

УДК 621.313.04

ТОПОЛОГИЯ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Д. А. Глумов¹, И. И. Ямалов², Ш. Н. ШАРАФУТДИНОВ³

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

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

Аннотация. Радиальные магнитные подшипники являются одними из наиболее часто используемых магнитных подшипников. Они широко применимы в области сверхскоростных и сверхточных станков с числовым программным управлением, бесподшипниковых двигателей, высокоскоростных маховиков, насосов искусственного сердца и молекулярных насосов, а также укрепляются и расширяются в различных важных областях. В данной статье приводится всесторонний обзор различных топологий радиальных магнитных подшипников с разными полюсами статора, которые отличаются по конструкции, режиму движения электромагнитов, потребляемой мощности, стоимости, магнитным цепям и симметрии, они сравниваются с разными полюсами и муфтами между двумя осями подшипников в радиальном направлении, отвечающими за возникновение перекрестных муфт.

Ключевые слова: радиальный магнитный подшипник; топологии; стратегии управления; активный магнитный подвес (АМП); гибридный магнитный подшипник.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитный подшипник – это элемент машины, использующий силу магнитного подвеса для подвешивания ротора без механического контакта. К настоящему времени разработаны различные магнитные подшипники, такие как упорные магнитные подшипники (магнитные подшипники с одной степенью свободы), радиальные магнитные подшипники (магнитные подшипники с двумя степенями свободы), радиально-осевые подшипники (магнитные подшипники с тремя степенями свободы), магнитные подшипники с четырьмя степенями свободы и магнитные подшипники с пятью степенями свободы. В этих типах магнитных подшипников радиальные магнитные подшипники (РМП) были встречены в основном с энтузиазмом, поскольку они используются в качестве основных компонентов других магнитных подшипников со степенями свободы (за исключением магнитных подшипников с одной степенью свободы). Поскольку постоянно появляются новые топологии подшипников, РМП становятся все более привлекательными. Они продемонстрировали потенциальное применение в центробежных машинах, турбомолекулярных насосах, компрессорах, сверхскоростных и сверхточных станках с числовым программным управлением, бесподшипниковых двигателях, высокоскоростных маховиках, биологических науках и во многих других областях.

ТОПОЛОГИЯ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Одним из ключевых вопросов системы магнитный подшипник – ротор является разработка разумных топологических структур (подшипник и ротор), которые влияют на общую производительность системы магнитный подшипник – ротор.

4-полюсные РМП и 8-полюсные РМП. Большинство устанавливаемых в настоящее время РМП основаны на четырех электромагнитах, из которых самым простым магнитным подшипником является 4-полюсный РМП, структура и магнитная цепь которого показаны на рис. 1. Однако наиболее часто используемым РМП во многих промышленных приложениях является гетерополярный 8-полюсный РМП, как показано на рис. 2. 8-полюсные РМП включают в себя гетерополярные и гомополярные 8-полюсные РМП. Как видно на рис. 2 (а) и (б), обе 8-полюсные структуры образуют четыре независимые магнитные петли с четырьмя независимыми катушками, что приводит к почти не связанным магнитным силам в четырех направлениях. Следовательно, в 8-полюсной системе РМП, как правило, имеются два биполярных усилителя или, иногда, четыре униполярных усилителя мощности. В гетерополярных РМП все восемь полюсов распределены в одной плоскости, N-полюс и S-полюс расположены взаимно крестообразно в окружном направлении. Хотя статоры и роторы гетерополярных РМП обычно имеют слоистую структуру, вихревой ток и потери на гистерезис все равно больше, хотя на поверхности вихревой ток и потери на гистерезис все равно относительно велики.

Между тем поскольку линия магнитной силы гомополярных РМП параллельна оси ротора, эффект сцепления и потери мощности гомополярных РМП меньше, чем гетерополярных РМП, а динамические характеристики систем гомополярных РМП лучше, чем систем гетерополярных РМП.

В системах с активным магнитным подшипником (АМП) два или четыре усилителя должны поддерживаться в нормальном рабочем состоянии из-за остаточного тока смещения, а использование меньшего количества усилителей мощности возможно при использовании схемы дифференциальной обмотки [3]. Другими словами, если одна катушка назначена специальной катушкой для тока смещения во всех полюсах и не зависит от катушек для токов управления, то не все усилители постоянно находятся в питании, а потребление энергии и стоимость может быть значительно снижено. Однако недостатком является то, что дополнительная катушка для тока смещения будет выделять гораздо больше тепла. Таким образом, необходимо использовать дополнительную систему охлаждения, и общая стоимость несущей системы соответственно увеличится.

В совокупности эффект связи и потери мощности гомополярного РМП с 4-мя парами полюсов, показанного на рис. 2 (б), даже меньше, чем у гетерополярного АМП, показанного на рис. 2 (а).

Кроме того, реальным методом снижения стоимости является уменьшение числа магнитных полюсов. Минимальное число полюсов для РМП, обеспечивающее требуемые силы в двумерном конфигурационном пространстве, равно трем. Трехполюсные РМП обычно считаются лучшими магнитными подшипниками, с точки зрения компактности подшипника при меньших диаметрах цапф. Поэтому в последние десятилетия 3-полюсные РМП широко изучаются. По сравнению с 8-полюсным типом, 3-полюсный РМП (как показано на рис. 3) имеет ряд преимуществ.

1) По крайней мере, один драйвер можно сэкономить, поскольку для него требуется не более трех усилителей мощности.

2) Он имеет меньшую частоту перемагничивания и, следовательно, включает меньшие потери железа в роторе. Для 8-полюсного РМП рис. 4 показывает, что, когда точка на роторе проходит путь от P1 до P8 (то есть один оборот), соответствующие магнитные поля (напряженность магнитного поля H и плотность магнитного потока B) изменяются на два цикла [4]. В отличие от этого, на рис. 5, когда точка ротора перемещается от Q1 до Q4 (то есть за один оборот), соответствующие магнитные поля изменяются на один цикл. Результаты на рис. 5 показывают, что частота перемагничивания для 3-полюсного РМП составляет лишь половину от частоты перемагничивания для 8-полюсного типа.

3) Уменьшение числа полюсов может оставить больше места для отвода тепла, намотки катушки и установки датчика

Все вышеперечисленные преимущества могут привести к снижению стоимости 3-полюсного РМП, что происходит исключительно за счет количества магнитных полюсов. Кроме того, на эксплуатационные характеристики, потери энергии и стоимость системы могут сильно влиять способ соединения обмоток и режимы их движения [4].

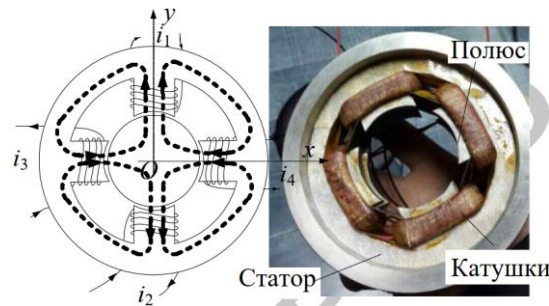


Рис. 1. Прототип и магнитная схема 4-полюсного РМП



Рис. 2. Прототип и магнитная схема 4-полюсного РМП: а) – гетерополярные РМП; б) – гомополярные РМП

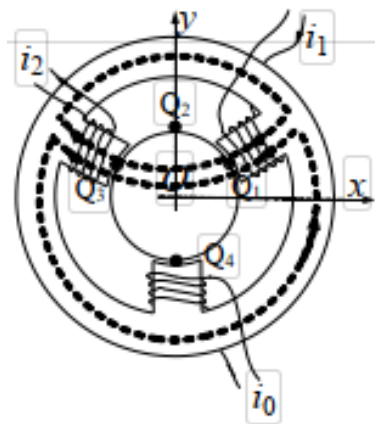


Рис. 3. Структурная схема и магнитная цепь 3-полюсного двигателя РМП

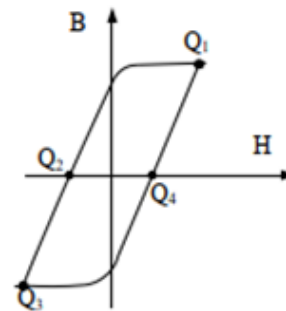
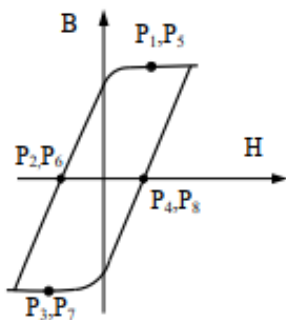


Рис. 4. Магнитные характеристики 8-полюсных РМП Рис. 5. Магнитные характеристики 3-полюсных РМП

3-полюсные РМП. В соответствии со способом соединения обмоток и режимами работы 3-полюсных РМП они могут быть далее классифицированы как 3-полюсные РМП,

управляемые тремя усилителями мощности [4], 3-полюсные РМП, управляемые двумя усилителями мощности [6–7], и 3-полюсные РМП, управляемые трехфазным преобразователем [5], как показано на рис. 3, 6 и 7 соответственно.

В этих топологиях 3-полюсных РМП в основном изучаются 3-полюсные РМП, управляемые тремя усилителями мощности. В отличие от наиболее распространенных радиальных магнитных подшипников с асимметричной структурой (четное число полюсов), 3-полюсные РМП, имеющие только три полюса для каждого подшипника, могут упростить структуру подшипника и значительно уменьшить размер подшипниковой системы. В [4] представлен 3-полюсный РМП, а его радиальное управление осуществляется тремя независимыми униполярными усилителями мощности.

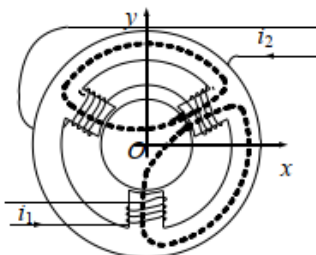


Рис. 6. Структурная схема и магнитная цепь 3-полюсных РМП, управляемых двумя усилителями мощности

В этих случаях для реализации радиального управления одним подшипником все еще необходимы два независимых однополярных усилителя мощности. Однако если один РМП может управляться только 3-фазным силовым инвертором, это будет все более привлекательным

Поэтому, если магнитный подшипник может быть разработан для использования 3-фазных силовых модулей, то есть 3-полюсного РМП, управляемого 3-фазным инвертором, стоимость и сложность магнитного подшипника могут быть значительно снижены [8]. На рис. 7 показан 3-полюсный РМП, приводимый в действие системой 3-фазного инвертора.

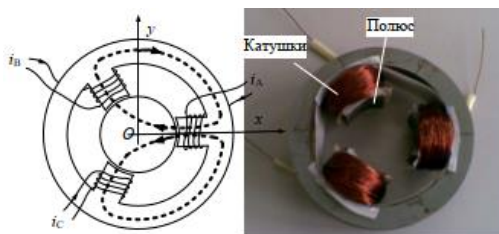


Рис. 7. Структурная схема и магнитная цепь 3-полюсных РМП, управляемых двумя усилителями мощности

6-полюсные РМП. Хорошим способом решения проблемы перекрестной связи, существующей в 3-полюсных РМП, является изменение асимметричной структуры (нечетные полюса) на симметричную (четные полюса). Одним из способов достижения этой цели является схема, состоящая из шести магнитов вокруг ротора. В этом случае два противоположных электромагнита подключаются к одной фазе 3-фазного преобразователя. Структурная схема и магнитная цепь 6-полюсного РМП с двумя противоположными магнитами, подключенными к одной фазе 3-фазного преобразователя, показаны на рис. 8.

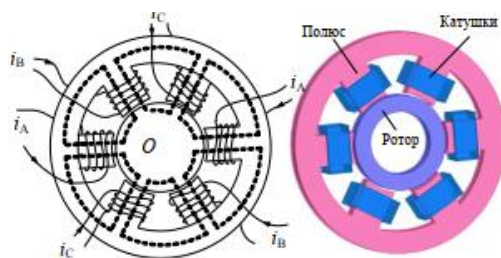


Рис. 8. Структурная схема и магнитная цепь 6-полюсного РМП с двумя противоположными магнитами, подключенными к одной фазе 3-фазного преобразователя

В работе [10] представлен другой тип подковообразного 6-полюсного магнитного подшипника (как показано на рис. 9), который представляет собой активный магнитный подшипник (АМП). Предлагаемая конструкция включает три электромагнита как необходимое минимальное количество исполнительных устройств, требуемых для подвеса ротора в пространстве подшипника. Меньшее количество исполнительных узлов и электронных схем позволяет минимизировать размеры подшипника, производственные затраты и потребление энергии. Недостатки этого решения связаны с низкой областью устойчивости и сильными нелинейностями.

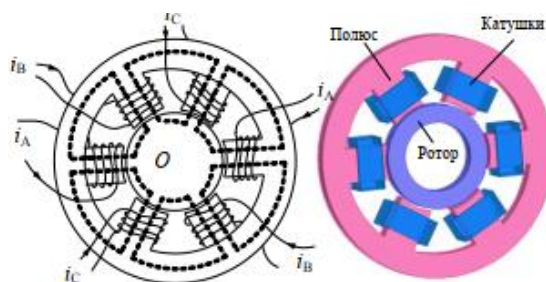


Рис. 9. Структурная схема и магнитная цепь подковообразного 6-полюсного РМП

Упомянутые выше 6-полюсные РМП являются АМП, а другой тип РМП включает ГМП, как показано в [10]. Устройство предлагаемого магнитного подшипника показано на рис. 10. Такие магнитные подшипники состоят из железного кольца с тремя полюсами постоянного магнита и тремя железными полюсами. Полюса постоянных магнитов, обозначенные 1, 2, 3, используются для создания потока смещения каждой из постоянных магнитных сеток. Железные полюса, обозначенные a , b и c , соединены с магнитными катушками для создания потока управления. На рис. 10 пунктирными линиями обозначен поток смещения, а сплошными – поток управления. Когда ротор находится в положении равновесия, плотности потоков, создаваемых постоянными магнитами во всех воздушных зазорах, равны из-за симметрии структуры, что означает отсутствие магнитных сил между статором и ротором в обоих направлениях x и y . Когда прикладывается возмущающая сила в отрицательном b -направлении, ротор отклоняется от равновесного положения. Затем отклонение положения будет обнаружено датчиками положения, и контроллер создаст силу магнитного подвеса в положительном направлении y на основе обнаружения ошибки. В результате плотность потока в воздушном зазоре между железным полюсом b и ротором увеличивается, в то время как плотность магнитного потока в воздушных зазорах железных полюсов a и c соответственно уменьшается. Наконец, в роторе создается магнитная сила вдоль положительного направления b , которая тянет ротор обратно в равновесное положение.

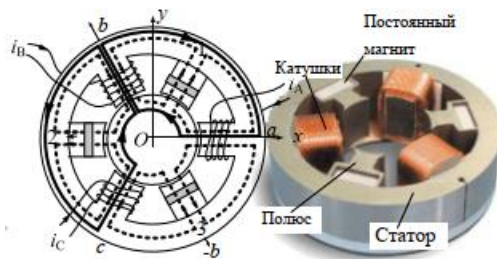


Рис. 10. Прототип и магнитная цепь 6-полюсных РМП (ГМП)

Дополнительными преимуществами описанного подшипника на рис. 11 и 12 является возможность использования больших воздушных зазоров, что обусловлено постоянным магнитным смещением. Для получения такой же магнитодвижущей силы, которая может быть достигнута уже при небольших объемах редкоземельных магнитов с помощью электрических катушек, потребовалась бы чрезвычайно большая площадь намотки.

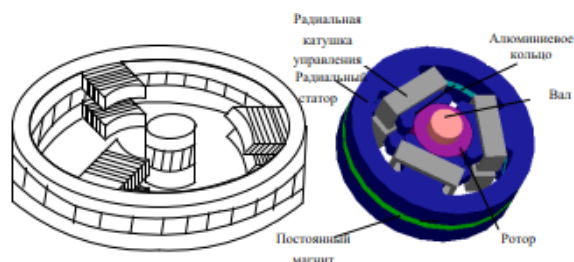


Рис. 11. Структурная схема 6-полюсного РМП с двумя частями статора в подшипнике

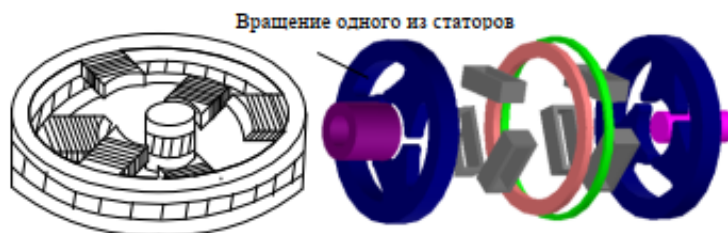


Рис. 12. Структурная схема 6-полюсного РМП с двумя частями статора в подшипнике (конструкция с одним повернутым кольцом)

12-полюсные РМП. Как сообщается в [8], 12-полюсное расположение практически не дает эффекта перекрестной связи. Для больших подшипников 12 полюсов не являются недостатком. Однако для подшипников меньшего размера будет преимуществом меньшее количество полюсов, как показано на рис. 13.

В табл. 1 представлен сравнительный анализ параметров для подшипников, представленных выше, при определенных условиях, и поэтому можно четко определить преимущества и проблемы каждой топологии. Конкретные условия следующие:

- (1) Тринадцать типов РМП сравниваются при одном и том же заданном значении диаметра цапфы.
- (2) Число витков катушек определяется путем анализа магнитной цепи для получения наилучшей нагрузочной способности в пределах токов катушек и плотности потока.
- (3) Номинальные скорости для всех тринадцати устанавливаются одинаковыми для проведения сравнения.

Детальный процесс сравнения потребляемой мощности выглядит следующим образом: когда мощность высокочастотного двигателя отключается, скорость ротора постепенно снижается до нуля под совместным воздействием воздушного трения, потерь на сопротивление, вихревого тока и гистерезисных потерь. Полная кинетическая энергия

преобразуется в ущерб от ветра и потери мощности (потери на медь, потери на гистерезис и потери на вихревые токи).

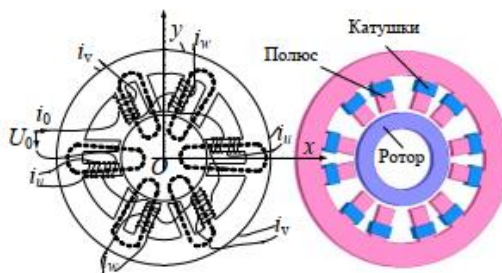


Рис. 13. Структурная схема и магнитная цепь 12-полюсных РМП

СРАВНЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ, СВЯЗАННЫЕ С РМП

В процессе естественного замедления (когда скорость ротора снижается с 60000 до 0 об/мин), энергия (E_k) и потери мощности (P_k) ротора следующие:

$$\left\{ \begin{aligned} E_k &= \frac{J_p w^2}{2} \\ P_k &= \frac{dE_k}{dt} = J_p w \frac{dw}{dt} + \frac{w^2}{2} \frac{dJ_p}{dt} = J_p w \frac{dw}{dt}, \end{aligned} \right.$$

где J_p – момент инерции, а w – угловая скорость вращения.

Исходя из уравнения общая потеря мощности, включая ущерб от ветра и потерю мощности при различных скоростях вращения, может быть получена в соответствии с изменением скорости вращения ротора во времени.

В эксперименте ущерб от ветра можно концептуально считать одинаковым. Поэтому разница между измеренными потерями мощности тринадцати различных РМП может служить эталоном для сравнения.

В табл. 1 символ «√» означает «да», а символ «×» – «нет». Из столбца энергопотребления (ранжированного от наибольшего к наименьшему) видно, что энергопотребление РМП, управляемых усилителями мощности, выше, чем у инверторов.

Таблица 1

Сравнительный анализ параметров

Легенда	Управляющее устройство		Расположение полюсов		Число полюсов	Мощность потребления (ранжирование от самого высокого до самого низкого)	Симметричность	Муфта		
	Активный	Гибридный	Усилитель мощности	Инвертор					Гетерополярный	Гомополярный
Рис. 1	√		√		√	4	2	√	×	
Рис. 2 (а)	√		√		√	8	1	√	×	
Рис. 2 (б)		√	√			√	8	3	√	×
Рис. 3	√		√		√	3	4	×	√	
Рис. 6	√		√		√	3	5	×	√	
Рис. 7	√			√	√	3	11	×	√	
Рис. 8	√			√	√	6	6	√	×	
Рис. 9	√			√	√	6	10	×	√	
Рис. 10		√		√	√	6	12	×	√	
Рис. 11		√		√		√	6	8	×	√
Рис. 12		√		√	√	6	9	√	×	
Рис. 13				√	√	12	7	√	×	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье сравниваются различные топологии РМП, которые в основном отличаются стоимостью, энергопотреблением, симметрией и связью между двумя осями подшипников в радиальном направлении, ответственной за генерацию перекрестной связи. На основе сравнения различных типов РМП были определены преимущества и проблемы каждой топологии. С помощью этого обзора можно выбрать наиболее подходящую топологию для определенного применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chiba A., Fukao T., Ichikawa O., Oshima M., Takemoto M., and Dorrell D. G. *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*. Oxford. U.K.: Elsevier, 2005.
2. Ren Y., Fang J. C. High-stability and fast-response twisting motion control for the magnetically suspended rotor system in a control moment gyro, *IEEE/ASME Trans // Mechatron*. 2013. Vol. 18. No. 5. Pp.1625–1634.
3. Pesch A. H., Smirnov A., Pyrhonen O., and Sawicki J. T. Magnetic bearing spindle tool tracking through-synthesis robust control, *IEEE/ASME Trans // Mechatron*. 2015. Vol. 20. No. 3. Pp. 1448–1457. June.
4. Fang J. C. and Ren Y. Self-adaptive phase-lead compensation based on unsymmetrical current sampling resistance net-work for magnetic bearing switching power amplifiers, *IEEE Trans // Ind. Electron*. 2012. Vol. 59. No. 2. Pp. 1218–1227. Feb.
5. Zheng S. Q., Han B. C., and Guo L. Composite hierarchical antidisturbance control for magnetic bearing system subject to multiple external disturbances. *IEEE Trans // Ind. Electron*. 2014. Vol. 61. No. 12. Pp. 7004–7012. Apr.
6. Hijikata K., Kobayashi S., Takemoto M., Tanaka Y., Chiba A., and Fukao T. Basic characteristics of an active thrust magnetic bearing with a cylindrical rotor core. *IEEE Trans // Magn*. 2008. Vol. 44. No. 11. Pp. 4167–4170. Nov.
7. Ahn J., Han C., Kim C., Park C., Cho J. Design of hybrid thrust Magnetic bearing for heavy rotating shaft considering self-weight compensation according to axial load // *Proc. IEEE International*. 2017. Dublin. Ireland. April 24–28.
8. Haris S. Z., Talha I. K., Ismai L. Design and adaptive sliding mode control of hybrid magnetic bearings. *IEEE Trans // Ind. Electron*. Early Access Articles. 2017. Aug.
9. Kandil M., Dubois M.R., Bakay L., Trovão J. P. Application of second-order sliding mode concepts to active magnetic bearings. *IEEE Trans // Ind. Electron*. Early Access Articles. 2017. Jun.
10. Rossi M., Dezza F. C., Mauri M., Maria Stefania Carmeli M. S., Braghin F. Rotor position estimation in a large air gap active magnetic bearing // *Proc. 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPEPOWERENG)*. Spain. 2017. April 4–6. Pp. 258–263.

ОБ АВТОРАХ

ГЛУМОВ Данил Андреевич, магистрант кафедры ЭМ.

ЯМАЛОВ Ильнар Илдарович, кандидат технических наук, доцент кафедры ЭМ.

ШАРАФУТДИНОВ Шамиль Наилевич, аспирант кафедры ЭМ.

METADATA

Title: Magnetic bearing topology.

Authors: D. A. Glumov¹, I. I. Yamalov², Sh. N. Sharafutdinov³.

Affiliation:

¹⁻³ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

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

Language: Russian.

Source: *Molodezhnyj Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (30), pp. 37-44, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: Radial magnetic bearings (RMBs) are among the most frequently used magnetic bearings. They are widely used in the field of ultra-high-speed and ultra-precision numerically controlled machine tools, bearingless motors, high-speed flywheels, artificial heart pumps and molecular pumps, and are also being strengthened and expanded in various important fields. This article provides a comprehensive overview of the different topology of radial magnetic bearings with different stator poles, which differ in design, solenoid motion mode, power consumption, cost, magnetic circuits, and symmetry. RMBs are compared with different poles and couplings between the two bearing axes in the radial direction responsible for the occurrence of cross couplings.

Key words: radial magnetic bearing; topologies; control strategies; active magnetic suspension (AMS); hybrid magnetic bearing.

About authors:

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

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

SHARAFUTDINOV, Shamil Nailevich, postgrad. student at the Dept. of Electromechanics.