УДК 62-543.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ОПОР ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ**

***Казаков Ю.Н., Корнаев А.В., Савин Л.А., Шутин Д.В.***

*Россия, г. Орел, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ)*

*В работе рассмотрено моделирование роторов как твердотельных моделей. Представлены способы расчета реакций смазочного слоя для подшипников жидкостного трения. Приведено сравнение модели с реальными результатами. Рассмотрено применение классических и интеллектуальных систем управления в активных опорах жидкостного трения.*

*Ключевые слова: управляемые опоры жидкостного трения, конические подшипники жидкостного трения, опоры с многозонной подачей жидкости, моделирование опор жидкостного трения, ПИ-контроллер, классические системы управления, DQN-agent.*

Сегодня все больше стали набирать популярность опоры с активным управлением. Существует несколько наиболее популярных видов таких опор: опоры со встраиваемыми элементами для изменения геометрии зазора в подшипнике, опоры в которых используются активные элементы оказывающие воздействие на ротор для смещения его в подшипнике, опоры в которых регулирование происходит за счет изменения давления подачи и д.р. В качестве систем управления в таких опорах применяют классические системы такие как ПИ, ПД и ПИД регуляторы. Большое количество работ в данной области направлены на их математическое и симуляционное моделирование [1-5].

При моделировании роторных машин как сложных систем из-за сложной структуры и использования систем управления необходимо чтобы модель как можно больше соответствовала реальному объекту. Для этого можно использовать ряд методов и программных комплексов. При моделировании объектов как твердотельных моделей широко распространено использование программного комплекса MATLAB/Simulink. В данном аппарате решается большое количество задач. Также он может использоваться при моделировании роторных систем.

Для моделирования объектов в среде Simulink используют 3D модели объектов, разработанные в различных комплексах, что позволяет воспроизвести геометрию и распределение массы реального объекта. После 3D модель загружается в среду, где на ее звенья накладываются связи при необходимости [6]. Моделирование роторных систем таким способом показывает достаточно хорошие результаты. Существует несколько подходов к способу задания реакций смазочного слоя. Первый заключается в поиске точки равновесия ротора и определения коэффициентов жесткости и демпфирования. Второй способ заключает в аппроксимации сил реакций смазочного слоя искусственными нейронными сетями, что значительно увеличивает скорость работы модели, но может приводить к появлению погрешности, если модель будет работать за пределами обучения [7].

Использование первого способа показало хорошие результаты при моделировании опоры с многозонной подачей жидкости. Такая концепция позволяет получать результаты качественно схожие с реальными, что подтверждается экспериментами [8]. В связи с этим появляется такая возможность как разработка и тестирование систем управления на моделях перед их использованием на реальных объектах. Это значительно сказывается при использовании систем управления основанных на методах глубокого обучения. В работе [9] представлена модель ротора с многозонной подачей жидкости (рисунок 1). В качестве контроллера выступает DQN-agent. Задачей контроллера являлось минимизировать амплитуды колебаний ротора при переходе через критические частоты.

На вход агенту подаются 3 параметра: параметры наблюдения, награда, прерывание. В качестве параметров наблюдения были выбраны значения координат центра ротора в подшипнике X1 и X2, скоростей колебаний V1 и V2, а также значение вращающего момента необходимого на вращение вала двигателя с заданной скоростью.



***Рисунок 1 – Модель управляемого ротора***

В результате обучения системы агент научился генерировать управляющие воздействия для уменьшения пикового значения колебаний, а также избегал попадание в резонансные частоты. Графические результаты представлены на рисунке 2.



***Рисунок 2 – Колебания центра ротора в зависимости от комбинации смазочного материала***

Использование искусственных нейронных сетей для аппроксимации смазочного слоя позволяет моделировать конические опоры с учетом возможных колебаний и смещений в осевом направлении. Использование данного эффекта в реальных роторных машинах позволяет изменять характер колебаний ротора, а также регулировать показания момента трения в опоре.

В работе рассматривается коническая опора с изменяемой геометрией (рисунок 1). Опора состоит из конической втулки и вала с конусом. В таких подшипниках имеется возможность изменять величину зазора смазочного слоя за счет осевого смещения вала относительно неподвижной втулки. Для моделирования подшипникового узла с изменяемой величиной смазочного слоя была разработана твердотельная 3D модель вала и подшипника. После чего она была сконвертирована в среду моделирования Simulink [6]. Модель состоит из муфты, которая передает вращающий момент на вал массой 1 кг, скорость вращения равна 3000 об/мин. Вал может перемещаться в муфте в осевом направлении. Справа вал размещен в конической опоре жидкостного трения, в которой вращается под действием сил реакции смазочного слоя, дисбаланса, собственного веса. Для управления были реализованы контроллеры на основе ПИ-регуляторов.

Базовый контроллер реализован в форме дискретного ПИ-контроллера, выходной, сигнал которого изменяется по закону:

$u\_{PI}\left(z\right)=P+IT\_{S}\frac{1}{z-1},$ (1)

где P, I – пропорциональный и интегральный коэффициенты, $T\_{S}$ – время сэмплирования сигнала.

Основу адаптивного ПИ-регулятора составляет тот же базовый ПИ-контроллер, описанный выражением (1), с дополнительными ограничениями по уровню выходного сигнала в виде насыщения:

$u\_{API}\left(s\right)=\left\{\begin{array}{c}P+I\frac{1}{s} if L\_{min}<u\_{API}<L\_{max} ;\\L\_{max} if u\_{API}\geq L\_{max} ;\\L\_{min} if u\_{API}\leq L\_{min},\end{array}\right.$ (2)

Для оценки работы систем управления был проведен ряд симуляционных экспериментов. Основной задачей регуляторов было справиться с возникновением осевой силы и вследствие чего увеличением момента трения.



***Рисунок 3 - Значение момента трения в соответствие с управляющим воздействием контроллеров***

На рисунке 3 представлены результаты моделирования. Графики изменения момента в соответствие с управляющим воздействием регуляторов показывают что адаптивный ПИ-регулятор значительно лучше справляется с поставленной задачей. Однако на графике управляющего сигнала адаптивного ПИ-регулятора видны колебания управляющего сигнала из-за плавающей границы. Данный эффект может быть решен за счет увеличения частоты управляющего воздействия. Что касательно ПИ-регулятора то регулирование осуществляется только в первой половине до достижения максимума.

***Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации № МД -129.2020.8. Авторы с благодарностью признают эту поддержку.***

Список литературы

1. D. C. De Moraes and R. Nicoletti Hydrodynamic bearing with electromagnetic actuators: Rotor vibration control and limitations/ D. C. De Moraes and R. Nicoletti // Proc. ISMA 2010 - Int. Conf. Noise Vib. Eng. Incl. USD 2010, pp. 3715–3721

2. D. S. Alves, M. F. Wu, and K. L. Cavalca Application of gain-scheduled vibration control to nonlinear journal-bearing supported rotor/ D. S. Alves, M. F. Wu, and K. L. Cavalca // J. Sound Vib.-2019. vol. 442, pp. 714–737, doi: 10.1016/j.jsv.2018.11.027.

3. J. Tůma, J. Šimek, J. Škuta, and J. Los Active vibrations control of journal bearings with the use of piezoactuators/ J. Tůma, J. Šimek, J. Škuta, and J. Los // Mech. Syst. Signal Process.-2013. vol. 36, no. 2, pp. 618–629, doi: 10.1016/j.ymssp.2012.11.010.

4. I. F. Santos and F. Y. Watanabe Compensation of cross-coupling stiffness and increase of direct damping in multirecess journal bearings using active hybrid lubrication: Part i-theory/ I. F. Santos and F. Y. Watanabe // J. Tribol.-2004. vol. 126, no. 1, pp. 146–155, doi: 10.1115/1.1631015.

5. [Ilmar Santos](https://orbit.dtu.dk/en/persons/ilmar-santos), Stefano Morosi Experimental investigations of active air bearings/[Ilmar Santos](https://orbit.dtu.dk/en/persons/ilmar-santos), Stefano Morosi // ASME Turbo Expo 2012 - Copenhagen, Denmark.-2012 pp. 1–10

6. smimport //MathWorks. Help Center [сайт].-URL <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ref/smimport.html> (дата обращения 23.06.2021)

7. A. V. Kornaev, N. V. Kornaev, E. P. Kornaeva, and L. A. Savin Application of Artificial Neural Networks to Calculation of Oil Film Reaction Forces and Dynamics of Rotors on Journal Bearings // Int. J. Rotating Mach., vol. 2017, doi: 10.1155/2017/9196701.

8. Alexey V. Kornaev, Elena P. Kornaeva, Leonid A. Savin, Yuri N. Kazakov, Alexander Fetisov, Alexey Yu. Rodichev, Sergey V. Mayorov Enhanced hydrodynamic lubrication of lightly loaded fluid-film bearings due to the viscosity wedge effect // Tribology International. 2021. №160. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107027

9. А.В. Корнаев, Е.П. Корнаева, Ю.Н. Казаков, А.Ю. Бабин Управление температурно-вязкостным клином в подшипнике жидкостного трения на основе алгоритма глубокого обучения с подкреплением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. №1

**Казаков Юрий Николаевич**, студент магистр ОГУ им И.С. Тургенева, 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29. Е-mail: KazakYurii@yandex.ru.

**Корнаев Алексей Валерьевич,** д.т.н, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники (ОГУ им. И.С. Тургенева), 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29. Е-mail: rusakor@inbox.ru.

**Шутин Денис Владимирович,** к.т.н, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники (ОГУ им. И.С. Тургенева), 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29. Е-mail: rover.ru@gmail.com.

**Савин Леонид Алексеевич,** д.т.н., профессор, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники (ОГУ им. И.С. Тургенева), 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29. Е-mail: savin3257@gmail.com.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

UDC 62-543.3

**MODELING OF ACTIVE LIQUID FRICTION SUPPORTS**

***Kazakov Yu. N., Kornaev A.V., Shutin D.V., Savin L.A.***

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

*The paper considers the modeling of rotors as solid-state models. Methods for calculating the reactions of the lubricating layer for liquid friction bearings are presented. The model is compared with real results. The application of classical and intelligent control systems in active liquid friction supports is considered.*

*Key words: controlled liquid friction bearings, liquid friction tapered bearings, supports with multi-zone fluid supply, modeling of liquid friction supports, PI controller, classical control systems, DQN-agent.*

Bibliography

1. D. C. De Moraes and R. Nicoletti Hydrodynamic bearing with electromagnetic actuators: Rotor vibration control and limitations/ D. C. De Moraes and R. Nicoletti // Proc. ISMA 2010 - Int. Conf. Noise Vib. Eng. Incl. USD 2010, pp. 3715–3721

2. D. S. Alves, M. F. Wu, and K. L. Cavalca Application of gain-scheduled vibration control to nonlinear journal-bearing supported rotor/ D. S. Alves, M. F. Wu, and K. L. Cavalca // J. Sound Vib.-2019. vol. 442, pp. 714–737, doi: 10.1016/j.jsv.2018.11.027.

3. J. Tůma, J. Šimek, J. Škuta, and J. Los Active vibrations control of journal bearings with the use of piezoactuators/ J. Tůma, J. Šimek, J. Škuta, and J. Los // Mech. Syst. Signal Process.-2013. vol. 36, no. 2, pp. 618–629, doi: 10.1016/j.ymssp.2012.11.010.

4. I. F. Santos and F. Y. Watanabe Compensation of cross-coupling stiffness and increase of direct damping in multirecess journal bearings using active hybrid lubrication: Part i-theory/ I. F. Santos and F. Y. Watanabe // J. Tribol.-2004. vol. 126, no. 1, pp. 146–155, doi: 10.1115/1.1631015.

5. [Ilmar Santos](https://orbit.dtu.dk/en/persons/ilmar-santos), Stefano Morosi Experimental investigations of active air bearings/[Ilmar Santos](https://orbit.dtu.dk/en/persons/ilmar-santos), Stefano Morosi // ASME Turbo Expo 2012 - Copenhagen, Denmark.-2012 pp. 1–10

6. smimport //MathWorks. Help Center [сайт].-URL <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/ref/smimport.html> (дата обращения 23.06.2021)

7. A. V. Kornaev, N. V. Kornaev, E. P. Kornaeva, and L. A. Savin Application of Artificial Neural Networks to Calculation of Oil Film Reaction Forces and Dynamics of Rotors on Journal Bearings // Int. J. Rotating Mach., vol. 2017, doi: 10.1155/2017/9196701.

8. Alexey V. Kornaev, Elena P. Kornaeva, Leonid A. Savin, Yuri N. Kazakov, Alexander Fetisov, Alexey Yu. Rodichev, Sergey V. Mayorov Enhanced hydrodynamic lubrication of lightly loaded fluid-film bearings due to the viscosity wedge effect // Tribology International. 2021. №160. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107027

9. A.V. Kornaev, E.P. Kornaeva, Yu. N. Kazakov, A.Yu. Babin Temperature-viscosity wedge control In a fluid friction bearing based On a deep reinforcement learning algorithm // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2021. №1

**Kazakov Yuri Nikolaevich**, Student, 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29. Е-mail: KazakYurii@yandex.ru.

**Kornaev Alexey Valerievich**, Doctor of Sciences in Technology, Professor at the Department of Mechatronics, Mechanics, and Robotics, 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29. Е-mail: rusakor@inbox.ru.

**Shutin Denis Vladimirovich**, Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel Docent of Department of mechatronics, mechanics and robotics, 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29. Е-mail: rover.ru@gmail.com.

**Savin Leonid Alexeevich**, Doctor of sciences, professor, professor at the department of mechatronics, mechanics and robotics, 302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29. Е-mail: savin3257@gmail.com.