

Исследование динамических характеристик наземной катапульты для запуска беспилотного летательного аппарата

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

Представлен математический аппарат для общего исследования динамических характеристик наземных пусковых устройств (НПУ) по циклограммам, полученным в натурном или численном экспериментах. Рассмотрены зависимости изменения скорости и перегрузки беспилотного летательного аппарата (БЛА) от положения на направляющей. Изложены физическая трактовка особых точек и участков кривых с точки зрения их влияния на параметры старта, состояние навигационного комплекса и прочностные свойства конструкции планера БЛА. Отмечены критичные режимы работы привода катапульты и их взаимосвязь с начальными параметрами ввода в полет БЛА.

Ключевые слова: наземное пусковое устройство, беспилотный летательный аппарат, циклограммы скорости и перегрузки.

Введение

Прогрессирующая миниатюризация бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) стала причиной появления беспилотных летательных аппаратов (БЛА) обширного диапазона взлетных масс. В свою очередь, возникла острая потребность в наземных пусковых устройствах (НПУ) различной мощности для ввода в полет соответствующих БЛА. Индивидуальные летные характеристики каждого запускаемого аппарата создают конструктивные затруднения в создании универсального НПУ для всех типов БЛА, что привело к появлению приводов, работа которых базируется на различных физических принципах - накоплении потенциальной энергии эластичных элементов, поднятого груза, раскрученного маховика, сжатого газообразного тела и т.д. [1].

По принципу действия приводы катапульт относятся к машинам импульсного действия, т.е. для них характерна высокая интенсивность процесса, длящегося короткий промежуток времени. Но в отличие от близких по идеологии артиллерийских систем к катапультным устройствам, кроме всего прочего, предъявляется требование по ограничению силового воздействия на запускаемый объект. С целью унификации режимов работы приводов пусковых устройств для запускаемых в широком диапазоне масштабного фактора объектов используется безразмерная величина – предельно допустимая стартовая перегрузка. Выполнение требования по ограничению стартовой перегрузки является критичным для всех без исключения вводимых в полет транспортных систем (в т.ч. БЛА), оснащенных сложным БРЭО.

Тем не менее приведенное ограничение не должно сказываться на выполнении остальных требований к стартовым характеристикам, например, придания минимальной скорости ввода в полет БЛА. Достижение последней в условиях строго лимитированной перегрузки может быть обеспечено на значительном разгонном участке, что приводит к увеличению длины направляющей [2].

Вышеприведенные построения свидетельствуют о неразрывной взаимосвязи между характеристиками БЛА и привода. Таким образом, актуальной выглядит задача создания математического аппарата для трактовки

динамических характеристик привода с целью их согласования со стартовыми параметрами запускаемого БЛА.

Исследуемая функция

Материалом, характеризующим ход развития процесса ввода в полет БЛА, служит циклограмма динамических параметров старта, полученная в натурном или численном экспериментах (рис. 1, 2). Для унификации приводов различной физической природы целесообразно использовать циклограмму перегрузки, воздействующей на БЛА при его движении по направляющей. В натурном эксперименте эти данные могут быть автоматически получены с помощью акселерометров, входящих в состав инерциальных навигационных систем БЛА, а в численном – путем решения уравнения динамики движения подвижных частей НПУ.

Дифференциальное уравнение перемещения подвижных частей трансмиссии в общем виде выглядит следующим образом:

$$\ddot{x} = f(t, x), \quad (1)$$

где x – координата БЛА на направляющей;

$f(t, x)$ – известная функция геометрических, инерционных и динамических характеристик подвижных звеньев НПУ.

Известны массогабаритные характеристики подвижных частей катапульты, входящие в нелинейную функцию $f(t, x)$. При этом изменением массы БЛА за счет выработки топлива при движении по направляющей пренебрегаем. Основное влияние на характер изменения функции оказывает тяговое усилие, создаваемое приводом расширительной машины и зависящее от изменения координаты x .

Рассмотрим функцию $x(t)$, служащую решением уравнения (1), определенную на некотором конечном промежутке $[0, L]$, где L – длина направляющей. Ее первая производная имеет физический смысл скорости движения БЛА $V = \dot{x}(t)$ по направляющей и является монотонно-возрастающей функцией (рис. 3). Угол наклона касательной α к графику скорости позволяет сделать вывод об эффективности использования участка разгона.

Оптимальным вариантом, обеспечивающим выполнение поставленной задачи, служит условие $f(t, x) = \text{const} = C_\alpha$, где C_α для рассматриваемого класса НПУ лежит в пределах C_α . В этом случае перегрузка постоянна и скорость будет линейной функцией с постоянным углом наклона α , тангенс которого $\text{tg} \alpha = C_\alpha$.

В случае, когда $f(t, x)$ не является константой, анализ угла наклона касательной к графику скорости позволяет сделать некоторые предварительные оценки. Если $\text{tg} \langle f(t, x) \rangle > \text{tg} \left\langle \frac{V_{\max}}{t_c} \right\rangle$, где t_c – время схода аппарата с катапульты, то это свидетельствует о выходе за область допустимых значений стартовой

перегрузки, что может привести к отказу БРЭО. Если $tg\langle f(t, x) \rangle < tg\left\langle \frac{V_{\max}}{t_c} \right\rangle$, то

это говорит о снижении действующей на БЛА перегрузки ниже номинального значения. Такое положение может привести к чрезмерному увеличению разгонного участка с целью достижения необходимого значения скорости ввода в полет при общем характере падения перегрузки.

График ускорения $a = \ddot{x}(t)$ имеет более сложный характер изменения: ему присущи как локальные изломы, так и глобальные выпуклости–вогнутости. Данные изломы указывают на то, что присутствуют производные от функции $x(t)$ выше второго порядка. Эти производные свидетельствуют о том, что аппарат при движении испытывает рывки. В дальнейшем для удобства анализа перейдем от зависимости \ddot{x} к коэффициенту перегрузки $n = n(x)$, демонстрирующему, во сколько раз данное ускорение больше ускорения свободного падения.

Высокая интенсивность волнового процесса [3] в приводе расширительной машины приводит к значительному числу локальных изломов (см. рис. 1 и 2), которые затрудняют оценку общего характера изменения ускорения. Использование метода наименьших квадратов позволяет провести кривую, определяющую общий характер гладкости функции (рис. 4).

Угол наклона касательной α к кривой $n = n(x)$ больше 0° свидетельствует об ускоренном характере движения БЛА по направляющей либо недопустимом превышении стартовой перегрузки. В случае, когда угол наклона касательной принимает отрицательные значения ($\alpha < 0^\circ$), движение становится замедленным и работа привода на исследуемом участке циклограммы становится неэффективной (рис. 5).

Кроме того, среднеквадратичная кривая перегрузок может иметь точки перегиба – точки (p), в которых направление вогнутости (выпуклости) меняется на противоположное. Непрерывно дифференцируемая на промежутке $x \in [0, L]$ функция $n = n(x)$ может иметь как глобальные, так и локальные экстремумы – максимумы (M) и минимумы (m) [4].

Наличие экстремумов и точек перегиба свидетельствует о радикальном изменении режимов работы привода, которые приводят к ускорению или замедлению БЛА, что в обоих случаях говорит об отклонении от эффективных стартовых режимов работы. Подобный макроанализ циклограммы перегрузок применим для процессов с сильными осцилляциями ускорения и позволяет выявить общий характер изменения параметров расширительной машины.

Производная функция $n = n(x)$ (рис. 6) претерпевает конечные разрывы в точках изломов, т.е. $\lim_{x \rightarrow -a} n'(x) \neq \lim_{x \rightarrow +a} n'(x)$.

Выделим между изломами участки монотонности, на которых функция возрастает ($n(x_2) > n(x_1)$) или убывает ($n(x_2) < n(x_1)$) при любых $x_1 < x_2$ (см. рис. 6). Участок монотонного возрастания функции $n(x)$ свидетельствует о положительном силовом балансе трансмиссии: привод расширительной машины создает положительное тяговое усилие ввиду прихода на рабочую поверхность

поршня волны сжатия. В описанном участке между изломами наблюдается кратковременный рывок до отражения следующей волны.

Участок монотонного убывания функции $n(x)$ объясняется приходом на поршень волны разряжения и возникновением вследствие этого кратковременного отрицательного тягового усилия.

Возможен также случай уравнивания давления расширения и противодействия расширительной машины, при котором тяговое усилие становится равным нулю. При этом движение будет определяться инерционными силами и зависеть от характера протекания предыдущего процесса.

В рассмотренных случаях не возникает изменения направления движения объекта, как в случае вибрации, которое может повлечь за собой выход из строя оборудования. В связи с вышеизложенным можно констатировать, что изменение знака тягового усилия не носит критического характера.

Ограниченное изменение значений функции на каждом временном шаге свидетельствует о конечных величинах перегрузки в промежутках между изломами, т.е. о работе НПУ в допустимых пределах.

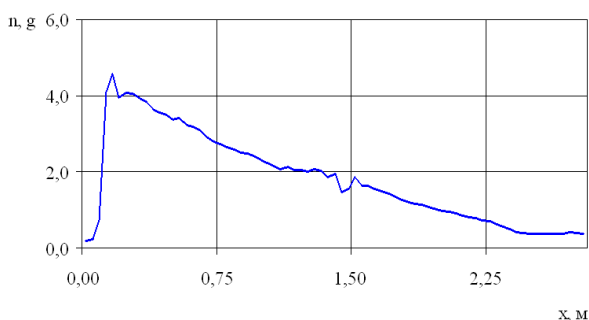


Рис. 1. Показания бортового самописца БЛА «Альбатрос–4К» при старте с помощью НПУ на основе эластичных элементов

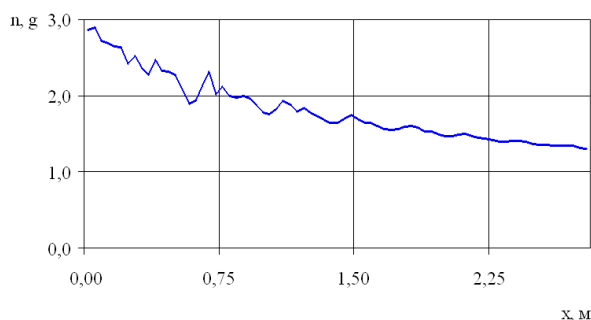


Рис. 2. Результаты численного исследования пневматического НПУ для БЛА «Ремез–3У»

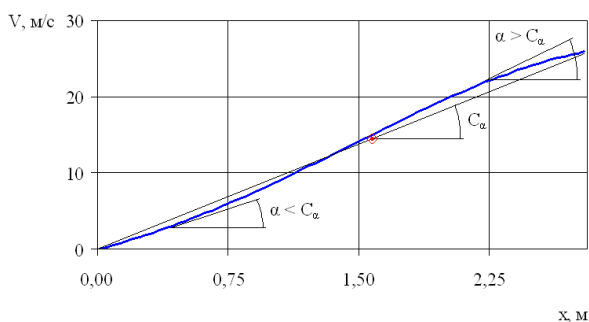


Рис. 3. Характер изменения скорости БЛА при движении по направляющей

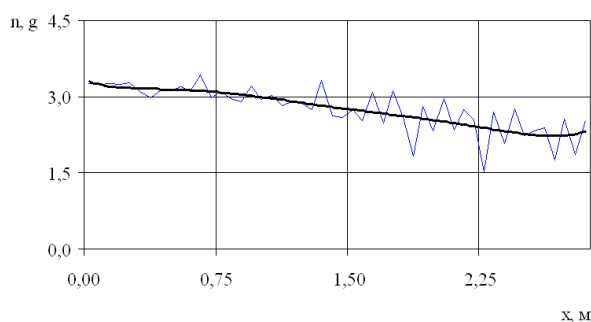


Рис. 4. Кривая наименьших квадратов для циклограммы перегрузок вакуумного НПУ [3]

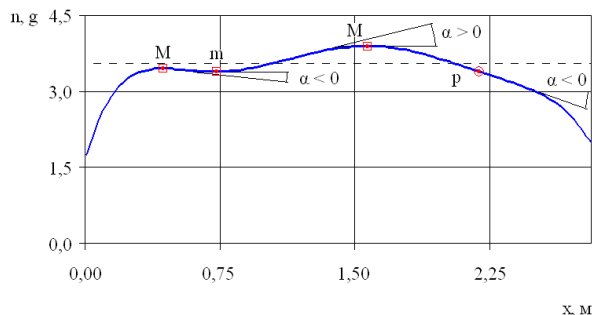


Рис. 5. Схема для выявления характера разгона БЛА на примере циклограммы перегрузок реактивной тележки

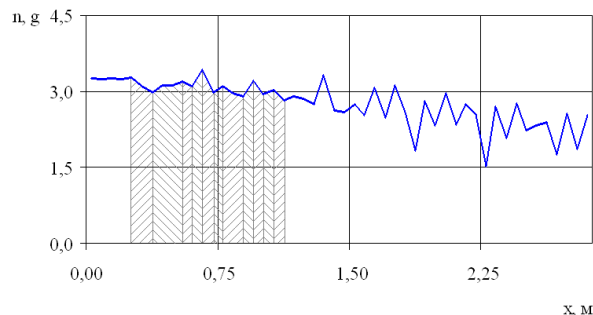


Рис. 6. Выделение участков монотонного возрастания и убывания функции перегрузки

Заключение

Описанная методика позволяет отклассифицировать результаты численного исследования или какое-либо предлагаемое решение, разбив на определенные интервалы циклограммы скорости и перегрузки.

Скорость и ускорение БЛА как функции положения на направляющей являются непрерывными. При этом производная от перегрузки (рывок) – кусочно-непрерывная функция с разрывами в местах отражения волн разряжения-сжатия, наблюдаемых при работе расширительной машины НПУ.

Конечные разрывы функции $n'(x)$ не отражаются фатальным образом на механических характеристиках БРЭО.

Идеальным является линейный закон стартовой перегрузки при $n_n = const$ с минимальным числом перегибов и изломов, который позволяет получить линейный характер набора скорости БЛА и придание V_{min} на минимальной длине разгонного участка.

Список литературы

1. Серета, 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 / Серета Владислав Олександрович. – Х., 2009. – 176 с.
2. Серета, В.А. Классификация законов распределения тягового усилия наземных пусковых устройств беспилотных летательных аппаратов [Текст] / В.А. Серета // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 4 (71). – С. 63–66.
3. Серета, В.А. Комплексно-сопряженная модель вакуумного наземного пускового устройства легкого беспилотного летательного аппарата / В.А. Серета // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 3 (80). – С. 12–15.
4. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. [Текст] И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.–Л.: ОГИЗ, 1945. – 556 с.

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

Поступила в редакцию 20.10.11

Дослідження динамічних характеристик наземної катапульти для запуску безпілотного літального апарата

Подано математичний апарат для загального дослідження динамічних характеристик наземних пускових пристроїв (НПП) за циклограмами, отриманими в натурному та числовому експериментах. Розглянуто залежності зміни швидкості та перевантаження безпілотного літального апарата (БЛА) від положення на напрямній. Наведено фізичне трактування особливих точок і ділянок кривих з точки зору їхнього впливу на параметри стратарту, стану навігаційного комплексу та міцнісні властивості конструкції планера БЛА. Відзначено критичні режими роботи привода катапульти та їхній вплив на початкові параметри вводу в політ БЛА.

Ключові слова: катапульта, циклограма швидкості та перевантаження, монотонно зростаюча та спадна функції, розрив, кусково–неперервна функція.

Research of dynamic characteristics of a land catapult for the launch unmanned aircraft vehicle

The mathematical apparatus for the general research of dynamic characteristics of ground launching device (GLD) on cyclogramme, received in natural and numerical experiments is presented. Dependences of change of speed and an overload of a unmanned aircraft vehicle (UAV) from position on the guide are considered. The physical treatment of special points and sites of curves from the point of view of their influence on start parameters, a condition of a navigating complex and strength properties of a design of glider UAV is stated. Critical operating modes of a drive of a catapult and their influence on initial parameters of input in flight UAV are noted.

Keywords: catapult, cyclogramme, speeds and the overloads, monotonously increasing and decreasing function, rupture, sectionally continuous function.