

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ НА ПАРАМЕТРЫ ИХ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Герасин А.А.<sup>1</sup>, Исмагилов Ф.Р.<sup>2</sup>, Хайруллин И.Х.<sup>2</sup>, Пашали Д.Ю.<sup>2</sup>, Бойкова О.А.<sup>2</sup>, Вавилов В.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», Москва, Россия (125319, Россия, г. Москва, ул. Викторенко, 7)

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» Уфа, Россия, (45000, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12)

---

В современной промышленности магнитные подшипники (МП) находят все более широкое применение. Особенный интерес представляет применение МП в высокоскоростных технических комплексах, так как применение МП позволяет решить в них проблемы потерь на трение. В связи с распространенностью применения МП достаточно остро встают вопросы диагностики их технического состояния. В связи с этим целью данной работы является анализ возможности применения метода диагностики МП по параметрам внешнего магнитного поля (ВМП) на практике. Для выполнения поставленной цели в работе решены следующие задачи: разработаны экспериментальные стенды для исследования осевого и радиального МП, а также методика экспериментальных исследований ВМП исправного и неисправного МП; проведены экспериментальные исследования МП с учетом влияния сторонних источников магнитных полей и условий окружающей среды, представлены сравнения экспериментальных данных с данными компьютерного моделирования, выполненного в программном комплексе Ansys; определены численные характеристики диагностических критериев МП с конкретными геометрическими размерами.

---

Ключевые слова: высокоскоростной электротехнический комплекс, магнитный подшипник, внешнее магнитное поле, диагностика.

## THE INFLUENCE OF MAGNETIC BEARINGS TECHNICAL STATE ON EXTERNAL MAGNETIC FIELD PARAMETERS

Gerasin A.A.<sup>1</sup>, Ismagilov F.R.<sup>2</sup>, Khairullin I.H.<sup>2</sup>, Pashali D.Y.<sup>2</sup>, Boykova O.A.<sup>2</sup>, Vavilov V.E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal State Unitary Enterprise "State Scientific-Research Institute of Aviation Systems", Moscow, Russia (Russia, 125319, Moscow, ul. Viktorenko, 7)

<sup>2</sup> FGBOU VPO "Ufa State Aviation Technical University," Ufa, Russia, (Russia, 45000, Ufa, ul. Karl Marx, 12)

---

Magnetic bearings (MB) are becoming more widely used in modern industry. The use of MB in high-technical systems (HTS) is having particular interest because the application of a magnetic field allows us to solve their problems friction losses. Due to the prevalence of MB rather urgent questions arise diagnostic their technical condition. Therefore, the aim of this work is the analysis of the possibility of diagnosing MB by an external magnetic field (EMF) in practice. To meet the goal in the following tasks: development of experimental stands for studies of axial and radial magnetic field, and the method of experimental research EMF both ways, MB, MB experimental studies with the influence of external magnetic fields and environmental conditions, a comparison of experimental data with data from computer simulations performed in the software package Ansys; certain numerical characteristics of the diagnostic criteria MB with specific geometric dimensions.

---

Keywords: high-speed electrical complex, magnetic bearing, an external magnetic field, diagnostics.

В современной промышленности магнитные подшипники (МП) находят все большее применение [2]. Особенно актуально их применение в высокоскоростных технических комплексах (ВЭК). Применение МП позволяет повысить энергоэффективность, минимизировать тепловые потери ВЭК, а также повысить экологичность таких комплексов. Отказ МП приводит к отказу всего ВЭК и, как следствие, к значительному экономическому

ущербу. Поэтому весьма важными являются вопросы диагностики их технического состояния.

Основными дефектами МП являются: размагничивание постоянных магнитов или их частичное разрушение (трещины, сколы), неисправности системы управления, что приводит к сокращению времени ее реакции на внешнее воздействие или отсутствию реакции, перекосу колец постоянных магнитов относительно друг друга, а также попаданию инородных тел в воздушный зазор МП (например, металлической стружки). Развитие обозначенных выше дефектов приводит к несоосности расположения внутренних постоянных магнитов относительно внешних. Допустимая длительность такого состояния определяется быстродействием системы управления [2].

Наиболее распространенные методы диагностики подшипниковых опор, такие как вибродиагностика и термодиагностика, не могут быть использованы при оценке технического состояния МП, так как измеряемые этими методами параметры, уровень вибрации и температура, изменяются в МП при возникновении механического контакта между наборами колец постоянных магнитов, то есть в последней стадии развития дефекта [5].

Предлагаемый авторами метод диагностики МП, основанный на анализе их внешних магнитных полей (далее ВМП), позволяет определять диагностические параметры бесконтактно и без вывода ВЭЖ из рабочего режима [1]. Применение такого метода позволяет повысить эффективность диагностики ВЭЖ.

В работах [3; 4] показано, что основным диагностическим критерием данного метода является гармонический анализ ВМП в различных зонах электрической машины (ЭМ) (поверхность статора, зона лобовых частей и т.п.) при исправном и неисправном состояниях. Диагностическим признаком неисправности ЭМ является возникновение дополнительных гармоник в спектре ВМП и/или их изменение (по величине или форме) с развитием дефектов.

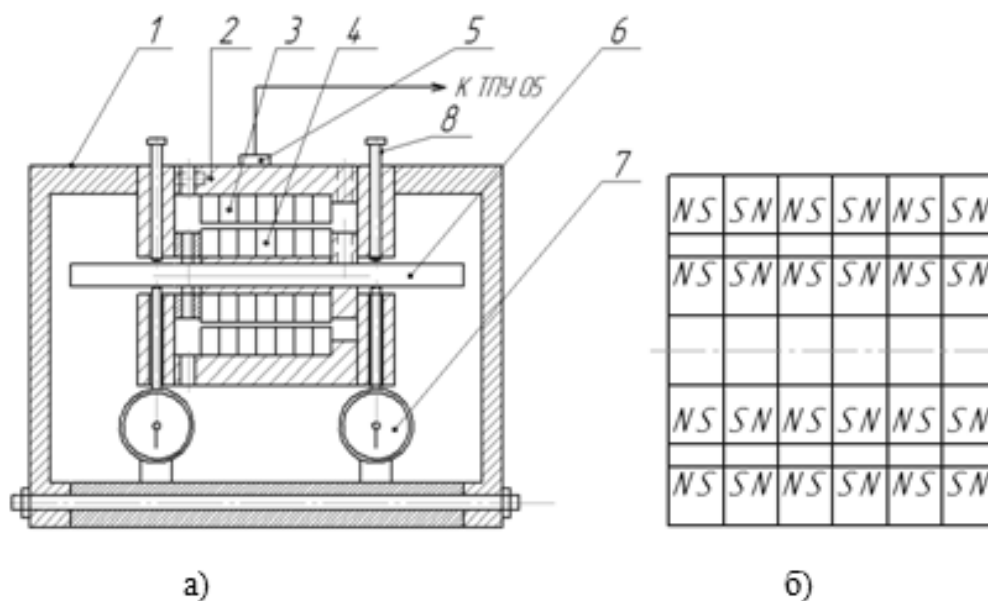
Целью настоящей работы является исследование влияния технического состояния магнитных подшипников на их внешнее магнитное поле, а также анализ возможности технической реализации и применения предлагаемого метода диагностики на практике.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана методика экспериментальных исследований ВМП осевых и радиальных МП;
- разработаны установки для экспериментальных исследований ВМП осевых и радиальных МП;

- проведены экспериментальные и компьютерные исследования влияния технического состояния осевых и радиальных МП и условий окружающей среды на их ВМП;
- произведена оценка влияния технического состояния осевых и радиальных МП и условий окружающей среды на ВМП ВЭК;
- разработаны рекомендации к технической реализации и практическому применению предлагаемого метода диагностики.

Установки для проведения экспериментальных исследований ВМП как диагностического критерия радиальных магнитных подшипников (РМП) и осевых магнитных подшипников (ОМП) приведены на рисунках 1 и 5 соответственно.



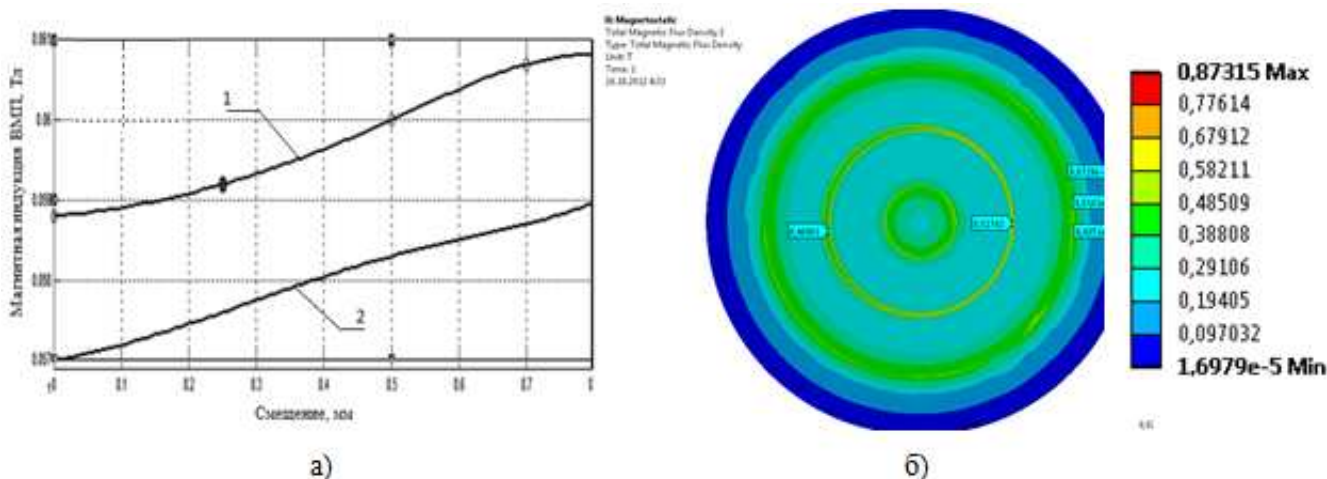
**Рис. 1:**

- а – экспериментальная установка для исследований ВМП РМП как диагностического критерия РМП;
- б – конструкция РМП: 1 – станина; 2 – магнитный подшипник; 3 – внешний набор магнитных колец *NdFeB N33*; 4 – внутренний набор магнитных колец *NdFeB N33*; 5 – датчик Холла; 6 – вал; 7 – индикатор часового типа ИЧ-10; 8 – толкатель.

Установка (рис. 1а) работает следующим образом: на станине 1 установлен вал с исследуемым МП, имеющим конструкцию, приведенную на рисунке 2. МП состоит из семи колец магнитов *NdFeB* марки *N33*, намагниченных в осевом направлении, воздушный зазор между внешним и внутренним набором магнитных колец составляет 1,5 мм. Геометрические параметры внешних колец: внешний диаметр – 43 мм, внутренний – 28 мм, осевая длина – 5 мм. Геометрические параметры внутренних колец: внешний диаметр – 25 мм, внутренний – 10 мм, осевая длина – 5 мм. Кольца магнитов запрессованы в немагнитные втулки. Последние выполнены немагнитными для того, чтобы избежать закорачивания магнитного

потока. Измерения значений индукции ВМП осуществляется датчиком Холла, который подключен к миллитесламетру ТПУ–05. За исправное состояние МП принимается концентричное расположение внутреннего набора магнитных колец относительно внешнего, за неисправное – эксцентричное. Последнее достигается путем смещения оси внутреннего набора магнитных колец относительно внешнего с помощью толкателя 8 (рис. 1а) с шагом смещения, равным 0,1 мм. По индикаторам часового типа ИЧ–10 отслеживается и фиксируется значение величины смещения. Для минимизации погрешности измерений установлено два индикатора: правый и левый, по которым оценивается равномерность смещения и контролируется отсутствие перекосов оси внутренних колец. Измерения проводятся при различных значениях температуры и влажности воздуха.

Полученные данные подвергаются математической интерполяции в программном комплексе *Matlab*, в модуле *SplineTools*. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 2а, кривая 2.



**Рис. 2:**

- а – зависимость магнитной индукции ВМП РМП от величины смещения внутреннего набора колец относительно внешнего;
- 1 – данные компьютерного моделирования; 2 – экспериментальные данные;
- б – спектр распределения магнитной индукции в РМП со смещением внутреннего набора магнитных колец относительно внешнего.

Анализ полученных экспериментальных данных (рис. 3, кривая 2) показал, что при смещении колец на 0,4 мм индукция ВМП РМП изменяется на 3–5%. Толщина корпуса в данном эксперименте составляла 10 мм. Такие изменения индукции легко фиксируются датчиком Холла, что подтверждает возможность использования предложенного метода на практике.

Поставленная задача также была решена методами компьютерного моделирования в программном комплексе *Ansys*. В качестве расчетной модели был принят МП, аналогичный

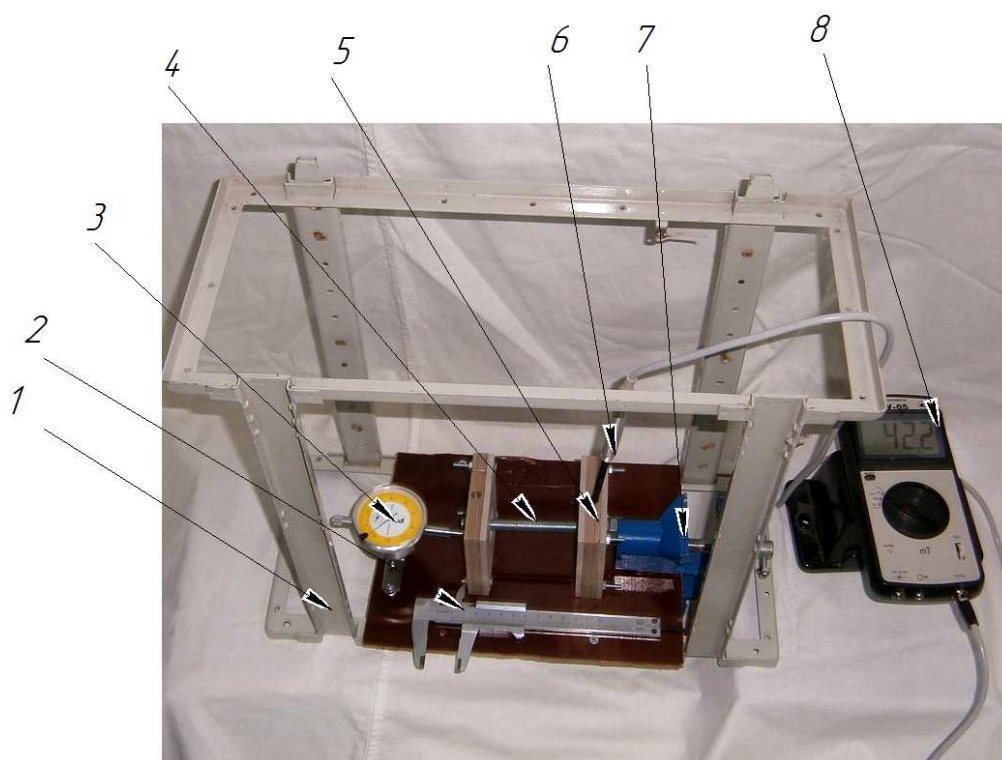
экспериментально исследуемому. Результаты компьютерного моделирования представлены в виде кривой 1 на рисунке 2а.

Анализ спектра распределения магнитной индукции РМП, полученного компьютерным моделированием (рис. 2б), показал, что при толщине корпуса 5 мм магнитная индукция ВМП РМП увеличивается на 51,5%. В связи с этим для повышения точности диагностики рекомендуется в корпусе ВЭК предусматривать глухие отверстия определенной глубины для установки датчика Холла. Для исследуемого случая глубина глухого отверстия в корпусе составляет 5 мм.

Сравнительный анализ результатов эксперимента и компьютерного моделирования показал, что качественно результаты идентичны, а численное расхождение составляет не более 5%. Причем данные компьютерного моделирования численно больше данных эксперимента, это объясняется тем, что реальные характеристики постоянных магнитов несколько ниже, чем заявленные производителем и используемые при моделировании.

Установка для проведения экспериментальных исследований ВМП как диагностического критерия ОМП представлена на рисунке 5. Установка содержит станину 1, штангенциркуль 2, индикатор часового типа ИЧ-10 3, шток 4, осевой магнитный подшипник 5, датчик Холла 6, толкатель 7, миллитесламетр ТПУ-05, соединенный с датчиком Холла 8. За исправное состояния ОМП принимается равнозначность рабочего зазора номинальному, за неисправное – отклонение рабочего зазора от номинального.

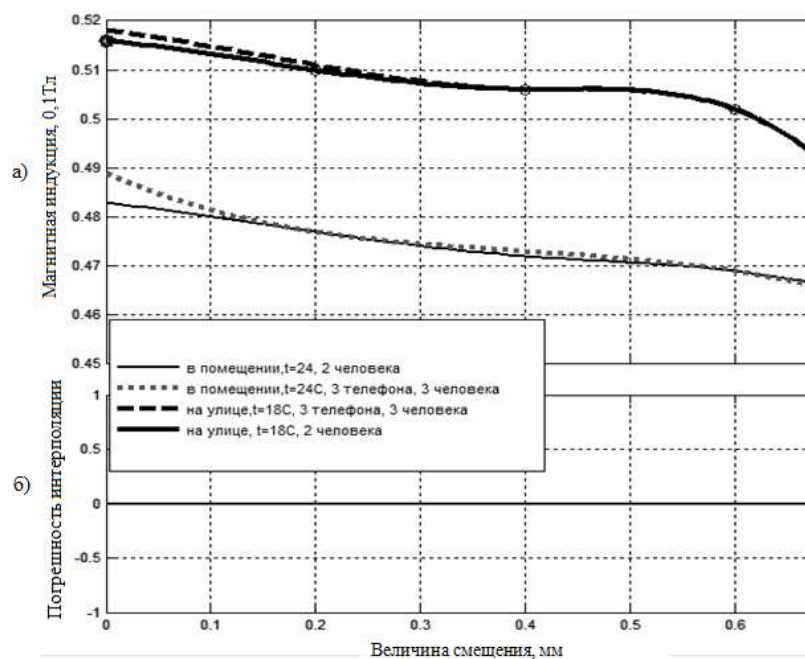
Установка (рис. 3) работает следующим образом: воздушный зазор в ОМП изменяют путем воздействия толкателя на шток. При этом значение величины изменения воздушного зазора фиксируется индикатором часового типа ИЧ-10, а значение величины магнитной индукции ВМП измеряется датчиком Холла и отображается на экране ТПУ-05. Полученные экспериментальные данные приведены на рисунке 4а. С помощью штангенциркуля измеряется толщина корпуса ВЭК.



**Рис. 3. Установка для проведения экспериментальных исследований ВМП как диагностического критерия осевого магнитного подшипника:**  
 1 – станина; 2 – штангенциркуль; 3 – индикатор часового типа ИЧ–10; 4 – шток;  
 5 – осевой магнитный подшипник; 6 – датчик Холла; 7 – толкатель;  
 8 – миллитесламетр ТПУ-05.

Анализ зависимостей (рис. 4а) показал, что при изменении воздушного зазора на 40% индукция ВМП изменяется на 4–5%. Данные изменения, как и в предыдущем эксперименте, с достаточной точностью фиксируются датчиком Холла, что подтверждает возможность применения предлагаемого метода диагностики МП в реальных условиях эксплуатации.

Для оценки влияния ВМП сторонних источников на точность диагностирования представленным методом, изменялись условия окружающей среды: количество людей, количество источников сторонних магнитных полей (в частности, использовались сотовые телефоны), температурный режим и относительная влажность воздуха. Результаты исследований влияния условий окружающей среды на параметры ВМП представлены на рисунке 4б.



**Рис. 4. Результаты измерений ВМП ОМП ВЭК, толщина корпуса 9 мм:**  
*а* – результаты исследований ВМП как диагностического критерия осевого магнитного подшипника; *б* – результаты исследований влияния условий окружающей среды на параметры ВМП.

Анализ влияния сторонних магнитных полей и условий окружающей среды на параметры ВМП МП показал, что внесение дополнительных источников поля в незначительной степени влияет на показания датчика Холла. Это объясняется тем, что в качестве диагностического критерия принимается величина индукции постоянного ВМП, а большинство магнитных полей окружающей среды имеют переменный характер. При изменении температуры и влажности воздуха зависимости качественно сохраняют свой характер, а их численное расхождение не превышает 3%. Последнее объясняется погрешностью измерительного прибора, вызванной изменением температуры окружающей среды, а не изменением ВМП МП при изменении температуры.

Для исследования влияния толщины корпуса ВЭК на численные значения диагностических критериев, т.е. на уровень ВМП, при эксперименте изменялась толщина корпуса на 33% и измерялись параметры ВМП исправного и неисправного ОМП.

Анализ полученных результатов показал, что при увеличении толщины корпуса ВЭК на 33% значение величины фиксируемого критерия отказа, т.е. уровень ВМП снижается в 1,8 раза.

Полученные результаты подтверждают возможность практической реализации предложенного метода внедрения его в высокоскоростных электротехнических комплексах.

#### Список литературы

1. Бойкова О.А. Функциональная диагностика неисправностей электромеханических элементов электротехнических комплексов по внешнему электромагнитному полю : автореферат ... канд. техн. наук. – Уфа : УГАТУ, 2011. – 19 с.
2. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. – СПб. : Политехника, 2003. – 206 с. : ил.
3. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Пашали Д.Ю., Бойкова О.А. Обзор современных методов и средств оперативной диагностики электромеханических преобразователей энергии // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14. – № 4 (39). – С. 73–79.
4. Пашали Д.Ю. Магнитная индукция при интегральной оценке неравномерности воздушного зазора для задач диагностирования // Электротехнические комплексы и системы : внутривуз. сб. науч. трудов. – Уфа : УГАТУ, 2001. – С. 194-199.
5. Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е. Определение влияния статического эксцентриситета на устойчивость гибридного магнитного подшипника // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16. – С. 147–150.

**Рецензенты:**

Шапиро С.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой физики Уфимской государственной академии экономики и сервиса, г. Уфа.

Фетисов В.С., д.т.н., профессор кафедры ИИТ ФГБОУ ВПО «УГАТУ», г. Уфа.