

УДК 623.418.4

Матричная модель упругих систем старта

А. А.Твердохлеб .

Аннотация

Разработана обобщенная модель систем старта авиационных средств поражения в виде универсальной матричной модели, позволяющей единообразно описывать упругие (жесткостные) свойства пусковой установки при моделировании процесса старта авиационного средства поражения. При этом исследованы особенности и свойства матриц жесткости, позволяющие осуществлять их преобразования, необходимые при моделировании снятия или наложения дополнительных механических связей, и разработана методика определения коэффициентов матриц жесткости с использованием метода статического расчета конструкций.

Ключевые слова:

Авиационное катапультное устройство; пусковые установки; средства поражения; матричная модель

Введение

Существенную роль в обеспечении безопасного отделения авиационного средства поражения (АСП) от самолета-носителя (СН) играет пусковая установка. Ее назначение состоит в формировании благоприятных с точки зрения обеспечения безопасности отделения АСП начальных параметров свободного движения (полета) АСП относительно СН, называемых параметрами отделения. К ним относятся линейные и угловые параметры движения АСП – линейная скорость центра масс (ц.м.), угол и угловая скорость корпуса авиационных средств поражения, приобретаемые АСП в процессе движения на пусковой установке.

В процессе проектирования авиационное катапультное устройство (АКУ) в соответствие с параметрами АСП (геометрическими, инерционными, упругими и др.),

режимами зона боевого применения самолета-носителя и диапазоном изменения потребных значений параметров отделения решаются следующие задачи:

- выбирается кинематическая схема АКУ (механизма),
- определяются параметры силового (пневматического или пиротехнического) привода для механизма катапультирования (МК) АКУ,
- определяются конструктивно-силовые параметры элементов, замков и кареток держателей и т.д.

Основное внимание на современном уровне развития вычислительной техники уделяется расчетному этапу отработки конструкции проектируемой АКУ. При этом математическое описание АКУ существенно усложняется ввиду того, что кратковременный процесс катапультирования характеризуется большой величиной усилий в элементах системы «АКУ — АСП» и, следовательно, заметными упругими деформациями. В результате этого, изменение в процессе катапультирования параметров движения, и прежде всего угловой тангажной скорости АСП $\omega_z(t)$, в реальной упругой системе существенно отличается от прогнозируемого с помощью классической теории механизмов с жесткими звеньями. Поэтому модели упругих АКУ традиционно основываются на уравнениях Лагранжа 2-го рода, учитывающих потенциальную энергию упругой деформации кинематических звеньев МК.

Для традиционного описания относительного движения АСП, соединенной с механизмом катапультирования, используется самолетная система координат, которая в общем случае неинерциальна. Положение АСП в этой системе координат характеризуется совокупностью декартовых координат её центра масс x_c, y_c и угла тангажа \mathcal{Q}_z :

$$x = \{x_c, y_c, \mathcal{Q}_z\}^T$$

В зависимости от кинематической схемы и конструктивных особенностей АКУ традиционный процесс создания ее математической модели может оказаться длительным, трудоемким и требующим высокой квалификации разработчика модели.

Существенного сокращения финансовых затрат и времени на разработку математических моделей для расчета и сравнительного анализа особенностей альтернативных конструкций можно достичь за счет использования обобщенных моделей упругих АКУ. Она не привязана к определенной конструкции и позволяет единообразно описывать упругие и кинематические свойства МК любых кинематических схем для моделирования динамики подавляющего большинства систем старта, отличающихся

пренебрежимо малой инерционностью звеньев МК АКУ по сравнению с инерционностью АСП.

Путем несложных преобразований матричная модель позволяет описывать возможные изменения конструктивно-силовой схемы, связанные с добавлением упругих элементов в узлах подвески, с включением (выключением) отдельных механических связей и др., значительно облегчает учет люфтов (зазоров), односторонних связей (гидроцилиндры и др.), эффекты несинхронной расцепки кареток и т.д.

Описание универсальной матричной модели в данной работе в основном рассматривается в приложении к МК АКУ – упругим механизмам, наиболее сложным в части их математического описания. Однако полученные результаты могут быть распространены и на авиационные пусковые устройства (АПУ) рельсового или трубчатого типа, не являющиеся механизмами.

Рассмотрим механическую систему «СН – АКУ – АСП», где в качестве АКУ рассматривается собственно механизм катапультирования.

В такой системе механизм с помощью силового привода преобразует энергию сжатого газа (запасенного в баллонах или полученного в результате сгорания пороховой шашки) в кинетическую энергию АСП. АСП получает стартовый импульс (линейную и угловую скорость относительно СН), необходимый для гарантированного безопасного отделения от СН на режимах применения.

Параметры движения принудительно отделяемого АСП в момент прекращения механической связи с СН называются параметрами отделения. Они зависят от условий применения и других факторов, например таких как:

- кинематика механизма катапультирования;
- газодинамические характеристики силового привода;
- упругие (жесткостные) характеристики рычагов и корпуса АКУ;
- инерционно - жесткостные характеристики АСП: масса, момент инерции, координаты бугелей по продольной оси, формы и частоты низших тонов изгибных балочных колебаний свободного (незакрепленного) АСП;
- упругие (жесткостные) характеристики узлов подвески АСП к АКУ и АКУ к СН;
- упругие и инерционные характеристики крыла СН (в случае подкрыльевой подвески АСП): формы и частоты низших тонов изгибно-крутильных колебаний крыла (в сечении размещения АКУ);
- аэродинамические характеристики АСП (с учетом интерференции);

- параметры движения СН: высота, скорость, угол наклона траектории, угловые скорости, углы атаки, скольжения и крена, перегрузки и угловые ускорения по всем осям связанной с СН системы координат.

Кинематическая схема АКУ обеспечивает заданную кинематическую траекторию движения АСП, а конструктивно-силовая схема обеспечивает разгон и движение АСП с минимальными отклонениями от кинематической траектории на режимах отделения.

При расчетах динамики отделения АСП с помощью матриц жесткости АКУ по известному вектору перемещений $\overset{1}{S}$ определяют векторы относительных перемещений $\overset{1}{d}$. Вектор $\overset{1}{d}$ определится выражением

$$\overset{1}{d} = \overset{1}{S}(s) - \overset{1}{S}^k(s)$$

В качестве параметра s , определяющего степень раскрытия механизма, можно выбирать либо одну из обобщенных координат $s=s_i$, либо комплексный параметр $s = f(s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)$, выражаемый через несколько компонент s_i . Темпы раскрытия механизма могут существенно различаться в зависимости от внешних условий. Поэтому время t в качестве параметра s выбирать не рекомендуется.

Очевидно, что в качестве обобщенной координаты s , определяющей степень раскрытия механизма, для однозначности нужно выбирать координату, изменяющуюся в процессе раскрытия механизма монотонно. В частности, такой координатой может быть ход поршня силового привода.

На рисунке 1 представлены различия кинематической и реальной траекторий перемещений в пространстве обобщенных координат.

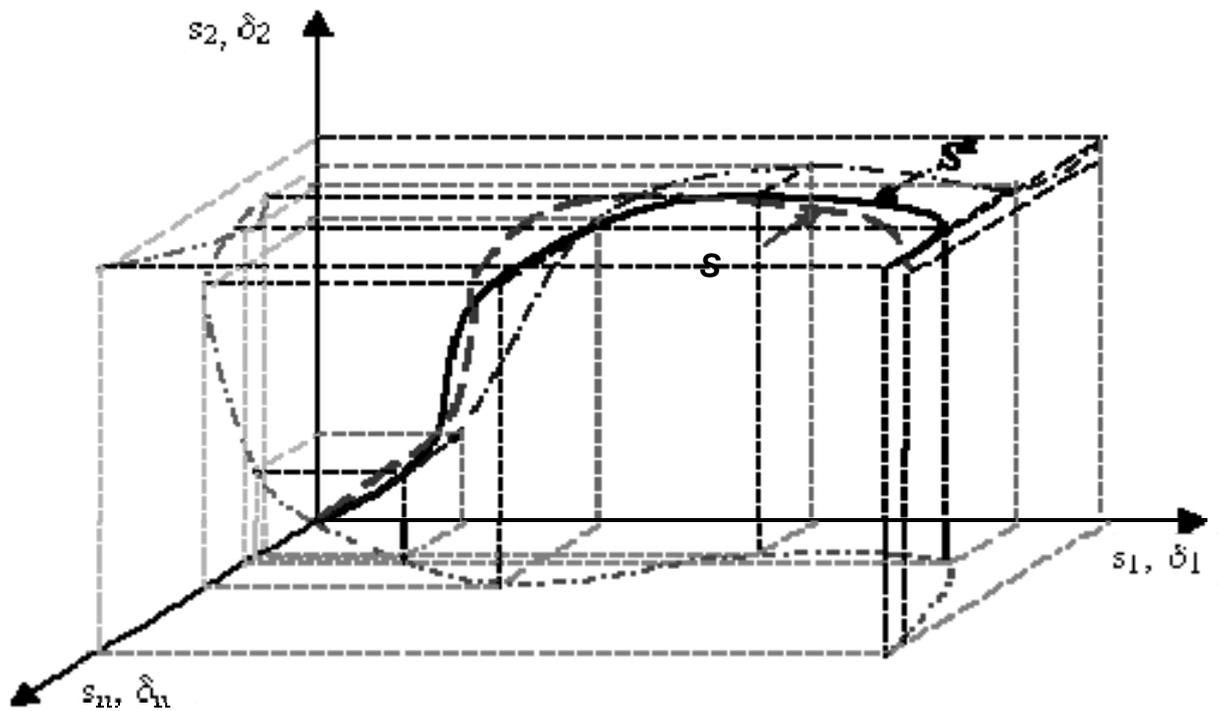


Рис. 1

Матричная модель любой АКУ в общем случае представляет собой матрицу с коэффициентами, зависящими от степени раскрытия механизма. Как правило, модель задается набором числовых таблиц (матриц жесткости), соответствующих различной степени раскрытия механизма.

Матричная модель может быть представлена выражением:

$${}^1F = [C]{}^1d$$

где

1F - вектор нагрузок,

1d - вектор относительных перемещений,

[C]- матрица жесткости.

Матричная модель АКУ, описывающая процесс катапультирования АСП в плоскости тангажа (плоская модель), в развернутой форме может быть представлена выражением

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_{\text{пр}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_{\text{пр}} \end{pmatrix}$$

где

F_1, F_2, F_3 - силовые факторы, компоненты вектора нагрузок $\overset{1}{F}$, действующие на каретки выводящих рычагов со стороны отделяемого АСП,

$T_{пр}$ – рабочее усилие, компонента вектора нагрузок $\overset{1}{F}$, создаваемое силовым приводом МК, раскрывающее механизм АКУ и передающее энергию СП отделяемого АСП.

δ_i – перемещение, i -ая компонента вектора относительных перемещений $\overset{1}{d}$,

c_{ij} – компонента матрицы жесткости [С], равная величине дополнительной составляющей ΔF_i i -ой компоненты F_i вектора нагрузок $\overset{1}{F}$ при единичном относительном перемещении $\delta_j=1$.

Также используется «пространственная» модель необходимая для исследований динамики пространственного движения отделяемых авиационных средств поражения. Эта модель не имеет принципиальных отличий от «плоской» и описывает упругое взаимодействие АКУ с отделяемой АСП. По сравнению с «плоской» задачей возрастает количество обобщенных координат, определяющих напряженно-деформированное состояние конструктивно-силовых элементов АКУ.

Удобство матричных моделей заключается в том, что для определения коэффициентов могут быть использованы хорошо известные методики и программы статического расчета на прочность. В частности, можно использовать программы статического расчета конструкций методом конечных элементов.

При исследовании механизмов может возникнуть необходимость описания работы конструкции с зазорами (люфтами) в подвижных соединениях элементов и другими односторонними связями. Во всех подобных случаях происходит снятие (наложение) отдельных механических связей.

Рациональное решение определения матриц жесткости АКУ состоит в экспериментальном определении матриц жесткости-податливости АКУ с минимальным числом дополнительных связей. Используя соответствующие преобразования полученные матрицы жесткости-податливости можно превратить в искомые матрицы жесткости.

Оценка адекватности системы старта физической модели проведена с использованием характеристик реальной конструкции МК, кинематическая схема которой явилась прототипом для кинематической схемы внутрифузеляжного катапультного устройства перспективного СН пятого поколения.

Математическая модель АСП представлялась в виде упругой балки, работающей на изгиб, с массой и моментом инерции. Эти инерционно-массовые характеристики дополнялись характеристиками собственных изгибных колебаний АСП как свободной балки.

Для расчета рабочего усилия, развиваемого силовым приводом, и производных от газодинамических параметров использовалась специально разработанная универсальная программа расчета газодинамических процессов в силовом пиротехническом приводе (СПП), оформленная в виде процедуры.

Идентификация осуществлялась интегрально через общую коррекцию величины всех компонент матрицы жесткости $[C]$ АКУ. Коррекция осуществлялась путем умножения всех компонент C_{ij} на коэффициент.

Оценка адекватности математической модели АКУ ее физической модели проводилась в условиях действия внешних нагрузок на катапультируемую ракету. Действие внешних аэродинамических нагрузок при старте ракет на различных режимах полета СН может привести к значительным отклонениям параметров отделения от номинальных значений.

На основании рассмотренных возможностей моделирование процесса старта авиационных средств поражения с применением математического моделирования в вертикальной плоскости и матричной модели в горизонтальной плоскости движения АСП относительно СН разработана обобщенная модель систем старта авиационных средств поражения в виде универсальной матричной модели, позволяющей единообразно описывать упругие (жесткостные) свойства ПУ (АКУ или АПУ) при моделировании процесса старта АСП. При этом исследованы особенности и свойства матриц жесткости, позволяющие осуществлять их преобразования, необходимые при моделировании снятия или наложения дополнительных механических связей, и разработана методика определения коэффициентов матриц жесткости с использованием метода статического расчета конструкций.

Заключение

Предлагаемая универсальная матричная модель упругой АКУ не привязана к определенной конструкции и позволяет единообразно описывать упругие и кинематические свойства механизма катапультирования (МК) любых кинематических схем для моделирования динамики подавляющего большинства систем старта, отличающихся пренебрежимо малой инерционностью звеньев МК АКУ по сравнению с инерционностью АСП.

Библиографический список

[1] Нестеров В.А., Пейсах Э.Е., Рейдель А.Л., Соколовский Г.А., Станкевич А.И. Основы проектирования ракет класса «воздух – воздух» и авиационных катапультных установок для них. – М.: Дрофа, 2002, 792 с.

[2] Правидло М.Н., Твердохлеб А.А., Пресняков В.М. Математическое моделирование динамики катапультирования авиационной управляемой ракеты с самолета-носителя // Статьи и материалы Третьей Научно-практической конференции «Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности». – М: ОАО «ОКБ Сухого», 2005, с. 354-358.

[3] Правидло М.Н., Ватолин В.В., Пресняков В.М., Твердохлеб А.А. Модель для исследования сквозного движения авиационной управляемой ракеты // «Авиакосмическая техника и технология». – М.: РИА, 2005, №3, с.10-15.

Сведения об авторах

Твердохлеб Андрей Анатольевич, инженер, ОАО «ГосМКБ «Вымпел» им. И.И. Торопова»

Тел. 8 (916) 718-43-87,

E-mail: drontverd@mail.ru