

УДК 629.7.085

И.С. АВИЛОВ¹, В.А. СЕРЕДА²¹ ООО «Научно–промышленные системы», КБ «Взлет», Харьков, Украина² Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Изложены способы усовершенствования рабочего процесса пневматического пускового устройства легкого беспилотного летательного аппарата (БЛА) за счет изменения закона распределения тягового усилия. В результате нескольких итераций оптимизационного процесса получена геометрия копира, обеспечивающего постоянную перегрузку при движении БЛА по направляющей. Получена кривая тормозного участка копира для безударной остановки тележек в крайней мертвой точке. Представлены динамические характеристики наземной пневматической катапульты с трансмиссией на основе вариатора копирного типа.

Ключевые слова: пусковое устройство, беспилотный летательный аппарат, пневмопривод, копир, оптимизация характеристик рабочего процесса.

Введение

Любая проектная задача в принципе предполагает какие-либо формы оптимизации рабочего процесса соответствующих объектов техники. Сложившиеся в области легких беспилотных авиационных комплексов (БАК) стереотипы характеризуются неравноценностью проектной проработки основных элементов, не адекватной их значимости в составе данной технической системы в целом. Так, например, широко распространенные пневматические пусковые устройства (ПУ) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) имеют сходные конструктивные решения и, вследствие этого – аналогичные недостатки. Известно [1], тем не менее, что постоянное передаточное отношение в трансмиссии пневматических катапульт не отвечает условию получения благоприятных стартовых характеристик БЛА. Фактически наблюдается два заброса усилия в момент отражения от поршня волны сжатия, а затем его постепенное торможение до следующего прихода волны. Первый пик давления имеет место при впрыске сжатого воздуха в рабочий цилиндр, а второй – при достижении поршнем крайнего верхнего положения вследствие его замедления. Между двумя указанными моментами наблюдается вялое заполнение камеры газом без образования волн высокой интенсивности. Согласно классификации [2], такой закон распределения тягового усилия относится к регрессивному, не отличающемуся высокой эффективностью. Его основной недостаток заключается в резком падении перегрузки на некотором участке направляющей, что влечет необходимость

увеличения ее длины с целью получения заданных динамических характеристик БЛА при старте.

В рамках обозначенной проблематики предложен подход к проектированию, обеспечивающий на оптимизацию динамических характеристик наземной ПУ (НПУ) пневматического типа.

Принцип действия вариатора

Для постановки задачи оптимизации необходимо выбрать комплексный критерий качества объекта проектирования, зависящий от основных варьируемых параметров, который должен достигать экстремального значения. Применительно к НПУ, целью оптимального проектирования является придание БЛА необходимой скорости схода при допустимых значениях стартовой перегрузки на наименьшей длине направляющей. Наиболее эффективный режим разгона БЛА реализуется при постоянном значении перегрузки. Поэтому в качестве целевой функции выбирают максимальную скорость движения БЛА по направляющей, соответствующую постоянному значению стартовой перегрузки.

Примером успешного решения проблемы обеспечения постоянного закона тягового усилия является принцип действия пневматической катапульты фирмы Boeing (рис. 1) для запуска легкого БЛА Scan Eagle [3] с переменным передаточным числом трансмиссии. В основе данной конструкции, кроме стандартного набора конструктивных элементов НПУ (пневмопривод, гибкая трансмиссия – полиспаг, направляющая и стартовая тележка) используется вариатор копирного типа.

Копир представляет собой дополнительную направляющую с фасонным профилем [3], которая позволяет за счет сокращения длины троса воспроизводить необходимый закон движения БЛА по основной направляющей. Подобное усовершенствование конструкции обеспечивает плавную передачу усилия от привода к стартовой тележке БЛА, минуя резкие скачки и «провалы» давления в расширительной камере.



Рис. 1 Пневматическая катапульта фирмы Boeing с вариатором копириного типа для запуска БЛА ScanEagle

Кинематика рассматриваемой в исследовании катапульти восстановлена на основании реконструкции кинематической схемы НПУ фирмы Boeing [3]. С целью получения геометрии копира, соответствующей постоянному закону распределения усилия пневматической катапульти F , передающегося на основную стартовую тележку, запишем уравнение динамики трансмиссии. При его составлении воспользуемся уравнением Лагранжа II рода, а также будем задаваться известной величиной угла наклона копира $\alpha = \alpha(t)$. Дифференциальное уравнение, описывающее движение подвижных частей катапульти имеет вид:

$$c_1(\alpha)\ddot{s} + c_2(\alpha)\dot{s} + c_3(\alpha)s = c_4(\alpha, F), \quad (1)$$

где $c_1(\alpha)$, $c_2(\alpha)$, $c_3(\alpha)$, $c_4(\alpha, F)$ – известные функции геометрических, инерционных и динамических характеристик подвижных звеньев НПУ.

Последующая замена перемещения $s = e^{ct}$, скорости $\dot{s} = ce^{ct}$ и ускорения поршня $\ddot{s} = c^2e^{ct}$ позволяет преобразовать выражение (1) к квадратному уравнению:

$$c_1(\alpha)c^2 + c_2(\alpha)c + c_3(\alpha) - c_4(\alpha, F) = 0, \quad (2)$$

где c – константа; t – время.

Определяемое на основании (2) положение подвижных частей катапульти является условием

сопряжения с газотермодинамической составляющей комплексно-сопряженной модели НПУ [4–6].

Постановка задачи оптимизации

Решение уравнения (2) при постоянном значении угла наклона копира, равного 0° , позволяет получить штатный режим работы катапульти (без использования устройств, компенсирующих падение перегрузки), идентичный [4]. Данное решение следует рассматривать в качестве нулевой итерации и использовать для подтверждения достоверности результатов их корреляцией с данными натурального эксперимента.

Для полученного таким путем закона распределения тягового усилия, проведем среднюю линию из условия равенства площадей суммарного импульса относительно прямой (рис. 2). Для достижения усредненного значения силы тяги привода в каждый момент времени работы катапульти введем в пространстве p функций F и τ_k (где τ_k – время работы НПУ) норму среднего суммарного импульса усилия привода:

$$\|\bar{F}\tau_k\| = |\bar{F}|\tau_k. \quad (3)$$

По аналогии с (1) вводится норма неравновесного состояния импульса усилия привода:

$$\|(F_{\pm} - \bar{F})\Delta\tau_k\| = |F_{\pm} - \bar{F}|\Delta\tau_k, \quad (4)$$

где $\Delta\tau_k$ – интервал постоянства знака.

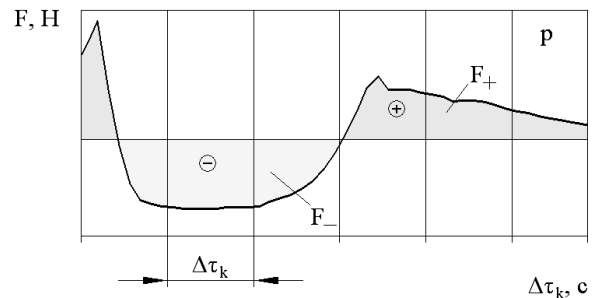


Рис. 1. Нормирование тягового усилия НПУ для постоянного угла наклона копира $\alpha = 0^\circ$

Каждая последующая итерация имеет целью сокращение значений неравновесного суммарного импульса усилия привода $F_{\pm}\Delta\tau_k$ по отношению к предыдущему. Отсюда условие сходимости итерационного процесса запишется в следующем виде:

$$\varepsilon = \frac{\sum \|(F_{\pm} - \bar{F})\Delta\tau_k\|}{\|\bar{F}\tau_k\|} \leq \varepsilon_3, \quad (5)$$

где $\varepsilon_3 \rightarrow 0$ – заданный допуск неравномерности усилия.

В качестве компромисса между приемлемой точностью вычислений и расчетным временем, в ка-

честве величины допуска ε_3 примем значение стартовой перегрузки, отвечающее равнозамедленному движению БЛА $>0,1 g$.

Очередное распределение тяги привода (n -тая итерация) катапульты служит основанием для получения геометрии копира, позволяющего найти следующую закон усилия ($n+1$ итерация) и т.д.

Для нахождения углов наклона касательной к копиру α , соответствующих постоянному значению перегрузки при заданном законе усилия, воспользуемся уравнением (1). Значения перемещения s , скорости \dot{s} и ускорения \ddot{s} поршня получим исходя из условия обеспечения постоянной эталонной перегрузки $n_x = 3 g$. При последующих итерациях ($n > 1$) в качестве задаваемой перегрузки выбирается сумма эталонной и недостающей до нее перегрузки, полученной в предыдущей итерации $n-1$.

Алгоритм численного решения уравнения (2) основывается на итерационном принципе, согласно которому i -тая компонента $(k+1)$ -го приближения вычисляется по формуле:

$$\alpha_i^{(k+1)} = \sum_{j=1}^{i-1} c_{ij} \alpha_j^{(k+1)} + \sum_{j=1}^n c_{ij} \alpha_j^{(k)} + d_i, \quad i=1, n. \quad (6)$$

где c_{ij} – нелинейные коэффициенты уравнения (2); $d_i = \alpha^{(0)}$ – начальное приближение.

В конце каждого итерационного шага уточняется динамика НПУ путем ввода в модель [1] значений $\alpha^{(k+1)}$. В предположении регулярного характера сходимости процесса вычислений в качестве условия завершения итераций принимается:

$$\|\alpha^{(k+1)} - \alpha^{(k)}\| \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где $\varepsilon = 10^{-3}$ – точность, целесообразно оправданная погрешностью механической обработки копира.

Таким образом, оптимизационный процесс нахождения геометрии вариатора для постоянного закона стартовой перегрузки сводится к пошаговой декомпозиции на основе комплексно-сопряженной газотермодинамической и механической модели НПУ [1] для отыскания уточненного профиля копира на протяжении одной итерации.

Результаты исследований

Ниже представлена динамика изменения основных характеристики катапульты (рис. 3 – 5), а также геометрия вариатора (рис. 6), для каждой из итераций процесса оптимизации. Пунктирной линией указаны характеристики при постоянном $\alpha = 0^\circ$.

Изменение передаточного числа трансмиссии не вносит значительных качественных изменений в закон распределения тягового усилия системы стар-

та (рис. 3), т.е. основное воздействие вариатор оказывает не на работу пневмопривода, а на динамические характеристики стартовой тележки с БЛА. Впрочем установлено, что каждое последующее изменение формы копира приводит к увеличению временного промежутка между забросами давления в связи с уменьшением нагрузки на привод. По этой причине последнее приближение формы вариатора приводит к полному исчезновению второго пика давления. Следовательно, пневматические катапульты с вариаторами копирного типа могут работать при пониженных уровнях рабочих давлений.

Значительно влияние на стартовую перегрузку (рис. 4) оказывают даже самые незначительные изменения в геометрии копира. Но связи с тем, что проектирование копира осуществляется из условия обеспечения неразрывности кинематических связей, его форма не должна иметь резких переходов. По этой причине, получить абсолютно линейный характер перегрузки не представляется возможным. Незначительные колебания перегрузки в пределах $0,2 g$ считаются допустимыми, как они не оказывающие существенного влияния на динамические характеристики.

Как видно из рис. 5, введение копира радикально меняет характер набора скорости БЛА при разгоне. В конечном итоге закон изменения скорости становится практически линейным. При сходе с направляющей скорость БЛА увеличивается на 10 м/с. Таким образом, копир позволяет укоротить участок разгона более чем на 1 м при неизменной скорости схода.

Конечная форма копира (рис. 6), несмотря на отчетливо выраженные перепады давления в расширительной машине пневмопривода НПУ, имеет плавные линии без резких переходов, что позволяет избежать заклинивания или нарушения кинематических связей дополнительной тележки при движении по направляющей копира. Установлено, что каждое последующее приближение не приводит к резким изменениям геометрии вариатора. Из этого следуют повышенные требования к точности обработки направляющей копира, так как даже небольшие изменения угла наклона вызывают значительные отклонения динамических характеристик от расчетных.

Разъединение гибкой кинематической связи между двумя автономно движущимися тележками конструктивно трудно реализуется. Отказ от сброса тележек по окончании работы НПУ требует использования тормозного участка на направляющей и копира соответственно. Уменьшения длины тормозного участка, предшествующего в передней мертвой точке, можно добиться наращиванием дополнительного профиля копира, обеспечивающего равнозамедленное движение тележек после схода БЛА.

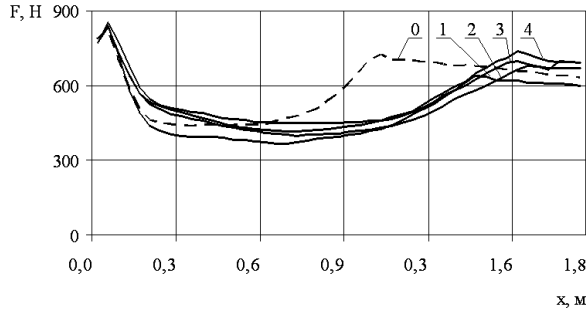


Рис. 3. Законы распределения тягового усилия при различных формах копира

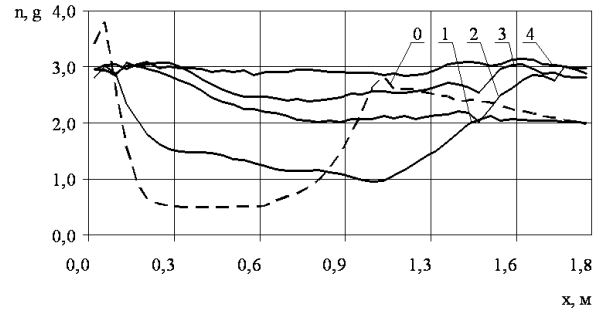


Рис. 4. Стартовая перегрузка

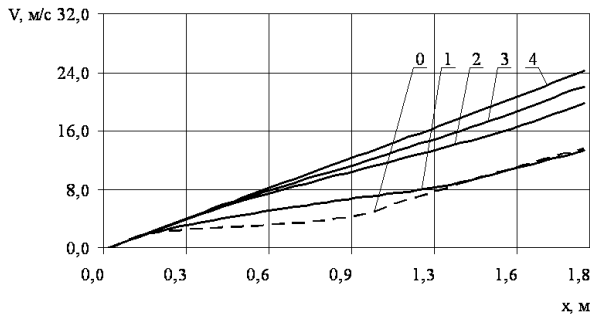


Рис. 5. Изменение скорости БЛА при движении по направляющей

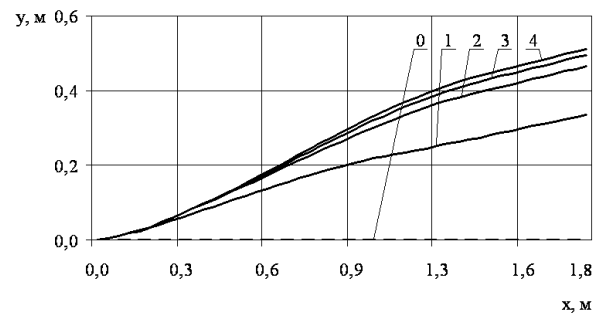


Рис. 6. Геометрия копира при различных итерациях

Соответствующий участок копира, может быть спрофилирован путем решения уравнения динамики трансмиссии, составленного аналогично (1) на основании уравнения Лагранжа II рода при условии сокращения стартовой перегрузки до нулевого значения по линейному закону.

На рис. 7 представлена окончательная форма копира для решения двух важных проектных задач:

- обеспечения наилучших динамических характеристик БЛА;
- реализации безударной остановки тележки.

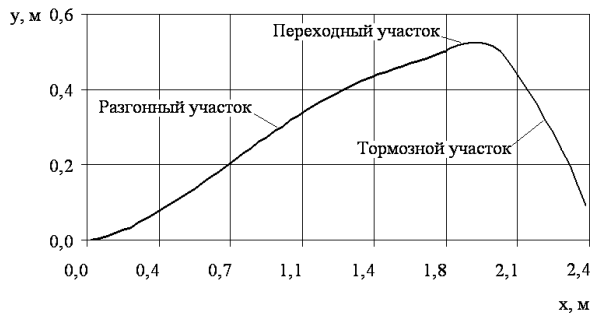


Рис. 7. Профиль вариатора копирного типа для реализации оптимального разгона БЛА и безударной остановки тележки

Заключение

Трансмиссии с вариатором копирного типа обеспечивают возможность настройки катапульты

на требуемый закон перегрузки без изменения конструкции расширительной машины и сглаживания забросов тягового усилия. Это позволяет сделать соизмеримыми значения перегрузки в момент старта и в свободном полете.

В результате устраняется необходимость применения БРЭО в дорогостоящем ударо-виброзащитном исполнении.

В приведенном примере необходимая скорость ввода в полет БЛА (24 м/с) придается на стартовом участке меньшей длины (2 м), т.е. укороченном на 1 м (1/3). В свою очередь, отказ от сброса стартовой тележки требует введения дополнительного тормозного участка (0,4 м). В связи с этим заметного сокращения длины направляющей не наблюдается. Тем не менее, в целом совершенство катапульты значительно повышается по причине улучшения динамических характеристик и условий эксплуатации ввиду исключения сектора безопасности в зоне падения стартовой тележки.

Вышеуказанные возможности подразумевают наличие специальных методов проектирования, базирующихся на достижениях в области информационных технологий. Предложенный метод разработки пневматических НПУ с вариаторами копирного типа в составе полиспадной трансмиссии позволяет получить оптимальные динамические характеристики фазы старта БЛА и реализуется ПЭВМ ординарного класса.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Сведения о НПУ для БЛА «Scan Eagle» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.boeing.com/defense-space/military/scaneagle/index.html>.
4. 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.
5. Амброжевич А.В. Комплексная траекторная модель летательного аппарата / А.В. Амброжевич, В.А. Серeda // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 5 (52). – С. 40-44.
6. Серeda В.О. Метод формування вигляду наземних пускових пристроїв безпілотних літальних апаратів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.06 / В.О. Серeda / Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С. Жуковського: Х. – 2009. – 20 с. – укр.
7. Авилов И.С. Критериальные оценки энергетического совершенства пусковых устройств легких беспилотных летательных аппаратов / И.С. Авилов, А.В. Амброжевич, В.А. Серeda // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 2 (38). – С. 15-19.

Поступила в редакцию 10.11.2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧНОГО НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО ПРИСТРОЮ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

І.С. Авілов, В.О. Серeda

Викладено способи вдосконалення робочого процесу пневматичного пускового пристрою легкого безпілотного літального апарату (БЛА) за рахунок змінення закону розподілення тягового зусилля. Внаслідок декількох ітерацій оптимізаційного процесу отримано геометрію копіру, який забезпечує постійне перевантаження при русі БЛА по напрямній. Отримана крива тормозної ділянки копіру для безударної зупинки візків у крайній мертвій точці. Представлено динамічні характеристики наземної пневматичної катапульти з трансмісією на основі варіатора копірного типу.

Ключові слова: пусковий пристрій, безпілотний літальний апарат, пневмопривід, копір, оптимізація характеристик робочого процесу.

OPTIMIZATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PNEUMATIC GROUND LAUNCHING DEVICE OF UNMANNED AERIAL VEHICLE

I.S. Avilov, V.O. Sereda

Ways of improvement of working process of a pneumatic launching device unmanned aerial vehicle (UAV) are stated due to change of the law of distribution of traction effort. As a result of several iterations of optimization process the geometry guide block is received, providing a constant overload at movement UAV on guiding. The curve of a brake site guide block for a unaccented stop of trolley in an extreme dead point is received. Dynamic characteristics of a ground pneumatic catapult with transmission are submitted on the basis of a variator guide block type.

Key words: launching device, unmanned aerial vehicle, air-powered drive, guide block, optimization of characteristics of working process.

Авилов Игорь Сергеевич – директор, главный конструктор ООО «Научно-промышленные системы» КБ «Взлет», Харьков, Украина, e-mail: Kbvzlet@mail.ru.

Серeda Владислав Александрович – канд. техн. наук, вед. инженер кафедры ракетных двигателей факультета ракетно-космической техники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sereda_vlad@ukr.net.