УДК 621.822

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АКТИВНЫХ ГИБРИДНЫХ ПОДШИПНИКОВ КАК СРЕДСТВА СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ НА ТРЕНИЕ В МАШИНАХ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**

**Шутин Д.В., Казаков Ю.Н.**

*Россия, г. Орел, ОГУ имени И.С. Тургенева*

*В статье рассмотрены особенности применения активных гибридных подшипников как средства снижения потерь энергии на трение в роторно-опорных системах. Показаны результаты моделирования работы роторной системы с такими подшипниками при различных значениях их параметров. Сделаны выводы об их соотношениях, обеспечивающих наилучшие показатели потерь энергии на трение.*

***Ключевые слова:*** *активные подшипники, роторно-опорные системы, потери энергии на трение, колебания, параметрический анализ.*

Проблема энергоэффективности является актуальной практически для всех категорий машин. Вопросы повышения КПД становятся все более важными и сложными с повышением энергонапряженности агрегатов, когда характеристики начинают приближаться к физическим пределам. КПД машин напрямую влияет на экономическую эффективность их использования, поэтому постоянно происходит поиск новых способов снижения потерь энергии. В роторных машинах существенным источником потерь энергии являются опорные узлы. Энергия вращения в них расходуется на преодоление сил трения. В случае с подшипниками жидкостного трения, одним из инновационных способов снижения потерь на трение в опорных узлах является применение активных опор. Исследования показывают возможность снижения коэффициента трения при использовании активных гибридных подшипников по сравнению с традиционными пассивными гидростатодинамическими подшипниками [1].

Потери на трение в подшипниках с жидкостной смазкой обусловлены действием вязкостных сил. Неидеально сбалансированный ротор в процессе работы совершает колебания в подшипнике скольжения, что сопряжено с перемешиванием слоев смазочного материала. Повышение амплитуды колебаний ротора приводит к интенсификации этого процесса, и, как следствие, к повышению расхода энергии на такие перемещения, а также к снижению КПД узла. Следовательно, снижение амплитуды колебаний ротора в подшипнике приведет также к снижению потерь энергии. Активное подавление колебаний ротора как раз и является ключевой задачей системы управления активных гибридных подшипников [2]. Получая от сенсоров перемещения информацию о текущем положении цапфы ротора в подшипнике, регулятор на основе ПИД или иного закона регулирования формирует управляющие сигналы для сервоклапанов, устанавливающих давление в раздельных питающих камерах подшипника. Создаваемое таким образом силовое воздействие стремится сместить ротор к заданной точке, которая обычно выбирается вблизи геометрического центра замкнутой траектории ротора, и приблизительно соответствует гипотетической точке расположения центра идеально сбалансированного ротора в подшипнике.

Вместе с тем, на эффективность процесса регулирования, которая оценивается степенью снижения амплитуды колебаний относительно нерегулируемой роторно-опорной системы, влияет множество факторов. Непосредственное влияние оказывает структура и параметры системы автоматического управления, а именно вид закона регулирования, параметры регулятора, динамические характеристики сервоклапанов и т.д. Однако конструктивные параметры самого гибридного подшипника также влияют на соответствующие процессы. В данной статье представлен анализ влияния основных соотношений конструктивных параметров подшипников жидкостного трения на эффективность снижения амплитуд колебаний в системе ротор – активный гибридный подшипник. Анализ проводится на основе результатов работы имитационной модели такой роторно-опорной системы. Работа подшипника моделируется на основе совместного решения уравнений гидродинамики для расчета реакций смазочного слоя и уравнений механики для определения перемещений ротора. Особенности такой модели, а также ее верификация, показаны в [3].

Одним из ключевых соотношений, определяемых при проектировании подшипника скольжения, является соотношение его длины *L* к диаметру *D* [4]. В большинстве источников рекомендуемое для традиционных пассивных подшипников соотношение этих параметров лежит в диапазоне 0.5..1.5 [5]. Моделирование было проведено для расширенного диапазона соотношений *L/D* 0.3..1.9 с шагом в 0.1. При этом варьировалось значение длины подшипника при постоянном его диаметре. Расчеты проводились также для различных значений коэффициента усиления П-регулятора. Полученные результаты показаны на рисунке 1.



***Рисунок 1 – Влияние соотношения L/D на снижение амплитуды колебаний***

Как видно из полученных результатов, соотношение *L/D* практически не оказывает влияния на установившуюся в системе амплитуду колебаний ротора при заданном коэффициенте усиления П-регулятора. Это дает основания в ходе проектирования активных гибридных подшипников выбирать соотношение *L/D* исходя из прочих требований к разрабатываемой системе без риска снижения эффективности работы системы управления.

Другим соотношением, оказывающим принципиальное влияние на свойства опорного узла, является соотношение зазора в подшипнике *h0* к его диаметру *D* [6]. В общем случае, для повышения несущей способность подшипника жидкостного трения стремятся уменьшить это соотношение [7], что может также оказывать влияние и на величину создаваемых системой управления регулирующих воздействий. Для исследования такой зависимости также моделировалась работа системы с различными величинами зазора *h0* при постоянном диаметре *D*. Диапазон оцениваемых соотношений *h0*/*D* составил (1..5)·10-3. В качестве дополнительного оцениваемого параметра использовалась эксцентричность точки уставки системы управления ввиду нелинейных свойств смазочного слоя подшипника. Результаты расчетов представлены на рисунке 2.



***Рисунок 2 – Влияние соотношения h0/D на снижение амплитуды колебаний***

Полученные результаты показывают увеличение эффективности процесса управления с уменьшением соотношения *h0/D*, то есть при прочих равных условиях меньшее значение начального зазора в подшипнике позволит добиться большего эффекта в снижении потерь энергии на трение при применении активных гибридных подшипников. Расположение же точки уставки в подшипнике практически не оказывает влияния на рассматриваемый процесс, лишь незначительно снижая эффективность управления при увеличении эксцентричности ротора. Следовательно, в процессе работы роторной системы с активными гибридными опорами точка уставки может задаваться в широком диапазоне эксцентриситетов без качественных изменений в работе активной опоры. Также следует отметить, что скорость изменения эффективности управления в зависимости от соотношения *h0/D* не постоянна и возрастает в области малых его значений, что обусловлено нелинейным характером реакций смазочного слоя подшипника. Таким образом, оправданным представляется повышение точности изготовления элементов роторно-опорных систем с целью уменьшения величины относительного начального зазора.

Полученные результаты способствуют ускорению внедрения технологий активных подшипниковых узлов в машины вращательного движения и могут быть непосредственно применены в ходе проектирования соответствующих устройств. Также необходимо отметить общность принципов расчета и проектирования активных и пассивных гибридных подшипников, позволяющих обеспечивать наилучший эффект от их применения. Ввиду того, что существенные отличия между таковыми имеются преимущественно в обеспечивающем оборудовании, а именно в линиях подачи смазочного материала, активные гибридные подшипники можно рассматривать как перспективное средство повышения энергетической эффективности машин вращательного движения.

***Работа подготовлена в рамках выполнения проекта РНФ №16-19-00186. Планирование оптимальных по расходу энергии траектории движения роторов мехатронных модулей в средах сложной реологии» Авторы выражают благодарность фонду за оказанную поддержку.***

Список литературы

1. Бабин, А.Ю. Повышение энергетических характеристик роторных машин путем применения подшипниковых узлов с активным управлением [Текст] / А.Ю. Бабин, Л.А. Савин, Д.В. Шутин // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: материалы XII международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 266-271.

2. Polyakov, R.N. Peculiarities of reactions control for rotor positioning in an active journal hybrid bearing [Text] / R.N. Polyakov, D.V. Shutin, L.A. Savin, A.Y. Babin // International Journal of Mechanics. – 2016. – №10. – C.62-67.

3. Шутин, Д.В. Верификация математической модели активного радиального гидростатодинамического подшипника [Текст] / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №3 (11). – С. 27-35.

4. Чернавский, С.А. Подшипники скольжения [Текст] / С.А. Чернавский. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. – 1963. – 243 с.

5. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-т.: Т.2. [Текст] / 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И.Н. Жестковой. // М.: Машиностроение. – 2001. – 912 c.

6. Коровчинский, М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения [Текст] / М.В. Коровчинский. // М.: Машгиз. – 1959. – 403 с.

7. Снеговский, Ф.П. Опоры скольжения тяжелых машин [Текст] / Ф.П. Снеговский // М.: Машиностроение. – 1969. – 224 с.

**Шутин Денис Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: rover.ru@gmail.com, тел.: +79192057380

**Казаков Юрий Николаевич**, студент кафедры мехатроники, механики и робототехники ОГУ имени И.С. Тургенева, e-mail: kazakyurii@yandex.ru, тел.: +79200894719

**PARAMETRIC ANALYSIS OF ACTIVE HYBRID BEARINGS AS A MEANS OF REDUCING ENERGY LOSSES FOR FRICTION IN ROTATING MACHINERY**

**Shutin D.V., Kazakov Y.N.**

*Russia, Orel, Orel State University named after I.S. Turgenev*

*The article discusses the features of the use of active hybrid bearings as a means of reducing energy losses due to friction in rotor-bearing systems. The results of modeling the operation of a rotor system with such bearings at various values of their parameters are shown. Conclusions are made about their ratios that provide the best indicators of energy losses due to friction.*

***Keywords:*** *active bearings, rotor-bearing systems, frictional energy losses, vibrations, parametric analysis.*

Bibliography

1. Babin, A.Y. Povyshenie energeticheskih harakteristik rotornyh mashin putem primeneniya podshipnikovyh uzlov s aktivnym upravleniem [Text] / A.Y. Babin, L.A. Savin, D.V. Shutin // Energo- i resursosberezhenie – XXI vek.: materialy XII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – 2016. – S. 266-271.

2. Polyakov, R.N. Peculiarities of reactions control for rotor positioning in an active journal hybrid bearing [Text] / R.N. Polyakov, D.V. Shutin, L.A. Savin, A.Y. Babin // International Journal of Mechanics. – 2016. – №10. – C.62-67.

3. Shutin, D.V. Verifikaciya matematicheskoj modeli aktivnogo radial'nogo gidrostatodinamicheskogo podshipnika [Text] / Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2015. – №3 (11). – S. 27-35.

4. Chernavskij, S.A. Podshipniki skol'zheniya [Text] / S.A. Chernavskij. – M.: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noj literatury. – 1963. – 243 s.

5. Anur'ev, V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya: v 3-t.: T.2. [Text] / 8-e izd., pererab. i dop. Pod red. I.N. Zhestkovoj. // M.: Mashinostroenie. – 2001. – 912 c.

6. Korovchinskij, M.V. Teoreticheskie osnovy raboty podshipnikov skol'zheniya [Text] / M.V. Korovchinskij. // M.: Mashgiz. – 1959. – 403 s.

7. Snegovskij, F.P. Opory skol'zheniya tyazhelyh mashin [Text] / F.P. Snegovskij // M.: Mashinostroenie. – 1969. – 224 s.

**Shutin Denis Vladimirovich,** Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics OSU named after I.S. Turgenev, e-mail: rover.ru@gmail.com, tel.: +79192057380

**Kazakov Yurij Nikolaevich**, student of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics OSU named after I.S. Turgenev, e-mail: kazakyurii@yandex.ru, tel.: +79200894719