

## **КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ В СОСТАВЕ КОМПАКТНОГО НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЗАПУСКА МИШЕНЕЙ-ИМИТАТОРОВ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ**

### **Введение**

Крылатые ракеты (КР) относятся к классу беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с высокой удельной нагрузкой на крыло и имеют характерные скорости полета 0,7 М (например, Х-55). Мишени-имитаторы КР должны обладать идентичными крейсерскими скоростями полета не ниже 0,5 М для воссоздания реальных условий перехвата комплексом ПВО. Мишени оснащаются реактивными двигательными установками с прогрессивной тяговой характеристикой (ПуВРД, ЭПВРД), поэтому крейсерский режим в значительной степени определяется начальной скоростью ввода в полет БЛА. Запуск КР или мишени ее имитирующей производится с помощью пускового устройства (ПУ) катапультного типа в составе наземного комплекса с приводом от тепловых расширительных машин на холодном (пневматических) или горячем (пиротехнических) рабочем теле.

Высокая скорость ввода в полет БЛА достижима в результате интенсивного наращивания характеристик наземного комплекса: повышения средней стартовой перегрузки или увеличения длины участка разгона. В условиях массовости пусков и низкой стоимости мишени (например, Е95М) их оснащают нетвердотельным БРЭО, которое имеет ограничение по стартовой перегрузке (в пределах 5 g). При увеличении длины направляющей необходимо предусматривать раскладные секции, монтажные площадки, обслуживающий персонал, время на развертывание, нестандартное буксируемое шасси, учитывать приспособленность транспортной сети и т. д. Последнее снижает компактность, а значит и мобильность всего комплекса (рис. 1, а), ухудшая его совершенство в целом (например, катапульты MC2555LR – Robonic, ADLR-021 – Adcom).

Таким образом, достижение высоких начальных скоростей полета мишени в условиях ограничения стартовой перегрузки при сохранении компактности ПУ может быть получено в результате системного улучшения рабочего процесса. Ключевая роль в составе проектного инструментария должна отводиться рабочему процессу в тепловых расширительных машинах в условиях взаимодействия с элементами трансмиссии. Известная концепция проектирования компактных ПУ компании Boeing (рис. 1, б), ориентированная на дорогостоящую натурную доводку в роли основного инструмента НИОКР и изменение передаточного числа трансмиссии (например, катапульты Super Wedge)

[1], но не затрагивающая тепловой расширительной машины. Однако, быстропеременная специфика рабочих процессов в тепловых расширительных машинах обуславливает принципиальную необходимость отображения в соответствующих физико-математических моделях волновых пространственно-неоднородных сопутствующих эффектов [2].



а



б

Рисунок 1 – Негативный и положительный примеры проектирования наземных комплексов. Название ПУ и длина направляющей:  
а – MC2555LR (Robonic) 23 м; б – Super Wedge (Boeing) 3 м

В связи с этим, необходимость построения концепции проектирования компактных ПУ на базе прогрессивных математико-информационных технологий, включающих в себя опережающие численные исследования рабочего процесса в тепловой расширительной машине с учетом взаимодействия с механической составляющей ПУ представляется весьма актуальной.

### Постановка задачи минимизации длины направляющей

Полезная функция ПУ универсальна для всех типов устройств вне зависимости от конструктивных особенностей – это придание БЛА заданной кинетической энергии  $E_k = \frac{m_{\text{БЛА}} V_0^2}{2}$  (где  $m_{\text{БЛА}}$  – масса БЛА;  $V_0$  – начальная скорость). Под компактным понимается ПУ, обладающее минимальной длиной направляющей и обеспечивающее выполнение полезной функции при ограничении по стартовой перегрузке  $n_{\text{хгд}}$ . Поиск экстремального  $L \rightarrow \min$  значения участка разгона подразумевает решение задачи оптимизации.

Для этого, во-первых, из окружения наземного комплекса выделено собственно ПУ и представлено в виде отдельных подсистем: привода, трансмиссии, направляющей и мишени. Во-вторых, выбрана целевая функция, количественно выражающую компактность ПУ и характеристики рабочего процесса, через которые эта функция выражается. В основе предпочтения при решении задачи проектирования лежит минимальная длина направляющей  $L \rightarrow \min$ , т. е. она является целевой функцией.

Полезная функция ПУ выполнима при совершении приводом тепловой расширительной машины фиксированной работы по разгону БЛА вдоль направляющей  $A = F_-(x)L = const$ . Повышение среднего значения регрессивного тягового усилия привода  $F_-(x)$  недопустимо ввиду ограничения по продольной стартовой перегрузке  $n_x(x) \leq n_{x\text{пд}}$ . Таким образом, максимально возможная работа выполнима при разгоне БЛА вдоль направляющей с постоянным тяговым усилием, с точностью до размерной константы определяемым допустимой перегрузкой  $F^*(x) = n_{x\text{пд}} g m_{\text{БЛА}}$ ,  $\forall x \in L$ . С целью получения оценки отклонения фактически совершенной работы  $A_-$  от максимально возможной (оптимальной)  $A^*$  предлагается использовать коэффициент полноты циклограммы тяги (КПЦТ):

$$\kappa = \frac{A_-}{A^*}. \quad (1)$$

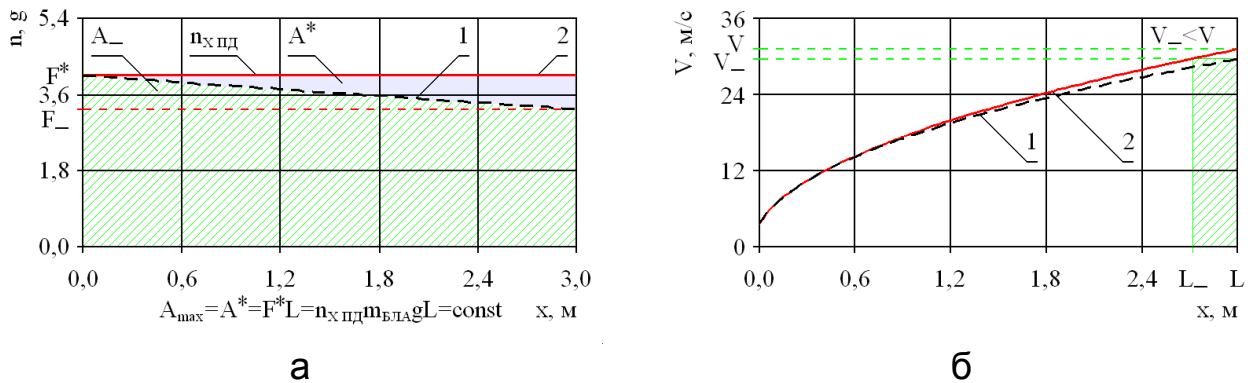


Рисунок 2 – Динамические характеристики ПУ при различных законах тягового усилия привода: а – стартовая перегрузка; б – скорость разгона БЛА. Тип закона: 1 – регрессивный; 2 – постоянный

С учетом регрессивной формы закона тягового усилия  $F_-(x)$  при наличии ограничений по перегрузке  $n_{x\text{пд}}$ , условия достижения минимальной длины разгонного участка  $L \rightarrow \min$ , постоянства тягового усилия  $F^*(x) = const$  или максимального значения КПЦТ становятся эквивалентными  $\kappa \rightarrow 1$ . Работа расширительной работы с прогрессивным законом тягового усилия  $F_+(x)$  недопустима и поэтому не рассматривается как средство достижения компактности.

В-третьих, выбраны управляемые параметры, которые оказывают максимальное влияние на целевую функцию. Начальная скорость БЛА  $V_0$ , взлетная масса  $m_{\text{БЛА}}$  и предельная перегрузка  $n_{x\text{пд}}$  считаются проектными параметрами. При заданном объеме расширительной машины  $W_{\text{Ц}}$  площадь  $S$  и ход  $h$  поршня образуют комплекс взаимосвязанных параметров, произведение которых неизменно

$W_{\text{ц}} = Sh = \text{const}$ . При использовании полиспастного механизма, не обладающего свойствами вариатора, передаточное число трансмиссии также постоянно  $m = \text{const}$ , поэтому

$$\bar{P}_{\phi} = \{V_0, m_{\text{БЛА}}, n_{\text{ХПД}}, S, h, m\} = \text{const}. \quad (2)$$

Матрица общих параметров  $\bar{P}_O$  независимо от конфигурации ПУ включает в себя параметрические векторы рабочего тела  $\bar{P}_{\text{РТ}}$ , воздушного аккумулятора давления  $\bar{P}_{\text{ВАД}}$ , предстартовых настроек БЛА  $\bar{P}_{\text{БЛА}}$  и является неизменной по причине незначительного (в пределах 3 %) воздействия на полноту совершаемой работы расширения. Исключением является объем баллона, оказывающий существенное влияние на закон тягового усилия [3]. Однако его увеличение более чем в 4 раза по отношению к объему цилиндра  $W_{\text{Б}} = 4W_{\text{ц}}$  представляется нецелесообразным по причине роста габаритов ПУ, поэтому

$$\bar{P}_O = \{\bar{P}_{\text{РТ}}, \bar{P}_{\text{ВАД}}, \bar{P}_{\text{БЛА}}\} = \left\{ \begin{matrix} R \\ T_0 \end{matrix} \right\}, \left\{ \begin{matrix} d_M \\ W_{\text{Б}} \end{matrix} \right\}, \left\{ \begin{matrix} \theta \\ \delta \end{matrix} \right\} = \text{const}, \quad (3)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $T_0$  – начальная температура газа;  $d_M$  – диаметр пневмомагистрали;  $W_{\text{Б}}$  – объем баллона;  $\theta$  – угол пуска;  $\delta$  – угол установки БЛА на направляющей.

Варьируемыми параметрами, оказывающими основное качественное и количественное влияние на целевую функцию, являются параметры трансмиссии  $\bar{P}_T$  и привода  $\bar{P}_\Pi$ . Управляемые параметры могут быть получены в результате внесения радикальных изменений в конструкцию ПУ (табл. 1). Матрица частных управляемых параметров  $\bar{P}_\chi$  имеет специфическое содержание в зависимости от конкретной конфигурации катапульты и однозначно определяет закон тягового усилия:

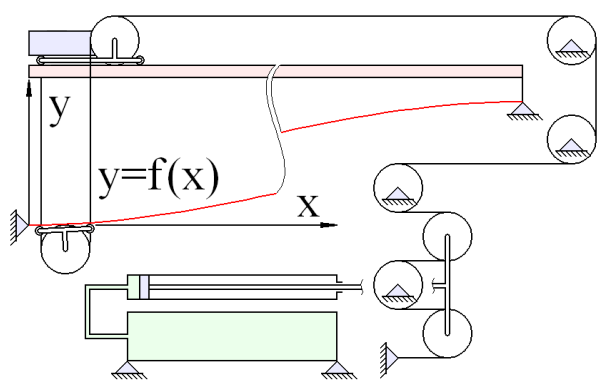
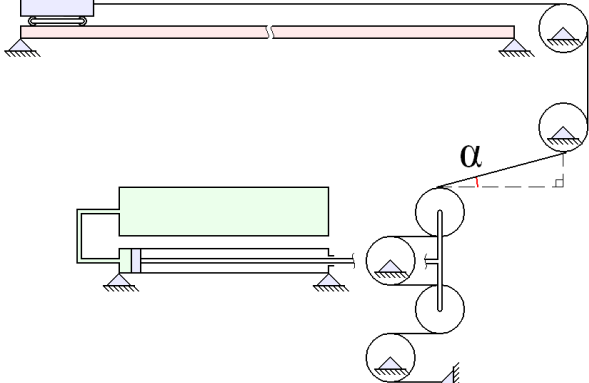
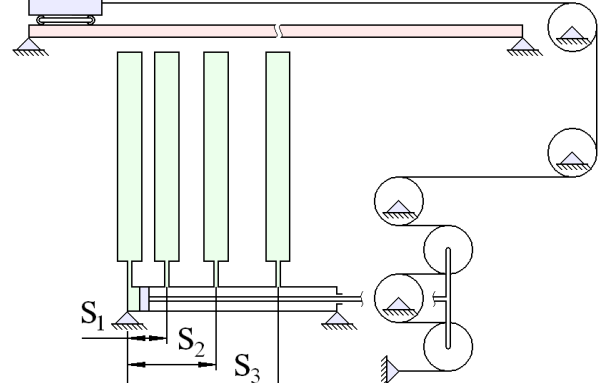
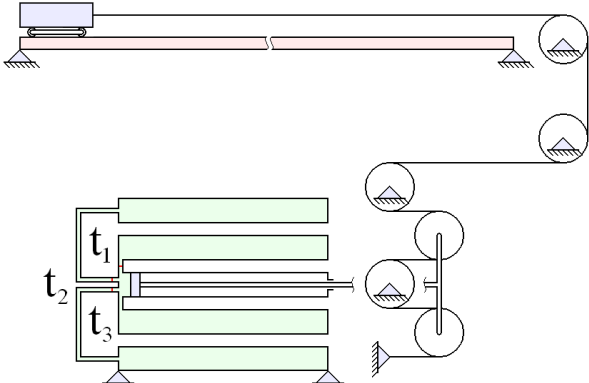
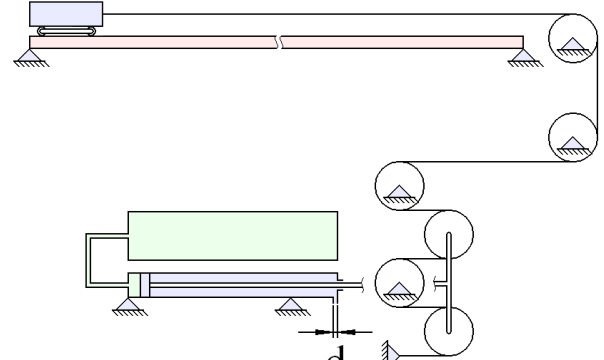
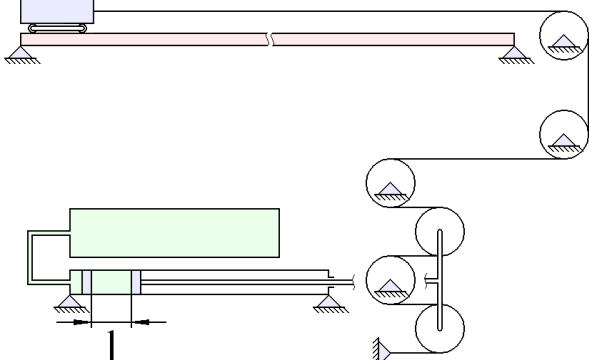
$$\bar{P}_\chi = \{\bar{P}_T, \bar{P}_\Pi\} = \text{var}. \quad (4)$$

Разработаны прогрессивные формы организации рабочих процессов ПУ: с вариаторами копирного и полиспастного типов, многоразовой системой подвода рабочего тела, пневматическим демпфером, свободным поршнем. В силу конструктивных особенностей перечисленные схемы способны обеспечить постоянный (или близкий к нему) законы распределения тягового усилия. Решение задачи оптимизации позволяют найти значение управляемого параметра, позволяющего повысить полноту совершенной работы и максимально сократить участок разгона БЛА.

В-четвертых, сформулирована физико-математическая модель (ФММ), описывающая взаимосвязи управляемого параметра и целевой функции. ФММ является комплексной и подразумевает сопряжение термогазодинамической (привода) и механической (трансмиссии) подмоделей, образующих рабочий процесс ПУ (наподобие [4]). ФММ

позволяет рассматривать процесс в расширительной машине в нестационарной пространственно-неоднородной постановке (рис. 3), что является отличительной особенностью предлагаемой концепции проектирования. БЛА рассматривается как материальная точка, для которой заданы коэффициенты  $c_x$  и  $c_y$ , а также площадь миделя.

Таблица 1 – Управляемые параметры, выражающие функцию передаточного отношения и геометрию органов газораспределения

Уравнение профиля копера на плоскости	$y(x)$	Начальное значение угла наклона троса	$\alpha$
			
Координата окна подвода дополнительной порции газа	$s_i$	Время срабатывания электрокрана	$t_i$
			
Диаметр отверстия клапана сброса давления	$d$	Расстояние между ведущим и ведомым поршнями	$l$
			

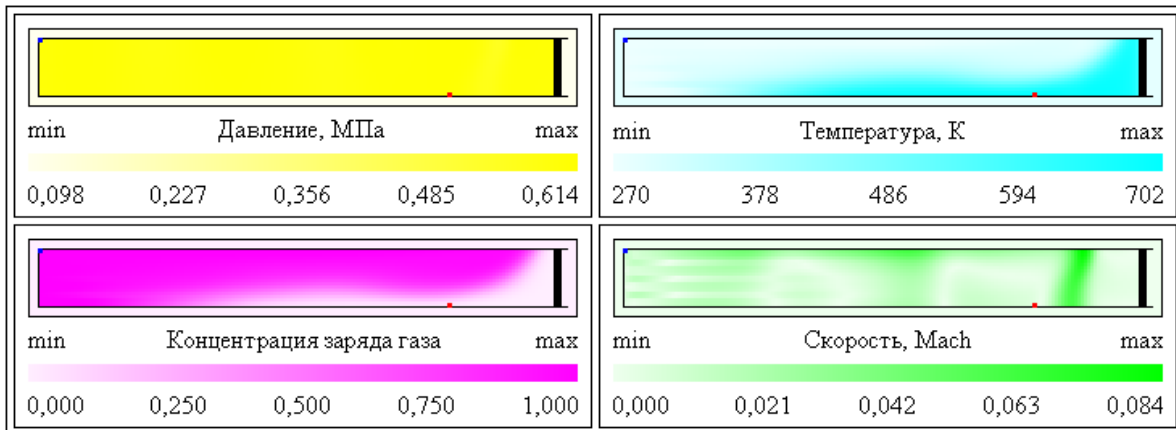


Рисунок 3 – Цветовые карты физических полей основных термогазодинамических параметров привода ПУ с многоразовой подачей рабочего тела в цилиндр

Согласно предлагаемой концепции к минимизации длины направляющей ПУ (рис. 4) ищется такое допустимое значение управляемого параметра  $\bar{\Pi}_\psi^*$  (трансмиссии или привода) при котором реализуется постоянный (или близкий к нему) закон тягового усилия, а КПЦТ стремится к максимуму, т. е. к единице  $\kappa(\bar{\Pi}_\psi^*) \rightarrow 1$ . При этом, множество допустимых решений  $\bar{\Pi}_\psi^* \in D$  задается системой ограничений типа неравенств по предельно допустимой стартовой перегрузке  $n_{x \text{ ПД}}$ , минимальной скорости ввода в полет БЛА  $V_{0 \text{ min}}$  и начальному уровню давления в баллоне  $p_{0 \text{ Б}}$ , разрешенному органами Котлонадзора:

$$\kappa(\bar{\Pi}_\psi^*) = \max_{\bar{\Pi}_\psi \in D} \kappa(\bar{\Pi}_\psi), \quad (5)$$

$$\begin{cases} n_x(x) \leq n_{x \text{ ПД}} = \text{const}, \forall x \in L; \\ V_0 \geq V_{0 \text{ min}} = \text{const}; \\ p_{0 \text{ Б}} \leq 2 \text{ МПа}. \end{cases} \quad (6)$$

Многообразные варианты численного эксперимента показали, что итерационный процесс поиска оптимального решения на объявленном множестве объектов при правильном выборе управляемого параметра  $\Pi_{\tau \vee \Pi}$  подчиняется условию регулярной сходимости  $\kappa^{k+1} > \kappa^k$ , а направление поиска в разностном приближении убывает. Таким образом, последовательность улучшаемых решений  $\kappa^k$  является фундаментальной и принадлежит пространству Банаха (рис. 5, где  $k = 0 \dots 4$ ), а применяемый метод условной параметрической оптимизации следует отнести к категории регулярного поиска.

$$\frac{\kappa^{k+1} - \kappa^k}{\left| \Pi_{\tau \vee \Pi \beta}^{k+1} - \Pi_{\tau \vee \Pi \beta}^k \right|} > \frac{\kappa^{k+2} - \kappa^{k+1}}{\left| \Pi_{\tau \vee \Pi \beta}^{k+2} - \Pi_{\tau \vee \Pi \beta}^{k+1} \right|}, \quad (7)$$

где  $k$  – номер итерации;  $\beta$  – индекс управляемого параметра.

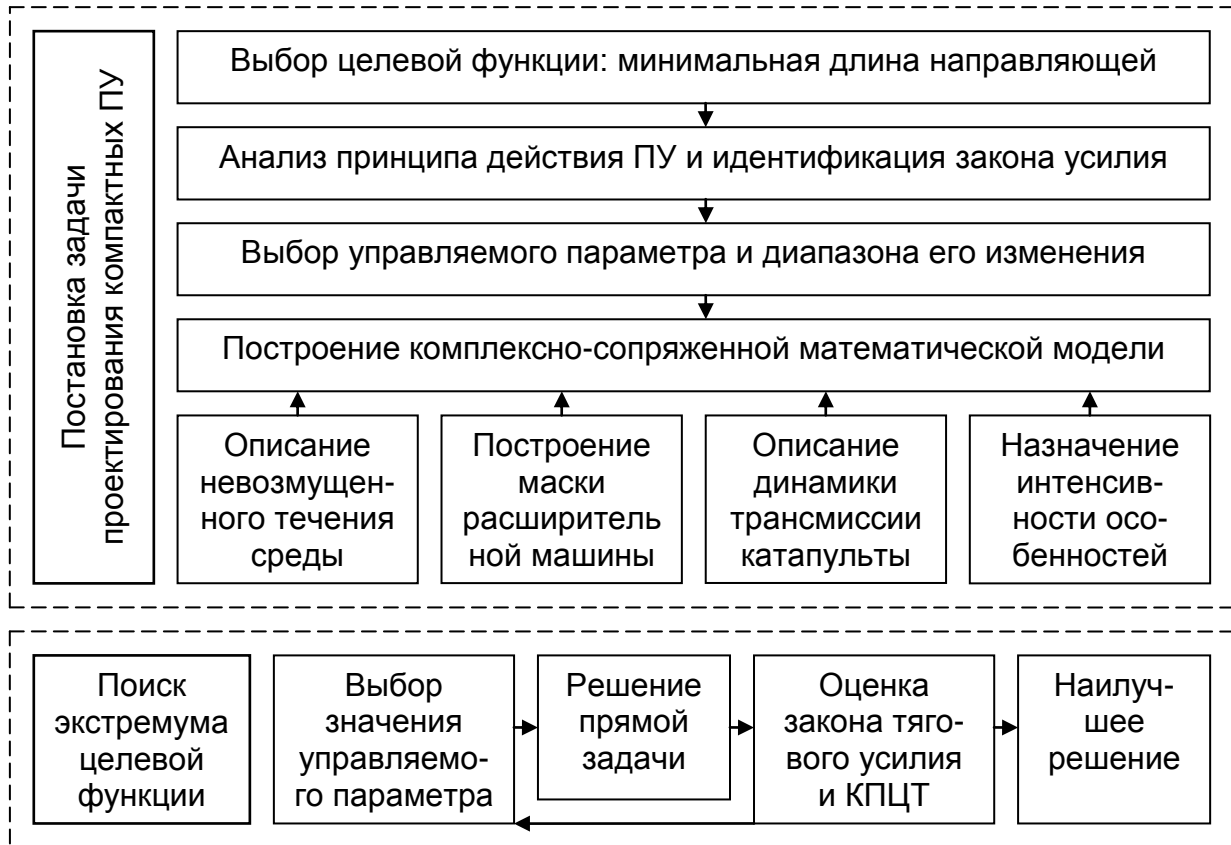


Рисунок 4 – Структурная схема концепции проектирования компактных ПУ для запуска БЛА

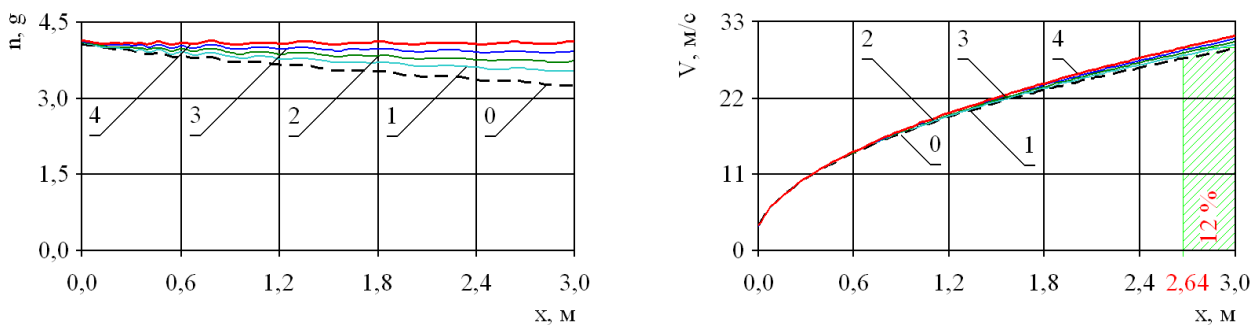


Рисунок 5 – Циклограммы стартовой перегрузки и скорости БЛА в виде итерационного процесса на примере ПУ с копиром

Рассматриваемые варианты приводов в порядке убывания уровня совершенства выстроены в виде последовательности на основании оценки КПЦТ и процентного выражения сокращения длины направляющей по отношению к стандартной конфигурации (табл. 2). ПУ на основе расширительной машины с многоразовым подводом рабочего тела вдоль цилиндра является наименее ресурсоемким по причине использования стандартных комплектующих наименее затратного коммерческого ассортимента и незначительных доработок крышки пневмоцилиндра.

Таблица 2 – Сравнение способа достижения оптимальной длины направляющей

Уровень совершенства	Тип ПУ (особенности устройства привода или трансмиссии)	КПЦТ (1)	Сокращение длины направляющей, %
1	Многоразовая подача газа вдоль цилиндра	0,89	13
2	Вариатор копирного типа с фасонным профилем	1,00	12
3	Пневмодемпер с заданным законом сопротивления	1,00	11
4	Расширительная машина со свободным поршнем	0,98	11
5	Вариатор полиспастного типа с наклонным тросом	0,98	10
6	Многоразовая подача газа в крышку цилиндра	0,89	6

Концепция проектирования компактных ПУ в составе наземного комплекса продемонстрирована на примере системы для ввода в полет мишени-имитатора КР массой 120 кг, начальной скоростью 50 м/с и предельно допустимой перегрузкой 5 g. Максимальный уровень мощности ПУ ограничивается 300 кВт и регулируется начальным уровнем давления в баллонах до предельно разрешимой величины 2 МПа. Сравнительный анализ с зарубежными образцами ПУ показал, что катапульта Р12П с многокаскадным пневмоприводом обладает глубоко не рядовыми в своем классе показателями компактности и мобильности. А именно, при аналогичных динамических характеристиках имеет направляющую 12 м, что по минимальным оценкам на 6 м меньше, чем у глубоко серийных и широко разрекламированных зарубежных образцов с однокаскадными пневматическими приводами (рис. 6).

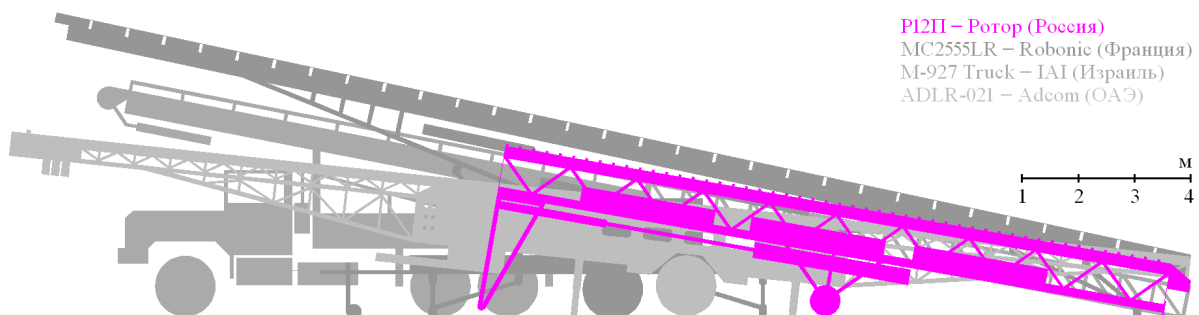


Рисунок 6 – Выраженная в габаритах направляющей оценка компактности ПУ



## Заключение

На основании единого подхода к моделированию работы тепловой расширительной машины, универсального представления динамики перемещения подвижных частей трансмиссии получена концепция проектирования ПУ в составе компактных наземных комплексов.

Концепция проектирования универсально применима к любым типам катапульт вне зависимости от типа трансмиссии и привода, так как множество частных форм организации рабочего процесса обобщается путем нормирования факторов тягового усилия.

Решение задачи параметризации на основании континуальной нестационарной ФММ позволяет получить оптимальную конфигурацию ПУ с высокой точностью и уровнем приближения к реальному образцу, в чем заключается преимущество культивируемого подхода к проектированию.

## Список использованных источников

1. Brain T. McGeer, Methods and apparatuses for launching unmanned aircraft, including releasably gripping aircraft during launch and breaking subsequent grip motion [Text] / Brain T. McGeer, Andreas H. von Flotow, Cory Roeseler // United States Patent. Patent Number: US 7,165,745 B2. Date of Patent: Jan. 23, 2007.

2. Середа, В. А. О волновом факторе в задачах оптимизации наземных пусковых устройств [Текст] / В. А. Середа // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 2 (119). – С. 20-24.

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

4. Амброжевич, М. В. Комплексное газодинамическое и механическое моделирование мотокомпрессорных воздушно-реактивных двигателей малых тяг [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.05; защищена 08.10.2004, утверждена 09.02.2005 / Амброжевич Майя Владимировна. – Х., 2004. – 186 с.

*Поступила в редакцию 23.02.2016.*

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