K \ln r + C_1. \quad (12)$$

Для двухпроводной линии выражение для функции потока имеет вид:

$$V_M = -\frac{1}{2\pi} (I_1 \ln r_1 + I_2 \ln r_2) + C, \quad (13)$$

где I_1, I_2 – токи первого и второго провода, А; r_1, r_2 – расстояние до точки измерения напряженности, м; C – постоянная интегрирования.

Принимая $C = 1$ и исходя из того что: $I = I_1 = -I_2$, выражение для функции потока принимает вид:

$$V_M = \frac{I}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (14)$$

так как:

$$\Phi = \oint_l A dl, \quad (15)$$

где Φ – поток в рабочем зазоре, Вб; A – векторный потенциал; l – длина, м.

$$A = \mu_0 V_M, \quad (16)$$

интегрируя векторное поле по длине l_y

$$\Phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} l_y \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (17)$$

Тогда (17) с учетом (9) примет вид

$$\Phi = \frac{B_\delta l_\delta}{2\pi} l_y \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (18)$$

Выражение для магнитной энергии:

$$W = \frac{\Phi I}{2}, \quad (19)$$

где W – энергия; I – сила тока; Φ – магнитный поток.

Магнитная энергия в зазоре между проводами определяется, с учетом выражений (9), (18) в виде:

$$W = \frac{B_\delta l_\delta}{2\pi} l_y \frac{B_\delta l_\delta}{\mu_0} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{B_\delta^2 l_\delta^2}{2\pi \mu_0} l_y \ln \frac{r_2}{r_1} \right). \quad (20)$$

Выражение для отталкивающей силы:

$$F = \frac{\partial W}{\partial \delta}, \quad (21)$$

где δ – немагнитный зазор, м.

Расстояние до точки измерения потока принимается в виде:

$$r_1 = R_1 + \frac{\delta}{2}, \quad (22)$$

$$r_2 = d_2 + \frac{\delta}{2}, \quad (23)$$

где R_1 – радиус первого провода, м; d_2 – толщина второго провода, м.

Продифференцировав выражение магнитной энергии в зазоре по величине немагнитного зазора, определяется отталкивающая сила:

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{B_\delta^2 l_\delta^2}{\pi \mu_0 \delta} l_y k \right), \quad (24)$$

где $k = \frac{(R_1 + \frac{\delta}{2})(d_2 + \frac{\delta}{2})}{(d_2 + \frac{\delta}{2})(R_1 + \frac{\delta}{2})}$ – геометрический коэффициент.

Принимая $R_1 \approx d_2 \gg \delta$, коэффициент $k = 0,9 - 1,1$.

Таким образом, отталкивающая сила в рабочем зазоре гибридного магнитного подшипника имеет вид:

$$F_s = \frac{B^2 \delta \pi R_1^2}{4\mu_0 \delta} l_y k, \quad (25)$$

Анализируя выражение для притягивающей силы (10), полученное с применением закона Ампера и выражение для отталкивающей силы (24), полученное с применением линий напряженности, видно, что выражения (10) и (24) идентичны. Учитывая, что выражения получены с применением различных методов, можно сделать вывод об адекватности представленных математических моделей.

Полученные математические модели позволяют определять и оценивать силы действующие в ГМП. Полученные решения могут служить в дальнейшем основой для разработки упрощенной инженерной методике расчета ГМП, а также для создания автоматизированного комплекса проектирования ГМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Верещагин В. П., Рогоза А. В., Савинова Т. Н.** Методика проектирования электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. 2009. Т. 113.
2. **Метлин В. Б.** Магнитные и магнитогидродинамические опоры. М: Энергия, 1968.
3. **Журавлев Ю. Н.** Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
4. **Petzold O.** Hybridmagnete für einen magnetisch gelagerten Rundtisch // Technische mechanik, Band 26, Heft 2, (2006). P. 85–86.
5. **Нейман Л. Р., Демирчян К. С.** Теоретические основы электротехники. Л.: Энергоиздат, 1981.
6. **Шаров В. С.** Особенности расчета магнитного подвеса роторов высокоскоростных электродвигателей. М.: МЭИ, 1982. 84 с.
7. **Верещагин В. П., Клабуков В. А.** Математическая модель магнитного подшипника // Вопросы электромеханики. 2009. Т. 112.

ОБ АВТОРАХ

Хайруллин Ирек Ханифович, проф. каф. электромех. Дипл. инженер-электромех. (Ивановск. энерг. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УАИ, 1981). Иссл. в обл. электромех. преобразователей энергии.

Исмагилов Флюр Рашитович, проф., зав. той же каф., проректор УГАТУ. Дипл. инженер-электромех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ 1998). Иссл. в обл. электромех. преобразователей энергии.

Вавилов Вячеслав Евгеньевич, асп. той же каф. Дипл. инженер-электромех. (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. электромех. преобразователей энергии.