

МЕХАТРОННАЯ УСТАНОВКА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РОТОРНО-ОПОРНЫХ УЗЛОВ**А.В. Сытин,
А.Ю. Родичев**Орловский государственный
университет им. И.С. Тургенева
Наугорское шоссе, 29,
г. Орел, Российская Федерация,
443086
sytin@mail.ru

В статье рассматривается мехатронная установка с электромагнитным нагружением для исследования высокоскоростных роторно-опорных узлов, состоящая из: лепесткового газодинамического подшипника, регистрирующей части, электромагнитных актуаторов и электронной системы управления. Разработка мехатронной экспериментальной установки включает в себя построение структурно-функциональной схемы, компоновку регистрирующих и управляющих систем. В разрабатываемой конструкции реализовано активное управление, которое необходимо для отслеживания траектории движения, непосредственно связанной с критическими прогибами опорной поверхности, а также своевременного воздействия на управляемый объект. Управляемым объектом является полый ротор, вращающийся в лепестковых газодинамических подшипниках. Установка комплектуется универсальной и гибкой измерительной системой.

Ключевые слова: Мехатронная система; магнитный подвес; ротор; упругий элемент; подшипниковый узел; установка; технология; датчик

1 Введение

Увеличение частоты вращения ротора позволяет избежать значительного увеличения массогабаритных характеристик турбоагрегата, при повышении производительности, что особенно важно для нестационарных установок. Вместе с тем, повышение частоты вращения валов в подшипниках скольжения ограничивается большими потерями на трение и ростом температуры, которые сильно возрастают с ростом окружной скорости. Эффективным путем повышения предельной частоты вращения является использование смазочных материалов с малой вязкостью. Очевидно, что наибольшие скорости могут быть достигнуты с помощью газовой, преимущественно воздушной смазки [1]. Силы трения, возникающие при работе в зонах контакта между лепестками, между лепестками и корпусом, а также силы упругой деформации лепестков рассеивают энергию колебаний ротора и улучшают динамические характеристики машины, позволяют достигать высоких частот вращения. Податливость лепестка позволяет обеспечить чрезвычайно малые зазоры

между цапфой и опорной поверхности на большой площади и получить несущую способность, достаточную для многих высокооборотных турбомашин различного назначения. Традиционные лепестковые подшипники принципиально не могут быть использованы для решения ряда сложных технических задач. Происходит это в тех случаях, когда, потенциально невозможно сохранить герметичность, например, в условиях глубокого вакуума, или требуется обеспечить устойчивую работу при сверхвысоких частотах вращения ротора. Одним из эффективных способов обеспечения устойчивого движения ротора является активное управление реакцией опор. Впервые этот принцип был реализован в электромагнитных подшипниках, которые следует рассматривать как мехатронную систему с автоматическим измерением величины и направления реакции опоры [5, 6].

Применение активного управления в ЛГДП позволяет расширить их область применения, поскольку делает возможным быстрое реагирование на непредвиденные ситуации [7]. С минимальным, на данный момент, запаздыванием производится

оценка траектории движения и непосредственное электромагнитное воздействие на ротор. В общем виде ЛГДП с активным управлением представляет собой мехатронную систему, состоящую из: лепесткового газодинамического подшипника, регистрирующей части (датчики перемещения), электромагнитных актуаторов и электронной системы управления (рисунок 1).

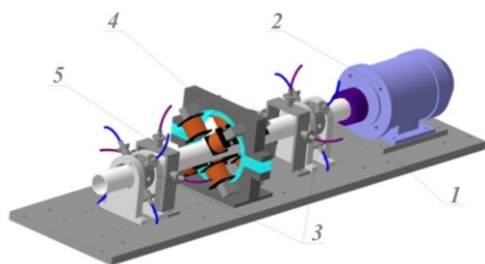


Рисунок 1. Мехатронная установка с электромагнитным нагружением

1 – основание, 2 – электродвигатель, 3 – опорный узел, 4 – электромагнитный узел, 5 – сенсорный узел

Принцип работы такой опоры заключается в регистрации отклонения ротора от положения равновесия датчиками перемещения, сигнал с которых поступает в электронную систему управления. После получения результата величины отклонения, усилитель, питаемый от внешнего источника энергии, увеличивает или уменьшает сигнал до необходимого уровня и подает его на электромагниты, которые воздействуя на ротор корректируют его траекторию движения.

2 Особенности конструкции

Мехатронная установка включает в себя три основных узла:

- опорный узел (рисунок 2), состоящий из лепесткового подшипника (рисунок 3) с системой контроля прогибов упругих элементов. Однако, в качестве подшипника может быть использован любой тип с соответствующими геометрическими характеристиками;

- электромагнитный узел (рисунок 4), необходимый для всплытия ротора в моменты пуска и останова, а также для

нагружения исследуемой системы в процессе работы;

- сенсорный узел, отслеживающий перемещения ротора в двух ортогональных направлениях с учетом перекоса оси ротора.

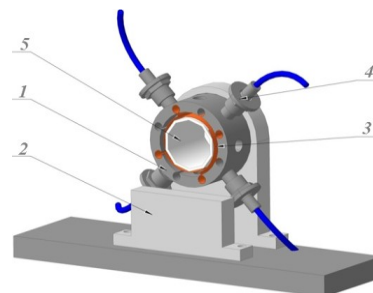


Рисунок 2. Опорный узел с лепестковым газодинамическим подшипником

1 – подшипник, 2 – опорная стойка, 3 – упругий элемент, 4 – датчик прогиба, 5 – ротор

Опорный узел представляет собой две металлические опоры с элементами фиксации и посадочным местом для установки лепесткового подшипника, которые обеспечивают его надежное крепление. Лепестковые газодинамические подшипники имеют относительно простую конструкцию и принцип работы. Несущую поверхность подшипника образуют тонкие упругие металлические пластины. На поверхность пластин наносится антифрикционное покрытие с низким коэффициентом трения, которое «смазывает» подшипник при пуске, пока вал не может вращаться достаточно быстро, чтобы между ним и упругими элементами образовался воздушный клин. По мере увеличения частоты вращения ротора газовый слой полностью разделяет рабочие поверхности. Рост скорости сопровождается увеличением несущей способности подшипника.

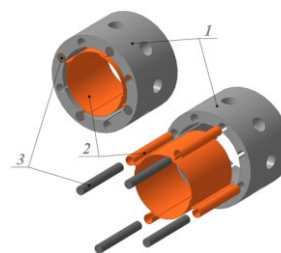


Рисунок 3. Лепестковый подшипник
1 – корпус подшипника, 2 – упругий элемент (лепесток), 3 – штифт

Основой лепесткового газодинамического подшипника является стальная втулка, в пазах которой закреплены упругие рабочие элементы (лепестки). Втулка изготовлена из стали марки 20Х ГОСТ 4543-71. К внутренней поверхности предъявляются повышенные требования по точности взаимного расположения к торцевым поверхностям, и качеству поверхности.

В центре экспериментальной установки находится электромагнитный узел. Монтаж основных деталей осуществляется на станине. Опоры имеют пазы для крепления сердечников на которые в свою очередь крепятся катушки электромагнитов ПМЕ-211.

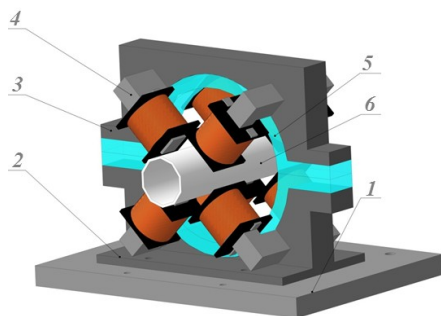


Рисунок 4. Электромагнитный узел
1 – основание, 2 – нижняя рама, 3 – верхняя рама,
4 – электромагнит, 5 – изолятор, 6 – ротор

В качестве привода вращения ротора экспериментальной установки используется асинхронный электродвигатель. Ротор экспериментальной установки представляет собой ступенчатый вал, на конце которого при помощи шпоночного соединения крепится ступица с зубьями, являющаяся частью соединительной муфты VoWex.

Ротор, установленный на лепестковые газодинамические подшипники с активным магнитным подвесом, представляет собой сложную систему с большим количеством различных управляющих параметров (рисунок 5). Диапазоны изменения каждого из них теоретически неограниченны. По этой причине проведение полномасштабных экспериментальных исследований, наиболее полно отражающих реальное состояние роторной системы, представляется

возможным с применением современных информационно измерительных комплексов на базе высокопроизводительных компьютерных платформ.

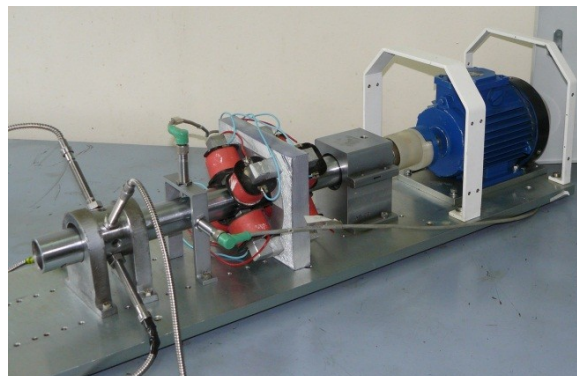


Рисунок 5. Экспериментальная установка в сборе

Для управления асинхронным электродвигателем, путем генерирования частоты переменного трехфазного тока от 0 до 400 Гц, применяется компактный частотный преобразователь ProfiMaster. Данный способ позволяет задавать и изменять частоту вращения электродвигателя, кривые разгона, осуществлять торможение постоянным током, торможение замыканием на сопротивление или осуществлять свободный выбег.

Основу информационно-измерительной системы (ИИС) составляет аналого-цифровой преобразователь фирмы «National Instruments» (рисунок 6).

Основой ИИС является многофункциональная плата NI6052E, которая имеет возможность многоканального цифрового и аналогового ввода-вывода и счетчики-таймеры. Функциональное назначение платы – обеспечение ввода-вывода сигналов, оцифровка и обработка команд, управление силовыми исполнительными модулями установки.

Сигналы с различных датчиков поступают в одно- или двухканальные аналоговые согласующие SCC модули. Управление электродвигателем и насосом, а также осуществление функций аварийного

отключения стенда производится через модули реле SC-RLY01. Для более компактного расположения и последующей обработки сигналов модули SCC и SC-RLY01 монтируются в единый блок-модуль SC-2345, где унифицированные сигналы с датчиков преобразуются в диапазон, воспринимаемый аналого-цифровым преобразователем (0..5В).



Рисунок 6. Информационно-измерительная система

Датчики перемещения и силовые модули экспериментального стенда подключаются к SC-2345 через интерфейсные разъемы BNC, 9-Pin D-sub, Strain Relief. Модуль SC-2345 требует внешнего питания 5В, источником которого является блок-питания SCC-PWR01.

Роль первичных преобразователей выполняют четыре вихретоковых преобразователя AP2100A-C-05.05.1 и два индуктивных датчика расстояния Pepperl+Fuchs IA6-12GM50-IU-V1. Четыре вихретоковых преобразователя AP2100A-C-05.05.1 установлены в корпус лепесткового подшипника скольжения, с их помощью радиального смещения упругого элемента (лепестка). Два индуктивных датчика расстояния Pepperl+Fuchs IA6-12GM50-IU-V1 установлены на планке, с их помощью осуществляется отслеживание положения ротора в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Плата NI6052E и модуль SC-2345 коммутируются единым кабелем SH 68-68-EP. Данные с многофункциональной платы

NI6052E, имеющей расширенные возможности синхронизации и тактирования, поступают в контроллер для последующей обработки или записи на жесткий диск. Программа эксперимента включает минимум три испытаний для одинаковых рабочих параметров. Каждое испытание состоит из разгона ротора до рабочей частоты вращения, работу некоторое время на установившемся режиме и останов. Возможности экспериментальной установки (рисунок 6) позволяют фиксировать частоту вращения, деформация упругого элемента (лепестка), траектории перемещения центра цапфы ротора, частотно-временные характеристики ротора на режимах разгона и выбега, и другие важные параметры.

3 Заключение

Активное управление необходимо для отслеживания траектории движения, непосредственно связанной с критическими прогибами опорной поверхности, а также своевременного воздействия на управляемый объект. Повышение уровня управляемости конструкций, основанное на синтезе механики, электроники и информационных технологий, следует рассматривать как объективную закономерность развития техники. Кроме того активное управление увеличивающее срок службы, надежность и контроль за происходящими в роторно-опорных узлах процессами, позволяет расширить области применения многолепестковых газодинамических подшипников, в опорах роторов турбодетандеров, турбокомпрессоров, высокоскоростных бесконтактных электродвигателей, турбогенераторов и других объектов транспортного и энергетического машиностроения.

4 Благодарности

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта №9.2952.2017/ПЧ государственного задания.

Список использованных источников

[1] Пешти Ю. В. Газовая смазка / Ю. В. Пешти // М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. – 382 с.

[2] Habermann H. An active magnetic bearing system / H. Habermann, G. Liard // Precision Engineering. - 1980. - Vol. 2. - Issue 3. - P. 139-140.

[3] Bleuler H. New concepts for cost-effective magnetic bearing control / H. Bleuler, D. Vischer, G. Schweitzer, A. Traxler, D. Zlatnik // Automatica. - 1994. - Vol. 30. - Issue 5. - P. 871–876.

[4] Wu A. Model-Based Control of Active Tilting-Pad Bearings / A. Wu, Z. Cai, M.S. de Queiroz // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. - 2008. - P. 112-122.

[5] Савин Л. А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения / Л. А. Савин, О. В. Соломин // М.: Машиностроение-1, 2006. – 444 с.

[6] Шутин Д. В. Моделирование активных радиальных гидростатодинамических опор / Д. В. Шутин, Л. А. Савин // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии. - 2012. - № 1. – С. 54-60.

[7] Deckler D. C. Simulation and Control of an Active Tilting-Pad Journal Bearing / D. C. Deckler, R. J. Veillette, M. J. Braun, F. K. Choy // STLE Tribology Trans. - 2000. - Vol. 47. - P. 440-458.

[8] Сытин А. В. Решение комплексной задачи расчета характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников: дис. канд. техн. наук: 01.02.06 / Сытин Антон Валерьевич. - Орёл, 2008. - 201 с.

MECHATRONIC TEST RIG WITH ELECTROMAGNETIC LOADING FOR HIGH-SPEED ROTOR-BEARING SYSTEMS RESEARCH

**Anton V. Sytin,
Aleksey U. Rodichev**

Department of Mechatronics and
International Engineering, Oryol State
University, Naugorskoe sh. 29, Oryol,
Russia Federation, 302020
sytin@mail.ru

The present paper considers a mechatronic test rig with electromagnetic loading for high-speed rotor-bearing systems research that consists of the following elements: a gas-dynamic foil bearing, a measuring system, electromagnetic actuators and a control system. Development of a mechatronic test rig involves development of a structural and functional diagram and a layout of a measuring and a control system. The present design allows active control of rotor trajectories that depend on deformation of the elastic elements and timely influence of the control system on the controlled object - a hollow rotor rotating on gas-dynamic foil bearings. The rig also features a universal measuring and control system.

Key words: *Mechatronic systems; magnetic suspension; rotor; elastic element; bearing node; test rig; technology; sensor*

References

- [1] Peshti, Yu.V. (1993), *Gas lubrication*, BMSTU, Moscow, Russia, 382 p.
- [2] Habermann, H. and Liard, G. (1980), "An active magnetic bearing system", *Precision Engineering*, vol. 2, issue 3, pp. 139-140.
- [3] Bleuler, H., Vischer, D., Schweitzer, G., Traxler, A. and Zlatnik, D. (1994), "New concepts for cost-effective magnetic bearing control", *Automatica*, vol. 30, issue 5, pp. 871-876.
- [4] Wu, A., Cai, Z. and de Queiroz, M.S. (2008), "Model-Based Control of Active Tilting-Pad Bearings", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, pp. 112-122.
- [5] Savin, L.A. and Solomin, O.V. (2006), *Modelling of rotor systems with fluid-film bearings*, Mechanical Engineering-1, 444 p.
- [6] Shutin, D.V. and Savin, L.A. (2012), "Modelling of active radial hybrid bearings", *SWSU Bulletin*, vol. 1, p. 54-60.
- [7] Deckler, D.C., Veillette, R.J., Braun, M.J. and Choy F.K. (2000), "Simulation and Control of an Active Tilting-Pad Journal Bearing", *STLE Tribology Trans*, vol. 47, pp. 440-458.
- [8] Sytin, A.V. (2008), "Solution of the complex problem of calculating the characteristics of radial petal gas dynamic bearings" Ph.D. Thesis, Orel, Russia, 201 p.