



УДК 533.6.011

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА СТРУЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОСТАТИЧЕСКИМ ПОДШИПНИКОМ

Т.Е. Ильина^а, Н.В. Продан^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Tamara-190@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 29.04.15, принята к печати 15.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-921-929

Ссылка для цитирования: Ильина Т.Е., Продан Н.В. Проектирование элемента струйной системы управления газостатическим подшипником // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 921–929.

Аннотация

Предмет исследования. Рассматривается концепция применения струйных систем управления, известных также как пневмоника, в управлении положением вала в газостатических подшипниках. Струйные системы имеют преимущества в тех задачах, где не хватает быстродействия традиционных механических, электрических или гидравлических сервоприводов. Типичным представителем такого класса задач является управление положением вала в газовых подшипниках с принудительной подачей газа в зазор между валом и подшипником. Управление в данном случае подразумевает изменение давления или расхода газа, подаваемого в зазор по одной из минимум трех осей, с частотой, превышающей номинальную частоту вращения вала. Таким образом, от системы требуется высокое быстродействие. Задачей настоящей работы является проектирование дискретного струйного элемента, обработка его геометрии и характеристики переключения. **Основные результаты.** Спроектирован дискретный струйный элемент для безмасляной бесконтактной трансмиссии, работающей на хладагенте, достигнуто время переключения 0,2–0,3 мс, что на порядок меньше требований авиационных систем управления, которые обычно работают с частотой порядка 200 Гц. Показано, что при подаче управляющего сигнала с недостаточным уровнем давления возникают периодические колебания с высокой частотой, следовательно, отдельной задачей проектирования является определение минимального допустимого давления в управляющем канале.

Ключевые слова

струйный элемент, система автоматического управления, управляющий сигнал, теория Коанда, численное моделирование.

ELEMENT DESIGN FOR AN INKJET SYSTEM OF HYDROSTATIC GAS BEARING CONTROL

Т.Е. Ил'ина^а, N.V. Prodan^а^а ITMO University, Saint Petersburg 197101, Russian Federation

Corresponding author: Tamara-190@yandex.ru

Article info

Received 29.04.15, accepted 15.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-921-929

Article in Russian

For citation: Ил'ина Т.Е., Prodan N.V. Element design for an inkjet system of hydrostatic gas bearing control. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 921–929.

Abstract

Subject of Study. The paper discusses the concept of inkjet systems application, also known as pneumonics, for automatic hydrostatic gas bearing control. Inkjet systems have the advantages over traditional control systems in those problems where the speed of traditional mechanical, electrical or hydraulic servomotors is not enough. Control of the shaft position in gas bearing with forced gas supply into the gap between the shaft and the bearing is typical for this class of problems. In this case, control means the pressure changing or flow rate of gas supplied to the gap by at least one of three axes at a frequency higher than the nominal speed of the shaft. Thus, high speed of response is required from the system. The objective of this work is to design a discrete jet element, testing of its geometry and switching characteristics. **Main Results.** The discrete inkjet element for oil-free non-contact transmission working on the refrigerant was designed. Relay transition process was modeled in the inkjet element with the use of numerical methods. The switching time has reached 0.2-0.3 ms; this is one order less than the requirements of aircraft control systems, which typically operate at a frequency of about 200 Hz. It is shown that periodic oscillations with high frequency occur when the control signal is injected with insufficient level of pressure. Therefore, a separate design task is to determine the minimum pressure allowable in the control channel.

Keywords

inkjet element, automatic control system, control signal, Coanda theory, numerical simulation.

Введение

Рассматривается задача проектирования дискретного струйного элемента для системы автоматического управления положением вала в газостатическом подшипнике, работающем на хладагенте. Отрабатывается методика численного моделирования подобных устройств. Исследуется передаточная характеристика элемента, время его переключения между дискретными положениями, поведение элемента при различных уровнях управляющего сигнала.

Газовые подшипники. В последние несколько десятилетий в ряде стран мира активно разрабатываются подшипники на газовой смазке [1]. История разработки теории газовых подшипников приведена в работе [2]. Такие подшипники не требуют масляной смазки, т.е. исключают связанные с этим проблемы пожароопасности и необходимость иметь отдельную масляную систему. Это делает привлекательным их использование в малогабаритных летательных аппаратах [3]. Кроме того, бесконтактные подшипники характеризуются очень низким трением в системе [4], что определяет перспективность их применения в турбохолодильных, детандерных и газотурбинных системах [5]. Начиная с 70-х годов XX века благодаря работам таких исследователей, как В.Н. Дроздович, В.П. Жедь, Н.Д. Заблоцкий, В.Н. Константиnescу, Л.Г. Лойцанский, А.А. Лохматов, С.В. Пинегин, Л.Г. Степанянц, С.А. Штейберг и др. была не только разработана теория газовых подшипников, но и созданы конкретные конструкции для применения в гироскопах, станках, турбохолодильных аппаратах, насосах и т.п. [6].

Виды газовых подшипников. Газовые подшипники делятся на газостатические (ГСП), газодинамические (ГДП) и гибридные [7]. ГСП и гибридные подшипники используют принудительную подачу рабочего тела под избыточным давлением в зазор между корпусом подшипника и валом ротора. Они нуждаются в оснащении системой управления (СУ) положением вала, которая должна регулировать давление и расход рабочего тела в зависимости от скорости вращения и нагрузки на вал. Активные работы в данном направлении ведутся в Центральном институте авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ), где созданы ГСП, в том числе, с системой управления положением вала [8, 9].

Сегментные газовые подшипники. Различают сегментные и полноохватные подшипники. Сегментные подшипники более стойки к таким нежелательным явлениям, как возникновение сложных колебаний ротора, известных как полускоростной вихрь, а также пульсаций давления между сегментом и поверхностью вала, получивших название «пневмомолоток» [10, 11]. Последний тип колебаний похож на явление, известное под названием «колебания донного давления» [12]. Считается, что если с помощью специальной методики [13] правильно подобрать ось вращения сегмента, то сегмент будет самостоятельно поворачиваться на заданный угол атаки в зависимости от частоты вращения и нагрузки на вал и устойчиво сохранять это положение [14], парируя колебания. Для эффективного демпфирования вибраций необходимо оптимизировать форму опорной поверхности сегмента [15]. Выполненный в ЦИАМ анализ [16] показывает, что СУ положением вала газового подшипника, основанная на концепции пневмоники, может иметь преимущества перед традиционной электромеханической.

Струйные системы управления (пневмоника). В настоящее время струйные системы управления (ССУ) широко используются в современных газотурбинных двигателях¹, например, в двигателе Д-18 самолета Ан-124 «Руслан». Активное применение они находят также в мехатронных узлах² [17]. Исследования в области струйных систем в настоящее время продолжает Омское моторостроительное конструкторское бюро (Омск).

Первые упоминания о пневмонике относятся к началу 60-х годов XX века. В классическом фундаментальном труде Рехтена [18] рассмотрены принципы проектирования ССУ, классификация элементов струйной техники. Полуэмпирические и эмпирико-статистические методы расчета элементов пневмоавтоматики рассмотрены в монографии [19]. Все известные сведения о фундаментальных основах пневмоники обобщены в классических работах [20, 21]. Теория и практика проектирования ССУ была достаточно хорошо развита в 70-е годы. К сожалению, в настоящее время компетенция в данной предметной области практически полностью утрачена, рабочие полуэмпирические методики проектирования отсутствуют. В то же время существует практическая потребность в решении конкретных задач проектирования ССУ, поэтому активно развивается новый подход, основанный на численных методах [22].

Проектирование струйной системы управления

Задачи системы управления. Рассмотрим сегментный гибридный подшипник, сегменты которого могут поворачиваться относительно оси вращения под воздействием аэродинамических сил (рис. 1), кроме того, ось вращения сегмента закрепляется на плоской пружине, допускающей радиальное смещение сегмента относительно вала. Пружина видна в верхней части рис. 1, б. Перемещения вала вызывают изменение зазора между сегментами и его поверхностью, в результате изменяется распределение давления, и равнодействующие F_i силы давления, приложенные к оси вращения сегмента, будут отличаться. В

¹ <http://avia.pro/blog/sistemy-upravleniya-na-elementah-struynoy-tehniki-gtd>.

² <http://www.uppo.ru/production/nefteprod/pnevmo>

каждый сегмент под заданным давлением подается рабочее тело, например, воздух или хладагент, которое через систему отверстий и сопел подводится в зазор между валом и сегментом. Давление и расход подачи рабочего тела регулируется СУ, что позволяет вывешивать вал при нулевой скорости вращения, парировать ударные нагрузки, регулировать несущую способность и жесткость смазочного слоя, парировать колебания и перегрузки. Эта система, в частности, может управляться струйными элементами. Если сделать СУ двухканальной, то возможно управление положением вала в двух перпендикулярных плоскостях. Действительно, смещение в направлении строго между двумя сегментами вызывает уменьшение зазора для одного сегмента и увеличение для противоположного. В остальных случаях зазоры изменяются у всех четырех сегментов.

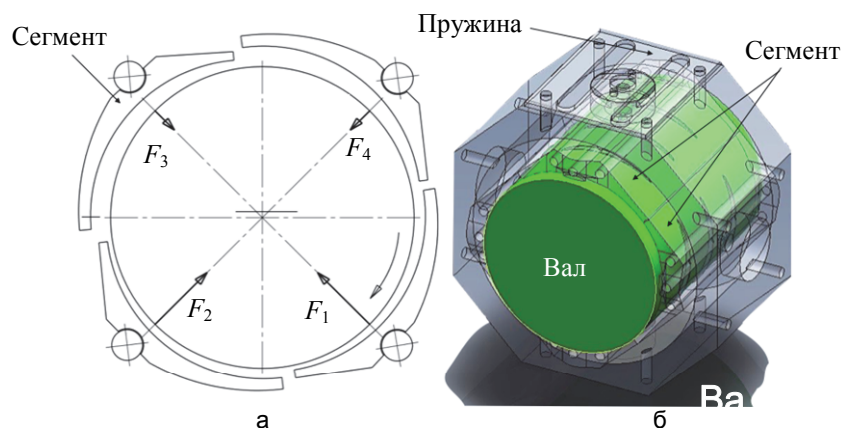


Рис. 1. Схема сегментного подшипника, сегменты которого (а) могут поворачиваться вокруг своих осей на некоторый угол относительно поверхности вала (б). F_i – равнодействующая сил давления, приложенная к оси вращения сегмента

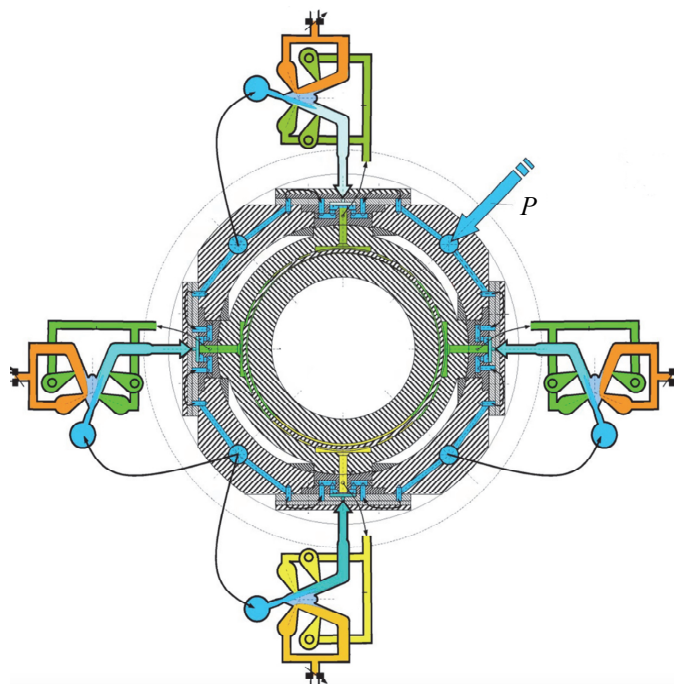


Рис. 2. Четырехканальная струйная система управления с дискретными регуляторами с независимым каналом управления для каждого сегмента. P – давление питания газостатических подшипников

Виды струйных элементов. Все струйные элементы ССУ можно разделить на активные и пассивные. К пассивным элементам струйных систем относятся различного рода сопротивления (сопла, дроссели, капилляры), фильтры, объемы, резонаторы и т.д.

Активные элементы отвечают за реакцию системы на некоторый управляющий сигнал. По аналогии с электроникой активные элементы могут быть разделены на аналоговые (пропорциональные), а также дискретные.

Пропорциональные аналоговые элементы усиливают входящий управляющий сигнал, т.е. непрерывному изменению входного сигнала соответствует непрерывное изменение выходного сигнала.

Аналоговым системам свойственно ограниченное быстродействие, так как управляющее воздействие выдается только при накоплении достаточной разности сигналов. В результате, например, колебания такая система просто не замечает, так как разность управляющих сигналов усредняется по времени и в среднем оказывается равной нулю.

Дискретный струйный элемент. Для того чтобы иметь возможность парировать ударные нагрузки и сравнительно высокочастотные колебания, необходимо применять дискретные струйные элементы. В дискретном струйном элементе выходной сигнал может принимать два или больше заранее известных значения. При поступлении управляющего сигнала переключение должно происходить практически мгновенно, поэтому дискретная ССУ непрерывно подает управляющие сигналы на исполнительные элементы каждого из сегментов.

На рис. 2 изображен случай, когда вал смещен вниз. При этом у левого и правого регуляторов датчики зазора в каналах измерения зазоров выдают одинаковое давление (показано зеленым цветом). Положение струи в струйных элементах симметричное, струя оказывает одинаковое давление на заслонку и в левом, и в правом исполнительном элементе. У нижнего струйного элемента в канале измерения давление выше среднего (желтый цвет), у верхнего – ниже среднего (темно-зеленый цвет). Струи прилипают к разным стенкам. В результате в верхнем регуляторе в канале управляющего воздействия давление стабилизируется в окружающей среде, а в нижнем регуляторе оно увеличивается, что приводит к смещению вала вверх.

Проектирование струйного элемента

Постановка задачи. Время срабатывания дискретного струйного элемента обеспечивало работу ССУ с заданной частотой управляющих сигналов (как правило, порядка 200 Гц). Ставится задача получить для заданного дискретного струйного элемента характеристику переключения при подаче на вход управляющего воздействия, определить необходимое для эффективного переключения давление в управляющей струе, а также типичное время переключения. Задача решается прямым методом, т.е. сначала задается геометрия, затем она рассчитывается численным методом. По характеристикам течения определяется, удовлетворены ли требования к элементу. При необходимости геометрия корректируется и расчет повторяется.

Методика численного расчета. Методика заключается в выборе модели геометрической расчетной области, модели турбулентности, метода дискретизации сетки, а также типа разностной сетки. Для отработки методики использован струйный элемент, геометрия и характеристики переключения которого известны из литературы [18].

На нем были опробованы разные модели турбулентности, разностные сетки. Результаты численного моделирования оказались ближе всего к известным характеристикам при использовании нерегулярной разностной сетки с 3 млн ячеек со сгущением сетки к границам элемента, решении полных уравнений Навье–Стокса в нестационарной постановке и применении *realisable k-ε*-модели турбулентности.

Следующим этапом тестирования численного метода являлась проверка того, насколько точно он может воспроизводить количественные характеристики переходных процессов. Для этого была выполнена серия расчетов струйного элемента (рис. 3), работающего на воде.

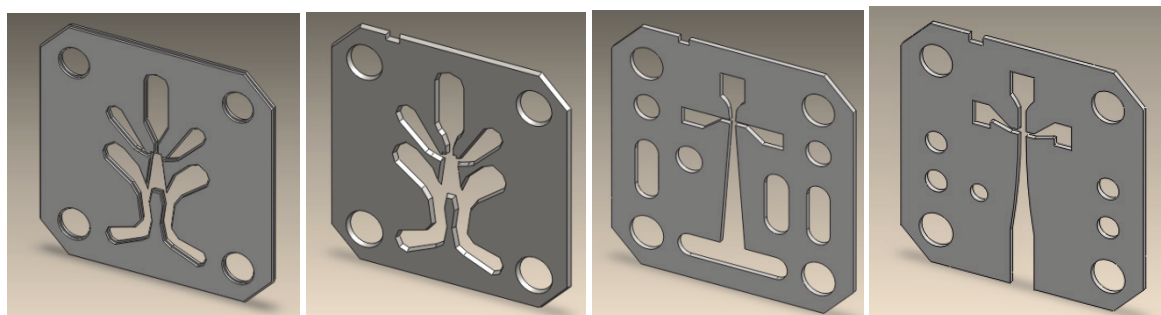


Рис. 3. Набор пластин для формирования платы дискретного струйного элемента, работающего на воде

Сравнивая экспериментальную и расчетную передаточные функции, можно сделать заключение об эффективности расчетной методики и адекватности рекомендаций по проектированию СУ, имеющихся в литературе. На рис. 4 приведено изменение расхода воды Q в одном из выходных каналов ССУ при подаче управляющего сигнала, время срабатывания $t = 0,03$ с, что достаточно для управления ГСП при частоте вращения до 100000 об/мин.

На кинограмме (рис. 5) виден высокий уровень плавности переходного процесса. Таким образом, методика расчета пригодна для проектирования ССУ.

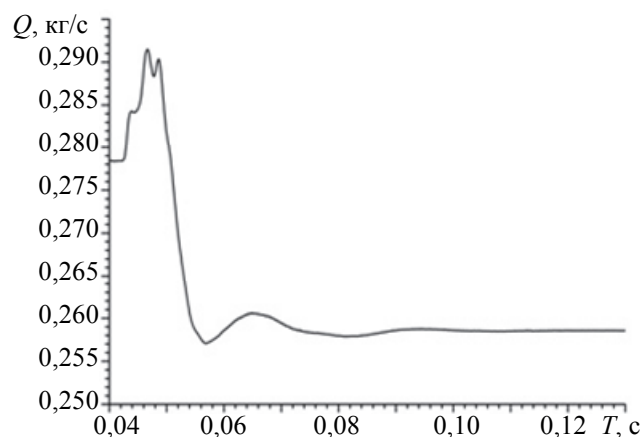


Рис. 4. Переходный процесс в струйном элементе, работающем на воде

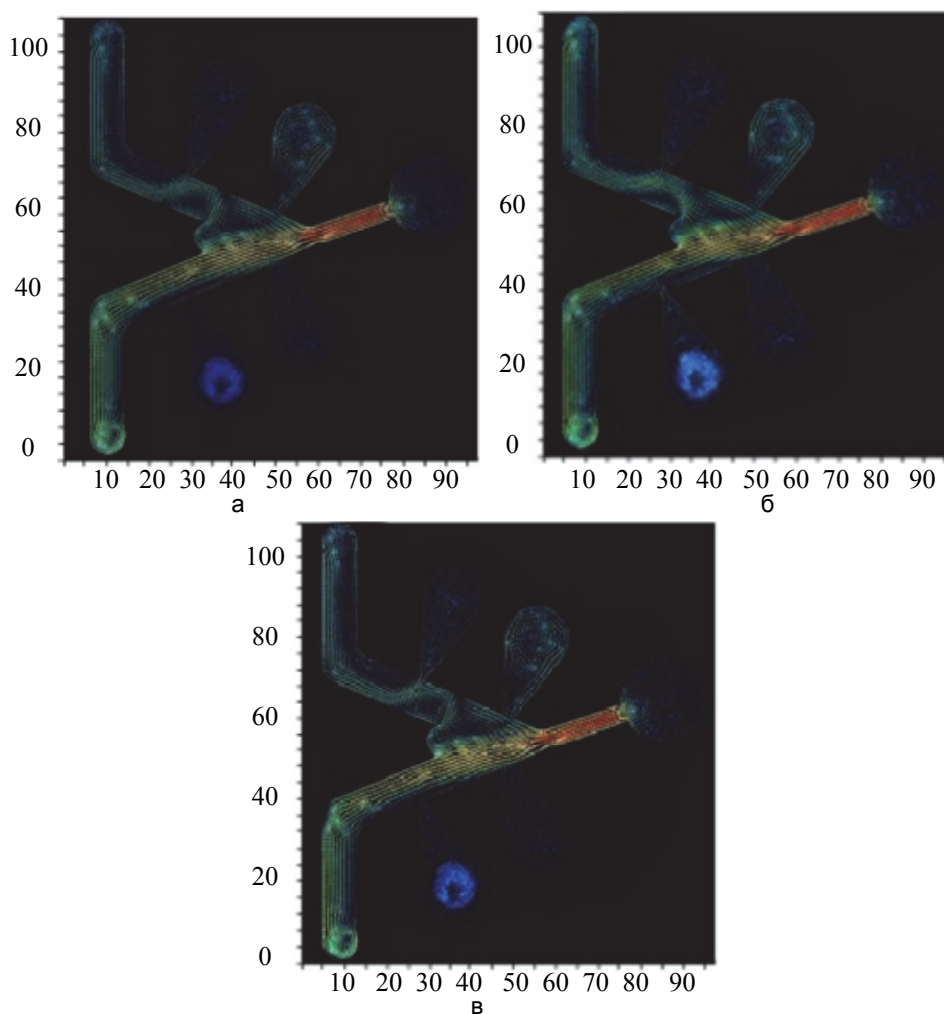


Рис. 5. Кинограмма переходного процесса в струйном элементе, работающем на воде. Векторное поле скорости течения в струйном элементе для времени работы: 0,04 с (а); 0,055 с (б); 0,07 с (в)

Модель струйного элемента состоит из подводящих каналов (питание и управляющие сигналы), камеры смешения и отводящих каналов (вентиляция и выходные сигналы). 3D-модель струйного элемента изображена на рис. 6. Толщина струйного элемента равна 1,5 мм, диаметры управляющих и выходных каналов, а также канала питания равны 3 мм, диаметры вентиляционных каналов равны 4 мм. Между выходными каналами расположена клиновидная каверна, в которой должен образовываться вихрь, стабилизирующий струю в одном из выходных каналов. Определение геометрии каверны является одной из задач проектирования струйного элемента. В используемой расчетной модели высота кана-

лов, на границе которых задавались условия выхода рабочего тела в окружающую среду, была увеличена, чтобы уменьшить влияние граничных условий на течение в самом струйном элементе.

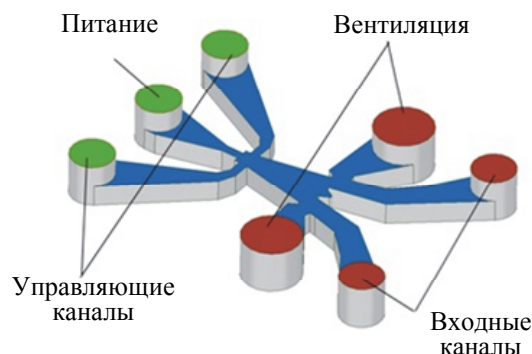


Рис. 6. Трехмерная модель дискретного струйного элемента

Разностная сетка. Для дискретизации расчетной области использовалась неструктурированная сетка на основе тетраэдров, в которой было выполнено сгущение к границам расчетной области.

Граничные условия. При расчете на входе в канал питания задавалось избыточное давление 1 бар и температура 300 К, направление векторов скорости – перпендикулярно границе. Избыточное давление в одном канале полагалось постоянным и равнялось 0,05 бар, а в другом изменялось в диапазоне от 0,05 до 0,15 бар. Таким образом, имитировался управляющий сигнал. На стенках выставлялись условия непротекания, прилипания и теплоизолированности.

Модель турбулентности. На основе выполненного анализа литературы [23] и проведенного тестирования на водном элементе различных моделей турбулентности выбрана realizable k - ϵ -модель турбулентности.

Анализ результатов

Моделирование стационарных положений дискретного струйного элемента. На рис. 7 представлены результаты расчета течения в струйном элементе при одинаковом избыточном давлении в управляющих каналах.

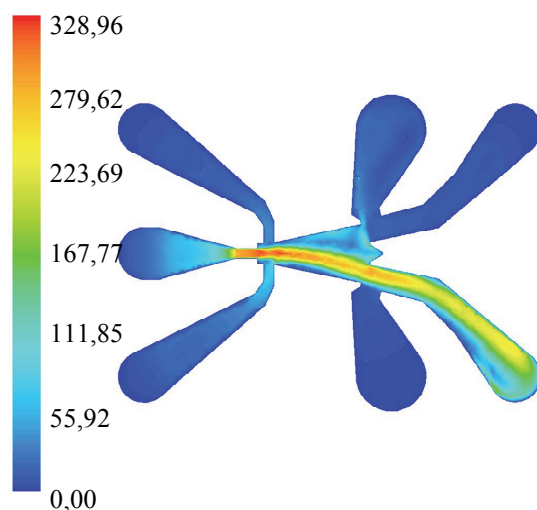


Рис. 7. Результаты моделирования течения в струйном элементе. Поле скоростей. Избыточное давление питания 1 бар, избыточное давление в управляющих сигналах 0,05 бар. На цветовой шкале приведено число Маха \times 1000

Видно, что в полном соответствии с теорией Коанда струя занимает одно из двух возможных устойчивых положений, прилипнув к одной из стенок. То, к какой из стенок прилипает струя, определяется случайными погрешностями в задании начальных условий. На рис. 8 видно, что в районе каверны образуется устойчивый вихрь, который прижимает струю к стенке, т.е. геометрия каверны выбрана верно. Поддача управляющего сигнала со стороны стенки, к которой прилипла струя, вызывает ее «переключение» в противоположное стационарное положение с прилипанием к другой стенке. Таким образом, геометрия удовлетворяет требованиям устойчивости положения струи.

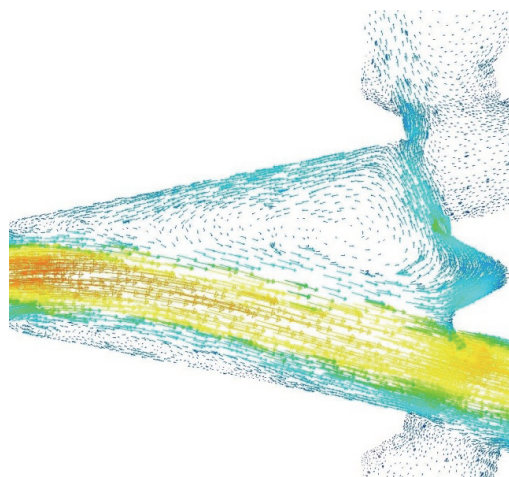


Рис. 8. Результаты моделирования центрального вихря в камере

Необходимое для переключения струйного элемента давление в управляющем канале. В последующих расчетах определялось давление в управляющем канале, достаточное для срабатывания элемента, т.е. переключения струи из одного выходного канала в другой. Для этого в управляющий канал со стороны стенки, к которой прилипла струя (на рис. 7 – это нижний управляющий канал), подавался ступенчатый сигнал с избыточным давлением, которое изменялось в пределах от 0,05 до 0,15 бар. При подаче в нижний управляющий канал сигнала с избыточным давлением 0,1 бар переключение струи не происходит, т.е. давление в управляющем канале недостаточно для переключения струйного элемента. При этом система не возвращается в исходное положение и переходит в нестационарный колебательный режим течения с частотой около 10 кГц.

Такая же картина течения наблюдалась во всех случаях, когда переключение струи не происходило из-за недостаточности уровня управляющего сигнала. Таким образом, недостаточно интенсивный управляющий сигнал переводит струйный элемент в полностью нерабочее состояние. Срабатывание струйного элемента удалось получить только при давлении управляющего сигнала 0,15 бар. Таким образом, при проектировании струйных элементов определять расчетным путем достаточный уровень управляющего сигнала абсолютно необходимо. Для разработанного струйного элемента получено удовлетворительное отношение мощности управляющего сигнала к мощности питания.

Передаточная характеристика и время срабатывания струйного элемента. На рис. 9 изображено изменение расхода на верхнем выходном канале во времени. Получен практически идеальный переходный релейный процесс длительностью чуть больше 1 мс. «Заброс» расхода при переключении струи на 20% превышает расход на установившемся режиме. В то же время длительность этого пика расхода всего 0,3 мс.

Таким образом, расчетом подтверждена релейная характеристика разработанного дискретного струйного элемента. Полученная характеристика переходного процесса по времени срабатывания удовлетворяет требованиям для применения в ССУ газовых подшипников при типичных для газотурбинных и холодильных машин скоростях вращения ротора, т.е. это время обеспечивает работу ССУ с заданной частотой выдачи управляющих сигналов.

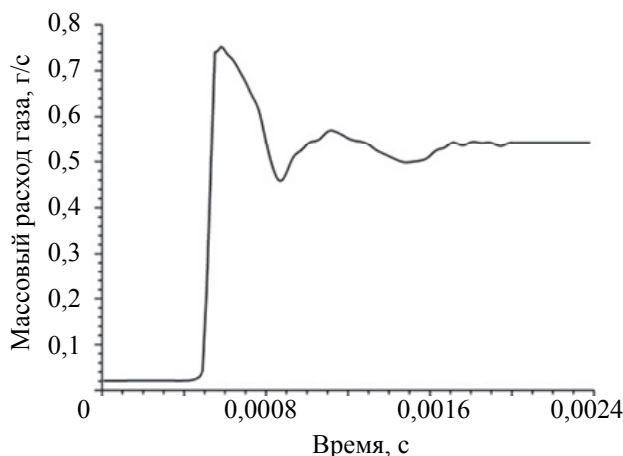


Рис. 9. Изменение расхода воздуха в верхнем выходном канале во времени. Давление питания 1 бар, верхний управляющий сигнал 0,05 бар, нижний 0,15 бар

Заключение

В работе изложен подход к проектированию струйной системы управления гибридным сегментным газостатическим подшипником. Предложена схема проведения вычислительного эксперимента, предназначенного для выбора геометрии струйных элементов и ее доработки по итогам численных расчетов. Определена последовательность отработки элемента: выбор/корректировка геометрии с целью обеспечения максимальной устойчивости положения струи, затем поиск геометрии, обеспечивающей минимальное время переходного процесса переключения элемента, и, в заключение, определение минимального давления управляющего сигнала, достаточного для срабатывания элемента.

В окончательном варианте разработанного струйного элемента переключение сигнала происходит при избыточном давлении в управляющем канале не менее 0,15 бар. Получен практически идеальный переходный релейный процесс длительностью чуть больше 1 мс. Моделирование струйного элемента с одинаковыми значениями управляющих сигналов (до 0,15 бар) показало, что образующийся в области раскатателя центральный вихрь прижимает струю к одной из стенок, и струя занимает одно из двух возможных устойчивых положений. Возмущения на выходе из струйной системы управления мало влияют на его работу, струя надежно удерживается в устойчивом положении прилипания к стенке. При недостаточном давлении в управляющем канале переключение струи не происходит, при этом течение в струйном элементе переходит в нестационарный режим с частотой колебаний около 10 кГц, что приводит к потере струйным элементом работоспособности. Таким образом, показана важность определения минимального давления управляющего сигнала.

Разработанный подход к проектированию струйного элемента может использоваться не только в процессе проектирования струйной системы управления гибридного газостатического подшипника, но и в других задачах, где применение пневмоники является обоснованным.

Литература

1. Гаврилов В.В. Проблемы и технология создания газовых подшипников для перспективных турбомашин безмасляных систем. Аналитический обзор № 415. М.: ЦИАМ, 2004.
2. Bulat M.P., Bulat P.V. The history of the gas bearings theory development // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 27. N 7. P. 893–897. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.27.07.13718
3. Small Aircraft Propulsion: The Future is Here [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nasa.gov/centers/glenn/about/fs01grc.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 19.08.15).
4. Смирнова О.С., Булат П.В., Продан Н.В. Применение управляемых газо- и гидростатических подшипников в турбонасосных агрегатах многофазовых комбинированных ЖРД // Фундаментальные исследования. 2013. № 4–2. С. 335–339.
5. Swanson E.E., Walton J.F., Heshmat H. A test stand for dynamic characterization of oil-free bearings for modern gas turbine engines // Proc. ASME Turbo Expo 2002. Amsterdam, Netherlands, 2002. V. 1. P. 39–48. doi: 10.1115/GT2002-30005
6. Шалобаев Е.В. К вопросу об опорах с газовой смазкой, применяемых в машинах и приборах (обзор литературы) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sites.google.com/site/shalobaev/salobaev-e-v-k-voprosu-ob-oporah-s-gazovoj-smazkoj-primenayemyh-v-masinah-i-priborah>, свободный. Яз. рус (дата обращения 19.08.15)
7. Bulat M.P., Bulat P.V. Basic classification of the gas-lubricated bearing // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 28. N 10. P. 1444–1448. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.28.10.13924
8. Степанов Г.П., Петухов А.А., Белуков А.А. Газостатический радиальный подшипник с регулятором положения вала. Заявка на изобретение 2007118732 от 28.05.2007.
9. Степанов Г.П., Белуков А.А., Петухов А.А., Степанов С.Г. Газостатический упорноосевой подшипник с регулятором положения вала. Патент РФ, №2357122.
10. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть II. Колебания давления в соплах питающей системы на сверхкритическом режиме работы // Вестник международной академии холода. 2013. № 1. С. 57–60.
11. Булат П.В., Усков В.Н. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть I. Постановка задачи // Вестник международной академии холода. 2012. № 3. С. 3–7.
12. Булат П.В., Продан Н.В. О низкочастотных расходных колебаниях донного давления // Фундаментальные исследования. 2013. № 4–3. С. 545–549.
13. Beschastnyh V.N., Bulat P.V. Method of sliding bearings static characteristics calculation // American Journal of Applied Sciences. 2014. V. 11. N 11. P. 1959–1963. doi: 10.3844/ajassp.2014.1959.1963
14. Булат М.П., Продан Н.В. Расчет гибридного трехлепесткового газостатического подшипника // Фундаментальные исследования. 2013. № 4–2. С. 272–275.
15. Продан Н.В., Булат М.П. Оптимизация опорной поверхности газостатического подшипника // Фундаментальные исследования. 2013. № 4–2. С. 316–320.

16. Степанов Г.П., Хромов К.С. Оценка возможности создания быстродействующей струйной системы управления положением вала авиационного ГТД с высокоскоростными подшипниками на газовой смазке. Научно-технический отчет. ЦИАМ №500-3550, 2001.
17. Саяпин В.В., Урываева Е.А. Струйные приводы «КИТЭМА» – экологически чистые системы управления шаровыми кранами газораспределительных станций и магистральных газопроводов // Наука и конструирование. 2009. № 2. С. 27–29.
18. Рехтен А.В. Струйная техника: основы, элементы, схемы. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.
19. Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. Элементы струйной автоматики. М.: Машиностроение, 1973. 360 с.
20. Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. М.: Наука, 1965. 431 с.
21. Залманзон Л.А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1968. 508 с.
22. Гимранов Э.Г., Свистунов А.В. Газодинамика активного канала струйного сверхзвукового усилителя системы управления положением корпуса летательного аппарата // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 1. С. 21–26.
23. Bulat M.P., Bulat P.V. Comparison of turbulence models in the calculation of supersonic separated flows // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 27. N 10. P. 1263–1266. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.27.10.13715.

<i>Ильина Тамара Евгеньевна</i>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская федерация, Tamara-190@yandex.ru
<i>Продан Николай Васильевич</i>	– инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская федерация, kolinti@mail.ru
<i>Tamara E. Il'ina</i>	– postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Tamara-190@yandex.ru
<i>Nikolay V. Prodan</i>	– engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kolinti@mail.ru