

УДК 621.318.38

doi 10.54708/22259309_2025_132129

СЕГМЕНТИРОВАННЫЙ ОСЕВОЙ МАГНИТНЫЙ ПОДШИПНИК

Ш. Н. ШАРАФУТДИНОВ¹, Д. Р. ИЛЬСОВ²

¹sharafutdinov.shn@ugatu.su, ²david.ilyasow@gmail.com

^{1,2} ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В статье проведено исследование влияния вихревых токов на характеристики осевых магнитных подшипников. Рассмотрены теоретические основы работы магнитных подшипников и механизмы возникновения вихревых токов в магнитных материалах. Разработаны конструкция осевого магнитного подшипника и проведено моделирование вихревых токов в его корпусе, методология и экспериментальная установка для измерения параметров подшипников. Представлены результаты моделирования, показывающие значительное влияние сегментации на величину вихревых токов осевых магнитных подшипников.

Ключевые слова: активный магнитный подвес; магнитный подшипник; вихревые токи.

ВВЕДЕНИЕ

Активные магнитные подшипники (АМП) получают все большее распространение. В настоящее время они являются одной из самых инновационных разработок в области машиностроения и находят свое применение во вращающихся машинах различного назначения. Магнитные подшипники более гибкие и с ними открываются широкие технические возможности. В ряде областей традиционные механические подшипники могут быть заменены на АМП из-за их преимуществ: меньший износ и трение, повышенная надежность, способность работать на высоких скоростях и в сложных условиях, легкость обслуживания.

Применение АМП в металлургической промышленности позволяет создавать высокоточные системы контроля процесса разлива металла, а в нефтегазовой – обеспечивает безопасную работу центробежных компрессоров. Несмотря на более высокую стоимость по сравнению с традиционными подшипниками, АМП оправдывают себя в приложениях, где требуются высокая надежность и длительный срок службы.

Принцип работы АМП основан на электромагнитной левитации, достигаемой с помощью магнитных сил. Магнитное поле создается регулируемые постоянными токами в обмотках сердечника, а сам подшипник состоит из статора, который имеет полюсные обмотки, и ротора (или сердечника), который установлен на валу. Статор создает магнитный поток в воздушном зазоре, который заставляет ротор левитировать без какого-либо механического контакта. Для удержания ротора в геометрическом центре машины необходима система управления, которая получает обратную связь от датчиков положения. Датчиковая система непрерывно отслеживает положение вала и посылает сигналы в систему автоматического управления для возврата вала в центральное положение путем регулировки позиционирующего магнитного поля статора. Сила притяжения на нужной стороне вала может быть увеличена или уменьшена путем регулирования тока в обмотках статора активных подшипников. Усилитель мощности подает ток на управляющие катушки статора для создания необходимой управляющей магнитной силы [1]. Принцип работы осевого АМП показан на рис. 1.

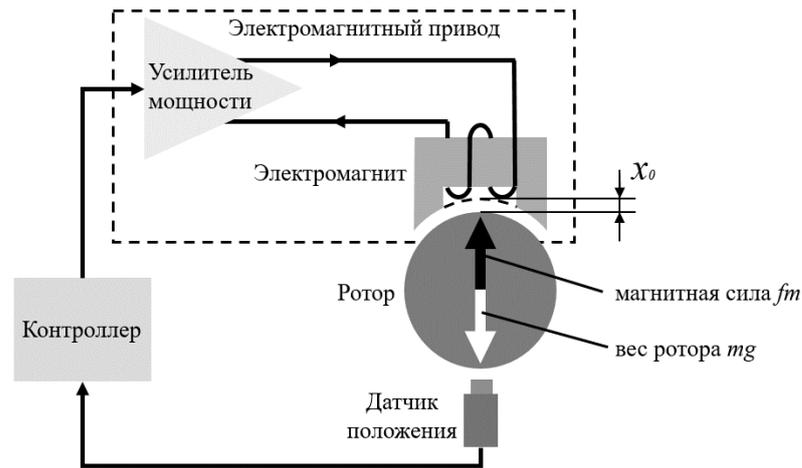


Рис. 1. Схема АМП

Вся подшипниковая система включает в себя три группы подшипников: осевые, радиальные и страховочные. Последние представляют собой механические подшипники и используются в качестве защиты внутренних частей агрегата при внезапном отключении электропитания. Осевые (ОМП) и радиальные магнитные подшипники удерживают ротор в требуемом положении, противодействуя возмущающим воздействиям в осевом (например, сила тяжести) и радиальном (например, силы дисбаланса) направлениях соответственно. Электромагнитный привод состоит из усилителя мощности и электромагнитов и управляется контроллером, получающим данные от датчиков положения [2, 3].

Конфигурация ОМП включает парные электромагнитные приводы для каждой оси. Осевые подшипники имеют осесимметричную конструкцию, каждый привод в поперечном сечении напоминает два электромагнита С-образной формы. В осевом сечении упорный подшипник выглядит как диск с канавкой, содержащей изолированную катушку. Каждая обмотка в паре упорных подшипников управляется отдельным усилителем мощности, как показано на рис. 2.

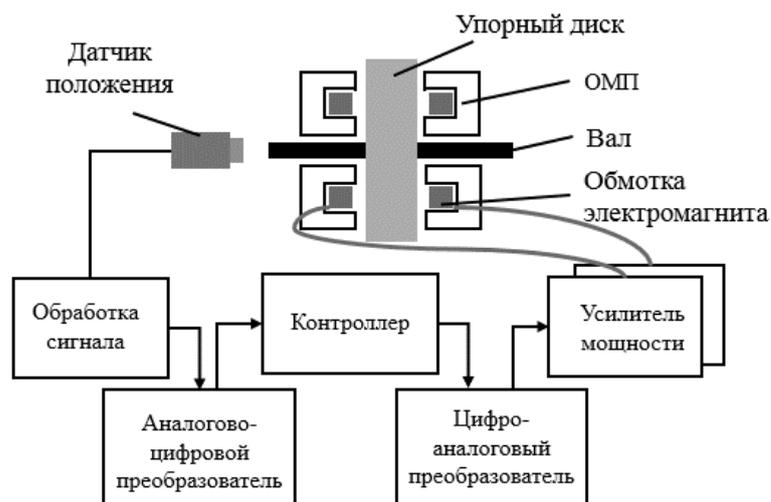


Рис. 2. Схема осевого магнитного подшипника

Сигнал о величине зазора между упорным диском ротора и статором ОМП, полученный с датчика положения, подвергается фильтрации помех и масштабированию в цепи формирования сигнала и поступает в контроллер, который вычисляет требуемый ток или напряжение катушки усилителей мощности. В токовом режиме работы усилители получают

опорный сигнал, соответствующий заданным значениям тока в катушках. Магнитодвижущая сила, создаваемая катушками, генерирует магнитный поток в электромагнитном приводе, обеспечивая необходимое усилие для стабилизации ротора.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГМЕНТАЦИИ ОМП

Ввиду высокой сложности и крупных производственных и материальных затрат магнитные упорные подшипники не изготавливают из шихтованной стали. В результате, согласно закону Фарадея, вихревые токи, индуцируемые в железе, создают магнитное поле, которое противодействует изменению поля, создаваемого переменным током катушки привода. Это противоположное поле приводит к уменьшению создаваемой электромагнитной силы и более медленному ее изменению. Таким образом, вихревые токи оказывают решающее влияние на динамическую мощность и полосу пропускания, которые могут быть достигнуты с помощью усилителя мощности. Одним из возможных способов достижения желаемой ширины полосы пропускания и улучшения динамических характеристик является сегментация осевого подшипника.

Для анализируемого ОМП были рассмотрены две конфигурации: электромагнитный привод без прорезей (рис. 3, а), и с прорезями (рис. 3, б) [4–7].

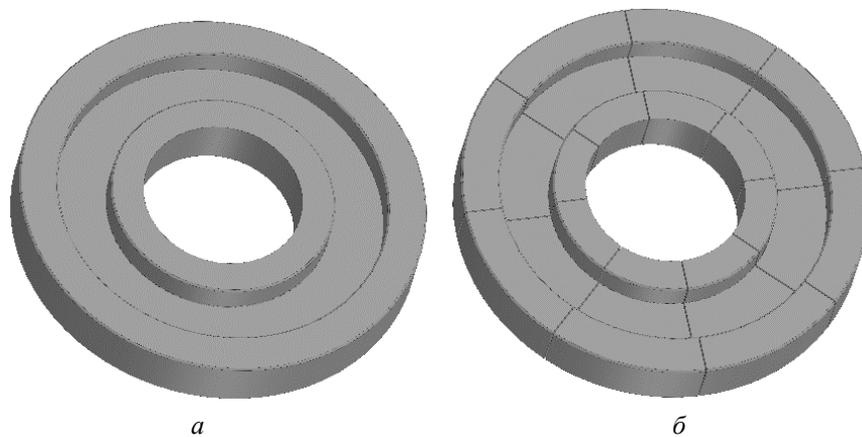


Рис. 3. Конфигурации ОМП

а – ОМП без прорезей;

б – ОМП с прорезями

На рис. 4 представлены геометрические размеры исследуемого ОМП.

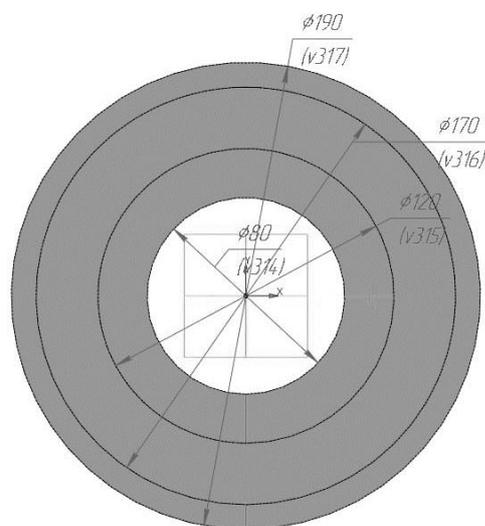


Рис. 4. Геометрические размеры ОМП

В табл. 1 представлены характеристики исследуемого ОМП

Таблица 1

Характеристики ОМП

Параметр	Величина
1	2
Материал	Сталь 10
Число витков	110
I_{max} , А	10 А
Сечение провода, мм ²	2
$F_{эм}$ расч, Н	6000
Число пазов	24
Ширина паза, мм	0,4

Для проверки влияния сегментации ОМП была разработана модель электромагнита с использованием программного обеспечения для моделирования электромагнитного поля. Результаты численного моделирования вихревых токов в осевом магнитном подшипнике, выполненного в среде *Ansys Maxwell* с использованием различных геометрических конфигураций, представлены на рис. 5–6 [8].

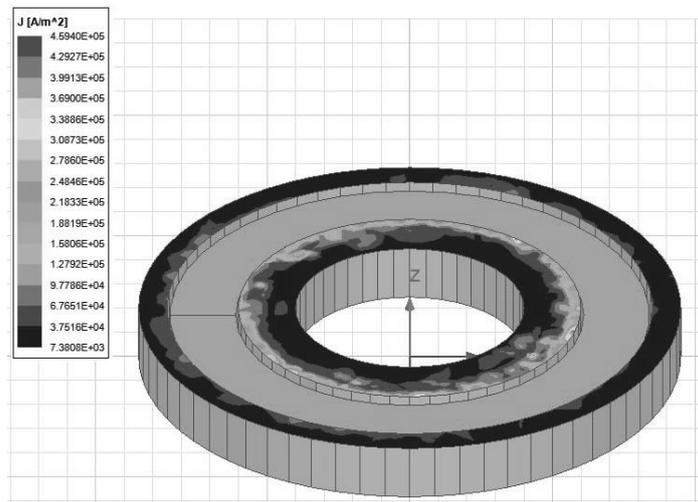


Рис. 5. Моделирование вихревых токов в ОМП без прорезей

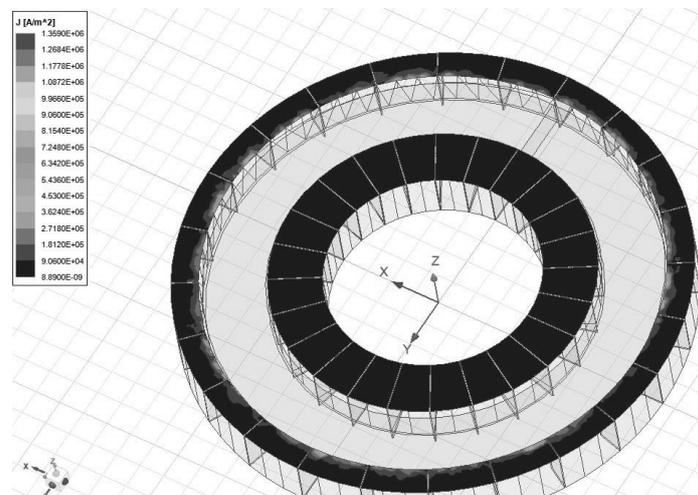


Рис. 6. Моделирование вихревых токов в ОМП с прорезями

Как видно из рис. 5–6, интенсивность вихревых токов в сплошном корпусе электромагнита выше, чем в сегментированном.

В конструкции сегментированного оптического магнитного подшипника наблюдается компромисс между уменьшением эффективной площади полюса и снижением вихревых токов. Разделение электромагнита на сегменты сокращает суммарное поперечное сечение, снижая магнитный поток при неизменном токе возбуждения из-за уменьшения магнитной проницаемости. Это, на первый взгляд, ухудшает грузоподъемность и жесткость подшипника. Однако сегментация существенно уменьшает вихревые токи, индуцируемые переменным магнитным полем, необходимым для активного управления положением ротора. В соответствии с законом Ленца эти токи противодействуют изменению поля, снижая эффективность и увеличивая энергетические потери, проявляющиеся в уменьшении амплитуды магнитного потока и тепловыделении. Изоляция сегментов увеличивает электрическое сопротивление пути вихревых токов, уменьшая их амплитуду за счет сокращения площади контура [9, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие сегментации предотвращает появление вихревых токов и, следовательно, увеличивает ширину полосы пропускания и скорость нарастания усилия. Однако при этом силовой потенциал несколько снижается.

Вихревые токи в сегментированном осевом магнитном подшипнике ниже по сравнению с несегментированным аналогом из-за увеличения электрического сопротивления пути этих токов. Разделение электромагнита на изолированные сегменты создает множество маленьких замкнутых петель для вихревых токов, вместо одной большой петли в сплошном электромагните. В результате суммарные потери на вихревые токи в сегментированной конструкции значительно ниже.

Таким образом, снижение вихревых потерь частично компенсирует уменьшение магнитного потока, обусловленное меньшей площадью сечения электромагнита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Журавлев Ю. Н.** Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с. ISBN: 5-7325-0665-1.
2. **Магин В. В.** Высокооборотный генератор на электромагнитных подшипниках для энергетических установок космического назначения / В. В. Магин, В. А. Клубуков, А. В. Рогоза // Труды МАИ. 2011. №45.
3. **Овсянникова Е. Е.** Исследование влияния потока крови на динамику ротора искусственного желудочка сердца (ИЖС) на активных магнитных подшипниках (АМП) / Е. Е. Овсянникова, Ю. В. Богданова, А. М. Гуськов // Машиностроение и компьютерные технологии. 2015. № 9.
4. **Верещагин В. П.** Методика проектирования электромагнитных подшипников / В. П. Верещагин, А. В. Рогоза, Т. Н. Савинова // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2009. № 6. С. 9.
5. **Китаев В. Е.** Электротехника с основами промышленной электроники: Учебник для проф.-техн. учебных заведений. Изд. 3-е, переработ. и доп. / В. Е. Китаев, Л. С. Шляпинтох. М.: Высшая школа, 1973.
6. **Jastrzebski R. P.** Analysis of a Segmented Axial Active Magnetic Bearing for Multi-MW Compressor Applications / R. P. Jastrzebski, O. Liukkonen // IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS. 2023.
7. **Исмагилов Ф. Р., Шарафутдинов Ш. Н., Ямалов И. И., Глумов Д. А.** Анализ влияния конструкции радиального магнитного подшипника на магнитные характеристики // Электротехника. 2023.
8. **Кузьмина Т. О.** Особенности моделирования упорного активного магнитного подшипника / Т. О. Кузьмина, А. Д. Стоцкая // Навигация и управление движением. 2016.
9. **Вавилов В. Е., Исмагилов Ф. Р., Жеребцов А. А., Сяхов И. Ф., Пронин Е. А., Гарипов И. Р.** Исследование магнитных полей в новой конструкции гомоплярного магнитного подшипника // Авиакосмическое приборостроение. 2023.
10. **Chiba A.** Magnetic Bearings and Bearingless Drives / A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto, D. G. Dorrell. Oxford. U.K.: Elsevier, 2005.

ОБ АВТОРАХ

ШАРАФУТДИНОВ Шамиль Наильевич, асп. ПИШ «Моторы будущего».

ИЛЬЯСОВ Давид Ринатович, бакалавр кафедры технологии машиностроения (УУНИТ, 2024).

METADATA

Title: Segmented axial magnetic bearing.

Authors: Sh. N. Sharafutdinov¹, D. R. Ilyasov²

Affiliation:

¹ Ufa University of science and technology (UUST), Russia.

Email: ¹sharshamil98@gmail.com, ²david.ilyasov@gmail.com,

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 1 (32), pp. 129-134, 2025, ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The article examines the effect of eddy currents on the characteristics of axial magnetic bearings. The theoretical foundations of the operation of magnetic bearings and the mechanisms of occurrence of eddy currents in magnetic materials are considered. The design of an axial magnetic bearing has been developed and eddy currents in its housing have been modeled. Methodology and experimental setup for measuring bearing parameters have been carried out. The simulation results are presented, showing a significant effect of segmentation on the magnitude of eddy currents of axial magnetic bearings.

Keywords: active magnetic suspension, magnetic bearing, eddy currents.

About authors:

SHARAFUTDINOV Shamil Nailevich, asp. AES "Motors of the future".

ILYASOV David Rinatovich, Bachelor of Engineering Technology Department (UUST, 2024).