

УДК 629.7.085.24

В. А. СЕРЕДА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАЗЕМНОЙ КАТАПУЛЬТЫ С МНОГОКАСКАДНЫМ ПНЕВМОПРИВОДОМ

*Описана проблематика мобильности беспилотных авиационных комплексов. Указана основная причина низкого совершенства динамических характеристик наземных пневматических катапульти. Предложена схема многокаскадной расширительной машины с дополнительной подачей рабочего тела вдоль цилиндра. Поставлена и решена задача оптимизации динамических характеристик рассматриваемой катапульти. Получены координаты расположения дополнительных окон подвода газа. Представлен сравнительный анализ характеристик модернизированной и классической пневматических катапульти.*

**Ключевые слова:** пусковое устройство, беспилотный летательный аппарат, многокаскадный пневмопривод, полнота совершенной работы.

### Введение

Несмотря на широкое распространение беспилотных авиационных комплексов (БАК) их наземная составляющая по-прежнему остается несовершенной с точки зрения мобильности. Так длина направляющей наземных пусковых устройств (НПУ, катапульти) известных производителей может достигать 23 м (MC2555LR фирмы Robonic) [1] или иметь 2-3 раскладные секции (ALPPUL LP-02 фирмы Agies) [2]. В связи с этим такие НПУ не могут быть установлены в ограниченном пространстве (на палубе катера, кузове прицепа и др. легком шасси) или требуют значительного времени на приведение комплекса в работоспособное состояние.

Основной причиной столь значительного удлинения направляющей является необходимость обеспечения минимальной скорости беспилотного летательного аппарата (БЛА) в условиях регрессивного закона тягового усилия привода катапульти и ограничения стартовой перегрузки. В данной статье изложен способ модернизации органов газораспределения пневматического НПУ, а также методика поиска их параметров, позволяющих оптимизировать динамические характеристики и сократить длину направляющей.

### Принцип действия многокаскадного пневмопривода

Классические пневматические приводы линейного действия представляют собой однокаскадные системы, где под каскадом понимается однородный участок цилиндра с единственным окном подвода рабочего тела. Расширение рабочего тела в пределах объема каскада сопровождается падением давления

и, как следствие, снижением тягового усилия на штоке. Таким образом, падение тяги трансмиссии НПУ прямо пропорционально длине каскада. Но сокращение длины каскада нерезонно в связи с уменьшением величины хода штока, поэтому возможен путь увеличения количества каскадов, т. е. мест дополнительной подачи газа в общий объем цилиндра.

Подобные схемы нашли свое применение в многокамерных артиллерийских орудиях «Tausendfuss» [3] и «Hochdruckspumpe» [4], в которых обеспечение дополнительного газоприхода рабочего тела осуществляется за счет воспламенения добавочных пороховых зарядов, расположенных вдоль ствола и срабатывающих при прохождении через них снаряда. В случае НПУ с пневматическим приводом, который обладает существенно меньшей интенсивностью процесса, конструкторско-технологическая составляющая проектных работ заметно упрощается, чего нельзя сказать об этапе опережающих газодинамических исследований.

Многокаскадный пневмопривод НПУ содержит кроме основного окна подвода рабочего тела также дополнительные, расположенные вдоль образующей цилиндра (рис. 1). Подвод дополнительного газа осуществляется по мере прохождения поршня по цилиндру с целью поддержания постоянства давления [5]. Тем самым обеспечивается постоянство тягового усилия катапульти, а значит, возможность предания БЛА заданных стартовых параметров на укороченном разгонном участке направляющей. Таким образом, многокаскадный пневмопривод содержит в себе возможность оптимизации работы НПУ за счет варьирования числом и расположением окон по длине цилиндра.

**Постановка задачи и метод оптимизации**

Обеспечение необходимой скорости ввода в полет БЛА  $V_0$  на минимальной длине направляющей  $L$  возможно только при воздействии постоянной стартовой перегрузки  $n_x = \text{const}$ . Т. е. оптимальный закон тягового усилия известен, и он имеет весьма тривиальный вид прямой линии  $\bar{F}(x) = \text{const}$ . Прямая ограничивает прямоугольник, геометрическим смыслом которого является максимальная работа расширения  $A_{\text{max}} = \bar{F}L$ . Поэтому целью нахождения наилучших динамических характеристик катапульты является заполнение всей площади под кривой тяги.

Следовательно, в данной постановке задача оптимизации не является вариационной и не сводится к доставлению минимума функционалу, но при известном виде устройства состоит в отыскании длин каскадов  $l_i$  путем решения ряда прямых задач. Однопараметрический поиск оптимальной конфигурации данной схемы катапульты должен ассоциироваться с возможностью настройки САУ на полученный параметр. Технически схему многокаскадного пневмопривода можно реализовать с помощью тросов заранее установленной длины, которые связывают между собой механические краны и шток.

В контексте постановки классической задачи оптимизации разобьем НПУ на отдельные подсистемы: направляющую, трансмиссию, цилиндр, баллоны и БЛА. В качестве целевой функции будем использовать полноту совершенной работы  $A_-$ , которую лучше выразить в виде отношения к максимально возможной  $k = \frac{A_-}{A_{\text{max}}}$ . Управляющим параметром, т. е. показателем, оказывающим максимальное влияние на целевую функцию, является длины каскада  $l_i$ .

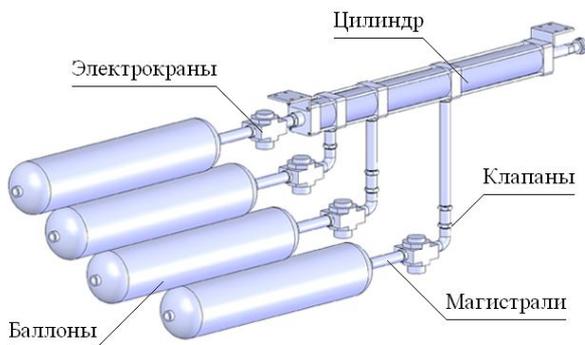


Рис. 1. Принципиальная схема НПУ с многокаскадным пневмоприводом

Пространственное описание газодинамических процессов в проточной части НПУ с учетом внешних эффектов обтекания основывается на консервативной форме записи системы из девяти уравнений нестационарного пространственного течения в декартовой системе координат, замыкаемых уравнением динамики подвижных звеньев трансмиссии (рис. 2). Описывающая взаимосвязь внутрисистемных переменных комплексно-сопряженная модель подробно представлена в [6].

Таким образом, на основании модели будем искать множество допустимых значений управляющего параметра  $l_i^* \in D$ , при котором достигается максимальное значение  $A(l_i^*)$  целевой функции  $A_-$ . В данной постановке решается задача условной параметрической оптимизации, т. е. в процессе разгона продольная перегрузка не должна превышать предельно допустимое значение  $n_{x \text{ пд}}$ , а скорость БЛА после схода с направляющей не должна быть ниже минимальной скорости  $V_{0 \text{ min}}$  ввода в полет:

$$A(t_i^*) = \max_{l_i \in D} A(l_i);$$

$$n_x(x) \rightarrow n_{x \text{ пд}} = \text{const};$$

$$V_0(L) \rightarrow V_{0 \text{ min}} = \text{const}.$$

Критерием размещения очередного окна подачи рабочего тела является снижение работы на участке каскада ниже равновесного значения на величину более 5%, т. е. при  $k < 0,95$ . Количество окон ( $n$ ) определяется автоматически как сумма длин каскадов, укладываемых в длину цилиндра пневмопривода  $\sum_{i=1}^n l_i = L$ , после завершения расчета рабочего цикла.

Технические характеристики рассматриваемого НПУ в стартовом состоянии могут быть универсальным образом параметризованы с помощью безразмерных комплексов (табл. 1).

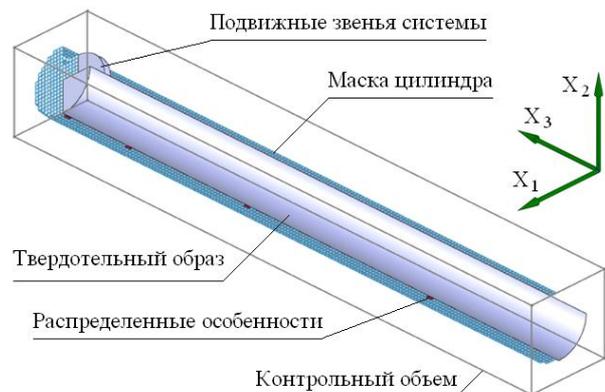


Рис. 2. Схема расчетной области пневматического привода НПУ

Таблица 1

Безразмерное представление технических характеристик НПУ с пневматическим приводом

| Физический параметр                               | Значение   |
|---|------------|
| Предельно допустимая перегрузка, ед               | Не более 4 |
| Начальная скорость БЛА по отношению к эволютивной | Не менее 1 |
| Кратность полиспастного механизма                 | 4:1        |
| Отношение объемов баллона и цилиндра              | 4:1        |
| Рабочее тело                                      | воздух     |

Метод оптимизации представлен в виде авторского пакета программ, включающего в себя расчетный модуль, созданный в среде программирования Visual Fortran 6.6 и генератор расчетной сетки Mesh3D, разработанный на языке Visual Basic.

### Результаты оптимизации

Результаты оптимизации представлены в виде фазового среза расчетной области, отображающей состояние физических полей в расширительной машине и интегральные характеристики НПУ (рис. 3). Размещение нескольких окон подвода газа вдоль цилиндра позволяет получить однородное поле давления по всему объему расширительной машины (см. поле давления). Подвод газа перпендикулярно оси цилиндра вызывает множество зон торможения потока о противоположную стенку, о чем свидетельствует локальный нагрев газа (см. поле температур).

Физические поля концентрации заряда свидетельствуют об улучшении режимов заполнения цилиндра за счет использования дополнительных окон подвода (см. поля концентрации заряда газа). Максимальное значение субстанциональной скорости в

расчетной области наблюдается во фронте отраженной волны (см. поле скоростей). Ее интенсивность при переходе через высокоскоростные струи дозатора заметно снижается, поэтому отражения от крышки цилиндра не происходит.

На рис. 4, 5 представлены основные динамические характеристики катапульты с многокаскадным пневмоприводом (поз. 4). Для сравнения пунктирной линией показаны параметры однокаскадного НПУ с подачей рабочего тела через торцевой дозатор. Емкость единственного баллона при этом представляла собой сумму объемов дополнительных баллонов в многокаскадной схеме.

Расчет подтверждает неэффективность однокаскадной схемы, которая обеспечивает регрессивный закон стартовой перегрузки (рис. 4, поз. 0) с коэффициентом полноты совершенной работы 0,78. Вследствие чего, НПУ способно придать минимальную скорость БЛА на направляющей длиной 3 м (рис. 5, поз. 0). Четырехкаскадная схема подвода рабочего тела обеспечивает пилообразный закон перегрузки (рис. 4, поз. 4), у которого полнота совершенной работы составляет 0,89. В результате, заданная скорость достигается на участке 2,6 м, т. е. на укороченном на 13 % участке направляющей.

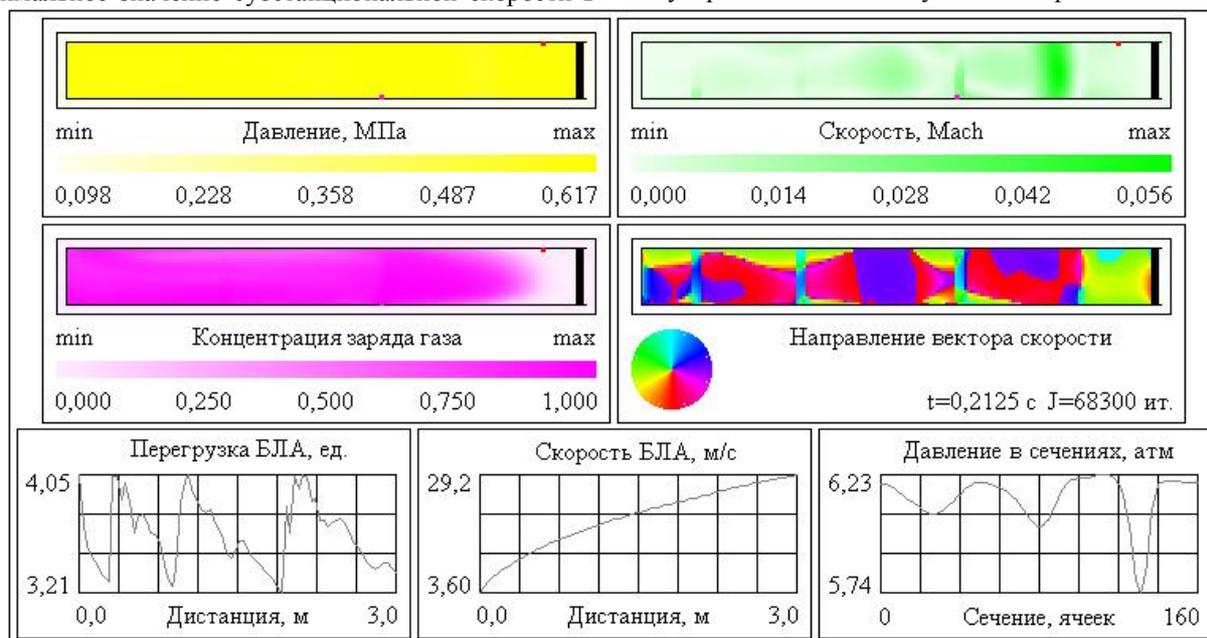


Рис. 3. Конечная фаза работы НПУ с многокаскадным пневмоприводом

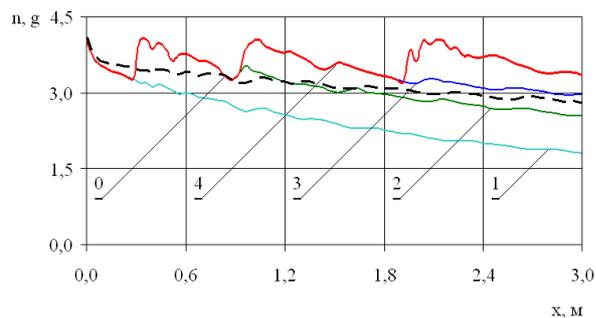


Рис. 4. Циклограммы стартовой перегрузки при различном количестве подключаемых баллонов

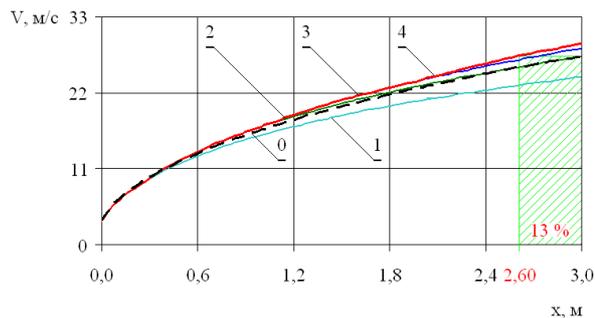


Рис. 5. Динамика набора скорости БЛА при движении по направляющей

Численный эксперимент свидетельствует о том, что пневматическая катапульта работает в импульсном режиме, т. е. в выполнении полезной работы участвует в основном начальная волна сжатия при открытии крана. При использовании классической однокаскадной схемы происходит выработка рабочего тела из баллона на 23 %. В результате подключения дополнительных каскадов наблюдается множественный импульсный подвод энергии, однако выработка воздуха из каждого баллона происходит значительно хуже – на 6...16%.

Полученные в численном эксперименте данные подтвердились серией натурных пусков груза-макета, проведенных на промышленном образце катапульты Р12П производства ООО НПФ «Ротор» (г. Тольятти), имеющей 4 независимых баллона и способных подключаться к общему объему расширительной машины как последовательно, так и параллельно.

Результаты оптимизации динамических характеристик многокаскадной НПУ представлены в табл. 2. Резкое начальное падение давления расширения в цилиндре целесообразно компенсировать срабатыванием дополнительных дозаторов газа с минимальным временным интервалом. Как следствие, оптимальная закономерность расположения дозаторов подчиняется арифметической прогрессии с разностью  $d = 0,3$  м и первым членом  $l_0 = 0,3$  м :

$$l_i = l_0 + jd = 0,3 + j0,3 ; j = 0, 1, 2, 3 .$$

### Заключение

Результатом использования многокаскадной схемы и метода оптимизации является сокращение длины направляющей на 13% по отношению к штатной конфигурации НПУ с гарантией обеспечения стартовых характеристик и ограничения по перегрузке БЛА.

НПУ на основе многокаскадного пневмопривода с окнами подвода газа вдоль цилиндра является наименее ресурсоемким на всех стадиях жизненного цикла (от разработки до эксплуатации) по сравнению с [7]. Кроме незначительных доработок пневмоцилиндра здесь используются стандартные комплектующие наиболее дешевого коммерческого ассортимента (дополнительные краны и баллоны).

Многокаскадный пневмопривод способен обеспечить постоянство давления в цилиндре значительного удлинения, что позволяет отказаться от полиспастных трансмиссий с передаточными числами свыше 2. Поэтому такие схемы НПУ могут применяться для запуска тяжелых БЛА с высокими скоростями схода, недостижимыми при использовании обычных пневмоцилиндров из-за необходимости иметь неприемлемо завышенные уровни давлений.

Таблица 2

Интегральные показатели НПУ при различном расположении окон подвода рабочего тела

| Физический параметр               | Номер баллона |      |      |      |      |
|-----------------------------------|---------------|------|------|------|------|
|                                   | $\Sigma V$    | 1    | 2    | 3    | 4    |
| Расположение окна подвода газа, м | –             | 0,00 | 0,08 | 0,24 | 0,48 |
| Средняя перегрузка, g             | 3,17          | 2,49 | 3,14 | 3,43 | 3,63 |
| Начальная скорость БЛА, м/с       | 27,3          | 24,2 | 27,2 | 28,4 | 29,2 |
| Коэффициент полноты работы        | 0,78          | 0,61 | 0,77 | 0,84 | 0,89 |

## Литература

1. ТТХ пневматической двухсекционной катапульты. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ariestesting.com/solutions-by-applications/unmanned-aerial-systems/uav-launchers>. – 28.09.2015.
2. ТТХ пневматической трехсекционной катапульты. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.robonic.fi/advantages-of-pneumatic-launch>. – 28.09.2015.
3. Шунков, В. Н. Ракетное оружие [Текст] / В. Н. Шунков. – М.: Попудри, 2003. – 544 с.
4. Шунков, В. Н. Оружие Вермахта [Текст] / В. Н. Шунков. – Мн.: Харвест, 1999. – 480 с.
5. Заявка № 2012139750 на Патент Российской Федерации, МКП В 64 F 1/06. Способ обеспечения постоянного тягового усилия привода катапульты и многоразовая система подачи рабочего

тела [Текст] / авторы: А. В. Амброжевич, В. А. Середя, К. В. Мигалин; заявитель и патентовладелец: Мигалин К. В.; заявл. 10.06.2012; приоритет 17.09.2012.

6. Амброжевич, А. В. Численное моделирование теплофизических процессов в двигателестроении [Текст]: учеб. пособие / А. В. Амброжевич. – Х.: ХАИ, 2005. – 233 с.

7. Амброжевич, А. В. Пневматическая наземная катапульта с многоразовой системой подачи рабочего тела [Текст] / А. В. Амброжевич, К. В. Мигалин, В. А. Середя // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики (АНТЭ-2013): тез. докл. Международ. науч.-техн. конф., 19-21 ноября, 2013 г. – Казань: Казанский нац. исслед. техн. ун-т им. А. Н. Туполева (КАИ), 2013. – С. 3-8.

Поступила в редакцию 28.09.2015, рассмотрена на редколлегии 14.10.2015

## ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАЗЕМНОЇ КАТАПУЛЬТИ З БАГАТОКАСКАДНИМ ПНЕВМОПРИВОДОМ

*В. О. Середя*

Описано проблематику мобільності безпілотних авіаційних комплексів. Вказано основну причину низької досконалості динамічних характеристик наземних пневматичних катапульти. Запропоновано схему багатокаскадної розширювальної машини з додатковою подачею робочого тіла уздовж циліндра. Поставлено та вирішено задачу оптимізації динамічних характеристик розглянутої катапульти. Отримано координати розташування додаткових вікон підведення газу. Наведено порівняльний аналіз характеристик модернізованої і класичної пневматичних катапульти.

**Ключові слова:** пусковий пристрій, безпілотний літальний апарат, багатокаскадний пневмопривід, повнота виконаної роботи.

## OPTIMIZATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GROUND CATAPULT WITH MULTISTAGE PNEUMATIC DRIVE

*V. A. Sereda*

Described problems of mobility unmanned aircraft systems. It indicates the main reason for the low dynamic performance excellence ground pneumatic catapult. The scheme of the multistage expansion engine with an additional supply of the working fluid along the cylinder. Posed and solved the problem of optimization of dynamic characteristics considered catapult. Get the coordinates of the location of additional windows gassing. A comparative analysis of the characteristics of the modernized and classic pneumatic catapult.

**Key words:** launching device, unmanned aerial vehicle, multistage pneumatic drive, completion of the work performed.

**Середя Владислав Александрович** – канд. техн. наук, доц. кафедры Конструкции и проектирования ракетной техники факультета Ракетно-космической техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sereda\_vlad@ukr.net.