

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.01

УДК 62-233

А.В. Махнутин, А.Ф. СальниковПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ СИСТЕМЫ
«РОТОР – СТАТОР» РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА**

Ротор является основополагающей сборочной единицей турбоагрегата. Он характеризуется множеством динамически изменяемых взаимозависимых и взаимовлияющих граничных условий, которые появляются в результате сопряжения газовой среды, напряженно-деформированного состояния элементной базы ротора, колебательного контура, дисбаланса и магнитной составляющей электромагнитных опор. Неизменный рост скорости вращения, повышение нагрузок на элементную базу ротора турбомашин, а также снижение массы и габаритов выводят задачу увеличения срока службы подшипниковых опор на первое место. Учитывая требования заказчиков о постоянном повышении мощности, увеличении жизненного цикла и продолжительности удовлетворительного функционирования оборудования, можно отметить, что современные турбоагрегаты нуждаются в опорах, которые смогут обеспечить стабильную и надежную эксплуатацию ротора на любых режимах и в любых средах. В плоскопараллельной постановке рассматривается численное моделирование комплексно сопряженной задачи рассеяния электромагнитного поля в воздушном зазоре системы «ротор – статор» радиального электромагнитного подвеса из состава центробежного нагнетателя при левитации ротора с учетом радиального смещения оси ротора во время вращения. По результатам расчета определена интенсивность распределения электромагнитных полей при взвешивании ротора и при его радиальном смещении и вращении.

Ключевые слова: радиальный электромагнитный подшипник, рассеяние магнитного поля, напряженность, индукция, метод конечных элементов, нагнетатель центробежный, эксцентриситет.

A.V. Makhnutin, A.F. Salnikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE AIR GAP OF THE «ROTOR – STATOR»
SYSTEM OF A RADIAL ELECTROMAGNETIC BEARING**

A particularly responsible, pronounced assembly unit of the turbine unit is the manufacturer, which has the severity of variable interdependent and mutually influencing boundary conditions that cause the impact on the gas environment, the sharply deformed state of the rotor element base, the oscillatory circuit, the imbalance and the magnetic strength of the electromagnetic support. The constant increase in the rotation speed, the increase in the importance of the structural element of the turbomachine rotor, as well as the reduction in weight and dimensions, bring the increase in the service life of bearing supports to the first place. It can be noted that modern turbine units are consumed in supports, which cause a stable and increased rotor speed in any modes and in any environment. The article considers in a plane-parallel setting numerical simulation of a complexly identified problem of field scattering in the air gap of the "rotor-stator" system of a radial electromagnetic suspension, from the composition of a centrifugal supercharger, with centrifugal rotor levitation, taking into account the radial displacement of the rotor axis during rotation. Based on the results of the calculation, the distribution of the distribution of electromagnetic fields was determined during the weighing of its rotor and during radial displacement and rotation.

Keywords: radial electromagnetic bearing, magnetic field scattering, sensitivity, transferring, element termination method, centrifugal supercharger, eccentricity.

Конструкция и схемы классических подшипников давно отработаны, протекающие в них процессы ставят ограничительные рамки в плане эксплуатации механизмов с данными подшипниками для надежного функционирования оборудования. Существенный недостаток данной конструкции в непосредственном контакте механических частей системы «ротор – статор» подшипника.

Данный контакт снижается введением смазочной системы в контур агрегата, что, в свою очередь, влечет за собой прецизионное изготовление зон уплотнений для герметизации и недопущения перетечек смазочных продуктов в газовую среду нагнетателя и обратно. Это, несомненно, сказывается на стоимости и усложнении схемы всего оборудования.

Магнитные подвесы не имеют данных проблем. Созданием реакций опоры занимаются магнитные и электрические поля. Отсутствие в магнитном подвесе механического контакта между ротором и статором, отсутствие смазочной системы делает их перспективными во многих областях турботехники.

В данной статье рассматривается задача взвешивания ротора нагнетателя центробежного (НЦ) на магнитных опорах. Ротор нагнетателя левитирует в магнитных полях, создаваемых двумя радиальными электромагнитными подшипниками. От осевого перемещения его удерживает осевой электромагнитный подшипник [1].

Нагнетатель центробежный – это динамическая система с высокой частотой вращения, в которой присутствует момент инерции $I = \sum_{i=0}^n m_i \cdot r_i^2$, центробежная сила $F = m\omega^2 \cdot R^2$, дисбаланс элементов ротора по отдельности (рабочие колёса, лабиринтные уплотнения, упорный диск) и дисбаланс ротора в сборе. Дисбаланс, многоконтурность и нелинейность взаимосвязей в системе – всё это приводит к эксцентриситету валопровода в нагнетателе. В результате смещения оси ротора нарушается и равновесное состояние электромагнитных сил в магнитном подвесе.

Конструктив элементной базы объектов расчета

Магнитопровод радиального магнитного подшипника (РМП) является собой пакет шихтованной стали. Пакеты статора и цапфы набираются из листовой электротехнической стали толщиной 0,1–0,5 мм.

В шихтованном пакте в каждом из листов образуются вихревые токи, которые деформируют, рассеивают и смещают магнитное поле в воздушном зазоре магнитного подшипника. На рис. 1 изображены два бруска металла, один является собою шихтованный пакет (рис. 1, б), другой – цельнометаллическая болванка (рис. 1, а) [2–6].

Вихревые токи – вихревой индукционный объёмный электрический ток, возникающий в электрических проводниках при изменении во времени потока действующего на них магнитного поля [7].

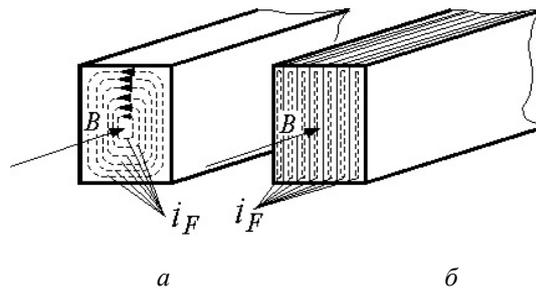


Рис. 1. Линии тока Фуко в шихтованном пакете:
а – цельнометаллическая болванка;
б – шихтованный пакет

На рис. 1, б показано, что есть некое магнитное поле, которое движется вдоль массивного шихтованного пакета, и под действием магнитного потока образуется вихревое электрическое поле на резистивном слое, которое создает вихревые токи. В нешихтованном элементе (см. рис. 1, а) вихревые токи развиваются до высоких значений и направлены таким образом, что создают встречное магнитное поле, и данное поле становится комплексной величиной, что влечет за собой дополнительные потери.

Магнитная сила, действующая в магнитном поле воздушного зазора системы «ротор – статор», создается магнитным полем [8–13].

Постановка задачи

Авторы обозначили задачу, в которой была смоделирована плотность распределения магнитного потока в воздушном зазоре радиального электромагнитного подшипника системы «ротор – статор». Распределение поля производилось при помощи метода конечных элементов (МКЭ).

Для анализа распределения этих сил была поставлена и решена плоскопараллельная задача. В программе системы автоматизированного проектирования (САПР) была построена трёхмерная модель радиального электромагнита с восьмиполусной схемой (рис. 2).

Для упрощения и экономии ресурсов задача решалась в плоскопараллельной постановке, в данных условиях основное воздействие магнитного поля будет производиться стержнем катушки, что занимает собою более 95 % от общего объема катушки, и результаты

можно экстраполировать на решение трудоёмкой трехмерной задачи.

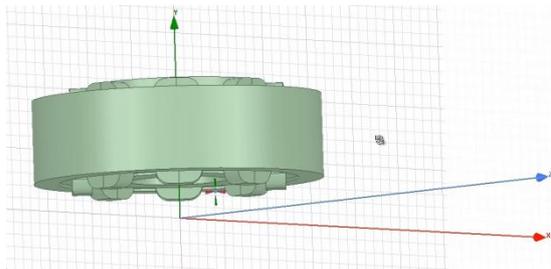


Рис. 2. 3D-модель

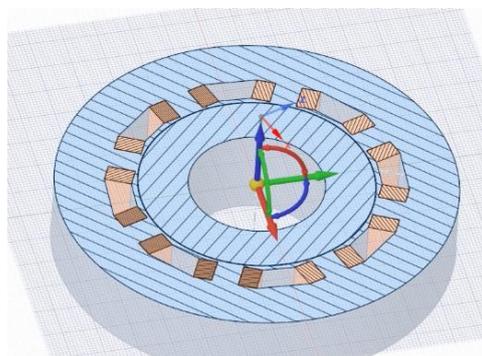


Рис. 3. Модель РМП в разрезе

Для граничных условий были приняты следующие параметры. Системе «ротор – статор» назначены характеристики электротехнической стали согласно ГОСТ 21427.2–83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Характеристика стали – нелинейная кривая намагничивания – изображена на рис. 4.

Кривую намагничивания BH , которая создаёт петлю гистерезиса, определяет направление шихтовки в пакете электромагнита с учетом коэффициента заполняемости.

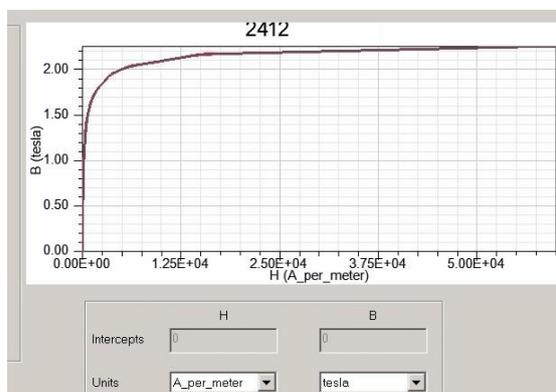


Рис. 4. Нелинейная кривая намагничивания стали

Основная кривая намагничивания (рис. 5) – это геометрическое место вершин частных симметричных петель гистерезиса. По данной кривой определяется важная характеристика ферромагнитного материала – абсолютная магнитная проницаемость.

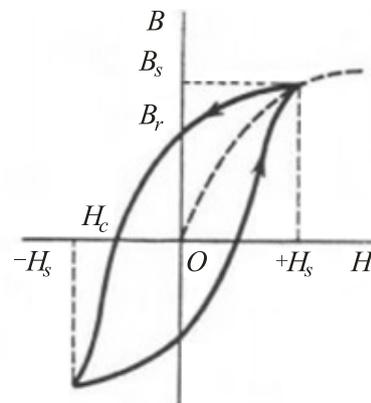


Рис. 5. Зависимость магнитной индукции от напряженности для ферромагнитного материала

Электромагнитное поле в воздушном зазоре создают катушки магнитного подвеса. В данной задаче основным граничным условием для медных катушек радиального электромагнита является полюсное направление токов, проходящих по ним (рис. 6).

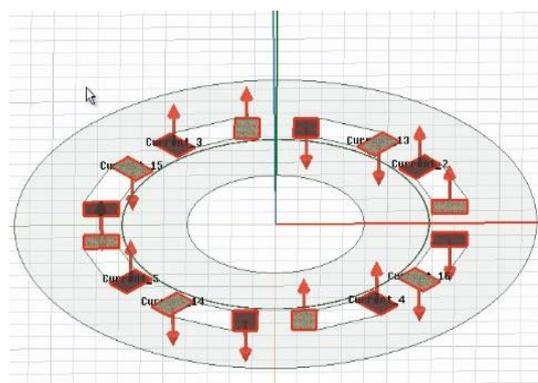


Рис. 6. Направление векторов тока

Задачи по магнитостатике характеризуются векторами напряжённости магнитного поля, плотности тока и магнитной индукции.

В распоряжении авторов имеются данные с компрессорной станции по радиальному смещению ротора и соответствующие значе-

ния токов для каждой пары катушек радиального электромагнитного подшипника.

Значения токов брались в момент максимального эксцентриситета валопровода нагнетателя (297 мкм), для первой пары катушек – 8,74 А, четвертой – 8,69 А, для второй и третьей пары было принято значение в 0,5 + 0,5 А.

Для понимания распределения сил в зазоре магнитного подшипника был графически отображен векторный график магнитной индукции, который выглядит, как на рис. 7.

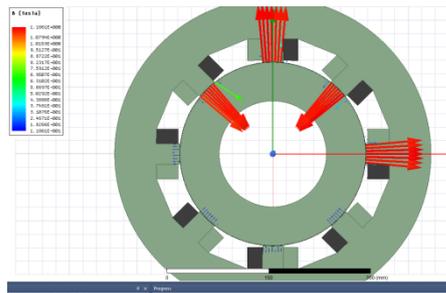


Рис. 7. Векторный график магнитной индукции

После получения распределения сил в подвесе было произведено «взвешивание ротора» и определена сила, с которой катушки электромагнита тянут якорь. На рис. 8 показано распределение вектора магнитной индукции в РМП.

После проведения расчётов было выявлено, что преобладание силы по ординате со

значением в 40045 Н, по абсциссе – 16390 Н. Значение магнитной индукции в пределах 0,7–1,8 Тл (рис. 9). Большие значения принадлежат 1-й и 4-й паре катушек.

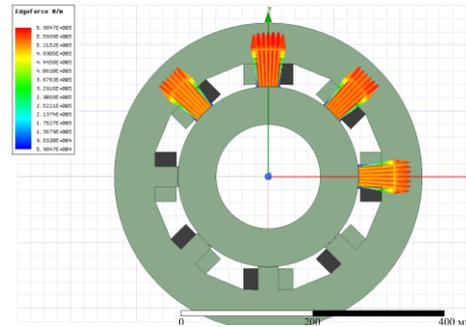


Рис. 8. Распределение силы на внешней поверхности ротора

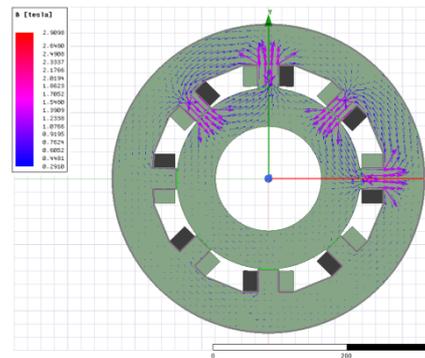


Рис. 9. Распределение магнитной индукции B при взвешивании ротора

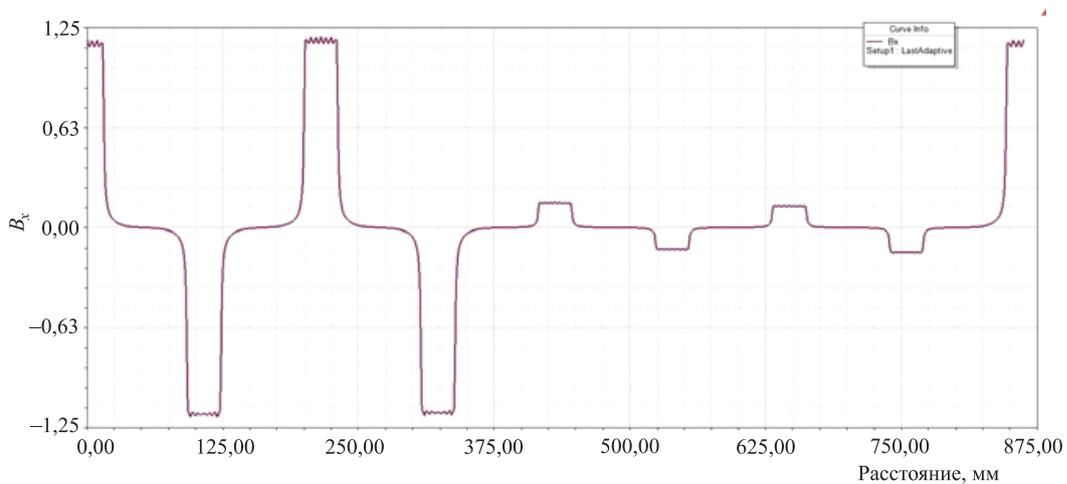


Рис. 10. График магнитной индукции

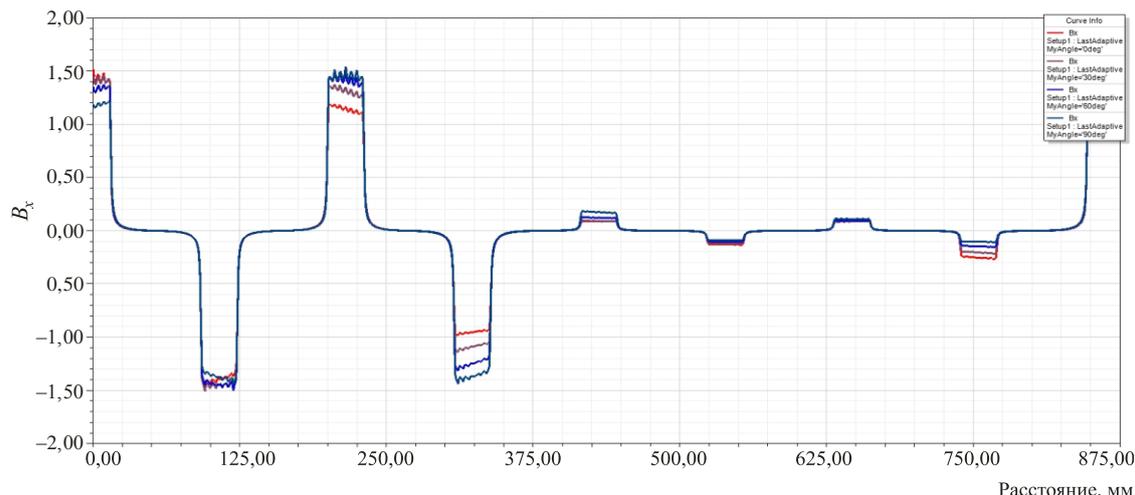


Рис. 11. B_x в зависимости от угла при эксцентриситете в 0,30 мм

Более реальную картину можно увидеть на графике магнитной индукции (рис. 10). По ординате показано значение магнитной индукции, в данном случае B_x , которая является радиальной компонентой, по абсциссе – длина окружности.

В дальнейшем планируется решение нестационарной задачи, для отладки вычислительного алгоритма была смоделирована тестовая задача со следующими условиями: ротор поворачивается на пол-оборота с шагом в 30 градусов и смещается в радиальном направлении на 300 мкм.

При эксцентриситете ротора по абсциссе на 300 мкм и повороте его на угол от 0 до 180 градусов с шагом в 30 градусов распределение компоненты магнитной индукции B_x показано на рис. 11.

На рисунке видно, как распределяется радиальная компонента магнитной индукции в зависимости от смещения ротора. Каждому углу поворота ротора соответствует свое значение.

По мере возрастания угла поворота ротора амплитуда колебаний магнитной индукции возрастает нелинейно: на 1,2–1,6 Тл на 1-й и 4-й парах катушек и на 0,1–0,5 Тл на 2-й и 3-й парах.

Анализ результатов численного моделирования показал, что максимальная амплитуда магнитной индукции наблюдается на 1-й и 4-й парах катушек, соответствующая значению 1,2–1,6 Тл, что на 8–20 % больше, чем на 2-й и

3-й парах катушек, так как основная нагрузка приходится на 1-ю и 4-ю пары.

Диапазон усилий составляет 150–925 кН. Графическое расположение сил при смещении ротора представлено на рис. 12.

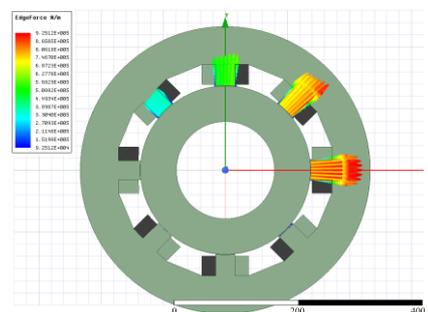


Рис. 12. Распределение сил при эксцентриситете 0,3 мм

Выводы

В результате расчета были получены тяговые значения радиального электромагнита со значением по ординате 40 045 Н, по абсциссе – 16 390 Н, магнитная индукция варьировалась в диапазоне 0,7–1,8 Тл.

По полученным результатам можно оценить интенсивность распределения сил без изменения зазора и при смещении оси ротора. Результаты при статичном заданном смещении указывают, что при увеличении эксцентриситета распределение интенсивности сил возрастает на 20 % в радиальном направлении.

Таким образом, при смещении ротора кватного функционирования оборудования. И это может привести к сигналу на аварийный останов компрессора, выбегу ротора, замене страховочных подшипников или дорогостоящему капремонту агрегата.

Библиографический список

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
2. Руководство по эксплуатации ГАШТ.684323.000 / АО Корпорация ВНИИЭМ.
3. Сайт компании «ВНИИЭМ» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vniiem.ru> свободный (дата обращения: 02.04.2022).
4. Магнитный подвес роторов электрических машин и механизмов // Труды ВНИИЭМ. – 1989. – Т. 89. – 135 с.
5. Активные электромагнитные подшипники для крупных энергетических машин. ВНИИЭМ / Техническая информация. – ОАБ. 149.64S. – М.: 1988. – 10 с.
6. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболевская Е.А. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
7. Энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Вихревые_токи (дата обращения: 02.04.2022).
8. Elibrary.ru: научная электронная библиотека [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.elibrary.ru> (дата обращения: 02.04.2022).
9. Богданов Д.Н., Верещагин В.П. Структура системы управления электромагнитными подшипниками // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 114, № 1. – С. 9–14.
10. Леонтьев М.К., Давыдов А.В., Дегтярев С.А. Динамика роторных систем с магнитными опорами // Вестник Моск. авиац. ин-та. – 2012. – Т. 19, № 1. – С. 91–101.
11. Научно-технические задачи развития магнитных подшипников для газоперекачивающих агрегатов / А.З. Шайхутдинов и др. // Газовая промышленность. – 2009. – № 7. – С. 66–70.
12. Верещагин В.П., Рогоза А.В., Савинова Т.Н. Методика проектирования электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 113, № 6. – С. 3–12.
13. Верещагин В.П., Клабуков В.А. Математическая модель магнитного подшипника // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 112, № 5. – С. 17–22.

References

1. Zhuravlev Yu.N. Aktivnyye magnitnyye podshipniki. Teoriya, raschet, primeneniye. [Active magnetic bearings. Theory, calculation, application.] Saint Petersburg: Politekhnik, 2003, 206 p.
2. Operation manual GASHT.684323.000. JSC Corporation VNIEM.
3. Website of the VNIEM company. – Access mode: <http://www.vniiem.ru> free (accessed).
4. Magnetic suspension of rotors of electrical machines and mechanisms. *Proceedings of VNIEM*, 1989, vol. 89, 135 p.
5. Active electromagnetic bearings for large power machines. VNIEM / Technical information. OAB. 149.64S. Moscow, 1988, 10 p.
6. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolevskaya Ye.A. Asinkhronnyye dvigateli serii 4A. Spravochnik [Asynchronous motors series 4A. Handbook]. Moscow: Energoatomizdat, 1982, 504 p.
7. Encyclopedia. The access mode [https://ru.wikipedia.org/wiki/Eddy currents](https://ru.wikipedia.org/wiki/Eddy_currents) is free (accessed).
8. Elibrary.ru: scientific electronic library. – Access mode: <http://www.elibrary.ru> (accessed).
9. Bogdanov D.N., Vereshchagin V.P. The structure of the control system of electromagnetic bearings. *Voprosy elektromekhaniki. Tr. NPP VNIEM*, 2010, vol. 114, no. 1, pp. 9–14.
10. Leontiev M.K., Davydov A.V., Degtyarev S.A. Dynamics of rotor systems with magnetic bearings. *Vestnik Mosk. aviation in-ta*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 91–101.
11. A.Z. Shaikhutdinov [et al.] Scientific and technical problems of development of magnetic bearings for gas pumping units. *Gas industry*, 2009, no. 7, pp. 66–70.
12. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V., Savinova T.N. Methodology for designing electromagnetic bearings. *Voprosy elektromekhaniki. Tr. NPP VNIEM*, 2009, vol. 113, no. 6, pp. 3-12.
13. Vereshchagin V.P., Klabukov V.A. Mathematical model of a magnetic bearing. *Voprosy elektromekhaniki. Tr. NPP VNIEM*, 2009, vol. 112, no. 5, pp. 17-22.

Об авторах

Махнутин Алексей Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29), e-mail: amaxnutin@inbox.ru

Сальников Алексей Фёдорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29), e-mail: afsalnikov_1@mail.ru.

About the authors

Aleksey V. Makhnutin (Perm, Russian Federation) – Post-graduate Student of the Department «Rocket and space technology and power systems», Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Av., 614990, Perm), e-mail: amaxnutin@inbox.ru.

Aleksey F. Salnikov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Rocket and Space Technology and Power Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Av., 614990, Perm), e-mail: afsalnikov_1@mail.ru.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках научного проекта FEUG-2020-0013.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 10.04.2022

Одобрена: 20.04.2022

Принята к публикации: 04.08.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Махнутин, А.В. Электромагнитное поле в воздушном зазоре системы «ротор – статор» радиального электромагнитного подшипника / А.В. Махнутин, А.Ф. Сальников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 7–13. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.01

Please cite this article in English as: Makhnutin A.V., Salnikov A.F. Electromagnetic field in the air gap of the «rotor – stator» system of a radial electromagnetic bearing. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 69, pp. 7-13. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.69.01