

УДК 629.735.33-82

Ш. Р. ГАЛЛЯМОВ, К. А. ШИРОКОВА, В. А. ЦЕЛИЩЕВ, Д. В. ЦЕЛИЩЕВ**ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РУЛЕВОГО ПРИВОДА
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Рассмотрено исследование гидравлического рулевого привода летательного аппарата с нежесткой связью между исполнительным механизмом рулевой машины и присоединенной инерционной нагрузкой. Приведен анализ численных результатов моделирования течения жидкости в проточной части струйной гидравлической рулевой машины и структурный анализ рулевого привода, выполненные в пакетах Cosmos FlowWorks и Ansys. *Рулевой привод; экспериментальные исследования; математическая модель; численное моделирование; струйная гидравлическая рулевая машина*

Современные многочисленные научно-исследовательские и производственные организации как за рубежом, так и в отечественной промышленности ведут исследования, направленные на совершенствование электрогидравлических приводов и устройств, и адаптацию к условиям работы в составе систем управления летательных аппаратов (ЛА) с высокой степенью надежности.

К органам управления вектором тяги двигателя ЛА предъявляются повышенные требования в отношении массовых характеристик конструкции при обеспечении надежности, эффективности и минимальных потерь удельного импульса двигательной установки. Кроме этих основных требований, к системе управления вектором тяги предъявляются и дополнительные требования [5]:

- обеспечение необходимых управляющих усилий на активном участке траектории полета ЛА;
- обеспечение наибольшей эффективности органов управления ЛА во всем диапазоне его рабочих параметров;
- наименьшие потери осевой тяги двигателя при работе органа управления;
- характеристики органа управления должны быть стабильны в течение всего времени работы ЛА.

Отсутствие надежных методов расчета силовых характеристик органов управления вектором тяги, учитывающих особенности изменения полетных условий при отработке программ полета ЛА, выдвигает на пер-

вое место экспериментальные методы определения этих характеристик [2]. Экспериментальные исследования обеспечивают возможность глубокого изучения гидромеханических процессов, создания общей методики расчета и проектирования пневмогидравлических систем, возможность оценки достоверности теоретических исследований. Проведение стендовых испытаний гидравлических приводов (ГП) мелкосерийного производства очень трудоемкая и дорогостоящая операция. Это обуславливает актуальность качественного анализа по результатам обработки и обобщения экспериментальных данных и моделирования гидравлических рулевых приводов в современных математических и конструкторских пакетах.

Рулевой привод со струйной гидравлической рулевой машиной (СГРМ), который используется в настоящее время в ракетных двигателях ЛА, отвечает всем требованиям по скоростным и силовым характеристикам. СГРМ выпускаются и проходят испытания в ФГУП Государственный ракетный центр «КБ имени академика В. П. Макеева». Испытаниям, которые проводились на экспериментальном стенде, подвергались однокаскадные и двухкаскадные СГРМ с различными конструктивными параметрами. На рис. 1 представлена однокаскадная СГРМ РМ1, где 2, 4, 6, 7, 14–17 — уплотнительные кольца, 3, 5 — крышки, 9 — корпус электромеханического преобразователя, 10 — струйная трубка, 11 — приемная плата, 18 — корпус гидроцилиндра,

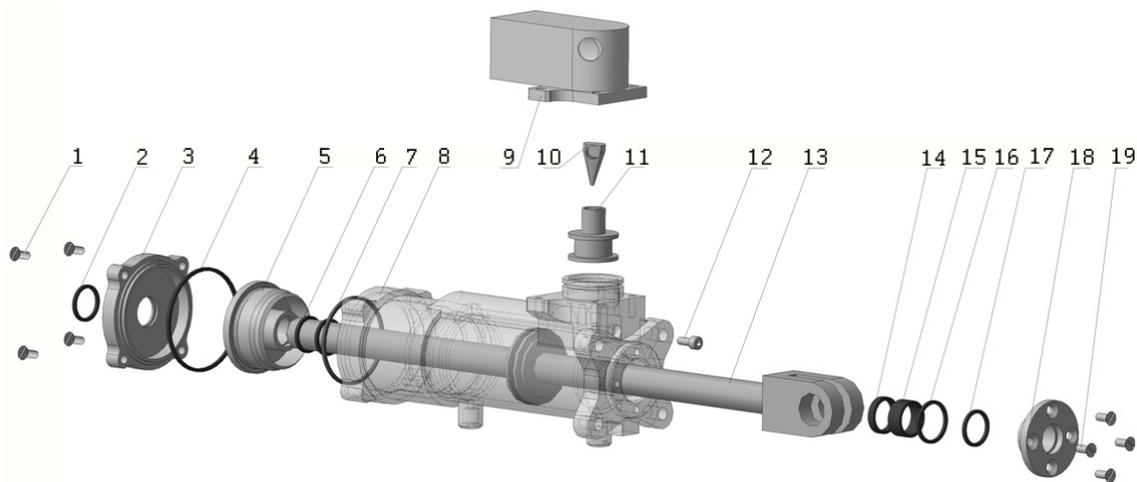


Рис. 1. Однокаскадная СГРМ

1 и 19 — винты. На рис. 2 представлен струйный каскад РМ1 в увеличенном масштабе.

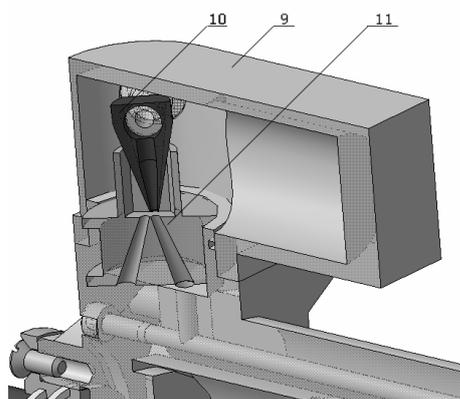


Рис. 2. Струйный каскад СГРМ

Результатом испытаний СГРМ, которые проводились в ФГУП Государственный ракетный центр «КБ имени академика В. П. Макеева», является база экспериментальных данных, которая представляет собой ряд статических и динамических характеристик рулевого привода летательного аппарата.

Современные методы исследования гидравлических и газовых систем позволяют получить определенное представление о сложных характерах физических процессов, протекающих в проточных каналах гидравлических исполнительных механизмов. Один из этих методов — моделирование трехмерных течений газа и жидкости, основанное на решениях уравнений гидродинамики. Программные комплексы COSMOS FlowWorks, Ansys, Star-CD и др. позволяют выполнять моделирование сложных трехмерных течений газа и жидкости в проточных каналах струйного гидравлического усилителя. Моделирование в данных

программных комплексах основано на конечно-объемном методе решения уравнений гидродинамики. Для анализа рабочих процессов в СГР в данной работе используется стандартная математическая модель несжимаемой жидкости, которая входит в состав математической базы программного комплекса.

Модель «Несжимаемая жидкость» описывает течения вязкой жидкости / газа при малых числах Маха ($M < 0,3$) и больших числах Рейнольдса. В модель входят следующие уравнения: уравнения Навье-Стокса, уравнение энергии и уравнение конвективно-диффузионного переноса концентрации примеси.

Статические характеристики СГРМ могут быть охарактеризованы следующими параметрами: давлением и расходом в струйной трубке и на выходе из окон приемной платы. Необходимо учесть, что в серийных приводах СГРМ давление в камере распространения струй оказывается существенным и пренебрегать им нельзя [3, 4]. Экспериментальные статические характеристики, представленные на рис. 3 и рис. 4, свидетельствуют о сложных гидромеханических процессах, протекающих в СГРМ. Так, например, расходно-перепадная характеристика (рис. 3) принимает вид нелинейной зависимости при увеличении перепада давлений в полостях ГЦ, что объясняется влиянием таких явлений, как эжекция рабочей жидкости в струйной камере, влияние обратной струи на струйную трубку, наличие в рабочей жидкости растворенного воздуха и др. [3, 4].

На рис. 5 и рис. 6 представлены расчетная 3D модель и сеточная модель струйного каскада СГРМ, выполненная по закольцованной схеме, для моделирования холостого режима

работы. Расчеты проводились в двух САД пакетах: COSMOS FlowWorks и Ansys.

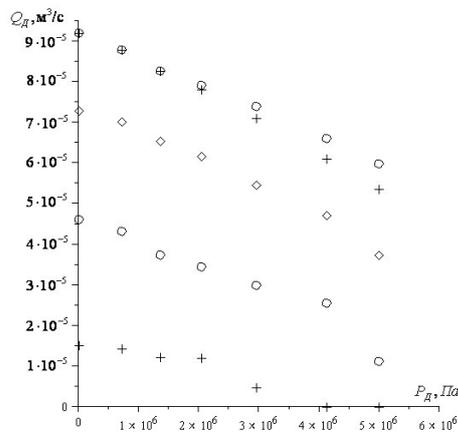


Рис. 3. Расходно-перепадная характеристика СГРМ

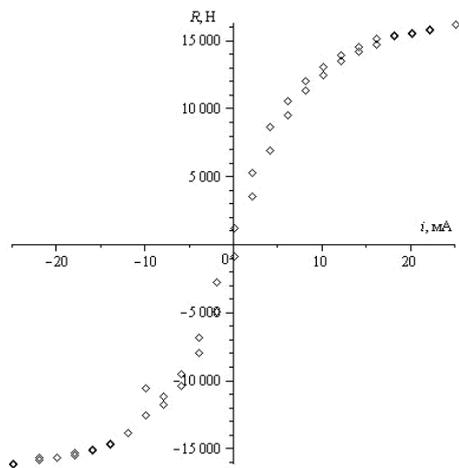


Рис. 4. Силовая характеристика СГРМ

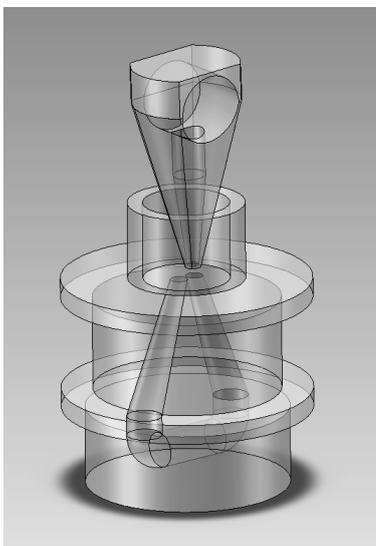


Рис. 5. 3D модель струйного каскада

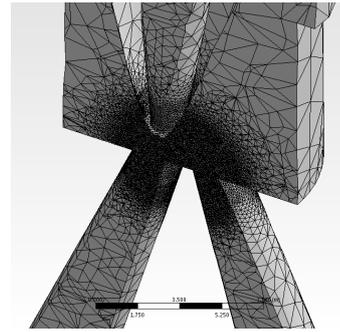


Рис. 6. Расчетная сетка 3D модели, построенная в Ansys CFX

На рис. 7 и рис. 8 изображены картины течения в проточной части РМ12 при нейтральном и максимальном положениях струйной трубки. В зоне I (рис. 7) происходит выход струи из струйной трубки с максимальной скоростью потока рабочей жидкости. Затопленная струя попадает в окна приемной платы, где происходит разворот потока (зона 2), вследствие чего возникает зона III — зона обратных течений при нейтральном положении струйной трубки.

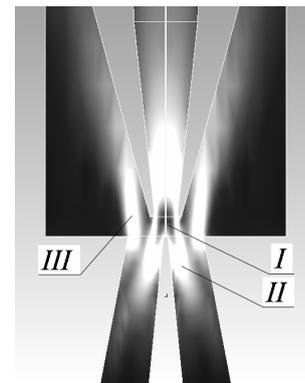


Рис. 7. Картина течения в струйном каскаде СГРМ при нейтральном положении струйной трубки

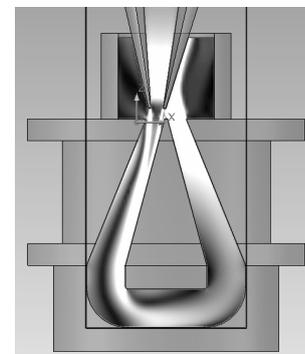


Рис. 8. Картина течения в струйном каскаде СГРМ при максимальном положении струйной трубки

На рис. 9 представлена зависимость в безразмерном виде коэффициента расхода рабо-

чей жидкости от смещения струйной трубки (○ — теория, * — эксперимент) при отсутствии нагрузки на исполнительный механизм СГРМ. Коэффициент расхода определяется как отношение расхода рабочей жидкости, поступившего в приемную плату (Q_{DV}), к расходу, поступившему на вход струйной трубки (Q), т. е.:

$$\mu = \frac{Q_{DV}}{Q}. \quad (1)$$

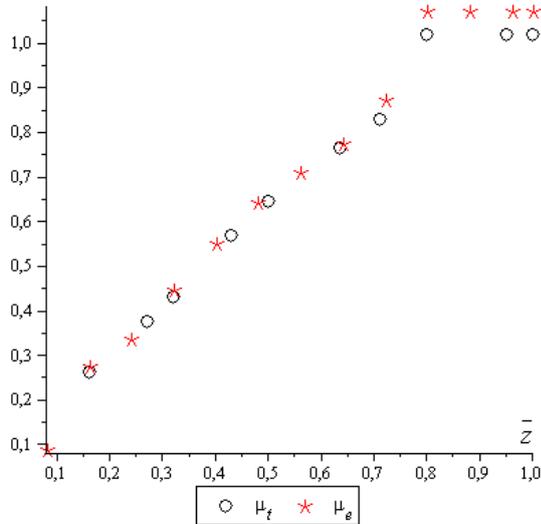


Рис. 9. Расчетные и экспериментальные значения коэффициента расхода РМ12

Анализ экспериментальных и теоретических значений коэффициентов расхода μ_e показал, что погрешность расчетов составила $\delta = 3,5\%$, что допустимо в инженерных методиках расчета и проектирования систем (рис. 9). Из рис. 9 видно, что при смещении струйной трубки $z > 0,7$ коэффициент расхода достигает максимального значения и не изменяется. Струйная трубка подвергается сильному воздействию обратной струи, вытекающей из окна приемной платы, вследствие чего при сигнале управления $\bar{i} = 0,7$ струйная трубка перемещается на максимальное расстояние, а пропорциональное регулирование нарушается.

Особенностью струйного гидрораспределителя, используемого в струйных гидравлических рулевых машинах, является наличие обратных потоков жидкости в зоне распределения основного потока. Гидродинамические силы, создаваемые реакцией вытекающих из окон приемной платы струй жидкости, сила вязкого трения и инерционная сила воздействуют как на основной поток жидкости, вытекающей из струйной трубки, так и на саму струйную трубку [3, 4]. Это приводит:

- к неустойчивому положению струйной трубки при отсутствии сигнала управления, что проявляется в виде самопроизвольного хаотичного движения поршня гидродвигателя;

- к резкому нарушению линейности статических характеристик СГРМ при смещении струйной трубки, что является причиной возникновения колебаний следящей системы.

На рис. 10 показаны изолинии воздействия обратной струи на струйную трубку, где в зоне I наблюдается максимальное воздействие, в зоне II — минимальное воздействие. По эпюре давления обратной струи, действующей на поверхность струйной трубки, можно определить максимальное значение крутящего момента, который является моментом сопротивления поворота струйной трубки вокруг своей оси. На рис. 11 показаны эпюра статического давления набегающей струи на струйную трубку P_{gd1} и эпюра статического давления, действующего на струйную трубку с противоположной стороны P_{gd2} . В результате проведенных расчетов в пакете Cosmos FloWorks была получена зависимость крутящего момента, который возникает на струйной трубе из-за гидродинамической силы обратной струи, как функция от безразмерной величины перемещения струйной трубки (рис. 12). Анализ полученной зависимости позволил выявить величину перемещения струйной трубки ($0,38 \leq z_k \leq 0,5$), при которой функция стремится к минимуму, а при последующем увеличении перемещения начинает возрастать до максимума. Объяснить данное явление можно если рассмотреть картину течения в струйном каскаде при данном значении ($0,38 \leq z_k \leq 0,5$) перемещения струйной трубки (рис. 13).

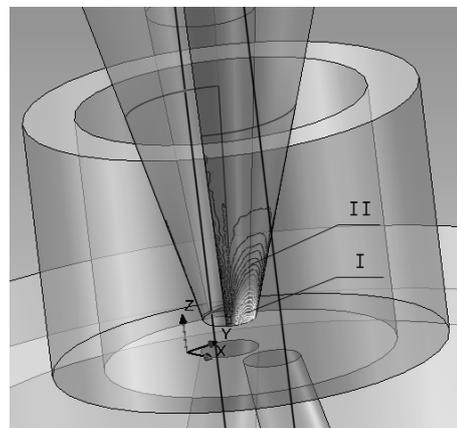


Рис. 10. Воздействие обратной струи на струйную трубку

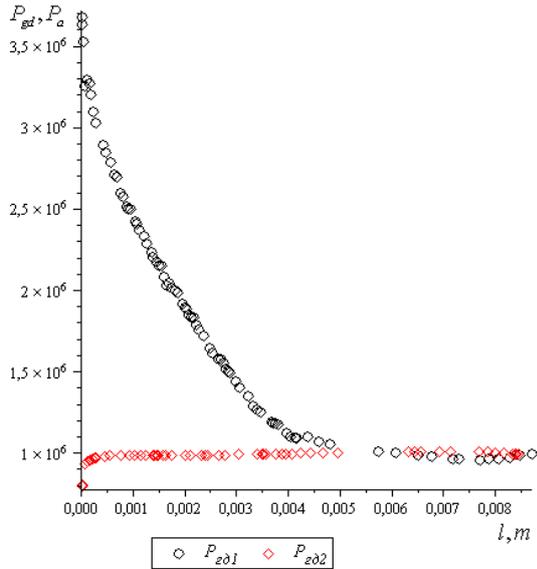


Рис. 11. Распределение статического давления вдоль струйной трубки

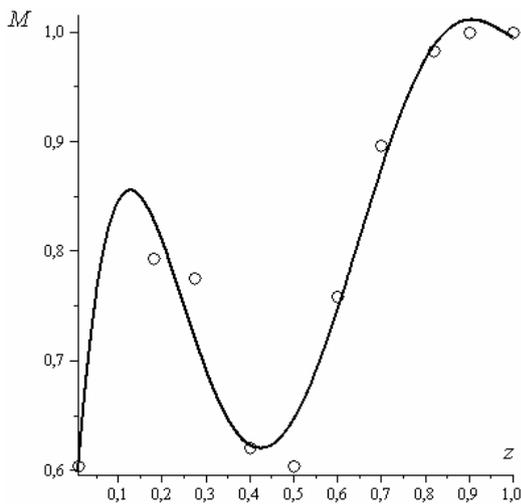


Рис. 12. Зависимость безразмерной величины гидродинамического момента от перемещения струйной трубки (○ — эксперимент)

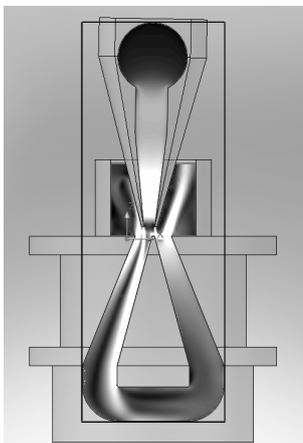


Рис. 13. Картина течения в струйном каскаде СГРМ при $z_k = 0,5$

Струя, выходящая из струйной трубки, делится на два потока: часть потока идет в левую камеру приемной платы, другая часть соответственно в правую полость. В результате взаимодействия обратной струи со вторым потоком происходит ее отклонение на определенный угол. Поэтому гидродинамическое воздействие обратной струи на струйную трубку в этот момент сводится к минимуму. Следует учесть, что данный расчет является приближенным расчетом той физической картины, которая возникает в реальном объекте в процессе эксплуатации. Здесь не учитываются внешние вибрационные воздействия, отсутствует воздействие реактивной силы летательного аппарата, которая возникает во время полета. При анализе полученных теоретических данных были использованы экспериментальные данные, полученные при исследовании рулевых машин в наземных условиях при стендовых испытаниях.

При структурном анализе рулевого привода, который выполнялся в пакете *Ansys Workbench*, решалась задача по получению динамических характеристик — амплитудных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ). Гармонический анализ в данном пакете используется для определения отклика (поведения под заданной нагрузкой) физической структуры при воздействии на нее гармонической, изменяющейся по времени нагрузкой. На рис. 14 представлена расчетная схема рулевого привода. В данной схеме учитывается влияние инерционной нагрузки на СГРМ и влияние постоянной статической нагрузки. Вал 2 закреплен так, что может только вращаться вокруг оси z (имитация подшипникового узла), для этого на поверхности А были приняты граничные условия по перемещениям. К валу 2 жестко прикреплены рычаг 3 и инерционный груз 1 (масса 30 кг) — граничные условия жесткой связи. К рычагу 3 с помощью граничных условий, имитирующих шарнирный узел, присоединяются толкатель 4 и вал поршня ГЦ 5. Вал поршня ГЦ 5 совершает движение вдоль внутренней поверхности корпуса ГЦ 6. Чтобы реализовать такое движение, было применено условие движения одной поверхности по другой без возникновения сил трения. Корпус ГЦ 6 связан с деталью 7 с определенной степенью жесткости ($c = 10^8$ Н/м), а поверхность F корпуса ГЦ закреплена так, что может совершать возвратно-поступательные движения вдоль оси X — имитация крепления СГРМ на летательном аппарате. Деталь 7 неподвижна.

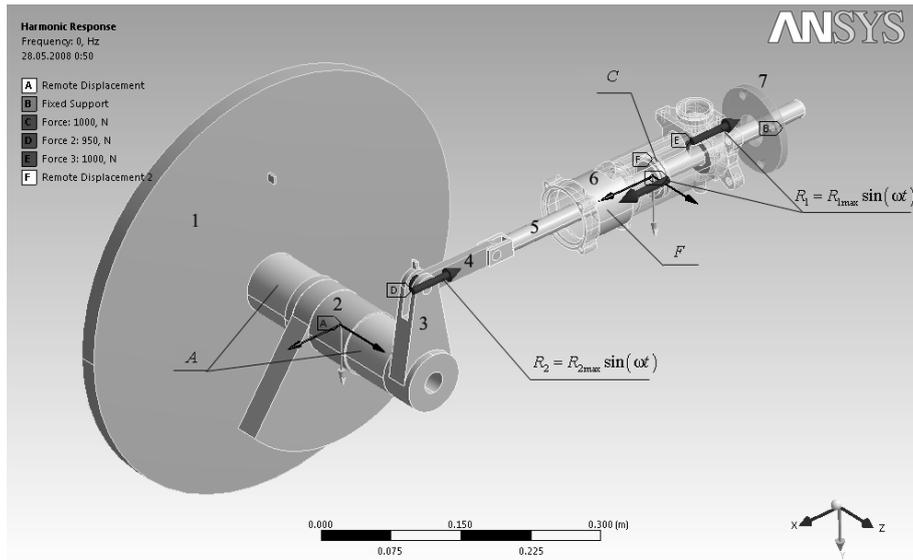


Рис. 14. Расчетная схема рулевого привода

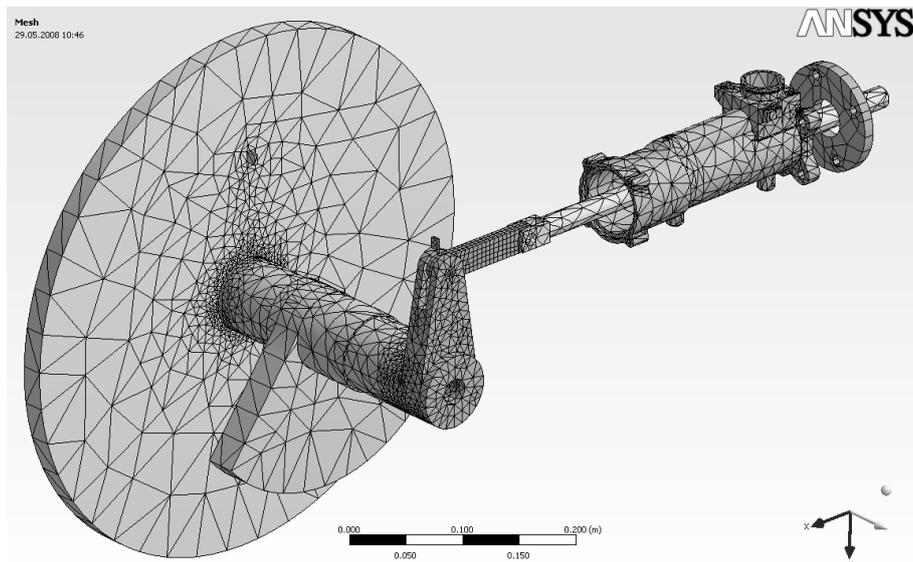


Рис. 15. Расчетная сетка рулевого привода для получения динамических характеристик

Движение поршня 5 осуществляется при действии силы $R_1 = R_{1\max} \sin(\omega t)$. На гидропривод (ГП) действует постоянная статическая сила нагружения $R_2 = R_{2\max} \sin(\omega t)$, которая направлена противоположно движущей силе R_1 . Движущая сила R_1 возникает при перепаде давлений рабочей жидкости в полостях ГЦ СГРМ. Перепад давления действует не только на эффективную площадь поршня ГЦ, но и на эффективную площадь корпуса ГЦ, вследствие чего он стремится сместиться в сторону противоположную направлению движения поршня ГЦ. Порядок величины смещения, полученный при экспериментах, довольно мал и составляет примерно 10^{-6} м.

На рис. 15 представлена расчетная сетка ГП, где можно увидеть зоны с частичным измельчением сетки. В результате проведенного моделирования были получены динамические характеристики — амплитудные и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ). На рис. 16 и рис. 17 представлены графики АЧХ и ФЧХ ГП, механическая жесткость которого составляет 10^{10} Н/м. В диапазоне частот $f = 0 \dots 50$ Гц фазового запаздывания между ведущим и ведомым звеньями не наблюдается (на рис. 17 φ_1 — ФЧХ поршня, φ_2 — ФЧХ инерционной нагрузки), а АЧХ поршня СГРМ A_1 и инерционной нагрузки A_2 одинаковы (накладываются друг на друга рис. 16).

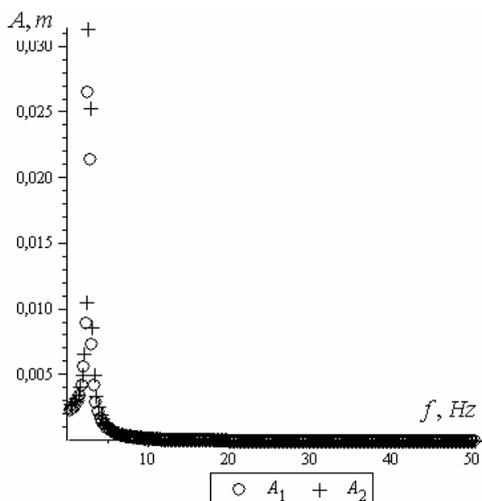


Рис. 16. АЧХ поршня СГРМ и инерционной нагрузки

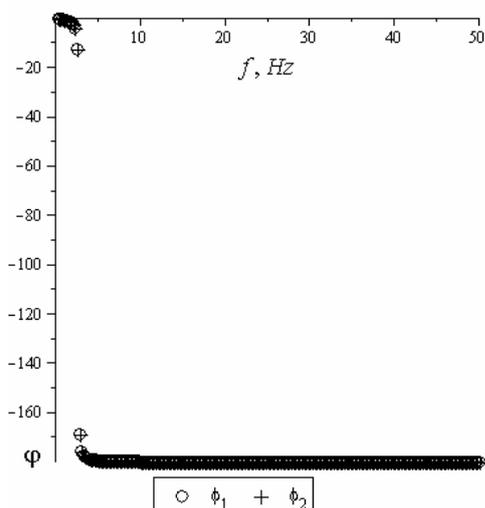


Рис. 17. ФЧХ поршня СГРМ и инерционной нагрузки

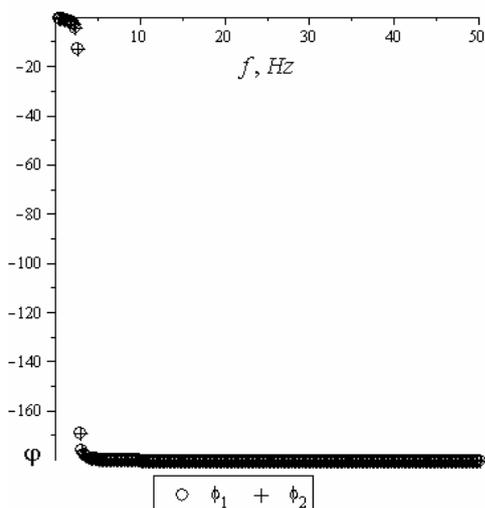


Рис. 18. АЧХ, полученные в Maple и Ansys

Результаты структурного анализа, выполненного в пакете Ansys, можно применять как предварительные расчеты рулевого привода ЛА при теоретических исследованиях. В [1] были предложены математические модели рулевого привода ЛА в линейной и нелинейной постановках. Сравнение результатов исследований, выполненных в пакете Ansys, и результатов, полученных при решении линейной математической модели в пакете Maple, представлено на рис. 18. АЧХ A_2 , полученная при численном решении в пакете Maple, и АЧХ A_1 , полученная в при численном исследовании в пакете Ansys, расходятся. В [1] была представлена линейная математическая модель, которая учитывает как механическую жесткость ГП, так и гидравлическую жесткость. Также в модели было учтено влияние движения корпуса ГЦ на динамические характеристики СГРМ. В модели, которая решается в пакете Ansys, учитывается только механическая жесткость ГП.

Численное моделирование с применением таких пакетов, как Ansys, Cosmos FlowWorks, Star-CD и др. позволяет исследовать как гидромеханические процессы, протекающие в проточной части гидравлического рулевого привода, так и проводить его структурный анализ при исследовании механической жесткости привода. Применение экспериментальных и теоретических исследований позволяет получить общую методику расчета и пневмогидравлических систем, а также снизить временные и финансовые затраты при их проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Галлямов, Ш. Р.** Применение эмпирических зависимостей в математической модели струйной гидравлической рулевой машины / Ю. К. Кириллов, А. В. Месропян, Ю. С. Телицын, В. А. Целищев // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 6(24). С. 56–66.
2. **Гониодский, В. И.** Привод рулевых поверхностей самолетов / В. И. Гониодский. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
3. **Целищев, В. А.** Экспериментальные исследования характеристик высоконапорного струйного гидрораспределителя / В. А. Целищев. Уфа: УГАТУ, 1998. С. 295–308.
4. **Целищев, В. А.** Струйные гидравлические рулевые машины (теоретические основы рабочих процессов) / В. А. Целищев, Ю. К. Кириллов, А. М. Русак [и др.]. Уфа: УГАТУ, 2002. 284 с.
5. **Антонов, Р. В.** Органы управления вектором тяги твердотопливных ракет: расчет, конструктивные особенности, эксперимент /

Р. В. Антонов, В. И. Гребенкин, Н. П. Кузнецов [и др.]. Москва-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. 552 с.

ОБ АВТОРАХ



Галлямов Шамиль Раши-тович, асп. каф. прикл. гидромеханики. Дипл. магистр по энергомашиностроению (УГАТУ, 2006). Готовит дис. в обл. систем автоматизации двигателей.



Широкова Ксения Александровна, асп. той же каф. Дипл. бакалавр (УГАТУ, 2004) и магистр (там же, 2006) по энергомашиностроению. Готовит дис. в обл. систем автоматизации двигателей.



Целищев Владимир Александрович, проф. той же каф. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматизации ЛА и двигательных установок.



Целищев Дмитрий Владимирович, асп. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. бакалавр по энергомашиностр. (УГАТУ, 2004), магистр по энергомашиностр. (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. систем управления летательн. аппаратами, моделирования струй. электрогидравлич. рулевых приводов систем управления летательн. аппаратами спец. назначения.