

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-8-26>



Многокритериальная оптимизация активных гибридных подшипников скольжения посредством эвристических алгоритмов

А.С. Фетисов¹✉, М.Г. Литовченко¹, Д.В. Шутин¹

¹ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
ул. Наугорское шоссе 29, г. Орёл 302026, Российская Федерация

✉ e-mail: fetisov57rus@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Проектирование подшипников скольжения, особенно для сложнонаагруженных роторных машин, является трудоемкой задачей. Внедрение в них систем управления параметрами движения ротора дополнительно повышает сложность такой процедуры. Исследование показывает разработанный подход к оптимальному проектированию активных опор роторов с использованием эвристических оптимизационных алгоритмов. Он позволяет получить сначала множество оптимальных по Парето решений, а затем определить единственную конфигурацию опорного узла, в наилучшей степени отвечающей заданным критериям.

Методы. Задача оптимального параметрического синтеза активной опоры жидкостного трения решалась с использованием ее численной модели, сопряженной с моделью движения ротора в опоре. Для поставленной задачи проектирования были сформулированы целевые функции, определены проектные переменные, и наложены необходимые ограничения. С использованием многокритериальных версий генетического алгоритма и алгоритма роя частиц проведены процедуры оптимального синтеза опорных узлов. Полученные различными методами решения сопоставлены и проанализированы на основании результатов модельных тестов.

Результаты. В ходе исследования был разработан алгоритмический и программный инструментарий решения задач оптимального параметрического синтеза активных гибридных опор жидкостного трения. Примененные целевые функции являются конфликтующими, поэтому первичным результатом решения является трехмерный фронт Парето. Протестированные эвристические алгоритмы показали качественно схожие решения, однако генетический алгоритм охватывает больший их диапазон. Конечные решения в целом удовлетворяют предъявляемым критериям, однако способы принятия конечных решений требуют дополнительной проработки.

Заключение. Исследование представляет подход к автоматизированному проектированию опор скольжения, который позволяет одновременно учитывать трибологические, динамические аспекты поведения роторно-опорной системы, а также обеспечивать готовность к использованию систем управления в опорных узлах. Протестированные эвристические алгоритмы дают сопоставимые решения оптимизационной задачи за также сопоставимое время. Дальнейшее совершенствование методики параметрического синтеза таких опор целесообразно проводить в направлениях алгоритмов принятия решений, уточнения целевых функций, а также ускорения применяемых расчетных моделей.

Ключевые слова: активные гибридные подшипники; параметрический синтез; многокритериальная оптимизация; роторные системы; генетический алгоритм; алгоритм роя частиц.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00789) «Методы синтеза и предиктивного анализа гидромеханических триботронных систем с использованием машинного обучения».

Для цитирования: Фетисов А.С., Литовченко М.Г., Шутин Д.В. Многокритериальная оптимизация активных гибридных подшипников скольжения посредством эвристических алгоритмов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 8-26. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-8-26>.

Поступила в редакцию 03.11.2023

Подписана в печать 09.12.2023

Опубликована 27.03.2024

Multi-Objective Optimization of Active Hybrid Fluid Film Bearings Using Heuristic Algorithms

Alexander S. Fetisov¹✉, Maksim G. Litovchenko¹, Denis V. Shutin¹

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev
29 Naugorskoe highway, Orel 302026, Russian Federation

✉ e-mail: sov57rus@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The design of sliding bearings, especially for heavily loaded rotary machines, is a laborious task. The implementation of control systems for the movement parameters of the rotor further increases the complexity of a design procedure. The study shows a developed approach to the optimal design of active rotor bearings using heuristic optimization algorithms. The approach allows to obtain a set of optimal Pareto solutions and determine the only configuration of the reference node that best meets the given criteria.

Methods. The problem of optimal parametric synthesis of an active fluid friction bearing was solved using a numerical model coupled with the model of rotor movement in the support. For the given design problem, objective functions were formulated, design variables were determined, and the necessary restrictions were imposed. Using multicriteria versions of the genetic algorithm and the particle swarm algorithm, procedures for the optimal synthesis of reference nodes were carried out. The solutions obtained by different methods are compared and analyzed based on the results of model tests.

Results. As part of the study, algorithmic and software tools were developed for solving problems of optimal parametric synthesis of active hybrid fluid friction bearings. The applied objective functions are conflicting, so the primary result of the solution is a 3D Pareto front. The tested heuristic algorithms showed qualitatively similar solutions, but the genetic algorithm covers a larger range of them. On the whole, the final decisions meet the criteria, but the methods for making final decisions require additional elaboration.

Conclusion. The study presents an approach to the automated design of sliding bearings, which allows you to simultaneously take into account the tribological, dynamic aspects of the behavior of the rotary bearing system, as well as ensure readiness for the use of control systems in bearing nodes. The tested heuristic algorithms give comparable solutions to the optimization problem in comparable time as well. Further improvement of the method of

parametric synthesis of such supports should be carried out in the direction of decision-making algorithms, refinement of objective functions, as well as acceleration of the applied calculation models.

Keywords: active hybrid bearings; parametric synthesis; multiobjective optimization; rotor systems; genetic algorithm; particle swarm algorithm.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding. The work was carried out with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00789) "Methods of synthesis and predictive analysis of hydromechanical tribotronic systems using machine learning".

For citation: Fetisov A. S., Litovchenko M. G., Shutin D. V. Multi-Objective Optimization of Active Hybrid Fluid Film Bearings Using Heuristic Algorithms. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 8-26 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-8-26>.

Received 03.11.2023

Accepted 09.12.2023

Published 27.03.2024

Введение

Применение упрощенных методик проектирования подшипников скольжения может быть оправдано в случаях, когда не требуется высокая точность в получении решений, требующая большого количества вычислительно дорогих расчетов [1-3]. В ряде случаев требуется получить более точные решения для высоконагруженных трибоузлов [4,5]. Для получения подобных решений используются нелинейные численные математические модели роторно-опорных систем, учитывающие различные физические эффекты кавитации, турбулентности, перекосы в роторной системе и т.д. [6,7]. Выделение на основе параметров математических моделей роторных систем целевых критериев, отражающих различные аспекты интегральных и динамических параметров роторной системы, а также характеристик системы управления, позволяет сформулировать задачу проектирования

роторно-опорных узлов в виде задачи поиска оптимального набора параметров роторной системы.

Параметры, отражающие аспекты динамического поведения роторных систем, практически не рассматриваются ни в упрощенных методиках проектирования, ни в качестве целевых функций при рассмотрении задачи поиска оптимальных решений для роторно-опорных систем. Особенно эти проблемы характерны для проектируемых роторно-опорных систем с гибким ротором, для которых вычислительная стоимость динамических расчетов значительно выше по сравнению с системами с жестким ротором [8, 9]. Отчасти, ускорение расчетов может осуществляться методами симплификации роторных систем [10, 11]. В этом отношении можно отметить работу [12], где в качестве критерия оптимизации рассмотрен декремент затухания колебаний ротора при относительно простой аналитической модели подшипника скольжения.

Внедряемые системы управления подшипниками скольжения значительно усложняют процедуру их проектирования и добавляют дополнительные целевые критерии для задачи оптимизации, обеспечивающие наиболее эффективное преобразование управляющих сигналов в управляющие воздействия.

Ввиду общей сложности и нелинейности математических моделей роторно-опорных узлов применение математических алгоритмов оптимизации первого порядка или выше является маловероятным и применяется по большей части для упрощенных моделей. Наиболее часто встречаются эвристические алгоритмы. В работе [13] генетический алгоритм использован для оптимизации формы опорной поверхности газодинамического подшипника скольжения. Для уменьшения размерности задачи авторы разбили оптимизируемую область на подрегионы, что позволило ускорить процесс решения. В работе [14] рассмотрена задача многокритериальной оптимизации роторного теплообменника. Авторами был использован недоминантный сортирующий генетический алгоритм (NSGA-2) для получения энергоэффективных и дешевых конструктивных решений. Другим известным алгоритмом нулевого порядка, применяемым в задачах роторной динамики, является алгоритм роя частиц. В работе [15] авторами показаны преимущества данного модифицированного алгоритма для решения задач с высокой вычислительной стоимостью. Также су-

ществует множество слабо применяемых эвристических алгоритмов: алгоритм бабочки [16], алгоритм колонии муравьев [17], алгоритм светлячка [18] и т.д.

Отмеченные особенности и трудности задачи оптимального проектирования роторно-опорных узлов позволяют констатировать актуальность разработки новых подходов, которые позволили бы учитывать весь комплекс важных целевых критериев в задаче параметрического синтеза активных опор жидкостного трения. Предлагаемый в данной работе подход позволяет учесть динамическое поведение ротора в подшипниках скольжения, интегральные характеристики активных опор скольжения и характеристики управляемости роторной системой. Сопутствующей задачей, решаемой в данном исследовании, является сравнение результатов решения оптимационной задачи при помощи различных алгоритмов: генетического алгоритма (Genetic Algorithm – GA) и алгоритма роя частиц (Multi-Objective Particle Swarm Optimization – MOPSO). Представленные решения задачи многокритериальной оптимизации позволяют находить сбалансированные сочетания представленных критериев. Анализ результатов также позволяет определить наиболее актуальные направления дальнейших исследований в данной области.

Математическая модель роторно-опорной системы и постановка оптимизационной задачи

В работе рассматривается задача оптимального проектирования роторно-опор-

ной системы на подшипниках скольжения с активной смазкой [19]. Используется модель жесткого ротора, работающего в до-критических частотах и без значительных перекосов в опорах. Схема активно смазывающегося подшипника представлена на рис. 1. Он представляет собой втулку с 4 каналами подачи смазки на центральной линии с прямоугольными гидростатиче-

скими карманами. В каждом канале давление смазочного материала регулируется отдельным сервоклапаном, создавая регулируемое силовое воздействие на ротор. Таким образом, несущая способность в данном гибридном подшипнике создается совокупностью гидродинамического и гидростатического эффектов, а регулирующая сила – только гидростатическим.

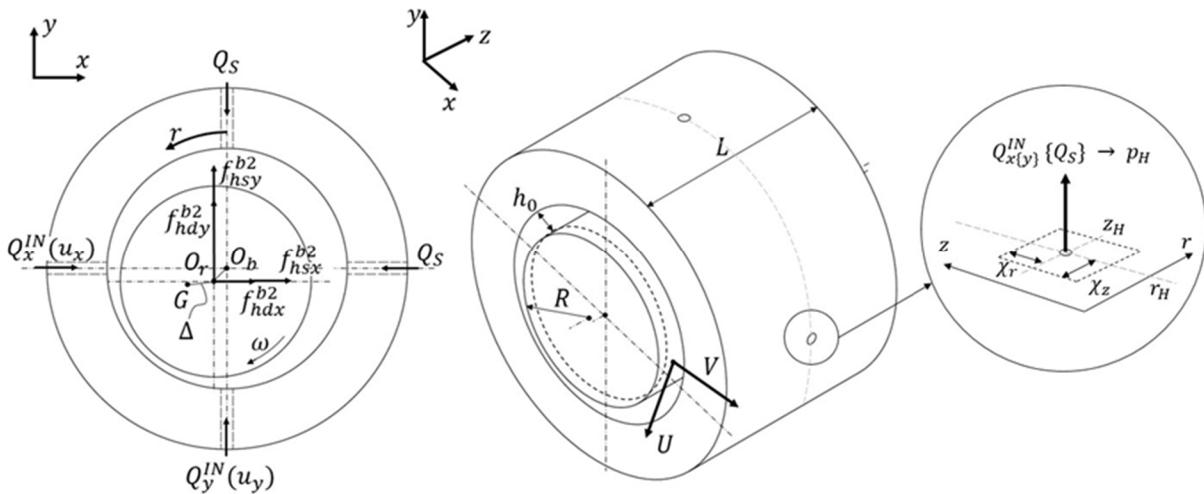


Рис. 1. Схема активного гибридного подшипника

Fig. 1. Scheme of an active hybrid bearing

Математическая модель гибридного подшипника базируется на основных положениях теории гидродинамической смазки [20, 21]. Модель использует численное решение модифицированного уравнения Рейнольдса методом конечных разностей [22, 23]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6 \frac{\partial}{\partial x} (Uh) + 12V, \quad (1)$$

где x, z – Декартовы координаты; h – функция радиального зазора подшипника скольжения; μ – динамическая вязкость смазочного материала; p – искомое дав-

ление смазочного материала в зазоре подшипника скольжения; U – скорость смазочного материала в окружном направлении; V – скорость смазочного материала в радиальном направлении.

Совместно с ним решаются уравнения баланса расходов смазочного материала [24] через питающие каналы с жиклерами. Решение гидродинамической задачи в виде рассчитанных реакций смазочного слоя служит основой для одномассовой модели жесткого ротора. Движение ротора в подшипнике под действием совокупности сил определяется решением уравнений Лагранжа, как в [19].

Система управления рассмотренного подшипника основана на П-регуляторе с обратной связью по положению ротора, более детальное ее описание показано в [25].

Решаемая задача параметрического синтеза подшипника традиционно сводится к минимизации целевой функции. В данном случае сразу три различных параметра рассматриваются в качестве таковых.

1. *Момент вязкого трения* в смазочном слое является одним из ключевых энергетических параметров, который описывает эффективность роторной системы. Он характеризует в том числе интенсивность теплообразования в зоне трения, и, как следствие, изменения реологических свойств смазочного материала. В процессе расчетов оценивалось среднее значение момента трения в установившемся режиме работы роторно-опорной системы.

$$M_{tp} = \frac{D}{2} \iint_S \left[\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U\mu}{h} \right] dS, \quad (2)$$

где D – диаметр подшипника; S – площадь поверхности подшипника.

2. *Время переходного процесса* в ответ на внешнее импульсное силовое возмущение выбрано в качестве базового критерия для оценки устойчивости ротора в подшипнике. Для получения этого параметра для каждой конфигурации подшипника проводилась тест-симуляция. Ротор свободно переходил в точку равновесия в подшипнике, после чего к нему прикладывался импульс си-

лы величиной в 3 веса ротора и длительностью 0,2 мс. Далее переходный процесс по ортогональным разверткам колебаний оценивался методом скользящего окна. Установившийся размах колебаний менее 3% от радиального зазора подшипника считался критерием окончания переходного процесса.

$$T_{pp} = (i_{start} - i_{stop}) \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где i_{start} и i_{stop} – номер итерации начала и окончания переходного процесса; Δt – расчетный интервал времени.

3. *Максимальное управляющее воздействие* F_{max} является характеристической, определяющей предел возможностей по управлению положением ротора в активно смазываемом подшипнике. Оно во многом зависит от конфигурации каналов подачи смазки, создающих гидростатическое воздействие на ротор. Для гидростатических подшипников эффект дросселирования может оказывать существенное влияние на реакцию смазочного слоя. Поэтому расчет проводился для центрированного положения ротора в подшипнике, что дает равные гидравлические сопротивления для всех питающих каналов. Максимальная сила воздействия вычислялась в случае, когда давление в двух рядом расположенных каналах питания при этом максимальное, а в двух противолежащих – минимальное.

Среди рассмотренных критерии, по меньшей мере, момент трения противоречит двум другим (рис. 2), поскольку последние требуют наибольшего зна-

чения стабилизирующих и/или управляющих сил, а критерием снижения трения является уменьшение перепадов в распределении давления. Таким образом решение оптимизационной задачи в данном случае будет представлять собой трехмерный фронт оптимальных по Парето решений. Ввиду того, что 2 остальных параметра стремятся к минимизации, а представленный параметр должен максимизироваться, для целостности общей задачи он выглядит следующим образом:

$$\xi = \frac{1}{F_{\max}}. \quad (4)$$

Сама оптимизационная задача в таком случае может быть формализована следующим образом:

$$\min f(X) = \{M_{tp}, T_{pp}, \xi\}$$

при

$$\left. \begin{array}{l} 40 < L < 80 \\ 40 < h_0 < 80 \\ 0,5 < d_h < 4 \\ 5 < l_h < 12 \\ 5 < W_p < 60 \\ 5 < L_p < 40 \\ 200 < D_p < 1000 \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где $X = [L, h_0, d_h, L_h, W_p, L_p, D_p]$ м
где L – длина подшипника, мм; h_0 – радиальный зазор, мкм; d_h – диаметр канала подвода смазки, мм; l_h – длина канала подвода смазки, мм; W_p – ширина гидростатического кармана, % от ширины подшипника; L_p – длина кармана по окружности; D_p – глубина кармана, % от зазора подшипника h_0 .

Ряд прочих параметров в ходе решения оптимизационной задачи оставался неизменным. Эти параметры характеризуют условия и режим работы проектируемого подшипника. В качестве смазочного материала использовалась вода с вязкостью 1,14 мПа·с и плотностью 1000 кг/м³. Частота вращения ротора массой 4,5 кг составляла 3000 об/мин. Рабочее давление подачи смазочного материала составляло 0,2 МПа, а максимальное давление подачи смазочного материала 1,0 МПа.

Результаты и их обсуждение

Представленная оптимизационная задача решалась с использованием генетического алгоритма и алгоритма многокритериальной оптимизации роя частиц, реализованных на базе программного комплекса Matlab. Для генетического алгоритма размер популяции составлял 200 элементов, а количество итераций – 50. Абсолютная погрешность сходимости составила 10^{-5} . При заданных границах переменных проектирования расчет был окончен при достижении поставленной погрешности на 30 итерации. Для алгоритма многокритериальной оптимизации роя частиц размер популяции составлял 200 частиц, размер репозитория – 200 элементов, а количество итераций – 50. Личный коэффициент обучения составлял 1,2, коэффициент социального обучения – 2, инерционный вес – 0,5 и коэффициент демпфирования инерционного веса – 0,95. Расчет был окончен при достижении заданного

количества итераций. Для проведения расчетов использовался персональный компьютер: 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11600K @ 3,90GHz 3,91 GHz, 16 Гб оперативной памяти, SSD 250 Gb.

В рамках вычислительного эксперимента была построена передняя сторона фронта Парето для двух пар целевых параметров, как показано на рис. 2. Как видно на рис. 2а, снижение момента трения влечет за собой уменьшение максимальной управляемой силы. Согласно данным на рис. 2б, минимальный момент трения возможен только при значительном снижении устойчивости роторной системы. Это подтверждает отмеченный ранее конфликт между обозначенными парами переменных. Таким образом, выбор подходящего решения задачи параметрического синтеза должен ба-

зироваться на балансе между используемыми критериями.

Трехмерный фронт Парето был рассчитан для всех трех оптимизационных критериев двумя упомянутыми выше эвристическими алгоритмами, GA и MOPSO. В графическом виде полученный фронт показан на рис. 3.

Полученный фронт Парето включает в себя 200 точек, соответствующих полученным оптимальным решениям. Выбор того или иного решения в базовом случае происходит с учетом значений целевых функций по осям координат. Так, параметр «Время переходного процесса» связан с устойчивостью базовой роторной системы, то есть в неуправляемом подшипнике. Параметр ξ отражает управляемость получаемого на его основе активно смазываемого подшипника.

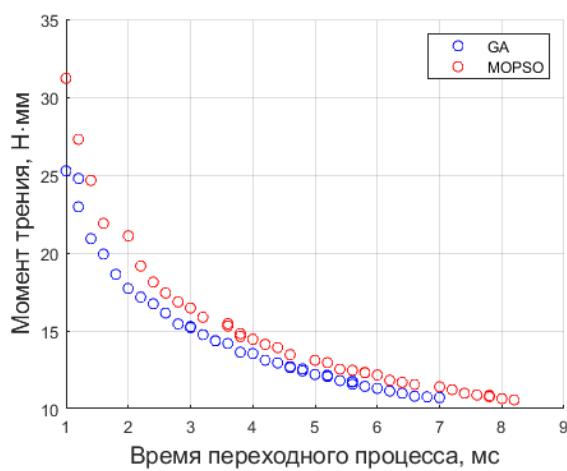
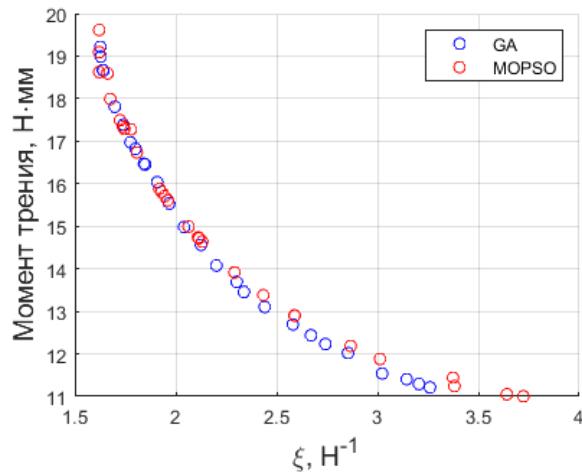


Рис. 2. Набор эффективных целевых параметров «Момент трения – Время переходного процесса» и «Момент трения – Максимальная управляемая сила»

Fig. 2. A set of effective objective parameters “Friction torque – Transient time” and “Friction torque – Maximum control action”



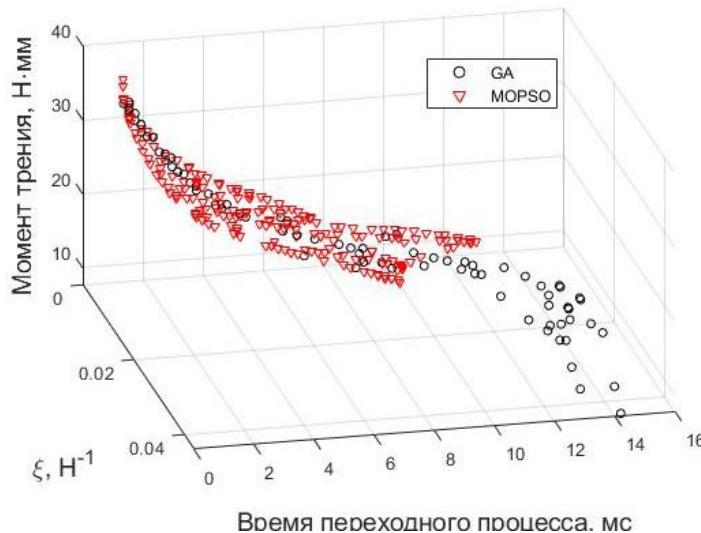


Рис. 3. Трехмерный фронт Парето

Fig. 3. Three-dimensional Pareto front

Данная диаграмма позволяет смещать приоритеты при выборе конкретного решения исходя из планируемых условий эксплуатации роторной машины. Таким образом, смещая приоритет в одну из сторон, можно добиться лучшего решения с точки зрения интегральных или динамических характеристик роторно-опорного узла или управляемости роторной системы.

На данном этапе задача многокритериальной оптимизации не имеет единого решения, а выбор конкретного технического решения остается за проектировщиком. Применение методов принятия решений позволяет значительно упростить получение итогового решения, приводя рассмотренную задачу к однокритериальной. К подобным методам относятся: метод линейной свертки [26], метод нечеткой оптимизация Белмана-Затеха [27], метод идеальной точки (TOPSIS) [28], метод многомерного анализа решений (LILMAP) [29]. В дан-

ной работе рассматривался метод линейной свертки параметров, имеющий в своей основе оценку взвешенной суммы нормализованных целевых критериев:

$$N = \omega_1 \cdot \frac{T_{\text{пп}}}{T_{\text{пп}}} + \omega_2 \cdot \frac{M_{\text{tp}}}{M_{\text{tp}}} + \omega_3 \cdot \frac{F_{\text{max}}}{F_{\text{max}}}, \quad (6)$$

где ω_i – коэффициент веса каждого критерия, $\Delta\omega_i = 1$.

Подбор весовых коэффициентов в данном случае производится исходя из важности конкретного критерия для того или иного случая проектируемого опорного узла. В данном исследовании были протестированы 2 набора весовых коэффициентов: 1) все критерии равнозначны и их веса равны: $\omega_i = [0.333 \ 0.333 \ 0.333]$; 2) критерий управляемости менее значителен по отношению к параметрам, отражающим динамические и интегральные параметры роторно-опорного узла: $\omega_i = [0.45 \ 0.45 \ 0.1]$. Результаты решения задачи однокритериальной оптимизации представлены на рис. 4.

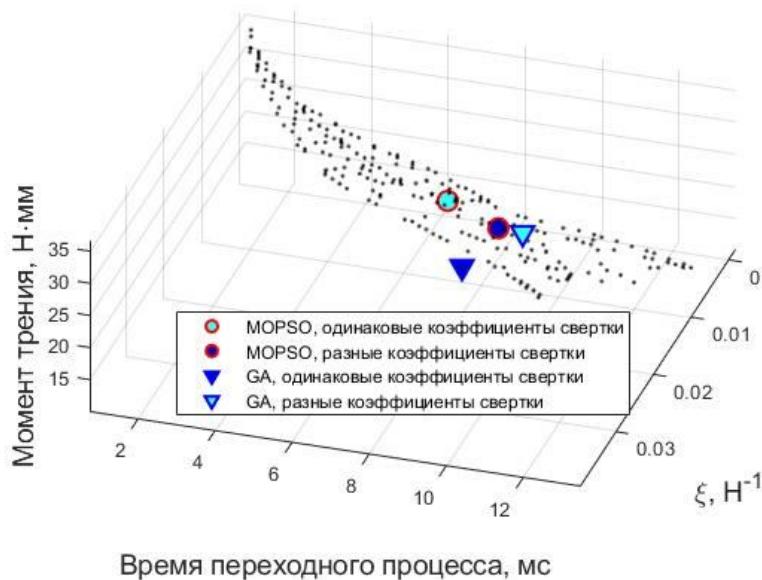


Рис. 4. Результаты решения задачи линейной свертки целевых функций

Fig. 4. Results of solving the problem of linear convolution of objective functions

Как видно на рис. 4, наблюдаются значимые различия между полученными решениями задачи оптимизации, сведенной к однокритериальной форме. Алгоритм многокритериальной оптимизации роя частиц MOPSO рассчитал конфигурации роторно-опорных узлов со значительно меньшим временем переходного процесса, но сравнительно высоким моментом трения.

Изменение коэффициентов свертки также имеет различное значение для представленных алгоритмов. Для генетического алгоритма GA изменение весов в сторону улучшения трибологических параметров и переходного процесса позволило при снижении управляющей силы на 65% незначительно снизить момент трения (на 7%) и время переходного процесса (на 12%), что, в целом, является закономерным результатом.

Алгоритм многокритериальной оптимизации роя частиц MOPSO при

применении различных коэффициентов свертки позволил получить конфигурацию, значительно уступающую варианту с одинаковыми весами. Данный эффект может быть объяснен наличием большого количества локальных минимумов, для преодоления которых требуется точная настройка представленных алгоритмов. В табл. 1 представлены геометрические параметры, описывающие полученные решения, а также значения целевых функций для представленных конфигураций роторно-опорных узлов.

Для детального тестирования полученных решений был проведен вычислительный эксперимент с использованием имитационной модели. В его ходе тестируемая роторно-опорная система на рабочей частоте 3000 об/мин подвергалась различным нагрузкам как при включенной, так и при отключенной системе управления.

Таблица 1. Геометрические и силовые параметры роторно-опорного узла**Table 1.** Geometric and force parameters of the rotor-bearing system

Параметр / Parameter	Генетический алгоритм / Genetic algorithm		Оптимизация роя частиц / Optimization of a swarm of particles	
	Однаковые коэффициенты свертки / Same convolution coefficients	Разные коэффициенты свертки / Different convolution coefficients	Однаковые коэффициенты свертки / Same convolution coefficients	Разные коэффициенты свертки / Different convolution coefficients
Длина подшипника, мм	46,2	20,1	51,4	45
Радиальный зазор, мкм	77,2	40	66,3	70,4
Диаметр канала подвода смазки, мм	0,98	1,56	1,3	0,8
Длина канала подвода смазки, мм	8,57	10,2	9,4	9,8
Ширина гидростатического кармана, % от ширины подшипника	48,47	27,4	9,2	55
Длина гидростатического кармана, градусов	31,88	32,4	38,8	6,8
Глубина гидростатического кармана, % от радиального зазора	950	250,4	686	950
Момент трения, Н·м	0,114	0,0123	0,0128	0,0150
Время переходного процесса, мс	7,4	8,4	6,4	7,8
Максимальная управляющая сила, Н	112	322	400	294

Последний случай характеризуется постоянным и равным давлением подачи смазки во все питающие камеры. Сценарий эксперимента включал следующие этапы:

– управление выключено, ротор свободно перемещается из центра подшипника в равновесное положение, оценивается переходный процесс;

- на ротор действует импульс силы величиной в 2 его веса и продолжительностью 3 мс, оценивается переходный процесс;
- к ротору добавляется несбалансированная масса с плечом $d=1 \cdot 10^{-4}$ м, оценивается установившаяся амплитуда колебаний;
- включается П-регулятор положения ротора с уставкой в точке равновесия сбалансированного ротора (приблизительно центр орбиты ротора), оценивается степень снижения амплитуды относительно этапа 3;
- дисбаланс ротора убирается, контроллер остается включенным;

- к ротору прикладывается импульс силы как на этапе 2, оценивается амплитуда перемещений и время переходного процесса в регулируемой системе относительно показателей пассивной системы на этапе 2;
- уставка контроллера положения ротора изменяется на удаленную от предыдущей, оценивается переходный процесс в регулируемой системе.

График перемещений ротора по осям координат для всех выбранных конфигураций приведен на рис. 5, а график изменения трения при этом – на рис. 6.

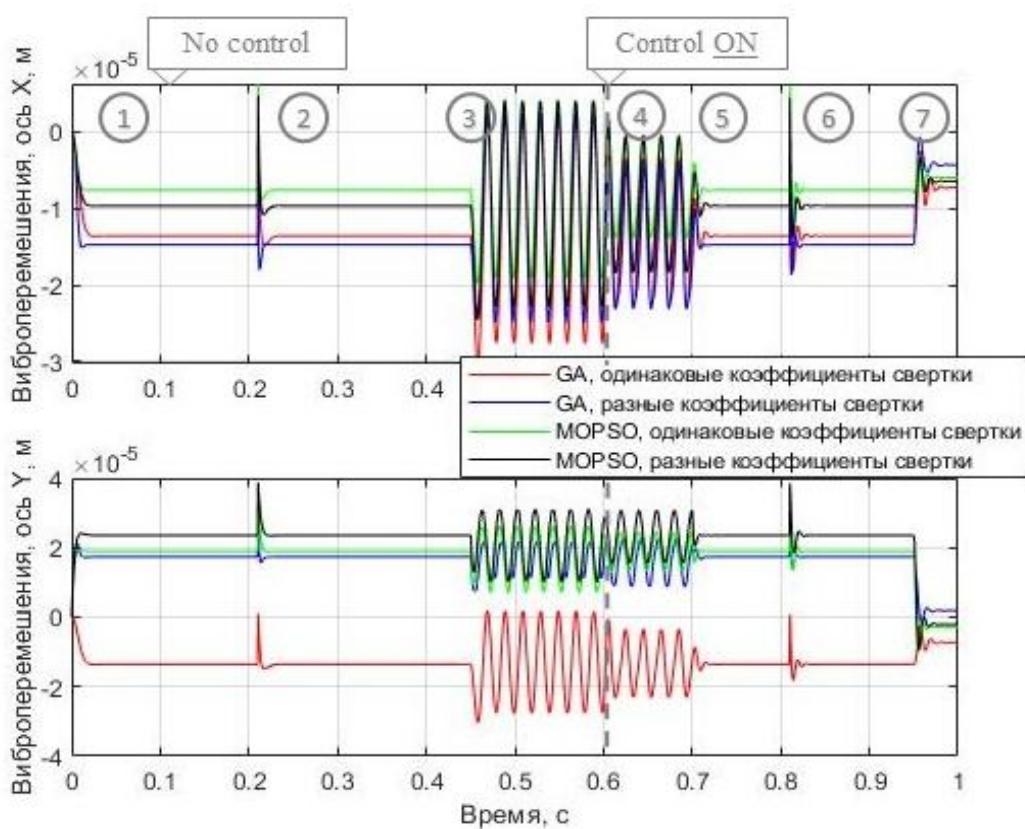


Рис. 5. Результаты вычислительного эксперимента – вибропреремещения при различных конфигурациях роторной системы

Fig. 5. The results of the computational experiment – vibrational displacement with different configurations of the rotor system

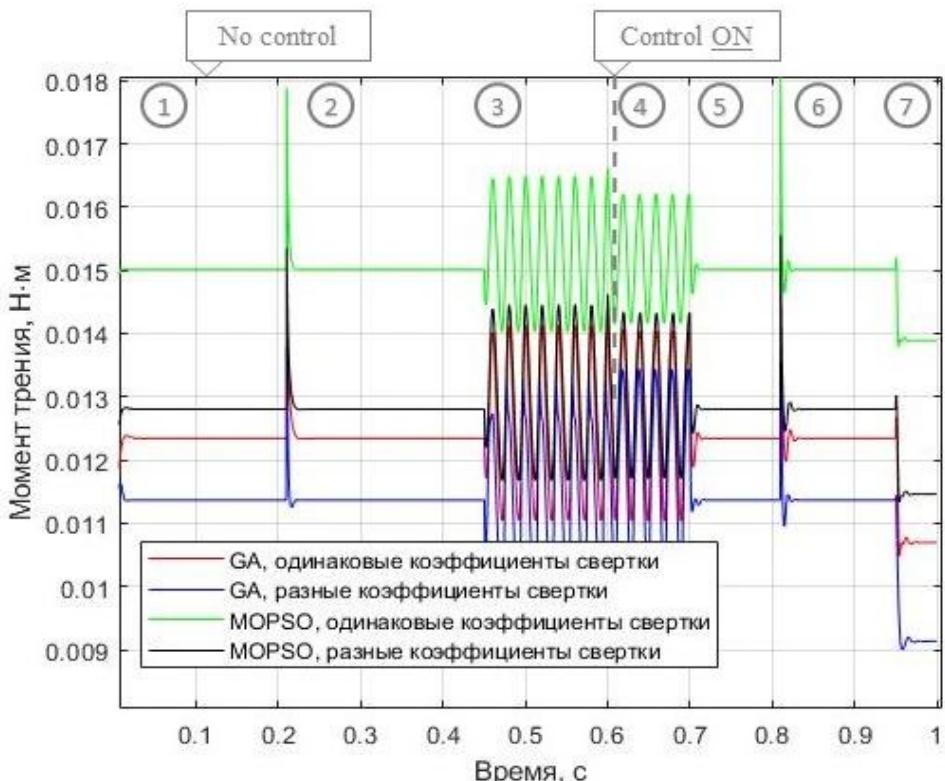


Рис. 6. Результаты вычислительного эксперимента – момент трения для различных конфигураций роторной системы

Fig. 6. The results of the computational experiment – friction torque with different configurations of the rotor system

Полученные результаты в целом подтверждают наличие у протестированных конфигураций характерных черт, заданных при выборе соответствующих решений оптимизационной задачи. Результаты показали, что конфигурации, полученные при помощи генетического алгоритма, имеют худшую динамику роторной системы по сравнению с результатами алгоритма многоцелевой оптимизации роя частиц, а именно худший переходный процесс и большую амплитуду колебаний при наличии постоянного дисбаланса. Конфигурации, полученные при помощи алгоритма роя частиц, работают в целом при меньших эксцентриситетах ($e =$

0,3 для MOPSO – разные коэффициенты, $e = 0,36$ для MOPSO – одинаковые коэффициенты, $e = 0,4$ для GA – одинаковые коэффициенты, $e = 0,56$ для GA – разные коэффициенты).

Необходимо отметить, что различия между всеми конфигурациями по длительности переходного процесса не столь выражены, хотя эти решения значительно удалены друг от друга согласно рис. 6. Это говорит о необходимости улучшения критерия, описывающего устойчивость системы. Максимальный размах колебаний, полученный при увеличении дисбаланса ротора, меньше для конфигураций, полученных генетическим алгоритмом (64 мкм для MOPSO –

разные коэффициенты, 59 мкм для MOPSO – одинаковые коэффициенты, 49 мкм для GA – одинаковые коэффициенты, 42 мкм для GA – разные коэффициенты). Это может быть связано с меньшей устойчивостью ротора, находящегося ближе к геометрическому центру подшипника скольжения.

При этом, параметр R_{max} достаточно адекватно отражает способность подшипника минимизировать отклонение ротора от уставки как при импульсных, так и при гармонических силовых воздействиях. Он может быть использован для определения конфигурации подшипника, наиболее эффективно реализующего управляющие воздействия на ротор. Кроме того, в целом можно сделать вывод, что применение системы управления позволяет снизить отклонение роторной системы ниже по сравнению с пассивной системой для всех представленных конфигураций, даже для наименее стабильных.

Одним из ключевых вопросов, решаемых в данном исследовании, был выбор наиболее подходящего алгоритма оптимизации. Приведенные выше результаты говорят о некотором преимуществе генетического алгоритма ввиду того, что: 1) Парето-оптимальные кривые показывают лучшие результаты по минимизации целевых функций по сравнению с алгоритмом роя частиц (см. рис. 2); 2) трехмерный фронт Парето охватывает больший диапазон изменения целевых параметров (см. рис. 3); результаты свертки при разных весовых

коэффициентах имеют более ожидаемый характер по отношению к результатам, полученным при помощи алгоритма роя частиц (см. рис. 4). Однако вторым важным параметром, помимо точности, является требуемый объем вычислений. Так, генетический алгоритм решил задачу однокритериальной оптимизации за 30 итераций, используя 5910 обращений к основной функции имитационной модели. Алгоритм роя частиц решил задачу за 7 итераций, использовав 2184 обращений к функции. Можно констатировать, что выбор алгоритма решения задачи оптимального синтеза активных роторно-опорных узлов является компромиссной задачей.

Таким образом, представленный подход к оптимальному проектированию подшипников скольжения можно оценить как в целом состоятельный, но требующий дополнений и улучшений. Он позволяет получать решения, подготовленные для эффективной реализации систем управления. Кроме того, рационально дополнить новыми критериями, такими как расход смазочного материала. Также дальнейшее совершенствование целесообразно проводить в направлении повышения скорости расчетов, особенно при рассмотрении моделей гибких роторов, работающих в критических областях.

Выводы

Работа предлагает подход к оптимальному проектированию подшипников жидкостного трения с учетом как

динамических свойств получаемой роторно-опорной системы, так и возможностей реализации на их основе управления движением ротора. Для этого на примере подшипника с активной смазкой сформулирована и решена многокритериальная оптимизационная задача. В ходе исследования были сопоставлены процедуры и результаты такого решения, полученные с использованием двух различных эвристических алгоритмов, генетического, и роя частиц. Оба алгоритма позволили получить близкие друг к другу трехмерные фронты Парето оптимальных решений. Единственные решения были получены с применением процедуры линейной свертки с различными наборами весо-

вых коэффициентов и протестированы с использованием имитационной модели роторно-опорной системы. Генетический алгоритм показал лучшие возможности по минимизации целевых функций, более широкий диапазон получаемых решений, а также более прогнозируемое поведение системы при применении процедуры линейной свертки. Алгоритм роя частиц показал значительное, почти трехкратное преимущество в скорости решения оптимизационной задачи. Полученные сведения можно использовать при выборе алгоритмической базы для решения задачи оптимального параметрического синтеза активных опор роторов.

Список литературы

1. Dekker M., Inc.: Handbook of turbomachinery. New York. 1995.
2. Чернавский С. А. Подшипники скольжения. М.: МАШГИЗ, 1963.
3. Hummel Ch.: Kritische Drehzahlen als Folge der Nachgiebigkeit des Schmiermittels im Lager. Forschungsarbeiten VDI. 1926.
4. Yamamoto T., Ishida Y.: Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications. John Wiley&Sons. New York, 2001.
5. Chen W. J., Gunter E. J.: Introduction to Dynamics of rotor-bearing systems. TRAFFORD PUB. 2005.
6. Defect-free optimal synthesis of crank-rocker linkage using nature-inspired optimization algorithms / R. Singh, C. Singh, H. Amit, S. Amit // Mechanism and Machine Theory. 2017. № 116. P. 105-122.
7. Panda S., Nanda N., Mishra D. Comparative study on optimum design of rolling element bearing // Tribology International. 2015. № 92. P. 595-604.
8. The applications of POD method in dual rotor-bearing systems with coupling misalignment / K. Lu, Yu. Jin, P. Huang, F. Zhang, H. Zhang, Ch. Fu, Yu. Chen // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. №150. P. 107236.

9. Onunka C., Gobler H., Bright G. A stability optimization model for shaft rotor-bearing systems // African Journal of Science, Technology, Innovation and Development. 2016. № 8. P. 1-12.
10. Review for order reduction based on proper orthogonal decomposition and outlooks of applications in mechanical systems / K. Lu, Yu. Jin, Yu. Chen, Y. Yang, L. Hou, Z. Zhang, Z. Li, Ch. Fu // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. № 123. P. 264-297.
11. Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning / S. Li, A. Babin, D. Shutin, Yu. Kazakov, Y. Liu, Z. Chen, L Savin // Tribology International. 2022. №175. P. 107805.
12. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method // International Journal of Mechanical Sciences. 2006. № 48. P. 1341-1351.
13. Zhang J., Talke F. E. Optimization of slider air bearing contours using the combined genetic algorithm-subregion approach // Tribology International - TRIBOL INT. 2005. № 38. P. 566-573.
14. Güllüce H., Özdemir K. Design and operational condition optimization of a rotary regenerative heat exchanger // Applied Thermal Engineering. 2020. № 177. P. 115341.
15. Fast surrogate-assisted particle swarm optimization algorithm for computationally expensive problems / F. Li, W. Shen, X. Cai, L. Gao, G. A Wang // Applied Soft Computing. 2020. № 92. P. 106303.
16. Rodrigues D., Albuquerque V., Papa J. A Multi-Objective Artificial Butterfly Optimization Approach for Feature Selection // Applied Soft Computing. 2020. № 94.
17. Wen X. Modeling and performance evaluation of wind turbine based on ant colony optimization-extreme learning machine // Applied Soft Computing. 2020. № 94. P. 106476.
18. Performance comparison of heuristic algorithms for optimization of hybrid off-grid renewable energy systems / M. Javed, T. Ma, J. Jurasz, S. Ahmed, J. Mikulik // Energy. 2020. № 210. P. 118599.
19. Jensen K., Santos I. Design of actively-controlled oil lubrication to reduce rotor-bearing-foundation coupled vibrations - theory & experiment // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2022. № 236.
20. Encyclopedia of Tribology // Encycl. Tribol. 2013.
21. Peculiarities of reactions control for rotor positioning in an active journal hybrid bearing / L. Savin, R. Polyakov, D. Shutin, A. Babin // International Journal of Mechanics. 2016. № 10. P. 62-67.
22. Dmochowski W. M., Dadouche A., Fillon M. Finite Difference Method for Fluid-Film Bearings // Encyclopedia of Tribology. 2013. P. 1137–1143.
23. San Andres, L. Notes 14. Experimental identification of bearing force coefficients. 2009.URL: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/93254> (accessed 09.01.2022).

24. Shutin D., Polyakov R. Adaptive nonlinear controller of rotor position in active hybrid bearings. 2016. P. 1-6.
25. Mattox D., Wang Q., Chung Y.: Encyclopedia of Tribology // Encycl. Tribol. 2013. P. 2717-2726.
26. Айзerman М. А., Алекскеров Ф. Т. Выбор вариантов. Основы теории. М.: Наука, 1990.
27. Bellman R. E., Zadeh L. A. Decision making in a fuzzy environment // Management Science. 1970. №. 4. P. 141–164.
28. Hwang C. L., Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications // BerlinHeidelberg New York, Springer-Verlag. 1981.
29. Rubiano J., Nucamendi S., Cordero F., Cordero A., Rodríguez M., Alejandro an improved LINMAP for multicriteria decision: designing customized incentive portfolios in an organization // Operational Research. 2022. № 22.

References

1. Dekker M. Inc.: *Handbook of turbomachinery*. New York, 1995.
2. Chernavskiy S. A. *Podshipniki skoljeniya* [Sliding bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1963.
3. Hummel Ch. *Kritische Drehzahlen als Folge der Nachgiebigkeit des Schmiermittels im Lager*. Forschungsarbeiten VDI, 1926.
4. Yamamoto T., Ishida Y. *Linear and nonlinear rotordynamics. A modern treatment with applications*. John Wiley&Sons, New York, 2001.
5. Chen W. J., Gunter E. J. *Introduction to Dynamics of rotor-bearing systems*. TRAFFORD PUB, 2005.
6. Singh R., Singh C., Amit H., Amit S. Defect-free optimal synthesis of crank-rocker linkage using nature-inspired optimization algorithms. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, no. 116, pp. 105-122.
7. Panda S., Nanda N., Mishra D. Comparative study on optimum design of rolling element bearing. *Tribology International*, 2015, no. 92, pp. 595-604.
8. Lu K., Jin Yu., Huang P., Zhang F., Zhang H., Fu Ch., Chen Yu. The applications of POD method in dual rotor-bearing systems with coupling misalignment. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, no. 150, 107236 p.
9. Onunka C., Gobler H., Bright G. A stability optimization model for shaft rotor-bearing systems. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*. 2016, no. 8, pp. 1-12.
10. Lu K., Jin Yu., Chen Yu., Yang Y., Hou L., Zhang Z., Li Z., Fu Ch. Review for order reduction based on proper orthogonal decomposition and outlooks of applications in mechanical systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, no. 123, pp. 264-297.

11. Li S., Babin A., Shutin D., Kazakov Yu., Liu Y., Chen Z., Savin L. Active Hybrid Journal Bearings with Lubrication Control: Towards Machine Learning. *Tribology International*, 2022, no. 175, 107805 p.
12. Saruhan H. Optimum design of rotor-bearing system stability performance comparing an evolutionary algorithm versus a conventional method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, no. 48, pp. 1341-1351.
13. Zhang J., Talke F. E. Optimization of slider air bearing contours using the combined genetic algorithm-subregion approach. *Tribology International - TRIBOL INT*, 2005, no. 38. P. 566-573.
14. Güllüce H., Özdemir K. Design and operational condition optimization of a rotary regenerative heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 2020, no. 177, 115341 p.
15. Li F., Shen W., Cai X., Gao L., Wang G. A fast surrogate-assisted particle swarm optimization algorithm for computationally expensive problems. *Applied Soft Computing*, 2020, no. 92, 106303 p.
16. Rodrigues D., Albuquerque V., Papa J. A Multi-Objective Artificial Butterfly Optimization Approach for Feature Selection. *Applied Soft Computing*, 2020, № 94.
17. Wen X. Modeling and performance evaluation of wind turbine based on ant colony optimization-extreme learning machine. *Applied Soft Computing*, 2020, no. 94, 106476 p.
18. Javed M., Ma T., Jurasz J., Ahmed S., Mikulik J. Performance comparison of heuristic algorithms for optimization of hybrid off-grid renewable energy systems. *Energy*, 2020, no. 210, 118599 p.
19. Jensen K., Santos I. Design of actively-controlled oil lubrication to reduce rotor-bearing-foundation coupled vibrations - theory & experiment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2022, no. 236.
20. *Encyclopedia of Tribology*. Encycl. Tribol. 2013.
21. Savin L., Polyakov R., Shutin D., Babin A. Peculiarities of reactions control for rotor positioning in an active journal hybrid bearing. *International Journal of Mechanics*, 2016, no. 10, pp. 62-67.
22. Dmochowski W. M., Dadouche A., Fillon M. Finite Difference Method for Fluid-Film Bearings. *Encyclopedia of Tribology*, 2013, pp. 1137–1143.
23. San Andres L. *Notes 14. Experimental identification of bearing force coefficients*. 2009. Available at: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/93254> (accessed 09.01.2022).
24. Shutin D., Polyakov R. Adaptive nonlinear controller of rotor position in active hybrid bearings, 2016, pp. 1-6.
25. Mattox D., Wang Q., Chung Y. Encyclopedia of Tribology. *Encycl. Tribol*, 2013, pp. 2717-2726.
26. Aizerman M. A., Aleskerov F. T. *Vibor variantov. Osnovi teorii* [Choise of options. Fundamentals of theory]. Moscow, Nauka Publ., 1990.

27. Bellman R. E., Zadeh L. A. Decision making in a fuzzy environment. *Management Science*, 1970, no. 4, pp. 141–164.
 28. Hwang C. L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin, Heidelberg; New York, Springer-Verlag, 1981.
 29. Rubiano J., Nucamendi S., Cordero F., Cordero A., Rodríguez M. Alejandro an improved LINMAP for multicriteria decision: designing customized incentive portfolios in an organization. *Operational Research*, 2022, no. 22.
-

Информация об авторах / Information about the Authors

Фетисов Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, ассистент
кафедры мехатроники, механики
и робототехники, Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева,
г. Орёл, Российская Федерация,
e-mail: fetisov57rus@mail.ru,
SPIN-код: 1662-8088,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3397-9863>

Литовченко Максим Геннадьевич, студент
кафедры мехатроники, механики и
робототехники, Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева,
г. Орёл, Российская Федерация,
e-mail: yamaks123@bk.ru

Шутин Денис Владимирович, кандидат
технических наук, доцент кафедры
мехатроники, механики и робототехники,
Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева,
г. Орёл, Российская Федерация,
e-mail: rover@gmail.ru,
SPIN-код: 8308-0143,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0515-7106>

Alexander S. Fetisov, Cand. of Sci. (Engineering),
Assistant of the Department of Mechatronics,
Mechanics and Robotics, Orel State University
named after I.S. Turgenev,
Orel, Russian Federation,
e-mail: fetisov57rus@mail.ru,
SPIN-код: 1662-8088,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3397-9863>

Maksim G. Litovchenko, Student of
Mechatronics, Mechanics and Robotics
Department, Orel State University named
after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation,
e-mail: yamaks123@bk.ru

Denis V. Shutin, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor of Mechatronics, Mechanics
and Robotics Department, Orel State University
named after I.S. Turgenev,
Orel, Russian Federation,
e-mail: rover@gmail.ru,
SPIN-код: 8308-0143,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0515-7106>