DOI: 10.15593/2224-9982/2019.58.02

УДК 62-233.2: 621.3.07

**Р.В. Мормуль¹, Д.А. Павлов², А.С. Голдобин³,
А.В. Махнутин³, И.Г. Руковицын⁴**

¹ Пермский военный институт войск национальной гвардии, Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³ ПАО НПО «Искра», Пермь, Россия

⁴ НПП ВНИИЭМ, Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТУРБОАГРЕГАТАХ С СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ

В структурном отношении любой турбоагрегат является сложной технической системой и отличается многоконтурностью информационных и энергетических связей функциональных блоков. Рассмотренная система характеризуется нестабильностью внутренних связей. Эти связи носят существенно нелинейный характер, что, в свою очередь, порождает возникновение многочастотных колебаний, сопровождающихся взаимодействием и взаимным влиянием силовых полей механической, газодинамической и электромагнитной природы.

В целях обеспечения устойчивого магнитного подвеса вращающихся роторов турбоагрегатов использованы активные магнитные подшипники для регулирования магнитного подвеса роторов – система автоматического управления.

Быстродействие электромагнита в создании тягового усилия оценивается по величине постоянной времени нарастания тока в обмотке, но при управлении с обратной связью по переменному току в подходах к оценке быстродействия необходимо учитывать характеристики системы автоматического управления магнитным подвесом.

Приведены результаты вычислительного эксперимента высокого уровня по определению нелинейных и нестационарных электромагнитных полей в системе статор–ротор, полученные в рамках численной реализации системы вихревых дифференциальных уравнений Максвелла.

Авторами был исследован принцип работы радиальных электромагнитных подшипников, разработанных корпорацией ВНИИЭМ для нагнетателя центробежного НЦ25М-01. В данном магнитном подвесе были исследованы процессы взаимодействия роторной и статорной составляющих объекта, влияние изменения магнитного поля в воздушном зазоре подвеса.

Полученная информация о структуре электромагнитных полей позволяет оптимизировать параметры системы автоматического управления электромагнитным подвесом турбоагрегатов для максимального исключения аварийных остановов.

Ключевые слова: частотное взаимодействие, электромагнитное поле, активный магнитный подвес, система автоматического управления магнитным подвесом, центробежный компрессор, численное моделирование, метод конечных элементов, ротор, оптимизация, радиальные подшипники, адаптивная сеточная модель.

R.V. Mormul¹, D.A. Pavlov², A.S. Goldobin³, A.V. Machnutin³, I.G. Rukovitsyn⁴

¹ Perm Military Institute of National Guard Forces, Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³ PJSC Research and Production Association "Iskra", Perm, Russian Federation

⁴ Scientific-Production Enterprise Scientific Research Institute of Electromagnetism "VNIIE",
Moscow, Russian Federation

NUMERICAL MODELING OF NONLINEAR ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TURBO UNITS WITH THE SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF ELECTROMAGNETIC SUSPENSION

Structurally, any turbine unit is a complex technical system and is characterized by multi-circuit information and energy connections of functional blocks. The considered system is characterized by instability of internal connections. These bonds are essentially nonlinear in nature, which in turn give rise to the appearance of multi-frequency oscillations, accompanied by the interaction and mutual influence of the force fields of a mechanical, gas-dynamic, and electromagnetic nature.

In order to ensure a stable magnetic suspension of the rotating rotors of turbine units, active magnetic bearings were used, and an automatic control system was used to regulate the magnetic suspension of the rotors.

The speed of the electromagnet in creating traction is estimated by the value of the rise time constant in the winding, but when controlling with alternating current feedback in the approaches to evaluating the speed it is necessary to take into account the characteristics of the automatic control system of the magnetic suspension.

The article presents the results of a high-level computational experiment to determine nonlinear and non-stationary electromagnetic fields in the stator-rotor system, obtained as part of the numerical implementation of the Maxwell system of vortex differential equations.

The authors investigated the principle of operation of radial electromagnetic bearings developed by VNIIEM Corporation for the centrifugal blower NC25M-01. In this magnetic suspension, the interaction processes of the rotor and stator component of the object, the influence of changes in the magnetic field in the air gap of the suspension were investigated.

The information obtained on the structure of electromagnetic fields allows you to optimize the parameters of the automatic control system of the electromagnetic suspension (EMS) of turbine units to maximize the exclusion of emergency stops.

Keywords: frequency interaction, electromagnetic field, active magnetic suspension, automatic control system of magnetic suspension, centrifugal compressor, numerical simulation, finite element method, rotor, optimization, radial runout, adaptive mesh model.

Введение

Стремление к увеличению скоростей вращения и нагрузок на роторные части машин и уменьшение массы и габаритов ставит проблему увеличения срока службы подшипниковых узлов на первое место. В настоящее время современная техника нуждается в опорах, которые смогли бы гарантировать стабильную и надежную эксплуатацию ротора на любых скоростях, в любых средах и режимах нагрузки [1–12]. Модернизация подшипников скольжения и качения, создание иных решений в конструктиве, иного физического принципа действия подшипниковых опор позволит найти путь к решению данных проблем.

Привычные подшипники качения и скольжения давно достигли высокого технического уровня. И те процессы, которые протекают в них, ставят ограничительные рамки в плане эксплуатации механизмов с данными подшипниками для надежной эксплуатации в жестких условиях. Самый значимый и важный недостаток подшипников качения – это механический контакт между ротором и статором. В подшипниках скольжения на первое место выходит смазочный материал и его дальнейшая герметизация, исключающая попадание смазки в рабочее тело. Модернизация и улучшение узлов герметизации может изменить стоимость механизма в ту или иную сторону, но не исключить взаимное проникновение смазочного материала и внешней среды.

Магнитные подвесы не имеют данных проблем. Создание реакций опоры обеспечивают магнитные и электрические поля. Наибольший практический интерес представляют активные магнитные подшипники (АМП).

Процессы, протекающие в электромагнитных полях, нелинейные, а по распространению в пространстве – непрерывные и затухают на бесконечности (дальней зоне).

Конструктивное исполнение агрегата с системой автоматического управления электромагнитным подвесом

Конструкция исследуемого турбоагрегата разработки ПАО НПО «Искра» приведена на рис. 1, входящего в его состав электромагнитного подвеса (ЭМП) разработки корпорации ВНИИЭМ – на рис. 2. Каждый радиальный магнитный подшипник оснащается страховочными подшипниками, которые являются гарантом сохранности ЭМП и ротора агрегата.

Радиальный подшипник состоит из силовой, измерительной частей и страховочного подшипника. Силовая часть воспринимает нагрузки в радиальном направлении и состоит из статора и посаженной на вал цапфы. Цапфа расположена внутри статора с радиальным зазором δ .

Рис. 1. Конструктивное исполнение турбоагрегата с ЭМП

Статор состоит из многополюсного кольцевого шихтованного пакета железа и обмоток полюсов. Цапфа представляет собой пакет железа в форме полого цилиндра. Пакеты статора и цапфы набираются из листовой электротехнической стали толщиной 0,1–0,5 мм.

Рис. 2. Конструкция ЭМП: 1 – блок датчиков радиальный; 2 – блок датчиков осевой; 3 – ротор; 4 – ротор ЭМП; 5 – статор ЭМП; 6 – диск упорный

Ротор переводится в состояние левитации в центре, не соприкасаясь со статором. Положение ротора контролируется индуктивными датчиками. Ими обнаруживается любое отклонение относительно номинального положения и подаются сигналы, которые управляют током в электромагнитах для возвращения ротора в его номинальное положение. Основное преимущество ЭМП в том, что они не имеют проблем с трением и смазкой.

Геометрическая модель радиального электромагнита представлена на рис. 3.

Рис. 3. Геометрическая модель радиального электромагнита

Рис. 4. Осевой магнитный подшипник

Для опоры ротора во время покоя и обеспечения выбега ротора в случае аварийного останова агрегата при нарушении работы ЭМП применяют страховочный подшипник.

Для контроля смещения ротора в осевом направлении применяют осевой электромагнитный подшипник, приведенный на рис. 4. Осевой магнитный подшипник содержит укрепленный на валу 1 ферромагнитный диск 2, который находится между двумя кольцевыми электромагнитами 3 и 6 с обмотками 4 и 5. Для получения информации о смещении ротора в осевом направлении служит датчик 7.

Задачи исследований

На сегодняшний день в механике турбоагрегатов нет полной картины динамического поведения ЭМП в целом, следовательно, можно выделить основные направления в исследовании:

- вибродиагностика и структурный анализ исследования нелинейных динамических процессов роторных турбомашин с ЭМП при их частотном взаимодействии и взаимовлиянии;
- постановка и проведение вычислительного эксперимента для решения цикла связанных и комплексно-сопряженных задач электродинамики сплошных сред;
- численное решение многопараметрической задачи оптимизации системы автоматического управления электромагнитным подвесом (САУМП), т.е. поиск оптимальных трендов токов управления радиальных электромагнитов для обеспечения максимального устойчивого и надежного функционирования агрегата в процессе его эксплуатации.

Построение физико-математической модели

Физико-математической моделью, которая описывает процессы электромагнитного взаимодействия системы статор–ротор, являются дифференциальные уравнения Максвелла, которые применительно к теории электрических машин можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 - \text{закон Фарадея;} \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j} - \text{закон Максвелла – Ампера;} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho - \text{закон Гаусса;} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 - \text{закон Гаусса для магнитного поля, } B|_{\Omega_i} = B_i - \text{граничное условие,} \end{cases}$$

где $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, В/м; $\vec{D}$ – электрическая индукция, Кл/м²; $\vec{B}$ – магнитная индукция, Вб/м², Тл; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м; $\vec{j}$ – плотность электрического тока, А/м²; ρ – плотность электрических зарядов, Кл/м³.

Сеточная топология и дискретизация вычислительного пространства

Дискретизация вычислительного пространства и топология адаптивной конечно-элементной сеточной модели приведены на рис. 5.

В рамках нестационарного и нелинейного численного моделирования назначены свойства конструкционных материалов, собраны пары катушек с последовательным соединением витков, создана единая цепь с заданными силовыми значениями токов.

Адаптивная сеточная модель восьмиполюсного ЭМП включает несколько объектов: статор, ротор, Polygon, Band.

Группа граничных условий, необходимых для определения распределения интенсивности магнитного поля в зазоре системы ротор–статор, включает в себя следующее:

- граничные условия, заданные на границе зазора, который формируется между условиями группы Band и статором магнитного подшипника;

Рис. 5. Дискретизация вычислительного пространства

- объект Polygon с характеристиками вакуума, не влияющий на результаты численного решения задачи (внесен для удобства наблюдения за вращением ротора);
- подвижную сеточную конечно-элементную модель, позволяющую адаптироваться к заданию подвижных граничных условий (изменению угловой скорости вращения ротора при переходных режимах его эксплуатации, изменению величины воздушного зазора между статором и ротором).

Реализация численного решения

Вычислительный эксперимент выполнен в пакете прикладных программ ANSYS Electromagnetics Suite 18.2 с учетом:

- взвешивания ротора (магнитостатическая задача);
- частотного взаимодействия и взаимного влияния системы статор–ротор (нестационарная задача).

Структура используемых численных методов также позволяет беспрепятственно массово распараллеливать алгоритм расчета. Ввиду этого в используемом программном комплексе многопоточковой обработке (OpenMP) подвержены все основные расчетные подзадачи, что обеспечивает практически непрерывную максимальную загрузку используемого вычислительного устройства.

Электромагнитные свойства конструкционных материалов магнитного подшипника

В качестве конструкционных материалов для ротора и статора выбрана электротехническая сталь 2412. Ее характеристики, нелинейная кривая намагничивания изображены на рис. 6. Направление шихтовки стали 2412 указано по аппликату с коэффициентом заполнения объема тела 0,95. Данный коэффициент является расчетным, по которому и сформирована кривая намагничивания.

Рис. 6. Нелинейная кривая намагничивания стали 2412

Процессы намагничивания и размагничивания сопровождаются потерями энергии на смещение границ доменов и их поворот. Ввиду этого намагничиванию и размагничиванию материала соответствуют разные кривые $B(H)$, которые создают петлю гистерезиса.

Количественно петля гистерезиса характеризуется остаточной индукцией $\pm B_r$ и коэрцитивной силой $\pm H_c$.

Практический интерес представляют особенности основных типов МП при выборе в качестве критериев сопоставления удельных показателей по массе и энергопотреблению, а также практическому быстрдействию исполнительных органов управления [1–8, 10–12].

Направление тока в медных катушках восьмиполюсного радиального МП приведено на рис. 7.

В качестве граничного условия принято, что магнитное поле всегда существует в воздухе вокруг проводника с током и затухает в дальней зоне.

Результаты вычислительного эксперимента

При взвешивании ротора численно определена действующая погонная электродинамическая сила, действующая со стороны катушек радиального электромагнита при взвешивании роторной части агрегата (рис. 8, *а*) и в процессе его собственной работы (рис. 8, *б*).

Рис. 7. Направление векторов тока в катушках восьмиполюсного радиального электромагнита

Рис. 8. Распределение силы на внешней поверхности ротора:
а – при взвешивании ротора; *б* – в процессе работы компрессора

На рис. 9, 10 представлена карта интенсивности распределения линий тока магнитного потока в соответствии с заданными граничными условиями. Шаг интегрирования по времени системы уравнений Максвелла составил 0,0001 с.

Рис. 9. Распределение силовых линий магнитного потока при взвешивании ротора

Рис. 10. Распределение магнитной индукции при смещении ротора (эксцентриситет 0,3 мм)

Магнитный поток распределяется неравномерно, явно концентрируясь у 1-й и 4-й пары катушек, так как на них и подается основная нагрузка при взвешивании ротора МП.

В процессе эксплуатации компрессора вихревые токи возникают в момент вращения ротора. Магнитный поток относительно ротора генерируется переменным. На рис. 9 также показано, что вихревые токи Фуко возникают у полюсов катушек, а затем смещаются в сторону 2-й и 3-й пары катушек. Данные токи создают встречный магнитный поток, который приводит к фазовому сдвигу радиальной компоненты магнитного поля и перераспределяет поле магнитной индукции на роторе в МП, тем самым осуществляя «размытие» его (поля) силовых линий.

Оптимизация работы системы автоматического управления магнитным подвесом

При проведении пуско-наладочных работ и вибродиагностических исследований в процессе эксплуатации данного турбоагрегата компрессорной станции возник ряд проблемных вопросов:

- возникновение субгармонических составляющих автоколебательного процесса;
- неуравновешенность роторной части агрегата и наличие механического дисбаланса;
- аварийные остановки и выбеги (при использовании системы страховочных подшипников).

Для решения указанных выше задач необходимо было провести комплекс мероприятий по снижению уровня вибрации роторной части агрегата. Одной из главных задач являлась оптимизация трендов токов управления радиальных электромагнитов, обеспечивающих устойчивую и надежную работу компрессора при минимизации функционала, который определяет радиальные «биения» роторной части агрегата, т.е.

$$U_{\Sigma}(\hat{I}_k(t)) = \int_0^t V_{\Sigma}(\hat{I}_k(t)) \rightarrow \min, \quad k = 1, \dots, 4,$$

где $\hat{I}_k(t)$ – экстремали решения вариационной задачи; U_{Σ}, V_{Σ} – полные радиальные перемещения и скорости ротора, вызванные частотным взаимодействием силовых полей газодинамической, электромагнитной и механической природы.

В качестве аппарата математического моделирования при определении допустимых экстремалей (трендов) токов управления САУМП использован вариационный принцип Лагранжа:

$$\begin{cases} -\frac{d}{dt}V_{i_k} + V_{i_k} = 0; \\ I_k(0) = i_{0k}. \end{cases}$$

Оптимальные тренды токов управления радиальными АМП регистрировались в системе управления базами данных (СУБД) микроконтроллера шкафа управления ЭМП.

Алгоритм построения передаточных функций управления исполнительных органов детально описан в работах [13–15].

Регистрация значений скорости и перемещения ротора произведена токовихревыми датчиками вблизи передней и задней опор агрегата (центробежного нагнетателя). Численное исследование амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) виброперемещений роторной части агрегата (отклика вала) проведено с помощью быстрого преобразования Фурье. Амплитудно-частотный спектр Фурье отклика вала с МП представлен на рис. 11.

Рис. 11. АЧХ роторной части агрегата: а – спектр перемещений ротора вблизи передней опоры в момент аварийного останова турбоагрегата (тренды токов управления не оптимальны); б – спектр перемещений ротора вблизи задней опоры, выход на автоколебательный режим (тренды токов управления оптимальны)

Заключение

В данной работе авторами был исследован МП корпорации ВНИИЭМ для нагнетателя центробежного НЦ25М-01. В МП были исследованы:

- процессы взаимодействия роторной и статорной составляющих объекта;
- влияние изменения магнитного поля в воздушном зазоре подвеса.

В статье детально описано конструктивное исполнение подвеса, его габариты, физические, электромагнитные свойства материалов, построена и интегрирована в программное обеспечение 3D-модель радиального подшипника, описана математическая модель решения блока задач, построена замкнутая система уравнений Максвелла, описывающих процессы электромагнетизма.

Разработанный авторами подход численного моделирования позволил оптимизировать тренды токов управления радиальных электромагнитов, обеспечив снижение амплитуды вибрации роторной части турбоагрегата на 86,7 %.

Библиографический список

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники. Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
2. Журавлев Ю.Н., Хмылко Н.В., Хростицкий А.Г. Возмущающие моменты в активном радиальном электромагнитном подшипнике // Изв. вузов. Электромеханика. – 1983. – № 7. – С. 82–88.
3. Магнитный подвес роторов электрических машин и механизмов / под ред. Г.А. Жемчугова; ВНИИЭМ. – М., 1989. – С. 89–135.
4. Панкратьев Д.А., Кузьмина Т.О. Разработка блока питания системы управления активным магнитным подвесом // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2017 (ИСУМ-2017): материалы III Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Севастополь, 2017. – С. 142–146.
5. Разработка и исследование системы управления упорным магнитным подшипником / Н.Д. Поляхов, Т.О. Кузьмина, А.Д. Стоцкая [и др.] // Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 3(21). – С. 54–58.
6. Кузьмина Т.О. Применение нечеткой логики для управления упорным активным магнитным подшипником // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2016 (ИСУМ-2016): материалы Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студ. – Севастополь, 2016. – С. 501–505.
7. Полущенко О.Л., Нижельский Н.А., Сысоев М.А. Магнитный подшипник на высокотемпературных проводниках с пассивной стабилизацией ротора // Наука и образование. – 2013. – № 5. – С. 223–234.
8. Расчет магнитных систем с элементами из высокотемпературных сверхпроводящих материалов / С.В. Грибанов, Ю.В. Кулаев, П.А. Курбатов [и др.] // Электричество. – 2009. – № 2. – С. 51–57.
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. Сарычев А.П., Спирин А.В. Создание нагнетателя НЦ-16М «Урал» с электромагнитным подвесом и сухими уплотнениями // Компрессорная техника и пневматика. – 2003. – № 6. – С. 3–6.
12. Научно-технические задачи развития магнитных подшипников для газоперекачивающих агрегатов / А.З. Шайхутдинов [и др.] // Газовая промышленность. – 2009. – № 7. – С. 66–70.
13. Абдурагимов А.С., Верещагин В.П. Особенности цифровой аппаратуры управления электромагнитными подшипниками газоперекачивающих агрегатов // Вопросы электромеханики. Тр. НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 115, № 2. – С. 19–26.
14. 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.
15. 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: Politehnika, 2003, 206 p.
2. Zhuravlev Yu.N., Khmylko N.V., Khrostitskiy A.G. Vozmushchayushchiye momenty v aktivnom radial'nom elektromagnitnom podshipnike [Perturbing moments in an active radial electromagnetic bearing]. Russian Electromechanics, 1983, no. 7, pp. 82–88.
3. Magnitnyy podves rotorov elektricheskikh mashin i mekhanizmov [Magnetic suspension of rotors of electrical machines and mechanisms]. Electromechanical matters. VNIIEEM studies, 1989, pp. 89–135.
4. Pankratiev D.A., Kuzmina T.O. Razrabotka bloka pitaniya sistemy upravleniya aktivnym magnitnym podvesom [Development of a power supply for an active magnetic suspension control system]. Materials of the 3-th All-Russian scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students "Intellectualnyye sistemy, upravleniye i mekhatronika - 2017" (ISUM-2017), Sevastopol, 2017, pp. 142–146.
5. Polyakhov N.D., Kuzmina T. O., Stotskaya A.D. Razrabotka i issledovaniye sistemy upravleniya upornym magnitnym podshipnikom [Development and research of a thrust magnetic bearing control system]. Automatics & Software Enginery, 2017, no. 3 (21), pp. 54–58.

6. Kuzmina T.O. *Primeneniye nechotkoy logiki dlya upravleniya upornym aktivnym magnitnym podshipnikom* [The use of fuzzy logic for controlling an active thrust magnetic bearing]. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Graduate Students and Students "Intellectualnyye sistemy, upravleniye i mekhatronika - 2016" (ISUM-2016), Sevastopol, 2016, pp. 501-505.
7. Polushchenko O.L., Nizhelskiy N.A., Sysoyev M.A. *Magnitnyy podshipnik na vysokotemperaturnykh provodnikakh s passivnoy stabilizatsiyey rotora* [Magnetic bearing on high-temperature conductors with passive stabilization of the rotor]. The Education and Science Journal, 2013, no. 5, pp. 223-234.
8. Gribanov S.V., Kulayev Yu.V., Kurbatov P.A. *Raschet magnitnykh sistem s elementami iz vysokotemperaturnykh sverkhprovodyashchikh materialov* [Calculation of magnetic systems with elements of high-temperature superconducting materials]. *Electrichestvo* (Electricity), 2009, no. 2, pp. 51-57.
9. Bogdanov D.N., Vereshchagin V.P. *Struktura sistemy upravleniya elektromagnitnymi podshipnikami* [The structure of the control system of electromagnetic bearings]. *Electromechanical matters. VNIIEM studies*, 2010, Vol. 114, no. 1, pp. 9-14.
10. Leontyev M.K., Davydov A.V., Degtyarev S.A. *Dinamika rotornykh sistem s magnitnymi oporami* [Dynamics of rotor systems with magnetic bearings]. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 91-101.
11. Sarychev A.P., Spirin A.V. *Sozdaniye nagnetatelya NTS-16M «Ural» s elektromagnitnym podvesom i sukhimi uplotneniyami* [Creation of a supercharger NC-16M "Ural" with an electromagnetic suspension and dry seals]. Moscow: *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2003, no. 6, pp. 3-6.
12. Shaykhutdinov A.Z. *Nauchno-tekhnicheskiye zadachi razvitiya magnitnykh podshipnikov dlya gazoperekachivayushchikh agregatov* [Scientific and technical tasks of the development of magnetic bearings for gas pumping units]. *Gas industry*, 2009, no. 7, pp. 66-70.
13. Abduragimov A.S., Vereshchagin V.P. *Osobennosti tsifrovoy apparatury upravleniya elektromagnitnymi podshipnikami gazoperekachivayushchikh agregatov* [Features of digital control equipment for electromagnetic bearings of gas pumping units]. *Electromechanical matters. VNIIEM studies*, 2010, vol. 115, no. 2, pp. 19-26.
14. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V., Savinova T.N. *Metodika proyektirovaniya elektromagnitnykh podshipnikov* [Design technique for electromagnetic bearings]. *Electromechanical matters. VNIIEM studies*, 2009, vol. 113, no. 6, pp. 3-12.
15. Vereshchagin V.P., Klabukov V.A. *Matematicheskaya model magnitnogo podshipnika* [Mathematical model of a magnetic bearing]. *Electromechanical matters. VNIIEM studies*, 2009, vol. 112, no. 5, pp. 17-22.

Сведения об авторах

Мормуль Роман Викторович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети», Пермский военный институт войск национальной гвардии (614112, г. Пермь, ул. Гремячий Лог, д. 1; e-mail: rmormul@yandex.ru).

Павлов Дмитрий Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергосистемы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: pal07@yandex.ru).

Голдобин Алексей Сергеевич (Пермь, Россия) – начальник бюро службы маркетинга ПАО «НПО «Искра»» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28; e-mail: gas802@iskra.perm.ru).

Махнутин Алексей Владимирович (Пермь, Россия) – инженер-конструктор 3-й категории, ПАО «НПО «Искра»» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, д. 28; e-mail: mav723@iskra.perm.ru).

Руковицын Илья Геннадьевич (Москва, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НПП ВНИИЭМ (107078, г. Москва, Хоромный тупик, д. 4, стр. 1; e-mail: vniiem@vniiem.ru).

About the authors

Roman V. Mormul (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor of Computing Machines, Complexes, Systems and Networks Department, Perm Military Institute of National Guard Forces (1, st. Gremyachi Log, Perm, 614112, Russian Federation, e-mail: rmormul@yandex.ru).

Dmitry A. Pavlov (Perm, Russian Federation) – PhD Student of Rocket and Space Technology and Power Plants Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: pal07@yandex.ru).

Alexey S. Goldobin (Perm, Russian Federation) – Head of Bureau of Marketing Service, PJSC Research and Production Association “Iskra” (28, st. Akademika Vedeneyeva, Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: gas802@iskra.perm.ru).

Alexey V. Makhnutin (Perm, Russian Federation) – Mechanical Engineer, PJSC Research and Production Association “Iskra” (28, st. Akademika Vedeneyeva, Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: mav723@iskra.perm.ru).

Илья Г. Руковитсин (Moscow, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, Scientific-Production Enterprise Scientific Research Institute of Electromagnism "VNIIEМ" (4/1, st. Khoromny tupik, Moscow, 107078, Russian Federation, e-mail: vniiem@vniiem.ru).

Получено 09.09.2019