

*Виноградов Е. В., студент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашины»
Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)», г. Калуга, Россия*

*Ильичев В. Ю., к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели и гидромашины»
Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)», г. Калуга, Россия*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Аннотация: Описываются основы методики оптимизации размерных характеристик активных магнитных подшипников, применяемые для этого зависимости, а также разработанные авторами программные средства, позволяющие произвести такую оптимизацию. Приведены результаты вариантных расчётов магнитного подшипника с помощью разработанных программ, сделаны выводы.

Ключевые слова: электромагнитная индукция, магнитный подшипник, тяговая сила, оптимизация размеров, язык Python.

Annotation: The basis of the technique of optimizing the dimensional characteristics of active magnetic bearings, used for this dependence, as well as software tools developed by the authors that allow such optimization are described. The results of variant calculations of the magnetic bearing using the developed programs are given, conclusions are drawn.

Keywords: electromagnetic induction, magnetic bearing, traction force, size optimization, Python language.

Введение

В тяжело нагруженных роторных машинах (например, турбинах) традиционные гидродинамические опоры скольжения или качения всё чаще заменяются на так называемые активные магнитные подшипники, несущие нагрузку за счёт регулируемых электромагнитных сил [10].

Достоинствами магнитных подшипников по сравнению с традиционными являются [9]:

1. возможность управления развиваемым магнитным усилием, в том числе автоматизированное;
2. невысокие потери на сопротивление вращению, т.к. осуществляется так называемая «левитация» (парение) цапф ротора внутри подшипника, и трение осуществляется только в слоях воздуха;
3. при расчётном режиме эксплуатации отсутствует износ частей подшипника (свойственный и подшипникам качения, и подшипникам скольжения);
4. нет необходимости подвода смазки, в связи с чем практически отсутствует загрязнение подшипника и отсутствует необходимость во вспомогательных системах смазки.

Однако, есть и некоторые недостатки, которыми пока сдерживается распространение активных магнитных подшипников: они не обладают свойством самоподдержания устойчивого режима работы подобно гидродинамическим подшипникам скольжения, поэтому требуют обязательного применения системы автоматического управления для исключения аварии, возможной при соприкосновении обмоток статора с вращающимся ротором. Также необходима бесперебойная подача электроэнергии к подшипникам и безошибочная работа системы управления (поэтому для исключения аварии роторного агрегата в случае неполадок магнитных подшипников в конструкции предусматривают дополнительные страховочные подшипники качения).

Ещё одним из недостатков является то, что у магнитного материала подшипника существует предел насыщения, которым ограничивается его удельная нагрузка. Однако, при современном уровне развития науки и техники, применение активных магнитных подшипников становится всё более предпочтительным, особенно в условиях эксплуатации, когда применение подшипников жидкостной смазки становится невозможным – в условиях вакуума, пониженных температур и др.

На данный момент принципы работы магнитных подшипников достаточно хорошо изучены. В России наиболее известны исследования Журавлёва В.Н. [2], в которых даются рекомендации по принципу подбора конструктивных параметров таких подшипников, однако для простоты изложения решение этой задачи сильно упрощено. Кроме того, для решения задач оптимизации используются не самые продуктивные на данной стадии развития науки методики вычислений.

Целью данной статьи является разработка общедоступного программного продукта, позволяющего на основе современных численных методов быстро находить оптимальные конструктивные параметры конкретного проектируемого подшипника. Кроме того, разрабатываемая программа должна позволять исследовать влияние размерных параметров на нагрузочную способность подшипника и делать выводы по оптимизации подбора этих параметров.

Методы и материалы

Методика, на основе которой создана расчётная программа, подходит для расчёта активных магнитных подшипников с любым количеством полюсов. В качестве примера рассчитывается подшипник с внешним диаметром $D=0,6$ м, характерным для компрессора газоперекачивающего агрегата средней мощности, взятый из работы [1]. Данный подшипник имеет 8 магнитных полюсов, его упрощённая расчётная модель показана на рис. 1.

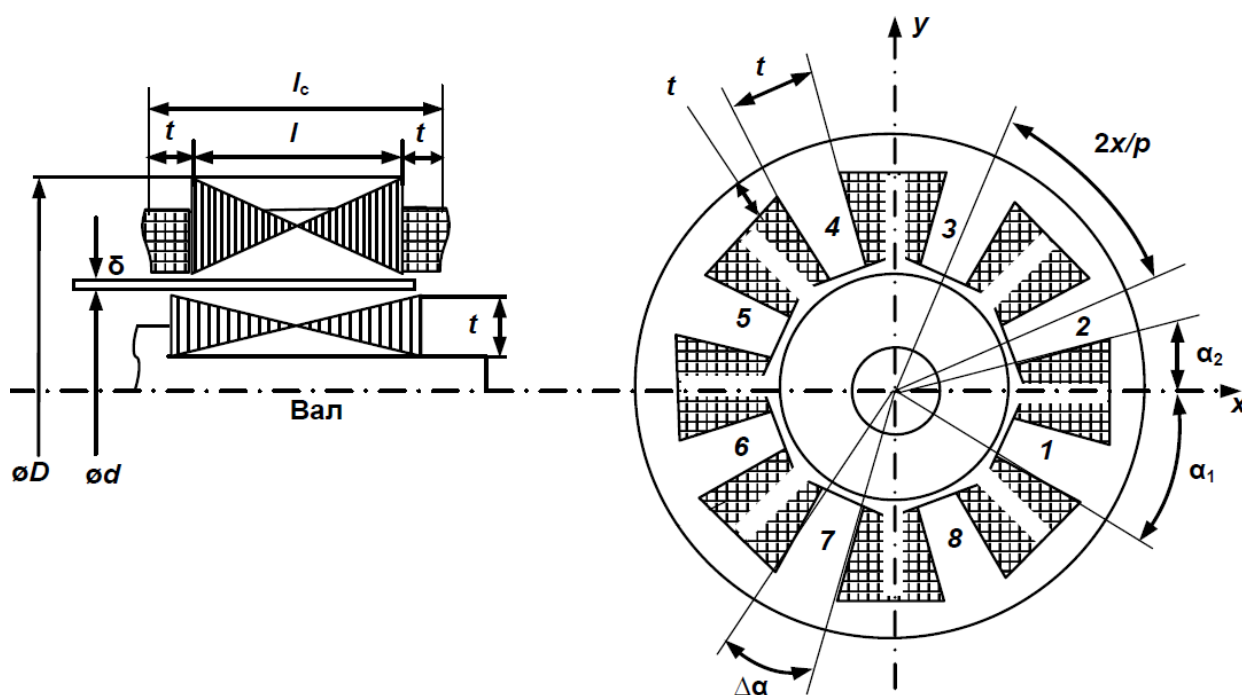


Рис. 1. Расчётная схема активного магнитного подшипника

Методика оптимизационного определения основных размеров подшипника основана на следующем принципе [2]: в заданном объёме подшипника, ограниченном его внешним диаметром D и длиной l , необходимо создать максимальное тяговое усилие $F_{\max}$ (его ещё называют несущей способностью – это максимальное усилие, которое подшипник способен нести без перегрева). Надёжная работа подшипника ограничивается магнитной индукцией $B_{\max}$ в зазоре δ . При использовании электротехнической стали $B_{\max}=1,2 \text{ Тл}$, для кобальтовой стали $B_{\max}=1,6 \text{ Тл}$.

При решении задачи необходимо найти такой оптимальный диаметр цапфы d и ширину полюса t , при которых обеспечивается $F_{\max}$. Если при расчёте $F_{\max}$ не соответствует необходимому тяговому усилию, но не сильно от него отличается, можно изменять длину подшипника l . Если $F_{\max}$ сильно отличается от необходимого, то необходимо изменять также внешний диаметр подшипника D и повторять расчёты. Все описанные операции можно быстро осуществить только с использованием специально написанной компьютерной программы, тем более что расчёт $F_{\max}$ также не является тривиальной

математической задачей, а требует применения той или иной оптимизационной методики.

Тяговое усилие, которое необходимо максимизировать, выражается формулой

$$F(d,t) = C_F C_B^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t \right)^2 \left(\frac{\pi d}{2} - t \right)^2 t, \quad (1)$$

где $C_F = \frac{0,924l}{\mu_0}$ - константа для восьмиполюсного подшипника;

$C_B = \frac{\mu_0 k_c j_{\max}}{2\delta}$ - константа;

$\mu_0 = 1,25663706212 \cdot 10^{-6}$ - магнитная постоянная, H/A^2 ;

k_c – коэффициент заполнения паза медью, который принимают равным 0,4;

$j_{\max} = 2 \cdot 10^6$ A/m^2 – допустимая плотность тока в проводниках катушек.

При максимизации $F(d,t)$ необходимо максимизировать также индукцию в зазоре $B(d,t) = B_{\max}$. Последнее условие можно записать в виде формулы

$$\left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} - t \right) \left(\frac{\pi d}{2} - t \right) - \frac{B_{\max}}{C_B} = 0. \quad (2)$$

Оптимизацию функции (1) при выполнении условия (2) было решено производить с использованием современного метода дифференциальной эволюции, реализованного на базе специальной библиотеки языка программирования Python.

Разработанная программа состоит из нескольких блоков:

1. Импорт функций, необходимых для использования метода дифференциальной эволюции [3]: `NonlinearConstraint`, `Differential_evolution`, `Bounds`, входящих в свою очередь в модуль научных вычислений `Scipy.optimize`. Импорт модуля `Numpy` [4], необходимого для организации и заполнения массивов, по которым будут выводиться результаты исследований, а также библиотеки `Matplotlib` [5] для вывода графиков.

2. Создание переменных, входящих в формулы (1) и (2), и присвоение им соответствующих значений. Зазор δ в примере принят равным 50 мкм.

3. Создание пустых массивов, для их последующего заполнения данными с целью построения графических зависимостей.

4. Запись ограничений, накладываемых на значения диаметра d и ширины полюсов t . В примере задано $0 > d \leq D/1,5$ и $0 > t \leq \pi D/8$, а также ограничение (2).

5. Записаны все стадии реализации оптимизационного метода дифференциальной эволюции максимизации функции (1). Результатом оптимизации являются значения d и t , с условием вышеприведённых ограничений.

6. Первый вариант программы выводит также промежуточные значения d , t и $F(d,t)$ в зависимости от номера итерации процесса дифференциальной эволюции и заполняет ими соответствующие массивы. Эта операция предусмотрена для демонстрации хода расчёта (хода эволюции указанных параметров) с помощью графиков.

7. Создание графиков зависимости указанных в п. 6 параметров от номера итерации с помощью модуля Matplotlib. Графики эволюции результатов для одного запуска программы приведены на рис. 2.

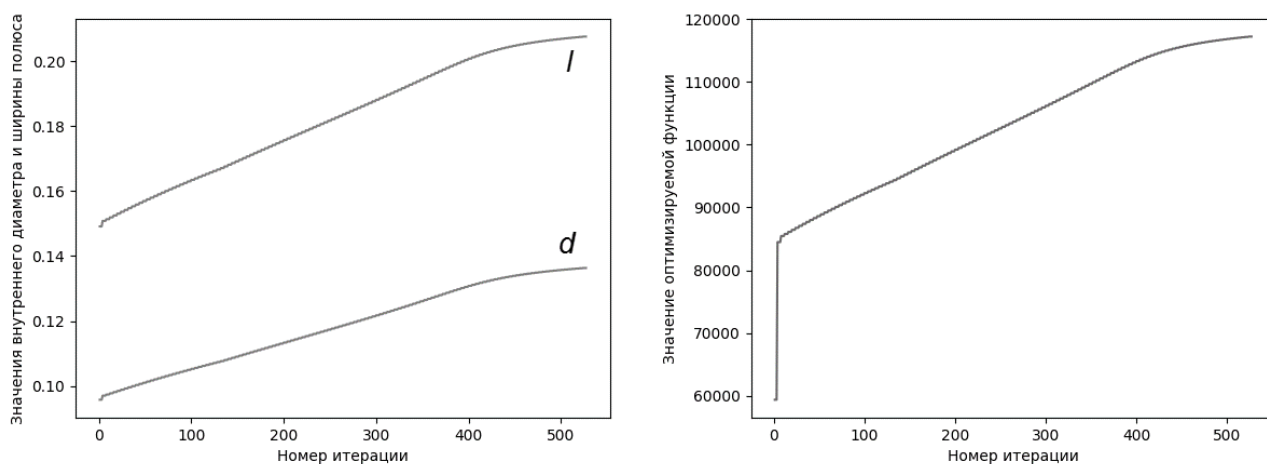


Рис. 2. Графики изменения вычисляемых значений в зависимости от номера итерации

Пример расчёта

Отображённый на рис. 2 процесс расчёта произведён для приведённых выше ограничений и заданной длины подшипника, равной половине его наружного диаметра.

Также был создан вариант программы, позволяющий исследовать зависимость тягового усилия от длины подшипника. Как было сказано выше, с помощью такого расчёта можно подобрать длину подшипника, если полученное тяговое усилие при заданном внешнем диаметре получается близким к необходимому. Результат расчёта с помощью второго варианта программы представлен на рис. 3.

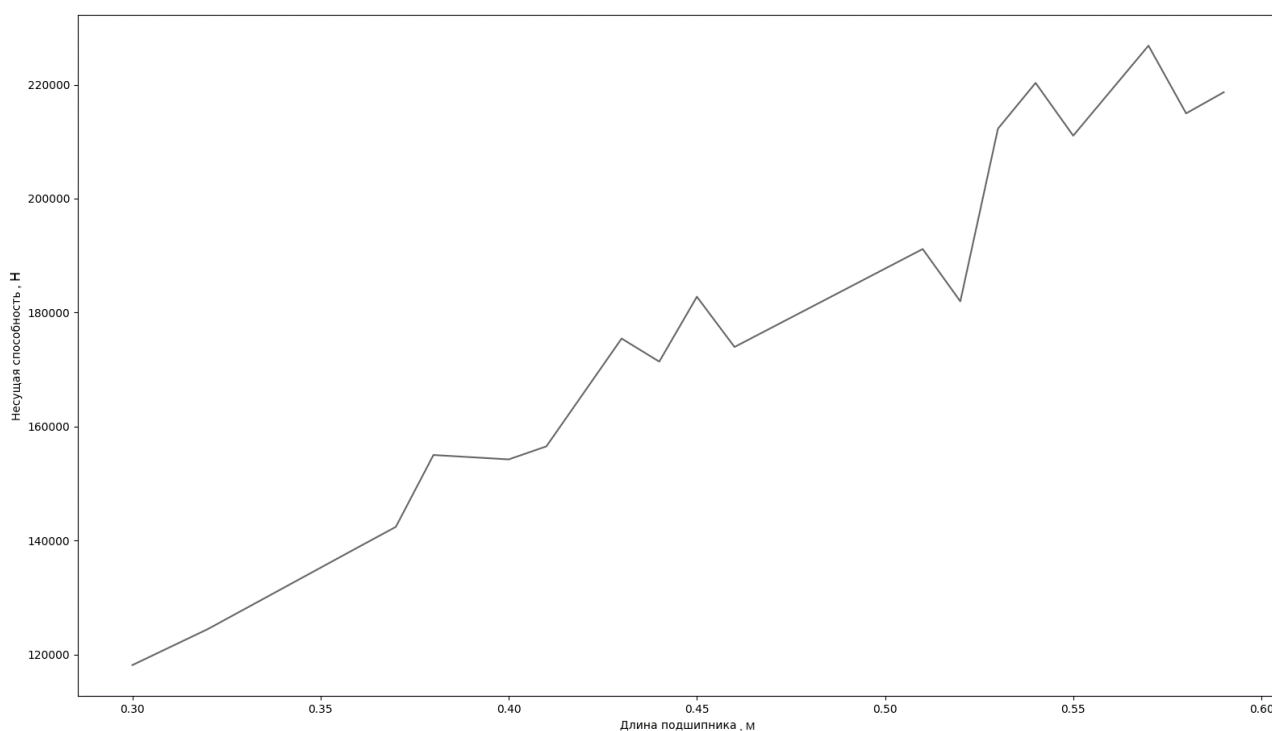


Рис. 3. Зависимость несущей способности активного магнитного подшипника от его длины

График показывает практически линейную зависимость тягового усилия (несущей способности) активного магнитного подшипника от его длины, что вполне подтверждает теоретическую зависимость тягового усилия

электромагнита, выраженную функцией (1) и одновременно является верификацией разработанной методики.

Следующий вариант программы рассчитывает зависимость тягового усилия (несущей способности) подшипника, F , H , от величины зазора δ , мкм . Данная зависимость представлена на рис. 4.

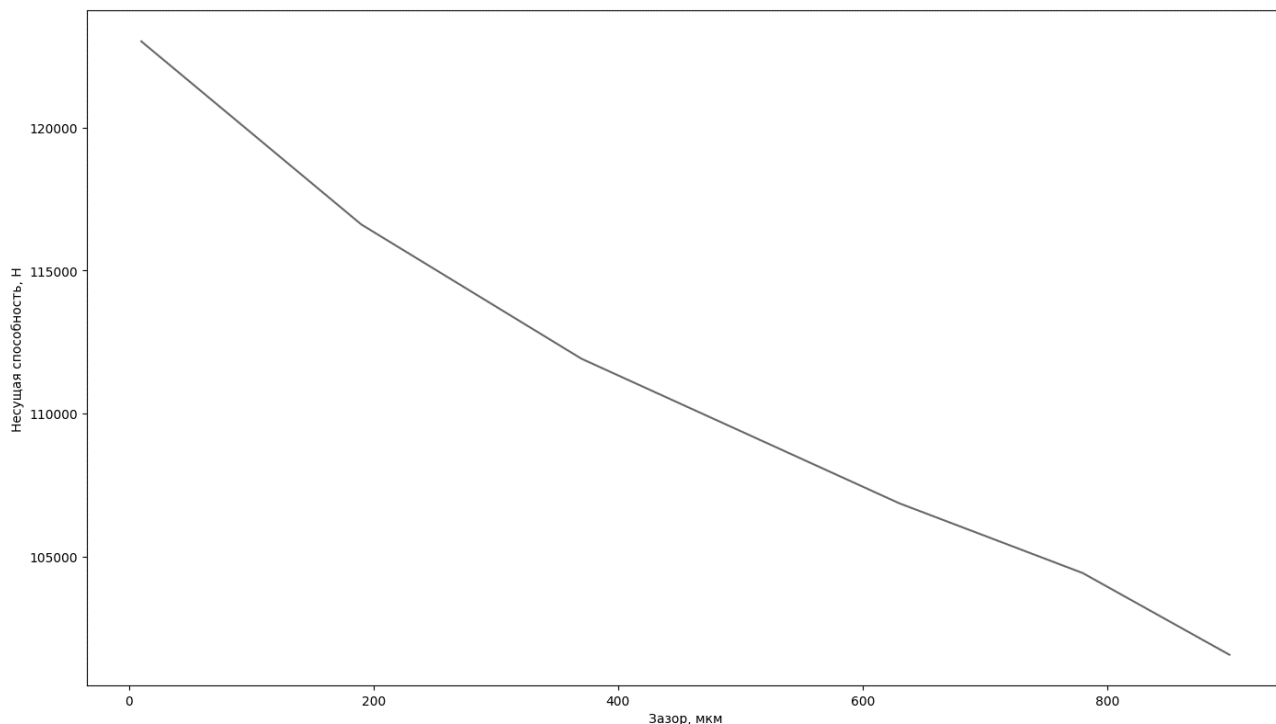


Рис. 4. Зависимость несущей способности активного магнитного подшипника от зазора между ротором и статором

График показывает, что даже при увеличении зазора в подшипнике в 10 раз (с 50 до 500 мкм), его несущая способность снижается относительно незначительно (примерно на 10%). Это позволяет выработать важную для проектирования активных магнитных подшипников рекомендацию, т.к. увеличение зазора позволяет уменьшить вероятность соприкосновения ротора и статора при возможных неравномерностях и перекосах, возникающих при работе подшипника. Поэтому, в данном случае желательно применять при проектировании подшипника несколько большие зазоры (по примеру проектирования подшипников с жидкостной смазкой зазор, равный 500 мкм ,

для предотвращения задеваний при рассматриваемом диаметре подшипника является вполне достаточным, даже с учётом значительного запаса) [6].

Заключение

Таким образом, все цели данной работы были выполнены – подобрана совершенная методика оптимизации конструктивных параметров активного магнитного подшипника, позволяющая обеспечить необходимую его несущую способность при достижении максимальной эффективности использования магнитного материала.

С помощью языка Python и одного из самых современных методов оптимизации – метода дифференциальной эволюции, удалось создать универсальную программу, которая может использоваться как при проектировании магнитных подшипников, так и при исследовании взаимозависимости его характеристик. По результатам расчёта примеров сделаны некоторые выводы по выбору конструктивных характеристик магнитного подшипника.

Разработанная и описанная в данной работе программа размещена для свободного использования и модернизации на сайте автора [8]. С её помощью можно рассчитывать активные магнитные подшипники, предназначенные для любых роторных установок – элементов традиционных газотурбинных двигателей, двигателей и приборов в вакуумной и криогенной, космической технике, а также широкого ряда прочих установок [7].

Библиографический список:

1. Верещагин В.П., Рогоза А.В. Сравнение различных типов электромагнитных подшипников. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2011. Т. 122. № 3. С. 11-16.
2. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчёт, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.

3. Ильичев В.Ю. Использование алгоритма дифференциальной эволюции для решения оптимизационных задач. // Системный администратор. 2021. № 4 (221). С. 80-83.

4. Ильичев В.Ю. Разработка программных средств увеличения изображений с использованием их фрактальных свойств. // Системный администратор. 2021. № 1-2 (218-219). С. 124-127.

5. Ильичев В.Ю. Использование парсинга для создания базы метеорологических данных и разработка на её основе нейросетевой модели прогнозирования скорости ветра. // Системный администратор. 2020. № 10 (215). С. 92-95.

6. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Создание программы расчёта упорных подшипников скольжения на языке Python. // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 3. С. 14-18.

7. Кужанбаев Р.Т., Киселев Д.Ю. Возможности использования активных магнитных подшипников в газотурбинных двигателях. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 1. № 10. С. 133-134.

8. Программа расчёта активного магнитного подшипника. URL: <http://turbopython.ru/magnetic> (дата обращения: 06.06.2021).

9. Стоцкая А.Д., Калинина О.В. Разработка математической модели радиальных активных магнитных подшипников. Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2013. № 7. С. 104-109.

10. Щеклеина И.Л., Угольников А.В. К теории расчета радиального активного магнитного подшипника. // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. № 2 (42). С. 59-62.