

УДК 629.7.085.24

В. А. СЕРЕДА

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

О ВОЛНОВОМ ФАКТОРЕ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ НАЗЕМНЫХ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ

Проведен анализ состояния рабочей среды в цилиндре, который показал интенсивный колебательный процесс на протяжении всего рабочего цикла. Произведена оценка негативного эффекта от колебаний среды на динамику старта с помощью предложенного коэффициента полноты циклограммы тяги. Выделены три основных периода в работе пускового устройства с точки зрения преобладания волн определенной конфигурации. Отмечена наиболее желаемая структура волны, обеспечивающая установление квазистатического равновесия в цилиндре. На основании критерия Струхалея произведена оценка характера периодичности процесса старта и колебательного процесса катапульты. Сделан вывод о несоответствии характерных частот и невозможности вследствие этого управления волновыми процессами. Выработан ряд практических рекомендаций по организации рабочего процесса катапульты, позволяющих максимально снизить негативный эффект от нестационарности процесса.

Ключевые слова: пусковое устройство, беспилотный летательный аппарат, пневматический привод, закон тягового усилия, волны сжатия-разряжения, интерференция волн.

Введение

Интенсивный волновой процесс для линейных пневмодвигателей с высокой динамикой, к которым относятся приводы наземных пусковых устройств (НПУ, катапульты) для ввода в полет беспилотных летательных аппаратов (БЛА), является неизбежным.

По причине того, что основной структурой при выдвигании поршня из цилиндра является отраженная волна разряжения, среднее давление расширения на поверхности поршня всегда остается низким. Повышение интегрального давления по объему цилиндра, например, в случае применения баллона значительной емкости, не приводит к улучшению силового баланса на поршне. С другой стороны, явление интерференции может способствовать усилению амплитуды волн в определенных местах цилиндра, несмотря на общее падение среднего давления. Таким образом, сильные колебания газа в целом ухудшают динамические характеристики пневматических катапульт, однако рациональное управление волновым процессом может стать регулирующим фактором в задачах оптимизации НПУ. В статье исследуется принципиальная возможность управления волновыми структурами, т. е. способность фиксировать проходящую волну сжатия на поверхности поршня.

Изложенный материал структурно дополняет комплекс мероприятий по приданию постоянного тягового усилия привода в рамках метода оптимизации динамических характеристик НПУ [1].

Методология

Оптимальной конфигурацией катапульты будем считать ту, которая обеспечивает необходимую для данного класса БЛА скорость ввода в полет (V) на минимальном участке траектории (L) без превышения предельно допустимой стартовой перегрузки ($n_{х\text{пд}}$). Указанные динамически характеристики достижимы только при обеспечении приводом постоянного тягового усилия (\bar{F}), т. е. совершении максимальной работы перемещения (\bar{A}). В реальности же, регрессия тягового усилия привода катапульты ($F_{\text{г}}$) приведет к совершению гораздо меньшей работы по перемещению БЛА ($A_{\text{г}}$). С целью определения степени отклонения совершенной работы от максимально возможной предлагается использовать коэффициент полноты циклограммы тяги:

$$\kappa = \frac{A_{\text{г}}}{\bar{A}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{г}}$ – работа по перемещению БЛА, соответствующая регрессивному закону тягового усилия; \bar{A} – максимально возможная работа по перемещению БЛА, соответствующая постоянной тяге привода.

На режиме, работа которого геометрически соответствует прямоугольнику (рис. 1) скорость БЛА ($V_{\text{г}}$) достигается на более коротком участке разгона (рис. 2) ($L_{\text{г}}$), а коэффициент (1) при этом приобретает максимально возможное значение, равное единице.

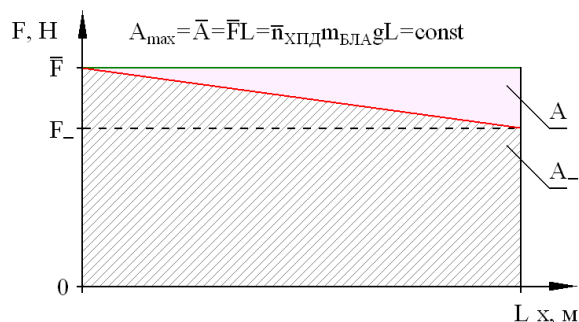


Рис. 1. Схема к определению коэффициента полноты тягового усилия

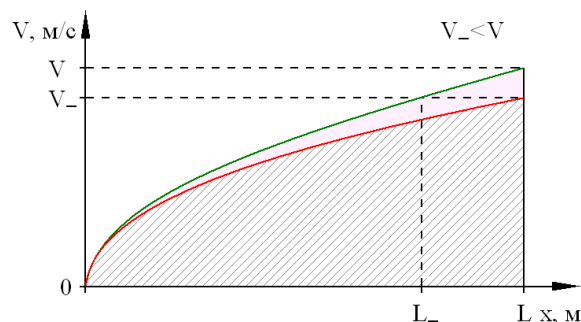


Рис. 2. Соответствие между длиной направляющей и начальной скоростью БЛА

Любой отличный от оптимального режим работы катапульты будет реализовывать работу перемещения БЛА, геометрически отвечающую трапеции (рис. 1 – заштриховано). В этом случае для придания необходимой скорости БЛА потребуются увеличение длины направляющей на величину $(L - L_-)$, а коэффициент полноты циклограммы тяги будет меньше единицы.

Исследования волновых процессов проводились на основании комплексной физико-математической модели пневматической катапульты [2]. Комплексный характер модели обусловлен единством факторов газодинамического процесса и динамикой трансмиссии. Динамические характеристики НПУ отображаются решением краевой газодинамической задачи в расширительной машине, где положение подвижных звеньев системы в каждый момент времени определяется системой сил механической трансмиссии. Топологические свойства расчетной области задаются системой сеток (твердотельных, поверхностных, направляющих), которые формируются с помощью приложения Mesh3D путем импорта твердотельного образа, сгенерированного в системе SolidWorks. Вычислительный модуль разработан в среде алгоритмического языка Compaq Visual Fortran ver. 6.6. Достоверность модельных представлений подтверждена удовлетворительной корреляцией с результатами бросковых испытаний груза-макета, полученных на катапульте P12П производства НПФ «Ротор» (г. Тольятти).

Расчет пневматической катапульты проводился на прямоугольной регулярной расчетной сетке из $24 \times 24 \times 170$ ячеек, с пространственным шагом 5 мм. В качестве базового образца рассматривалось НПУ для ввода в полет легкого БЛА массой 25 кг с минимальной скоростью 25 м/с на дистанции 3 м и предельно допустимой стартовой перегрузкой 5 g. Использовался баллон сжатого воздуха вдвое большего объема по сравнению с расширительной машиной и начальным давлением 7 атм. Передача тя-

гового усилия на стартовую тележку с БЛА осуществлялась с помощью гибкой полиспастной трансмиссии кратностью 4. Результаты получены в виде фазовых срезов, воспроизводящих переменные во времени состояния физических полей и интегральные характеристики устройства с проявлением доминирующего волнового фактора (рис. 3).

Основная часть

Полученные результаты численного исследования свидетельствуют о несоответствии действительности квазистационарных представлений о процессах, происходящих в расширительных машинах НПУ. Анализ циклограммы тяги говорит о том, что передаваемое посредством трансмиссии на тележку с БЛА усилие оказывается гораздо меньше планируемого вследствие интенсивного колебательного процесса. На рис. 4 представлены циклограмма, полученная путем отслеживания отраженной от поверхности поршня волны разряжения (поз. 2), и для сравнения идеальный закон стартовой перегрузки (поз. 1). Соответствующая динамика набора скорости БЛА вдоль направляющей при различных законах перегрузки изображена на рис. 5.

Полученную зависимость перегрузки от положения поршня в цилиндре можно выделить в область, ограниченную мажорантой и минорантой. В указанной области проведена средняя линия, характеризующая квазистационарный фон (пунктирная линия). Величина отклонений от средней линии свидетельствует о том, что интенсивности волн разряжения и сжатия не эквивалентны. Основной вклад в регрессию тягового усилия вносит не только падение давления расширения вследствие ограниченного объема баллона, но и отражаемая от выдвигаемого поршня волна разряжения. Интенсивность волны разряжения растет с увеличением линейного размера расширительной машины и ускорением подвижного звена (поршня).

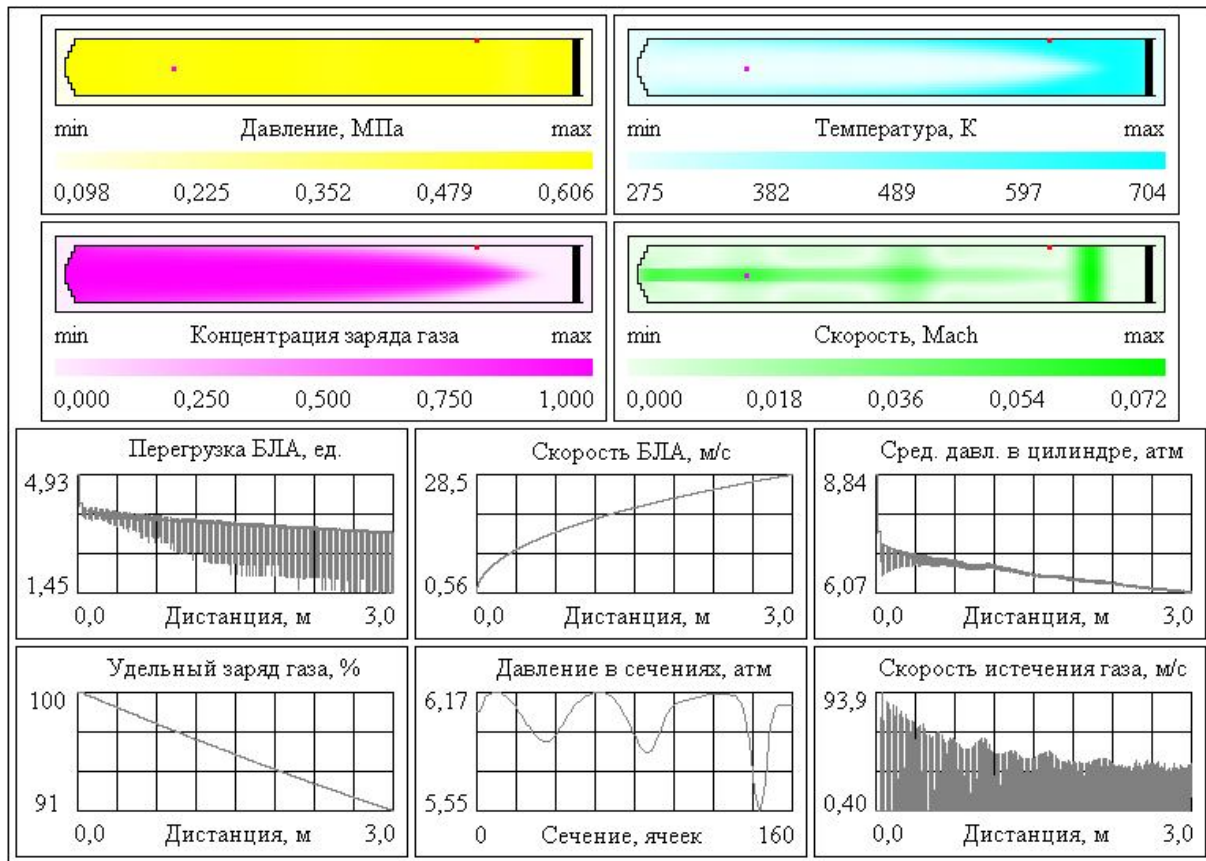


Рис. 3. Фаза завершения рабочего цикла НПУ с пневмоприводом (временной срез 0,2025 с)

Согласно коэффициенту (1) наполняемость идеального процесса ($n = \text{const}$) стремится к 1,00, поэтому скорость схода БЛА максимальна на данной дистанции и составляет 30,7 м/с (рис. 5, поз. 1). Регрессия стартовой перегрузки реального нестационарного процесса выражается меньшим значением коэффициента наполнения циклограммы – 0,896, в результате чего начальная скорость БЛА сокращается до 28,5 м/с. В идеальном процессе эта же скорость достигается на участке направляющей, длина которой меньше на 12,5%. Постоянный закон перегрузки может быть получен при истечении рабочего тела из «бесконечного» резервуара [3], поэтому основной вклад в регрессию вносит все-таки

ограниченная емкость баллона. Высокочастотный колебательный процесс, несмотря на малую подынтегральную площадь отрицательных пиков усилия, в общем балансе снижает коэффициент (1) на величину 0,04. В результате чего, для данной конфигурации катапульты недобор скорости исключительно за счет волнового процесса составляет ~0,8...1,0 м/с.

На протяжении всего времени работы катапульты наблюдаются процессы генерирования, отражения и наложения волн разряжения-сжатия. Однако, в зависимости от положения x поршня в цилиндре длиной S выделены периоды наиболее интенсивного проявления того или иного волнового фактора (рис. 6).

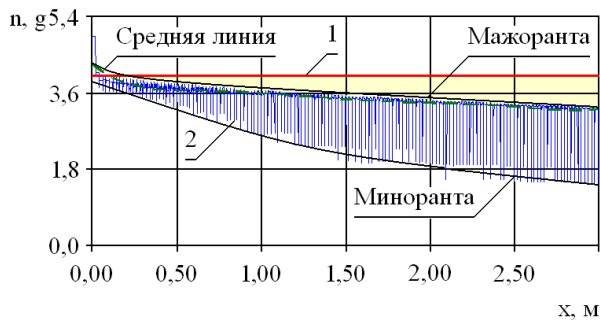


Рис. 4. Циклограмма перегрузки, действующей на БЛА

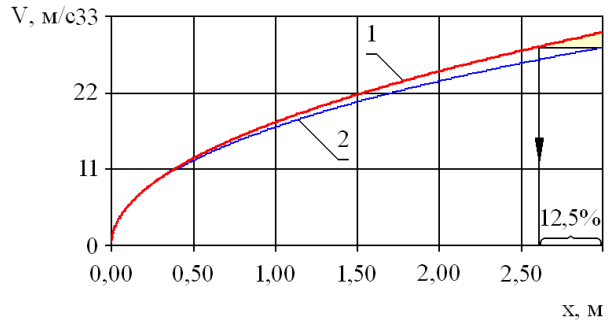


Рис. 5. Динамика набора скорости БЛА на направляющей

Низкая скорость движения поршня обуславливает генерирование слабых волн разряжения, которые разрушаются о высокоэнергетическую струю подводимого газа (I период). При наборе скорости поршнем интенсивность волн оказывается достаточной, чтобы преодолеть сопротивление струи и отразиться от крышки цилиндра (II период). В конце рабочего цикла уменьшение заряда рабочего тела способствует максимальному проявлению явлений интерференции (III период).

Наибольший интерес с точки зрения обеспечения наилучших динамических характеристик представляет фаза возникновения стоячей волны (III период). Причиной возникновения стоячей волны является наложение отраженной от крышки цилиндра на вновь сгенерированную поршнем волн сжатия, с устойчивым во времени взаимным усилением амплитуды. Фиксация фронта усиленной волны сжатия вблизи поверхности поршня свидетельствует об установлении квазистатического равновесия в нестационарной системе и уменьшает рассеяние потенциальной энергии.

Очевидно, подавление волн разряжения или установление квазистатического равновесия в цилиндре за счет организации рабочего процесса специальным образом позволит повысить скорость БЛА на заданном участке разгона. С целью определения возможности влияния на характер волновых явлений по характерным параметрам определены числа Струхала для рабочего Sh_{PI} и колебательно-го Sh_{KPI} процессов [4].

$$Sh_{PI} = \frac{S}{TW}, \quad Sh_{KPI} = \frac{fS}{D},$$

где S – линейный размер течения (0,75 м); W – максимальная скорость перемещения поршня (7,5 м/с); T – полное время процесса запуска (0,2025 с); f – частота волнового процесса (730 Гц); D – скорость распространения колебаний (150 м/с).

О низкой периодичности рабочего процесса свидетельствует число Струхала, величина которого меньше единицы – 0,49. В то время как о высокой

нестационарности процесса в пневматическом цилиндре свидетельствует соответствующее число Струхала, значение которого превышает единицу – 3,65. Такое значительное отличие в численной величине критерия подобия говорит о несоответствии характерных частот указанных явлений. Таким образом, с помощью различных способов организации рабочего процесса не представляется возможным реализовать на практике волновое управление.

Однако замечено, что торцевой подвод рабочего тела в цилиндр препятствует локальному понижению давления на зеркале поршня и распространению малых возмущений вглубь цилиндра в начальный период расширения. Фронт волн сжатия при этом приобретает коническую форму (рис. 6), причем вершина конуса направлена в противоположную сторону распространения (выделен контуром с указанием направления его перемещения).

Радикальным способом подавления зарождающихся волн разряжения является наддув рабочего тела непосредственно на зеркало поршня. При этом устраняется возможность локального понижения давления и, как следствие, аккумуляции непрерывной последовательности малых возмущений.

Заключение

Волновые процессы в цилиндре значительно ухудшают динамические характеристики НПУ (среднеинтегральную перегрузку, скорость схода) и приводят к увеличению длины направляющей. Коэффициент полноты циклограммы тягового усилия позволяет отследить не только отклонение основного фона от постоянного значения, но также выявить влияние каждой волны на параметры работы НПУ.

Подавление волновых явлений в расширительной машине позволяет повысить работу перемещения БЛА максимум на 4 %. В общем энергетическом балансе это довольно ощутимый показатель, т. к. вся регрессия тягового усилия оценивается в 11 %. Еще более явно негативный эффект от регрессии тяги выражается в увеличении длины направляющей на 12,5 %, т. е. 0,375 м для рассматриваемого НПУ.

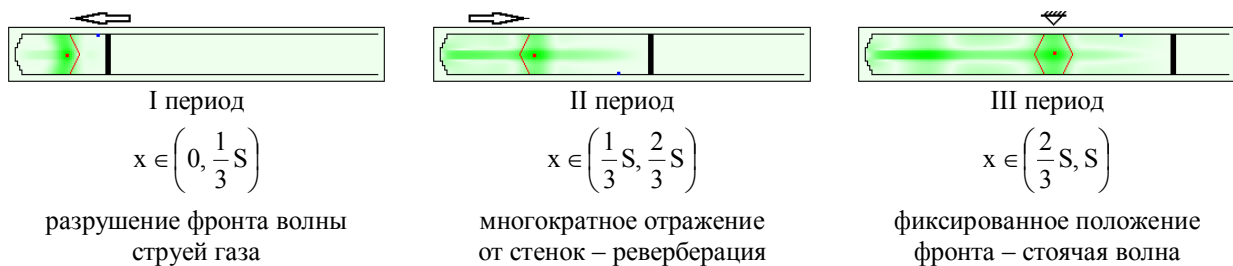


Рис. 6. Структура фронта волны сжатия в различные моменты времени. Направление движения волны:

→ – вправо; ← – влево; ⇐ – фиксированное положение

Критерий Струхаля свидетельствует о сильном расхождении собственных частот рабочего и колебательного процессов, что вызывает сложности в управлении волновыми факторами. Однако по причине относительно низкой интенсивности волн разряжения в начальный период работы катапульты, предлагается использовать НПУ с малым рабочим ходом совместно с полиспастами высокой кратности (свыше 4).

Оптимизация динамических характеристик, т. е. получение постоянного тягового усилия стандартной конфигурации пневматической катапульты, возможно только в результате глубокой модернизации трансмиссии или привода [1].

Литература

1. Серeda, В. А. Постановка задачи оптимизации наземных пусковых устройств [Электронный ресурс] / В. А. Серeda // Труды МАИ. – 2013. – № 70.

Поступила в редакцию 9.12.2014, рассмотрена на редколлегии 20.03.2015

ПРО ХВИЛЬОВИЙ ФАКТОР В ЗАДАЧАХ ОПТИМІЗАЦІЇ НАЗЕМНИХ ПУСКОВИХ ПРИСТРОЇВ

В. О. Серeda

Проведено аналіз стану робочого середовища в циліндрі, який показав інтенсивний коливальний процес протягом усього робочого циклу. Зроблено оцінку негативного ефекту від коливань середовища на динаміку старту за допомогою запропонованого коефіцієнта повноти циклограми тяги. Виділено три основних періоди в роботі пускового пристрою з точки зору переважання хвиль певної конфігурації. Відзначено найбільш бажана структура хвилі, що забезпечує встановлення квазістатичної рівноваги в циліндрі. На підставі критерію Струхаля зроблено оцінку характеру періодичності процесу старту і коливального процесу катапульты. Зроблено висновок про невідповідність характерних частот і неможливості внаслідок цього управління хвильовими процесами. Вироблено низку практичних рекомендацій щодо організації робочого процесу катапульты, які дозволяють максимально знизити негативний ефект від нестационарності процесу.

Ключові слова: пусковий пристрій, безпілотний літальний апарат, пневматичний привід, закон тягового зусилля, хвилі стиснення-розрядження, інтерференція хвиль.

ON THE WAVE FACTOR IN OPTIMIZATION PROBLEMS OF GROUND LAUNCHERS

V. A. Sereda

The analysis of the working medium in the cylinder, which showed intense oscillatory process throughout the operating cycle. An assessment of the adverse effect on the fluctuations of the medium on the dynamics of start using the proposed coefficient completeness cyclogram traction. Three main periods in the starting device in terms of the prevalence of the waves of a certain configuration. Marked the most desired wave structure, ensures the establishment of a quasi-static equilibrium in the cylinder. On the basis of the criterion of the Strouhal assessed the nature and frequency of the process of starting oscillation process catapult. The conclusion of non-conformity of the characteristic frequencies and consequently the impossibility of control of wave processes. Developed a number of practical recommendations on the organization of the working process of the catapult, allowing to minimize the negative impact of non-stationary processes.

Key words: launching device, unmanned aircraft vehicle, pneumatic drive, law of traction, waves compression and exhaustion, wave interference.

Серeda 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.

25 ноября 2013. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=44445>. – 09.12.2014.

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

3. Бойчук, И. П. К вопросу о рациональной емкости баллона пневматического наземного пускового устройства [Текст] / И. П. Бойчук, В. А. Серeda // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. – Б., 2015. – № 3. – С. 80–84.

4. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 440 с.