

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГИБРИДНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

На основе анализа электромагнитных процессов в гибридном магнитном подшипнике, получены исходные уравнения для определения дисбаланса электромагнитных сил в гибридном магнитном подшипнике с учетом влияния статического эксцентриситета. *Гибридный магнитный подшипник; дисбаланс электромагнитных сил; эксцентриситет*

Проблема трения существует столько же, сколько существует техника. 25 % энергии используемой в мире теряется за счет трения. По оценке Министерства энергетики США, только в США годовая экономия энергоресурсов при снижении коэффициента трения до 0,005 составит около 100 млрд. долларов в год. По данным Европейской комиссии, затраты связанные с трением в Европе составляют 350 млрд. евро в год. В РФ таких данных обнаружить не удалось. Износ основных производственных фондов РФ составляет 60 %. Это позволяет сделать вывод, что затраты, связанные с трением в РФ, превышают Европейские более чем на 20–25 % [1].

В электрических машинах основная часть потерь, вызванных трением, приходится на подшипниковые узлы. Поэтому решением проблемы трения в подшипниковых узлах является применение бесконтактных подшипниковых опор, в частности гибридных магнитных подшипников (ГМП).

Основными эксплуатационными характеристиками ГМП является несущая способность и жесткость [2].

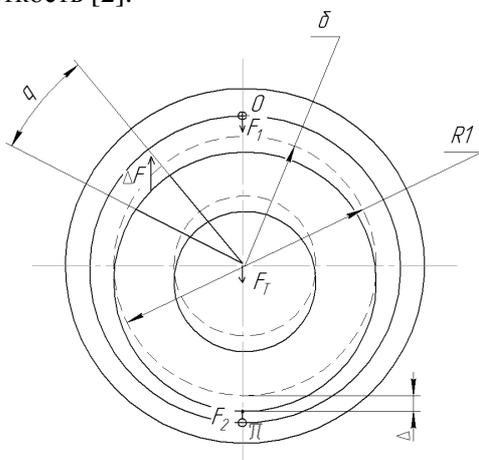


Рис. 1. Расчетная схема ГМП

В высокоскоростных роторных системах, скорость вращения которых превышает 10^4 об./мин., центробежная сила стремится сместить ось ротора относительно оси статора, тем самым возникает эксцентриситет. При смещении осей возникает неравномерность зазора и неуравновешенность электромагнитных сил в ГМП, которая вызывает неустойчивость подшипника. Таким образом, важно математически оценить неуравновешенность электромагнитных сил ГМП при наличии эксцентриситета.

В основу расчетной модели принимается общий вариант конструктивного исполнения ГМП: бесплюсной, с гладким цилиндрическим постоянным магнитом и кольцевой обмоткой (рис. 1).

В работе, ввиду сложности расчетов, используются обычные при решении такого класса задач допущения:

1. Отталкивающая сила, действующая на малый участок внутреннего кольца, создается магнитным полем ограниченной области внешнего кольца, находящейся в непосредственной близости этого участка;
2. Радиусы кривизны колец значительно больше зазора;
3. Рассеяния магнитного потока отсутствует;
4. Магнитная проницаемость немагнитного зазора равна проницаемости вакуума μ_0 , магнитная проницаемость стали сердечника равна бесконечности $\mu_r = \infty$, магнитная проницаемость постоянных магнитов постоянна.

При наличии эксцентриситета, баланс сил ГМП принимается в виде:

$$\Delta F = F_r + F_m, \quad (1)$$

где $\Delta F = F_1 + F_2$ – разность сил ГМП; F_1 – отталкивающая сила в точке 0; F_2 – отталкивающая сила в точке π ; F_r – радиальная составляющая центробежной силы; F_m – сила тяжести.

С учетом того, что $F_r \gg F_m$, баланс сил принимается в виде:

$$\Delta F = F_r, \quad (2)$$

В том случае, если $\Delta F < F_r$, произойдет механический контакт внутреннего кольца ГМП с внешним кольцом, подшипник разрушится.

С учетом допущения 2 можно утверждать, что зазор в каждом небольшом секторе образован двумя плоскостями. Это означает, что при расчете разности электромагнитных сил ГМП можно исходить из соотношений, получаемых для двухпроводной системы.

Учитывая, что отталкивающая сила в зазоре ГМП:

$$F_s = \frac{B_\delta^2 \pi R_1^2}{4\mu_0 \delta} l_y k. \quad (3)$$

Сила, действующая на элемент поверхности:

$$\Delta F_s = \frac{B_\delta^2 \pi R_1^2}{4\mu_0 \delta} l_y k \Delta q. \quad (4)$$

Зазор между поверхностями элемента:

$$\Delta \delta = \delta + \Delta \cos q. \quad (5)$$

Составляющая разности электромагнитных сил ГМП, направленная противоположно смещению [3]:

$$\Delta F = \Delta F_s \cos q. \quad (6)$$

Интегрирование (6) по q от 0 до π , учитывая симметрию, приводит к выражению для определения разности электромагнитных сил в ГМП:

$$F = \frac{B_\delta^2 \pi R_1^2}{4\mu_0 \delta} l_y k \int_0^\pi \frac{\cos q}{\delta + \Delta \cos q} \partial q. \quad (7)$$

Преобразовывая выражение (7):

$$F = \frac{B_\delta^2 \pi R_1^2}{4\mu_0 \delta} l_y k \frac{1}{\delta} \int_0^\pi \frac{\cos q}{1 + \frac{\Delta}{\delta} \cos q} \partial q. \quad (8)$$

Так как эксцентриситет это – смещение оси внутреннего кольца ГМП относительно внешнего, то условия работоспособности ГМП принимаются в виде:

$$\delta > \Delta, \quad (9)$$

$$0 < \frac{\Delta}{\delta} < 1, \quad (10)$$

Выражения (9), (10) показывают, что ГМП работоспособен тогда, когда отсутствует меха-

нический контакт между внутренним и внешним кольцом.

Интегрируя (8) в указанных пределах, с учетом (9), (10):

$$F = -\frac{B_\delta^2 \pi R_1^2}{4\mu_0 \delta} l_y k \frac{1}{\delta} \left(\frac{\pi \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{\delta} \right)^2} - 1 \right)}{\frac{\Delta}{\delta}} \right), \quad (11)$$

Согласно выражению (11), при наличии эксцентриситета разность сил $F < 0$, следовательно, $F_1 < F_2$. С целью проверки данного утверждения проводилось компьютерное моделирование плотности магнитного потока в рабочем зазоре ГМП при наличии эксцентриситета.

Компьютерное моделирование распределения плотности магнитного потока производилось методом конечных элементов, посредством программного комплекса Ansys. Решалась объемная задача гармонического анализа трехмерного магнитного поля на модели ГМП, построенной по расчетной схеме (рис. 1), состоящий из трех кольцевых постоянных магнитов, статора и двух кольцевых обмоток.

Модель представляет собой поперечное сечение магнитопровода с концентрическими зонами, характеризующимися различной магнитной проницаемостью и удельным электрическим сопротивлением. Введено сгущение сетки в области воздушного зазора. Коэффициент заполнения паза принят 0,8.

В результате моделирования получены спектры распределения плотности магнитного потока в рабочем зазоре ГМП при различных значениях эксцентриситета (рис. 2).

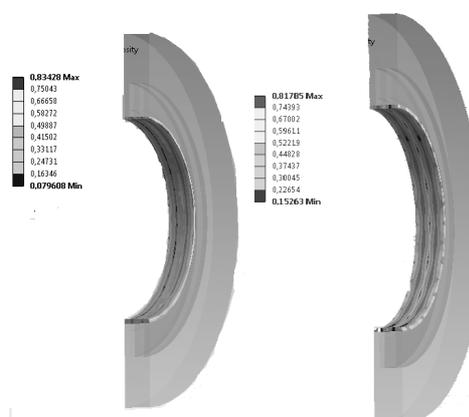


Рис. 2. Спектр распределения магнитной индукции ГМП (слева) эксцентриситет 5 %, (справа) эксцентриситет 30 %

Анализ полученных спектров распределения магнитной индукции показывает, что с увеличением эксцентриситета на 30 % индукция на стороне уменьшения зазора возрастает на 11,59 %, при увеличении эксцентриситета на 50 % индукция возрастает на 19,5 %, при увеличении эксцентриситета на 70 % индукция увеличивается на 27,3 %.

Согласно (3), электромагнитные силы в ГМП зависят от квадрата плотности магнитного потока. Следовательно, увеличение индукции на стороне уменьшения зазора приводит к увеличению силового воздействия F_2 .

Таким образом, результаты компьютерного моделирования ГМП подтверждают, что $F_2 > F_1$ и, следовательно, отрицательное значение разности сил (выражение (11)) указывает только на то, что действие разности сил направленно противоположно смещению. Исходя из вышесказанного, при построении зависимости разности электромагнитных сил ГМП от эксцентриситета, принимался модуль разности электромагнитных сил.

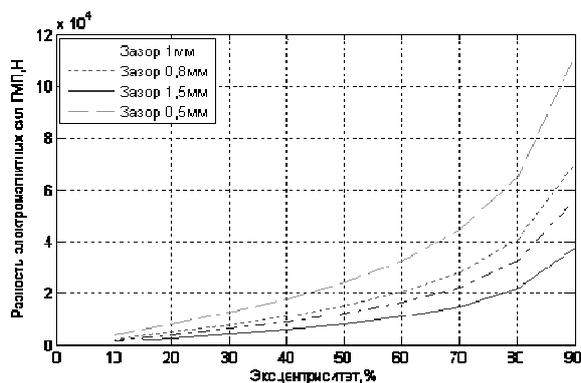


Рис. 3. Зависимость разности электромагнитных сил от статического эксцентриситета

Анализ зависимости разности электромагнитных сил от статического эксцентриситета показал, что при увеличении эксцентриситета на 20 % разность сил увеличивается на 50 %, при уменьшении зазора в 3 раза разность сил увеличивается в 3,5 раза. При этом при незначительном эксцентриситете 10–15 %, разность электромагнитных сил составляет 5–8 %.

Таким образом, при увеличении эксцентриситета, значительно увеличивается дисбаланс электромагнитных сил, что приводит к нестабильности и колебаниям колец ГМП и к разрушению или нарушению работоспособности всей системы.

Ввиду этого необходимо, чтобы эксцентриситет не превышал 15 % при больших зазорах ($\delta \geq 1$ мм) и 7 % при малых зазорах ($\delta < 1$ мм). Указанные значения эксцентриситета возможно достичь лишь при жестком контроле и управлении смещением колец друг относительно друга.

Полученная математическая модель и результаты компьютерного моделирования могут служить в дальнейшем основой при проектировании системы контроля и управления ГМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инновационное развитие – основы модернизации экономики России: Национальный доклад. М: ИМЭМО. РАН. ГУ-ВШЭ, 2008.
2. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
3. Вышков Ю. Д. Иванов В. И. Магнитные опоры в автоматике. М.: Энергия, 1978. 160 с.
4. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Л.: Энергоиздат, 1981.

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.