

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

Ш. Н. ШАРАФУТДИНОВ¹, И. И. ЯМАЛОВ², Д. А. ГЛУМОВ²

¹sharshamil98@gmail.com, ²yamalov.i.i@mail.ru, ³glumov00@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В соответствии с различными рабочими условиями и требованиями к конструкции радиальные магнитные подшипники (РМП) имеют различные методы проектирования. Недостаточная эффективность или точность некоторых методов может привести к значительным различиям в конструктивных характеристиках магнитных подшипников, что вызовет ограничение несущей способности и сложность управления и контроля подшипников. В этой статье анализируется топология 8- и 12-полюсных магнитных подшипников, затем предлагается общий пример конструкции 8-полюсного магнитного подшипника на основе анализа магнитной цепи.

Ключевые слова: активный магнитный подвес, радиальный магнитный подшипник, метод конечных элементов, магнитное поле.

ВВЕДЕНИЕ

Радиальные магнитные подшипники (РМП) – это опорные устройства без трения между ротором и подшипником. Они обладают большим количеством преимуществ, чем подшипники качения, например, более высокие скорости вращения, отсутствие смазки, низкие потери и настраиваемые динамические параметры опоры.

Магнитные подшипники по принципу работы подразделяются на три вида: активные магнитные подшипники (АМП), пассивные магнитные подшипники (ПМП) и гибридные магнитные подшипники (ГМП). АМП в соответствии с режимами формирования токов электромагнитов разделяются на магнитные подшипники постоянного тока и переменного тока, а в соответствии с формой статора на цилиндрические и конические магнитные подшипники.

Активные магнитные подшипники представляют собой управляемые электромеханические гибридные системы, которые удерживают вращающуюся часть машины в заданном положении относительно неподвижной части. Они включают в себя ротор, статор и электромагниты, а также датчик положения вала, контроллер и усилитель мощности (УМ).

В зависимости от направления магнитного потока в теле ротора различают два варианта РМП: с поперечным направлением потока и продольным направлением потока. Подшипники с поперечным направлением потока проще в изготовлении и имеют меньшие размеры. Для уменьшения потерь на вихревые токи статор и ротор МП выполняются шихтованными. Подшипники с продольным направлением применяются в основном в конструкциях, требующих цельнометаллического исполнения ротора [1].

На рис. 1 показана схема работы РМП с одной степенью свободы. Механический контакт между ротором и статором отсутствует. Стабильность системы достигается за счет дифференциального управления, при котором сигнал изменения выходного напряжения определяется бесконтактным датчиком приближения из-за смещения вала ротора. Затем электромагнитная сила противодействует силе, выводящей систему из баланса, чтобы вернуть ротор в его положение равновесия. Электромагнитная сила генерируется дифференциальными токами в двух

противоположных катушках, выводимых контроллером и усилителем мощности. Этот процесс происходит непрерывно и с высоким быстродействием, таким образом, ротор левитирует в воздухе во время работы [2].

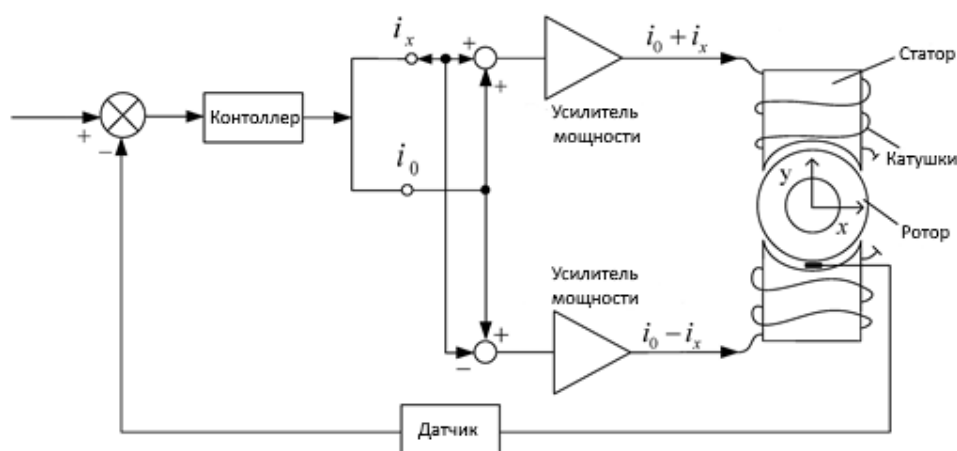


Рис. 1. Принцип работы системы АМП

Магнитные подшипники в настоящее время широко используются в аэрокосмической промышленности, на транспорте, в новых областях энергетики. АМП являются важными компонентами высокоскоростных генераторов, компрессоров и турбодетандерных установок. Первые исследования и разработки касались системы магнитных подшипников с четырехполюсной топологией статора. Ток четырех катушек в 4-полюсных РМП регулируется четырьмя независимыми УМ или двумя симметричными УМ для создания электромагнитных сил в двух вертикальных направлениях.

Для улучшения производительности РМП была предложена схема 8-полюсных подшипников, из которых наиболее часто используются гетерополярные 8-полюсные РМП. Как правило, статор и ротор изготавливаются путем склеивания листов электротехнической стали для уменьшения изменения магнитного поля и потерь на вихревые токи. Однако разнополярный магнитный подшипник испытывает большие потери из-за преобразования высокочастотного магнитного поля во время вращения ротора. В гетерополярных 8-полюсных РМП зачастую магнитные полюса распределяются по принципу Север-Север-Юг-Юг (*NNSS*). Пространство между полюсами в данной структуре используется не полностью, поэтому предлагается применять 12-полюсные РМП. В конструкции такого магнитного полюса один магнитный полюс делится на два небольших магнитных полюса и размещается по обе стороны от другого магнитного полюса. Распределение полюсов по принципу *SNS* или *NSN* может обеспечить независимость магнитной цепи и снизить вероятность перекрестной связи между магнитными полюсами.

ВОСЬМИПОЛЮСНЫЕ РМП И ДВЕНДЦАТИПОЛЮСНЫЕ РМП

Наиболее часто используемыми являются разнополярные 8-полюсные РМП, которые можно разделить на два типа в зависимости от расположения радиальных магнитных полюсов. Один тип магнитного полюса выполнен в виде *NNSS*, и структура показана на рисунке 2. Структура может образовывать два типа структур в зависимости от угла между направлением силы тяжести (направление *Y*) и ближайшим магнитным полюсом (0° или $22,5^\circ$). Методы его контроля также различны [3].

Угол между электромагнитной силой 8-полюсных РМП и силой тяжести ротора в направлении *Y* составляет 0° , а угол между электромагнитной силой и силой тяжести, который может быть сформирован путем регулировки магнитного полюса, составляет $22,5^\circ$. Угол электромагнитной силы более благоприятен для системы управления из-за стабильного вращения ротора.

Кроме того, связь магнитного потока между осями X и Y ниже, а стабильность и точность системы последующего управления выше. Однако магнитный поток полюса быстро переходит в насыщение при работе под большой нагрузкой.

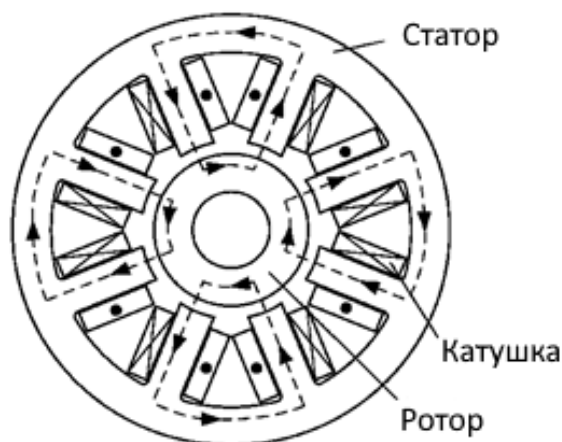


Рис. 2. Конструкция РМП с 8 полюсами и структурой распределения магнитных полюсов $NNSS$.

В практических применениях, когда наружный диаметр статора РМП велик, а количество магнитных полюсов мало, возникают такие проблемы, как большой зазор между магнитным полюсом статора, что приводит к пустой трате места в магнитном подшипнике. Ширина магнитного полюса статора не может достигать максимальной ширины, поэтому электромагнитная сила, создаваемая радиальным электромагнитным подшипником, не является максимальной.

Принцип построения 12-полюсного РМП заключается в том, что один магнитный полюс разделен на два небольших и размещен по обе стороны от другого магнитного полюса. Полюса с небольшой площадью называются субмагнитными, а с большой средней площадью – центральным. В общем случае площадь вспомогательного магнитного полюса составляет половину площади центрального, число витков катушки также составляет половину числа витков центрального полюса.

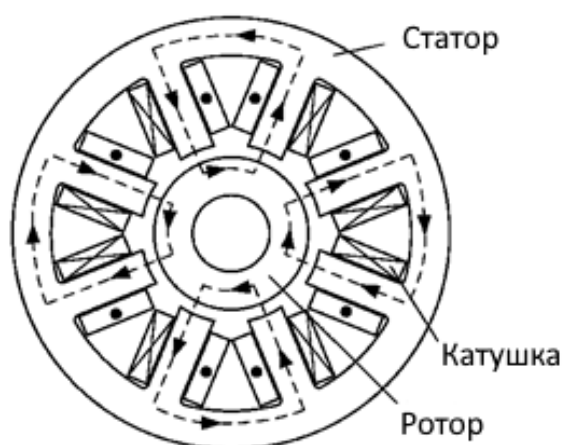


Рис. 3. Конструкция 12-полюсного РМП.

Расстояние между магнитными полюсами и зазор полностью используются благодаря увеличенному количеству полюсов и обмоток. Топология магнитных полей выполняется как SNS или NSN . Каждая группа магнитных полюсов обеспечивает независимость магнитной цепи и может подавлять влияние между магнитными цепями соседних групп магнитных полюсов. Распределение магнитных полюсов на рисунке 3 – NSN . Характеристики 12-полюсных РМП

по сравнению с 8-полюсными более оптимальны с точки зрения несущей способности и управляемости, а связь магнитного поля между магнитными полюсами низкая.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

Конструкция магнитных подшипников зависит от характеристик оборудования, в которое он будет устанавливаться. Осуществимость и надежность конструкции анализируются с помощью моделирования. Магнитный подшипник должен иметь незначительный износ, высокую стабильность и несущую способность, чтобы соответствовать требованиям безопасности эксплуатации.

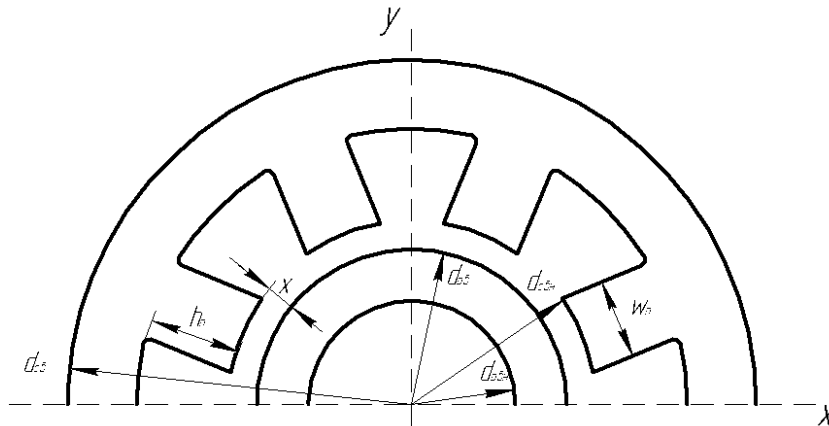


Рис. 4. Геометрия 8-полюсного РМП

Усилие подшипника определяется, исходя из заданных в технических требованиях статических и динамических нагрузок на подшипник. Это максимальная нагрузка с учетом веса ротора. Однако следует учитывать, что для разгрузки верхних электромагнитов от веса ротора применяется, как правило, расположение осей зон электромагнитов под углом $\alpha = 45^\circ$ к вертикали.

Поэтому, когда вся квазистатическая нагрузка обусловлена только весом ротора, номинальное усилие составляет:

$$F = P \cos \alpha, \quad (1)$$

где сила P представляет собой значение веса ротора, приведенное к месту установки магнитных подшипников.

Номинальная индукция в зазоре выбирается по кривой намагничивания для выбранной стали подшипника с учетом характера его работы. Для статических условий работы выгодно выбирать

$$B \approx (0,75 \div 0,8) B_{max}, \quad (2)$$

а при значительных динамических нагрузках B может быть определена как:

$$B \approx 0,5 B_{max}, \quad (2)$$

Номинальная индукция выбирается, исходя из магнитных свойств материалов ротора и статора магнитного подшипника. Типовым значением для обычных электротехнических сталей (2411, 2421 и т.д.) является $B=1$ Тл. Увеличение значения номинальной индукции может потребоваться при необходимости уменьшения габаритов подшипника. Повышение B допу-

стимо при применении сталей с высокими индукциями насыщения (1,5-2 Тл) либо при проектировании механизмов с гарантированными статическими нагрузками при отсутствии существенных переходных режимов по усилиям.

Необходимость уменьшения номинальной индукции возникает обычно по конструктивным соображениям, например, при выборе каких-либо характерных размеров магнитного подшипника, связанных с заданными размерами рабочих органов машины [4].

Номинальный зазор в подшипнике выбирается обычно минимальным из конструктивных соображений. Для больших машин значение составляет обычно 0,75–1 мм, так как при меньших зазорах трудно осуществлять сборку тяжелых статорных и роторных частей.

Минимальные значения зазоров для самых маленьких роторов из-за трудностей обеспечения эффективной работы страховочных подшипников выбираются не менее 0,1–0,2 мм.

Номинальный зазор в электромагните выбирается, как правило, исходя из выбранного значения зазора в страховочном подшипнике и габаритов машины. Типовым значением зазора в магнитном подшипнике является $\lambda = 2\delta_{сп}$, причем зазор в страховочном подшипнике $\delta_{сп}$ в большинстве случаев определяется требованиями к конструкции рабочих органов машины.

Реальные выражения, применяемые для расчета электромагнитов должны учитывать следующее:

1. Расположение полюсов по окружности (вычисляется результирующая сила от всех полюсов зоны).

Ненулевое значение магнитного сопротивления стали ($\mu \neq \infty$).

Наличие потерь магнитного потока полюса из-за рассеивания потока по воздуху.

Неполное заполнение окна статора сечением обмоточных проводников – из-за наличия зазоров и изоляции.

Конструктивная длина статора и ротора из-за наличия изоляции между листами на 5% больше, чем рассчитанная по сечению стали.

Исходя из вышеперечисленных параметров выбираются внешний и внутренний диаметры статора и ротора, сечение провода, номинальный ток и количество обмоток катушки. Таким образом, подбирая значения исходных данных при первоначальном проектировании, можно добиться приемлемых габаритов и формы листа подшипника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиальный 8-полюсный магнитный подшипник с топологией *NNSS* имеет лучшие характеристики, чем 4-полюсный. Однако его недостатками являются быстрое магнитное насыщение и большой зазор между полюсами статора.

12-полюсный РМП превосходит стандартный 8-полюсный по пропускной способности, стабильности и производительности управления, но он имеет высокое энергопотребление.

Методы проектирования магнитных подшипников, как правило, основаны на подборе минимального диаметра ротора. Однако существуют и другие методы проектирования для различных прикладных требований. Если задан диаметр ротора, то остальные параметры РМП, как площадь магнитного полюса, ток в обмотках и количество витков катушки, подбираются с учетом известных параметров. Затем могут быть рассчитаны геометрические характеристики статора. Окончательные оптимальные конструктивные параметры могут быть получены после коррекции, моделирования и анализа магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники, расчет и применение. Изд-во Политехника, 2003. 64–89 с.
2. Поляхов Н. Д., Стоцкая А. Д. Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников // Научное приборостроение. 2012. Т. 22. № 4. С. 5–18.
3. Qiang Li, Yefa Hu, Huachun Wu Structure design and optimization of the radial magnetic bearing // Actuators. 2023. № 12 (1). 27.
4. Верещагин В. П., Рогоза А. В. Особенности проектирования магнитных подшипников для крупных машин // Вопросы электромеханики. 2008. Т. 106. № 1. С. 15–18.

ОБ АВТОРАХ

ШАРАФУТДИНОВ Шамиль Наилевич, аспирант кафедры ЭМ.
ЯМАЛОВ Ильнар Илдарович, кандидат технических наук, доцент кафедры ЭМ.
ГЛУМОВ Данил Андреевич, магистрант кафедры ЭМ.

METADATA

Title: On the question of choosing the optimal design of a radial magnetic bearing.

Authors: Sh. N. Sharafutdinov¹, I. I. Yamalov², D. A. Glumov³

Affiliation: Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ sharshamil98@gmail.com, ² yamalov.i.i@mail.ru, ³ glumov00@gmail.com

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (27), pp. 147-152, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: According to different operating conditions and design requirements, radial magnetic bearings (RMP) have different design methods. Insufficient efficiency or accuracy of some methods can lead to significant differences in the design characteristics of magnetic bearings, which will cause a limitation of bearing capacity and the complexity of control and control of bearings. This article analyzes the topology of 8- and 12-pole magnetic bearings, then offers a general example of the design of an 8-pole magnetic bearing based on the analysis of a magnetic circuit.

Key words: active magnetic suspension; radial magnetic bearing; finite element method; magnetic field.

About authors:

SHARAFUTDINOV, Shamil Nailevich, Postgrad. Dept. of Electromechanics.

YAMALOV, Ildar Ildarovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the dept. of Electromechanics.

GLUMOV, Danil Andreevich, Master's student, Dept. of Electromechanics.