

Комплексно–сопряженная модель пневмогидравлического наземного пускового устройства беспилотного летательного аппарата

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Предложена комплексно–сопряженная модель пневмогидравлического наземного пускового устройства (НПУ) беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Модель отображает совокупность связанных друг с другом основных факторов рабочего процесса, включая пространственные волновые явления, динамику подвижной трансмиссии и др. Полученные в результате численного исследования физические поля представлены в виде цветowych карт расчетной области. Продемонстрированы преимущества данного типа НПУ по отношению к пневматическим.

Ключевые слова: наземное пусковое устройство, беспилотный летательный аппарат, пневмопривод, гидротрансмиссия, модель рабочего процесса.

Введение

В цикле предыдущих статей [1–4] рассматривались рабочие процессы в наземных пусковых устройствах (НПУ) с регрессивным законом тягового усилия [5] с позиций выработки конструктивных мероприятий по обеспечению постоянства усилия.

В силу специфики рабочего процесса существует класс НПУ, способный непосредственно обеспечить постоянный закон перегрузки, т.е. не нуждающийся в адаптивных свойствах трансмиссии или привода. Основное препятствие к широкому применению НПУ указанного класса заключается в прецизионном устройстве узлов и вытекающих отсюда высокой стоимости изготовления, сложности и массивности конструкции. К таким устройствам относятся пневмогидравлические катапульты, исследованию рабочих характеристик которых посвящена предлагаемая статья.

Представления о работе подобных устройств базируются на весьма тривиальных квазистационарных моделях [6, 7], которые не позволяют получить подлинную картину воздействующих на границы проточной части усилий. В действительности же при работе импульсной тепловой машины (ИТМ) катапульты в рабочем теле возникают волны, скорость распространения которых на порядок выше скорости движения подвижных звеньев трансмиссии. Достижение волной сжатия твердых границ проточной части сопровождается сильным ударом и дает дополнительный импульс трансмиссии. В связи с принципиальной необходимостью учета волновых эффектов исследования рабочих процессов в пневмогидравлических НПУ должны проводиться на основе нестационарных моделей.

Принцип действия катапульты

Разгон беспилотного летательного аппарата (БЛА) на короткой направляющей НПУ предполагает мгновенный выброс значительного количества накопленной энергии. В качестве такого накопителя энергии идеально подходит воздушный аккумулятор давления (ВАД). В подобных пневматических катапультах энергия сжатой среды из ВАД преобразуется в механическую энергию трансмиссии при ее

истечении в рабочий цилиндр. Однако обычная расширительная машина не обеспечивает постоянного закона тягового усилия при увеличении рабочего объема.

Однородная гидравлическая система не способна аккумулировать заметной энергии ввиду несжимаемости рабочего тела. Тем не менее отмеченное свойство позволяет выгодно передавать энергию без изменения тягового усилия во все точки гидротрансмиссии (на основании закон Паскаля). Пневматической системе с регулятором давления в рабочем цилиндре имманентно присуща способность создания постоянного тягового усилия. Таким образом, гибридная пневмогидравлическая схема привода сочетает в себе свойства для обеспечения постоянного закона тягового усилия с выгодными передаточными возможностями.

В основе пневмогидропривода лежит комбинирование пневматического и гидравлического цилиндров в одном корпусе, разделенных подвижным поршнем на соответствующие камеры. На одну сторону поршня воздействует сжатый газ, поступающий из ВАД. С противоположной стороны поршня находится несжимаемая жидкость, связанная с гидропоршнем. В нейтральном положении поршень удерживается гидроклапаном, который находится в магистрали гидроцилиндра. Редуктор обеспечивает установленный уровень рабочего давления в пневмоцилиндре.

В стартовом положении гидроцилиндр освобожден от жидкости, и ее перетекание из пневмоцилиндра ограничено гидрозамком. В пневмоцилиндр, выполняющий также роль предстартовой камеры, подается газ из ВАД. Гидротрансмиссия позволяет надежно фиксировать подвижные звенья системы до момента достижения в предстартовой камере необходимого давления. После срабатывания гидрозамка усилие от пневмопоршня посредством жидкости передается на гидропоршень и система приходит в движение.

Важной стадией подготовки к работе катапульты является наполнение предстартовой пневмокамеры. После достижения рабочих параметров старт рекомендуется проводить спустя некоторый промежуток времени, обеспечивающий релаксацию зон турбулентности. ВАД выступает в качестве компенсатора падения давления в пневмоприводе при увеличении ее рабочего объема. Основные характеристики исследуемой катапульты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные характеристики пневмогидравлической катапульты

Физический параметр	Значение
Давление в предстартовой камере, Па	$2,5 \cdot 10^6$
Начальное давление в ВАД, Па	$10 \cdot 10^6$
Отношение площадей цилиндров	2
Кратность полиспаста	4
Длина направляющей, м	3
Масса запускаемого БЛА, кг	12
Среднеинтегральная перегрузка, ед.	не более 5

При условии, что отношение площадей пневмо– и гидроцилиндров $\frac{S_{\Pi}}{S_{Г}} = n$, усилие, создаваемое на ведущем гидропоршне, в n раз меньше усилия на пневмопоршне (без учета потерь). Вследствие равенства перетекающего

объема жидкости рабочий ход поршня пневматической расширительной машины в n раз меньше длины гидротрансмиссии, что приводит к необходимости применения механических преобразователей, дающих выигрыш в перемещении. Для абсолютного большинства подобных устройств характерно использование стальных полиспаатов с высокой степенью кратности (9–кратный для НПУ БЛА «Phoenix» [6]).

Проектный инструментарий

Комплексно–сопряженная модель пневмогидравлического НПУ представляет собой взаимосвязь газотермодинамических процессов в ИТМ с динамикой механической трансмиссии. Модели объектов подобного класса, отличающиеся условиями организации рабочего процесса, могут быть получены реконфигурированием базовой модели НПУ [8].

Математическое описание модели механизма базировалось на одном из основных уравнений динамики – уравнении Лагранжа II рода. В качестве своего рода жесткой трансмиссии здесь выступает жидкость (масло). Термин «жесткая трансмиссия» в данном случае используется условно в связи с малой сжимаемостью жидкости.

Характерные скорости перетекания (около 2 км/ч подобно взрыву в жидкости) данному процессу не свойственны, что освобождает от необходимости учета волновых процессов в гидроцилиндре. В связи с этим целесообразно использование однородной модели гидротрансмиссии на основе закона Паскаля. Перетекание жидкости моделировалось без учета потерь дросселирования.

Интегрированная в расчетную область модель привода НПУ (рис. 1) органически связана с реализующим ее консервативным численным методом. Контрольный объем (КО), заключающий в себе привод, состоит из ансамбля ячеек. Обмен массой, импульсом и энергией между вычислительными ячейками определяется основными законами гидромеханики. Твердотельные элементы конструкции (поршень и гидротрансмиссия) исключаются из области решения краевой задачи и представлены твердотельной маской. Внешние и внутренние поверхности цилиндров задаются непроницаемой поверхностной маской, отображающей непроницаемые границы в ячейках КО.

Условием срабатывания перепускного клапана редуктора ВАД является снижение давления в пневмоцилиндре ниже номинального значения $p_{ном} = 3.5 \text{ атм}$. С этой целью на каждом временном слое производится определение среднеинтегрального давления и его сравнение с номинальным значением. В случае, когда $p < p_{ном}$, для поддержания номинальных параметров осуществляется подвод рабочей среды из ВАД путем изменения проницаемости стенок поверхностной маски.

Проходное сечение клапана, как и другие элементы с меньшим периодом расчетной сетки или перфорированные стенки, отображается с помощью поверхностной маски неполной проницаемости со значениями от 0.0 до 1.0. На частично маскированных ячейках применяются комбинированные условия вида

$$\Phi_h^{l+\frac{1}{2}} = (1-\gamma)\Phi_h^{l+\frac{1}{2}} + \Phi_h^{l+\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где Φ – столбцевые потоковые матрицы;

γ – коэффициент проницаемости маски, отображающий относительную площадь твердой границы;

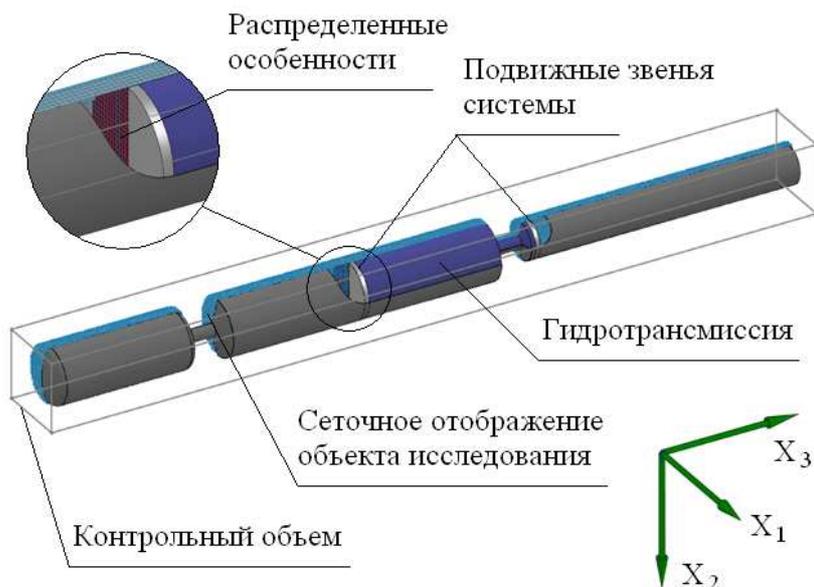


Рис. 1. Positionирование твердотельной модели маски пневмогидравлического НПУ в расчетной области

$$\left(\dots \right)^{l+\frac{1}{2}}, \left(\dots \right)_h, \quad h = k \quad i_1 \pm \frac{\delta_1^k}{2}, i_2 \pm \frac{\delta_2^k}{2}, i_3 \pm \frac{\delta_3^k}{2} \quad - \text{индексы временного слоя и узлов}$$

прямоугольной сетки соответственно, $k = 1, 2, 3$.

Моделирование наполнения пневмокамеры и задание исходных параметров в ВАД осуществляется заданием начальных условий в соответствующих полостях. Для случая идеального газа термическое уравнение состояния $\bar{p} = \bar{\rho}RT$ позволяет определить плотность рабочей среды, исходя из заданного давления в камерах. Таким образом, состав каждого компонента обобщенных потоковых вектор-матриц будет представлен в следующем виде:

$$\left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial t} \right)_{(2)} = \bar{\rho} \{ 1, 1, S, 0, 0, w, \varepsilon^o \}, \quad (3)$$

где $\bar{\rho} = (\rho_{II}, \rho_B)$ – плотность газа в предстартовой пневмокамере и ВАД соответственно;

$\bar{p} = (p_{II}, p_B)$ – начальное давление в полостях камер;

ε^o – внутренняя энергия по полным параметрам;

S – энтропия;

$(\dots)_{(2)}$ – индекс групп особенностей, отображающий источник энергии.

Анализ результатов численного эксперимента

Для отображения результатов численного эксперимента использовано преобразование параметров физических полей (давления, температуры, концентрации газа и скорости) в цветные карты. В виде графиков представлены основные динамические характеристики трансмиссии НПУ.

Предварительное наполнение пневмоцилиндра и фиксация трансмиссии в исходном положении с помощью гидрозамка позволяют исключить негативные эффекты, сопровождающие истечение газа в сужающийся канал. К последним относятся явления, характерные для работы типичных пневмомашин:

- 1) жидкое сопло, которое вызывает увеличение субстанциональной скорости и снижает давление расширения;
- 2) образование газовых каверн, которые увеличивают гидравлические потери и приводят к возникновению вихревых токов;
- 3) возникновения скачка уплотнения при втекании газа в сужающийся канал с высокой скоростью, вызывающего уменьшение на порядки расхода газа через отверстие;
- 4) образование сильных зон турбулентности, которые являются причиной самопроизвольного образования многочисленных нелинейных фрактальных волн, вызывающих диссипацию энергии [9].

Преобладание сильных осцилляций на графике давления в расширительной машине свидетельствует о высокой интенсивности волновых процессов (рис. 2 и 3). Так, на рис. 2 (см. поля скоростей) можно заметить сразу несколько выраженных волн сжатия, распространяющиеся вдоль цилиндра. В то же время повторному отражению слабых волн возмущения от нижнего торца цилиндра препятствует сопло подачи дополнительного газа из ВАД (рис. 3).

На рис. 4 и 5 указаны распределение перегрузки и скорости БЛА по длине направляющей для случаев автоматической работы редуктора (сплошная линия) и без подачи дополнительного газа из ВАД (пунктирная линия).

Благодаря использованию гидрозамка и предстартовой пневмокамеры пневмогидравлическая катапульта обладает уникальными свойствами. Согласно классификации [5] закон распределения тягового усилия хотя и относится к регрессивному (рис. 4, пунктир), но начальное и конечное значения перегрузки отличаются всего лишь на 30% (разница в перегрузке для пневматической НПУ составляет 70% [2]). Таким образом, столь незначительное падение стартовой перегрузки по линейному закону не требует дополнительных мер по модернизации трансмиссии или привода для перевода НПУ в класс с постоянными тяговыми характеристиками. Несмотря на неидеальные характеристики, подобный закон перегрузки обеспечивает БЛА необходимую скорость ввода в полет (25 м/с).

Автоматическая регулировка давления в пневмокамере (рис. 4, сплошная линия) обеспечивает ярко выраженный постоянный закон перегрузки. Незначительные всплески усилия, возникающие вследствие отражения волн сжатия, составляют 0,5 g и не оказывают значительного влияния на интегральные характеристики, так как гидротрансмиссия позволяет компенсировать удары на ведущую систему и в конечном итоге - на БЛА. Данному закону соответствует линейный характер набора скорости БЛА (рис. 5), позволяющей сократить длину направляющей на 1/3.

К отрицательным свойствам данного НПУ следует отнести характерные для большинства гидромашин недостатки:

- 1) существенные повреждения гидросистемы вследствие кавитационных процессов;
- 2) влияние температурных параметров окружающей среды на вязкость жидкости, а значит, и на характеристики НПУ в конечном итоге;
- 3) высокая сложность и стоимость прецизионных пневмо- и гидроузлов.

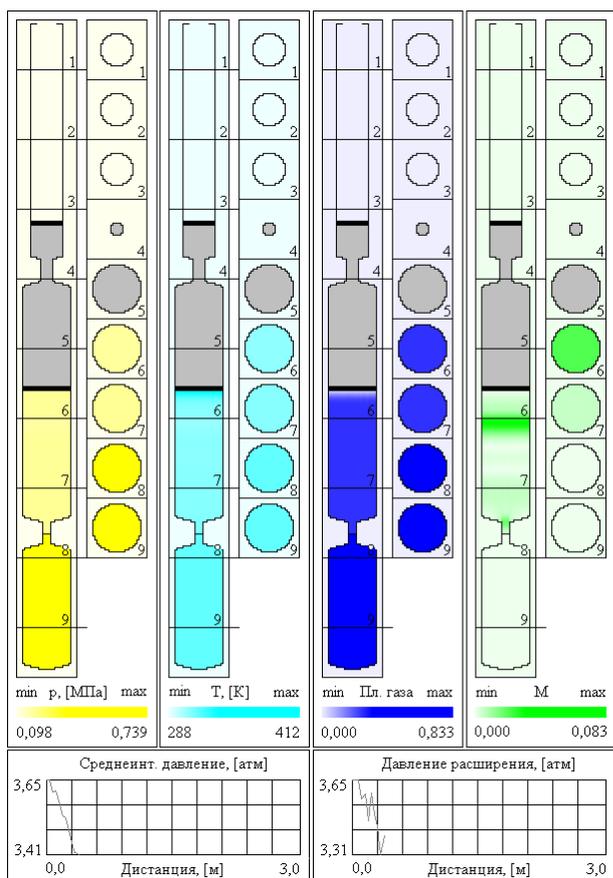


Рис. 2. Фазы рабочего процесса пневмогидравлического НПУ – срабатывание гидрозамка, начало движения трансмиссии

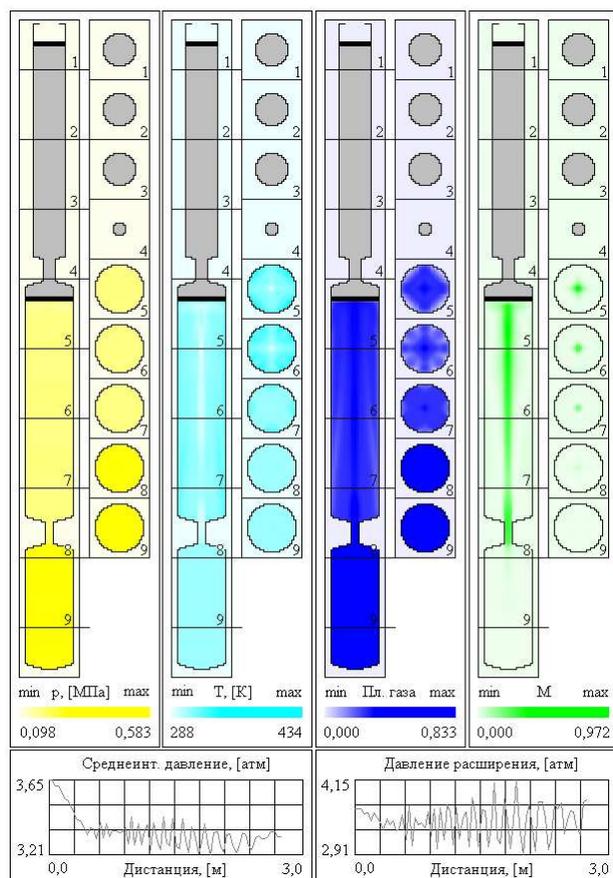


Рис. 3. Фазы рабочего процесса пневмогидравлического НПУ – заполнение газом пневмоцилиндра, конец рабочего цикла

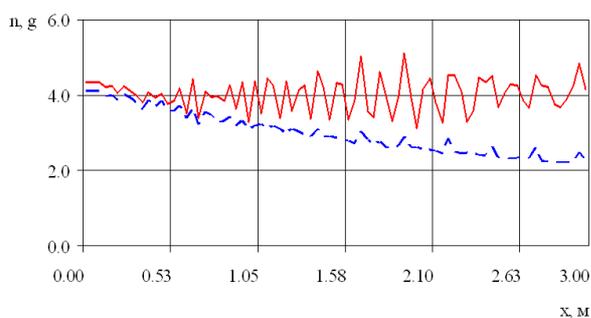


Рис. 4. Стартовая перегрузка

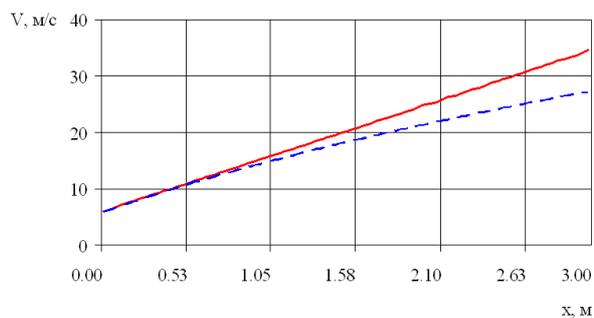


Рис. 5. Скорость разгона БЛА

Заключение

В отличие от классического пневмопривода, где наполнение цилиндра (при начальных нормальных условиях) происходит из ВАД, в гибридной схеме предстартовый пневмоцилиндр наполняется предварительно и расширение происходит при небольшом ходе поршня (1/5 цилиндра в НПУ Phoenix [6]), что обеспечивает постоянный закон перегрузки БЛА.

Предстартовая пневмокамера гарантирует старт БЛА при однообразной перегрузке независимо от условий окружающей среды. В свою очередь, автомати-

ческий режим работы редуктора ВАД также способствует повторяемости закона усилия по причине самонастраивания на актуальные параметры в пневмоцилиндре.

Вероятно существование геометрии привода ИТМ и начальных параметров в нем, обеспечивающих реализацию постоянного закона тягового усилия. Таким образом, актуальной задачей оптимального проектирования НПУ становится определение конфигурации (объема и площади) и начального давления в предстартовой пневмокамере и ВАД.

Список литературы

1. Авилов И.С. Комплексно–сопряженная модель инерционного стартового устройства легкого беспилотного летательного аппарата / И.С. Авилов, А.В. Амброжевич, В.А. Серeda // Авиационно–космическая техника и технология. – 2008. – № 2 (49). – С. 5–8.

2. Авилов И.С. Комплексно–сопряженная модель пневматического наземного пускового устройства легкого беспилотного летательного аппарата / И.С. Авилов, А.В. Амброжевич, В.А. Серeda // Авиационно–космическая техника и технология. – 2010. – № 5 (72). – С. 19–23.

3. Авилов И.С. Оптимизация динамических характеристик пневматического пускового устройства беспилотного летательного аппарата / И.С. Авилов, В.А. Серeda // Авиационно–космическая техника и технология. – 2010. – № 6 (73). – С. 23–27.

4. Серeda В.А. Комплексно–сопряженная модель вакуумного наземного пускового устройства легкого беспилотного летательного аппарата / В.А. Серeda // Авиационно–космическая техника и технология. – 2011. – № 3 (76). В печати. Поступила в печать 30.03.2011.

5. Серeda В.А. Классификация законов распределения тягового усилия наземных пусковых устройств беспилотных летательных аппаратов / В.А. Серeda // Авиационно–космическая техника и технология. – 2010. – № 4 (71). – С. 63–66.

6. The Phoenix Launcher / Royal School of Artillery // Basic Science and Technology Section. 19 Dec. 2002.L05 P. 1–8

7. Определение динамических параметров катапульты с пневмоаккумулятором / М.С. Логинов, С.П. Масленников, А.М. Мурзин, Н.Ф. Кривошапов // XXXIV академические чтения по космонавтике. Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства. – 2010. – Секция 12.

8. Серeda В.О. Метод формування вигляду наземних пускових пристроїв безпілотних літальних апаратів: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.06; захищена 23.10.09; затв. 10.02.10 / Серeda Владислав Олександрович. – Х., 2009. – 176 с.

9. Монин А.С. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности: в 2 т. / А.С. Монин, А.М. Яглом. - М.: Наука, 1965. – 640 с.

Рецензент: д–р техн. наук, проф. В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 02.03.11

Комплексно–спряжена модель пневмогідравлічного наземного пускового пристрою безпілотного літального апарата

З метою підвищення якості початкових етапів проектування наземних пускових пристроїв (НПП) легких безпілотних літальних апаратів (БЛА) запропоновано комплексно–спряжену модель пневмогідравлічного НПП. Модель відображує сукупність зв'язаних між собою основних факторів робочого процесу катапульти, включаючи просторові хвильові явища, динаміку рухомої трансмісії та ін. Отримані у результаті числового дослідження фізичні поля подано у вигляді кольорових карт розрахункової області. Зроблено висновок про досконалість робочого процесу поданого типу НПП відносно пневматичних.

Ключові слова: пусковий пристрій, безпілотний літальний апарат, пневмопривід, гідротрансмісія, повітряний акумулятор тиску.

Complex–connected model of pneumohydraulic ground launching device of the light unmanned aerial vehicle

For the purpose of improvement of quality of the initial stages of designing of ground launching device (GLD) unmanned aerial vehicle (UAV) the in a complex-interfaced model pneumohydraulic GLD is presented. The model displays set of the major factors of working process of a catapult connected with each other, including the spatial wave phenomena, dynamics of mobile transmission, etc. the physical fields Received as a result of numerical research are presented in the form of color cards of settlement area. The conclusion is drawn on perfection of working process of given type GLD in relation to the pneumatic.

Keywords: launching device, unmanned aerial vehicle, air–powered drive, multi-valve expansion the machine, optimization of characteristics of working process.