

## СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ТЕКСТЕ . . . . .	2
ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ . . . . .	4
1 ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ НА РАЗРАБОТКУ СУ ПТДУ . . . . .	4
1.1 Назначение ПТДУ . . . . .	6
1.2 Общий вид ВА . . . . .	7
1.3 Конструкция и принцип действия ПТДУ . . . . .	9
1.4 Характеристики органов управления . . . . .	11
1.5 Требования к СУ . . . . .	13
2 АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ВКЛЮЧЕНИЯ ПТДУ .	14
3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЦМ ВА . . . . .	16
4 ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СУ ПТДУ . . . . .	17
4.1 Постановка задачи управления ЦМ . . . . .	18

## СОКРАЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ТЕКСТЕ

БСК	блок силовой коммутации
БУК	блок усиления и коммутации
БЦВМ	бортовая цифровая вычислительная машина
БЭ	блок электроники
ВА	возвращаемый аппарат
ДДУ	дискретный датчик угла
ИТ	источник тока
НС	наблюдатель состояния
ОУ	объект управления
ПТДУ	посадочная твердотопливная двигательная установка
ПТК НП	пилотируемый транспортный корабль нового поколения
ПУ	посадочное устройство
РДТТ	ракетный двигатель твердого топлива
РМ	рулевая машинка
РП	рулевой привод
РПУ	релейное пороговое устройство
РС	регулятор состояния
СУ	система управления
СУБ	сопловые управляемые блоки
ТП	телеметрический потенциометр
ТРТ	твердое ракетное топливо
УПК	устройство преобразования кода Грея в двоичный код
УСДК	устройство сравнения двоичных кодов
ЭД	электродвигатель
ЭП	электромеханический привод

## ВВЕДЕНИЕ

Целью данного курсового проекта является синтез алгоритма наведения и стабилизации центра масс возвращаемого аппарата. Разработка алгоритмов и программного обеспечения математического моделирования замкнутой системы управления в MatLab. Проведение сравнительного анализа результатов моделирования.

Под синтезом системы автоматического управления понимается направленный расчет, имеющий конечной целью отыскание рациональной структуры системы и установление оптимальных величин параметров ее отдельных звеньев.

Синтез можно трактовать как инженерную задачу, сводящуюся к такому построению системы, при котором обеспечивается выполнение технических требований к ней. Подразумевается, что из многих возможных решений инженер, проектирующий систему, будет выбирать те, которые являются оптимальными с точки зрения существующих конкретных условий и требований к габаритам, весу, простоте, надежности и т. п.

При инженерном синтезе системы автоматического управления необходимо обеспечить, во-первых, требуемую точность и, во-вторых, приемлемый характер переходных процессов.

Обеспечение приемлемых переходных процессов оказывается почти всегда более трудным вследствие большого числа варьируемых параметров и многозначности решения задачи демпфирования системы. Поэтому существующие инженерные методы часто ограничиваются решением только второй задачи, так как обеспечение требуемой точности может быть достаточно просто сделано на основании использования существующих критериев точности и совершенствования их практически не требуется.

В настоящее время для целей синтеза систем автоматического управления широко используются вычислительные машины, позволяющие производить полное или частичное моделирование проектируемой системы

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1 ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ НА РАЗРАБОТКУ СУ ПТДУ

1. Рассматривается схема газосвязанной ПТДУ с регулированием тяги
2. Основные потребные параметры ПТДУ определяются значениями
  - Диапазон суммарной тяги  $R_{\Sigma} = 9.0 - 22.0$  тс, при этом предполагается возможность реализации управления тягой по заданным алгоритмам в зависимости от реализованных условий посадки, обусловленных разбросом параметров атмосферы, аэродинамических, массовых, инерционных, центровочных характеристик возвращаемого аппарата, параметров, траектории и др
  - Суммарный импульс тяги по осям всех сопел  $I_{\Sigma} = 260$  тс \* с
  - Максимальное время работы 30 с.
3. Рассматривается применение в составе ПТДУ от 8 до 12 сопловых управляющих блоков (СУБ), Каждый СУБ имеет два расходных сопла, одно из которых направлено вдоль продольной оси ВА, второе-под углом (30... 45) град к поперечной плоскости ВА. Регулирование расхода через каждое сопло осуществляется по командам от систем управления дифференцированно с помощью регулятора механического типа, вал которого кинематически связан с рулевой машинкой по командам управления.
4. Сопла, направленные вдоль продольной оси ВА (сопла первой группы), задействуются на основном участке торможения от момента начала работы ПТДУ и до высоты 40 м, с которой начинается приземный участок торможения. Группа обеспечивает гашение линейной скорости

ВА на этом участке, а также управление относительно ЦМ по каналам рысканья и тангажа.

5. Сопла, направленные под углом (30...45) грд к поперечной плоскости ВА (сопла второй группы), введены в состав ПТДУ для минимизации воздействия струй работающей ПТДУ на грунт. Сопла второй группы задействуются на приземном участке, а также для управления по каналам рысканья и тангажа на основном участке (при необходимости) и на приземном.
6. Должна быть проработана целесообразность и, при необходимости, реализация управления по каналу крена средствами ПТДУ при ее работе.

## 1.1 Назначение ПТДУ

Посадочная твердотопливная двигательная установка (ПТДУ) предназначена для снижения скорости возвращаемого орбитального аппарата (ВА) на участке приземления от величин, соответствующих установившейся скорости спуска, до заданных значений к моменту касания земли. При этом должна обеспечиваться возможность реализации управления тягой по заданным алгоритмам в зависимости от реализованных условий посадки по командам системы управления ВА.

Под участком приземления понимается участок спуска ВА, начинающийся в момент включения ПТДУ и заканчивающийся в момент касания первой опоры посадочного устройства (ПУ) ВА с поверхностью полигона. Приведение ВА на полигон обеспечивается управлением ВА до включения ПТДУ. Под полигоном понимается подготовленная посадочная площадка диаметром несколько км. Включение ПТДУ должно производиться на высоте 1 км над поверхностью полигона.

## 1.2 Общий вид ВА

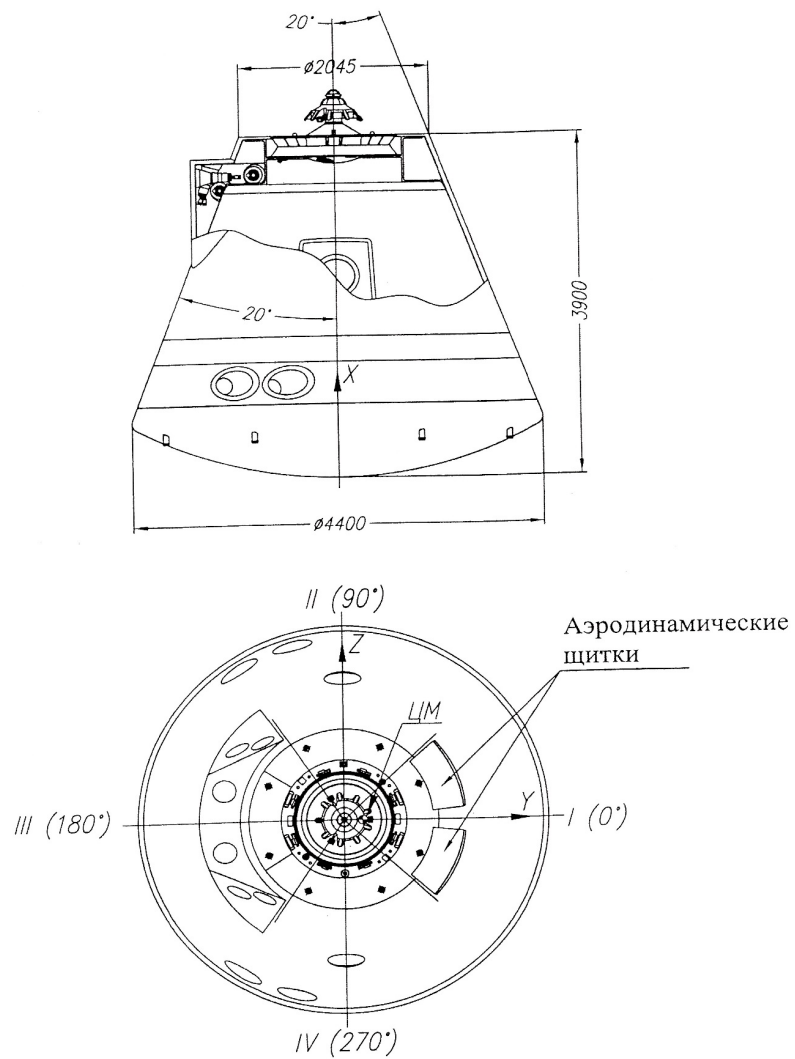


Рис. 1.1: Общий вид ВА

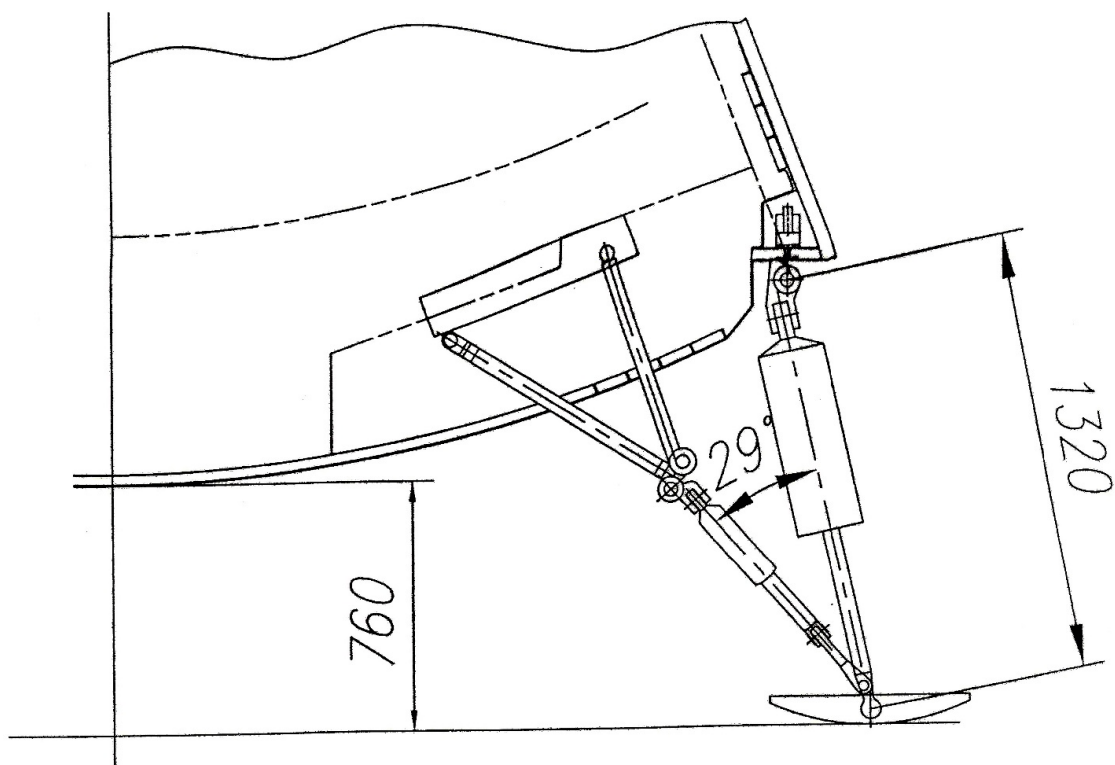


Рис. 1.2: Посадочная конфигурация ВА с выпущенным посадочным устройством



### 1.3 Конструкция и принцип действия ПТДУ

ПТДУ представляет собой РДТТ с регулируемой тягой по величине и направлению. На рисунке показана схема ПТДУ. Он состоит из:

- двух корпусов типа ”кокон” с наполнителями ТРТ ”Г-3”
- 16 односопловых управляющих блоков (СУБ)
- системы газоходов, газосвязывающего корпуса с наполнителями и СУБ
- двух пусковых двигателей
- блока датчиков давления системы измерения давления
- рулевого привода (электромеханического или газогидравлического)

Сопла всех СУБ снабжены собственными регуляторами расхода, управляемыми собственными рулевыми машинками. Расположение и маркировка органов управления соответствует рисунку 6.1.

ПТДУ многорежимна. Переход с режима на режим, а также стабилизация давления на любом режиме, обеспечивается изменением газоприхода от поверхности горения за счет изменения скорости горения наполнителя путем кратковременного изменения суммарной площади минимальных сечений сопел.

Создание управляющих сил по каналам тангажа и рыскания на каждом режиме обеспечивается за счет перераспределения расхода продуктов сгорания ТРТ между соплами путем изменения площади минимального сечения каждого сопла при сохранении постоянной суммарной площади минимальных сечений всех сопел:

$$\mu F_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{16} \mu F_j \approx const \quad (1)$$

где  $\mu F_{\Sigma}$  - требуемая суммарная эффективная площадь минимальных сечений сопел на соответствующем режиме работы ПТДУ.

$\mu F_j$  - текущая эффективная площадь минимального сечения  $j$ -го сопла.

При необходимости должна быть обеспечена возможность отсечки тяги ПТДУ по команде СУ. При этом для прекращения горения наполнителей должно выполняться условие:

$$\mu F_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{16} \mu F_j^{max} \quad (2)$$

где  $\mu F_j^{max}$  - максимальная эффективная площадь минимального сечения  $j$  - го сопла.

В случае отказа одного из СУБ или отказа ПМ площадь минимального сечения этого СУБ при дальнейшей работе ПТДУ должна оставаться постоянной, при это должна выполняться заданная циклограмма суммарной тяги  $R_{\Sigma}$  и управление остальными СУБ в заданном диапазоне  $R$ .

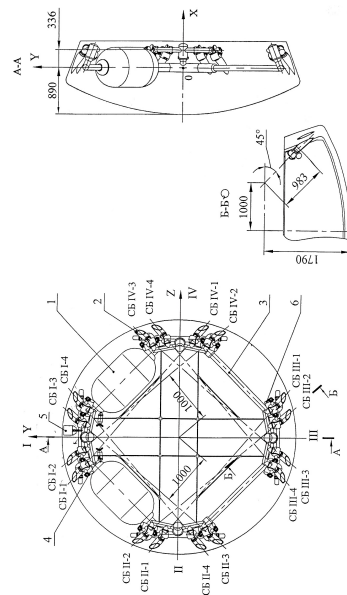


Рис. 1.3: Схема ПТДУ

## 1.4 Характеристики органов управления

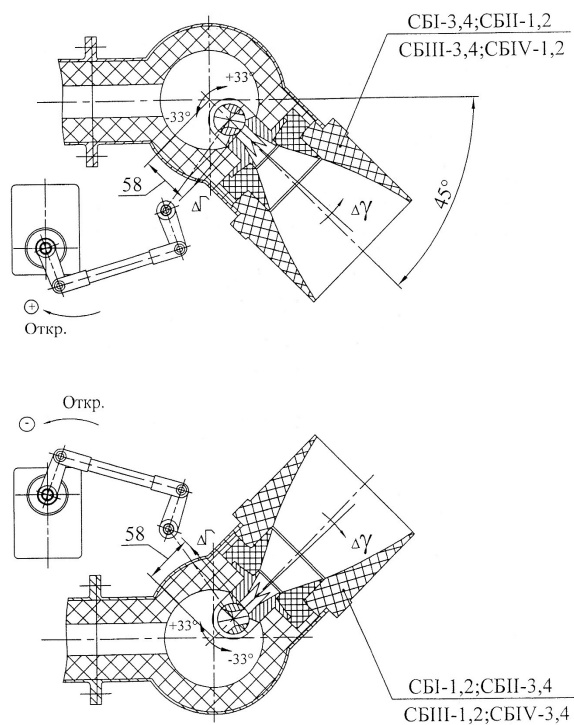


Рис. 1.4: Кинематическая схема СУБ с РП

Зависимость эффективной площади минимального сечения единичного сопла СУБ ( $\mu F_j$ ) от угла поворота вала РМ ( $\delta_j$ ) представлена на рисунке (1.5)

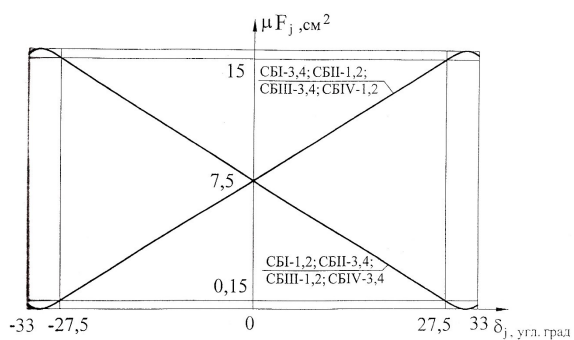


Рис. 1.5: Зависимость эффективной площади сечения единичного сопла ( $\mu F_j$ ) от угла поворота вала РМ ( $\delta_j$ )

При работе ПТДУ используется только линейный участок зависимости  $\mu F_j(\delta_j)$ .

На участке от  $-27.5^\circ$  до  $27.5^\circ$  для данной расходной характеристики допускается линейная аппроксимация:

$$\delta_j = 3.667 \cdot \mu F_j - 27.5 \quad (3)$$

Систематическое линейное и угловое отклонение вектора тяги в единичном сопле в зависимости от угла поворота РМ от геометрической оси сопла за счет прямоугольной формы площади минимального сечения регулятора сопла приведено на (1.5).

Отклонение происходит в плоскости, проходящей через геометрическую ось сопла перпендикулярно продольной оси корпуса СУБ.

Случайное отклонение вектора тяги от номинального положения геометрической оси сопла в плоскости минимального сечения составляет: линейное 1.5 мм, угловое  $1.5^\circ$ .

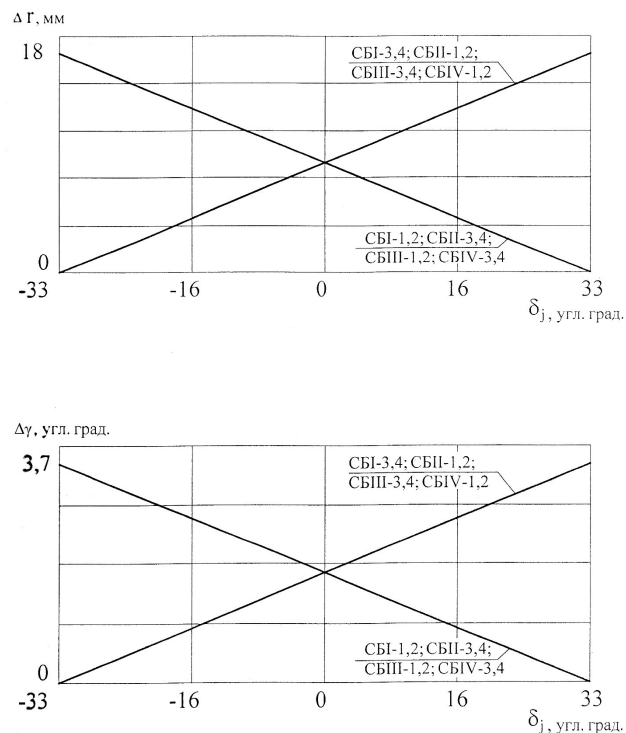


Рис. 1.6: Линейное ( $\Delta r$ ) и угловое ( $\Delta \gamma$ ) отклонение линии действия вектора тяги от геометрической оси сопла в зависимости от угла поворота вала РМ

## 1.5 Требования к СУ

Исходными данными на разработку технических предложений по алгоритмам СУ, СУ ПТДУ для управления на участке посадки возвращаемого аппарата определены следующие положения:

- Начальные условия при запуске ПТДУ:
  - угол наклона траектории  $-70^\circ \div -90^\circ$
  - скорость  $80 \div 120 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
  - угол атаки  $8^\circ \div 20^\circ$
  - угловые скорости до  $\pm 50$  угл. град/с по трем углам одновременно
  - высота  $700 \div 1200$  м.
- Условия окончания:
  - на высоте 20 м начинается участок вертикального движения, который завершается касанием. Скорость во время касания  $2 \div 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
- суммарный импульс тяги:

$$\int_0^T R(r) dt = 280 \text{ Тс} \cdot c$$

## 2 АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ВКЛЮЧЕНИЯ ПТДУ

Исходя из независимости движений в ортогональных направлениях и приоритете вертикального канала в процессе управления, выбор момента включения ДУ определяется высотой, скоростью движения аппарата и необходимостью обеспечения наиболее предпочтительного режима работы ПТДУ.

Предпочтительным режимом является работа в середине линейного диапазона регулирования тяги, так как при действии возмущений такой режим создает наилучшие условия для управления.

В связи с тем, что аппарат на момент включения ПТДУ движется практически с установившейся скоростью, суммарная потенциальная и кинетическая энергия, которую необходимо рассеять с помощью ПТДУ, убывает при снижении аппарата:

$$E(h) = \frac{mv^2}{2} + mgh \quad (4)$$

где  $v \approx const$

Принимая равенство совершаемой двигателем работы и энергии аппарата, погашаемой на участке спуска при величине тяги двигателя, соответствующей середине диапазона регулирования  $E = R_{cp}\eta_0$ , получаем высоту включения ПТДУ:

$$\eta_0 = \frac{mv^2}{2} \cdot \frac{1}{R_{cp} + C_x \rho S_m \frac{v_\eta^2}{6} - mg} \quad (5)$$

здесь  $R_{cp} = 12Tc$ .

Этот функционал может вычисляться на борту и при возможном разбросе начальной скорости  $v_{\eta_0}$  в пределах  $80 \div 120 \frac{m}{c}$ , высота включения ПТДУ лежит в пределах  $\eta_0 = 400 \div 800m$ . Предполагая, что в вертикальном канале реализуется движение с постоянным замедлением, т. е.  $\dot{V}_\eta = const$ , получаем интегралы движения:

$$\eta = \eta_0 - V_\eta \cdot t + \frac{\dot{V}_\eta \cdot t^2}{2} \quad (6)$$

$$V_{\eta} = -V_{\eta_0} + \dot{V}_{\eta} \cdot t \quad (7)$$

откуда

$$\dot{V}_{\eta} = \frac{V_{\eta_0}^2}{2\eta_0} \quad (8)$$

$$T = -\frac{V_{\eta_0}}{\dot{V}_{\eta}} \quad (9)$$

Среднее значение вертикального ускорения, обеспечивающего затормаживание на заданной высоте  $\dot{v}_{\eta} \approx 12 \div 20 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ , и время торможения  $T \approx 8 - 10 \text{с}$ . При этом минимальный суммарный импульс тяги, расходуемый на затормаживание аппарата равен  $\approx 150 \text{Тс} \cdot \text{с}$ . На участке вертикального спуска расходуется еще  $\approx 70 \div 80 \text{Тс} \cdot \text{с}$ .

Минимальная высота включения ПТДУ, при которой еще возможно погасить энергию аппарата  $h_0 \approx 400 \text{м}$ , время торможения  $\approx 7 \text{с}$ , тяга  $R_{\text{max}} = 22 \text{Тс}$ . При этом перемещения в горизонтальной плоскости исключаются. Весь импульс при этом сбрасывается в вертикальном канале управления.

### 3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЦМ ВА



#### 4 ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СУ ПТДУ

Исходя из требований ТЗ, при н. у. которые были определены ранее решенной задачей определения момента включения ПТДУ, требуется переместить объект из одной из возможных точек области н. у. в заданную точку пространства (точка зависания) за заданное время. В связи с тем, что органами управления являются не поворачиваемые сопла, т. о. сама задача определяется движением ЦМ и угловым движением. В связи с компоновкой сопловых блоков ВА эти задачи взаимосвязаны. Для того чтобы упростить задачу на данном этапе синтеза будем считать что есть приведенные моменты и приведенные силы. Распределения сил и моментов по соплам это задача следующего этапа. Чтобы синтез управления упростить мы декомпозируем систему на две независимые подсистемы: управления ЦМ и Управления угловым положением на основе разделения движений. Считаем, что динамика требуемой угловой ориентации на порядок быстрее чем движения ЦМ.

При этом каждой из этих подсистем управления выдвигаются свои требования по качеству:

1. Время переходного процесса
2. Отсутствие перерегулирования
3. Точность вывода в точку при вариации н. у. в области, которая ранее была определена алгоритмом включения ПТДУ

#### 4.1 Постановка задачи управления ЦМ

Цель управления:

$$\|x(t) - x_*(t)\| \leq \Delta_x, \forall t \geq \hat{t} \quad (10)$$

где  $x(t) = (\xi \dot{\xi} \eta \dot{\eta} \zeta \dot{\zeta})^T$  - вектор состояния объекта управления относительно центра масс,  $x_*(t)$  - желаемая траектория спускаемого аппарата с заданными показателями качества.

Это была общая постановка задачи управления. Для того чтобы решить данную задачу мне нужно прежде всего сформировать желаемую траекторию и стабилизироваться относительно её.

Таким образом, задача распадается на две подзадачи:

1. Синтез желаемой кинематической траектории с учетом желаемой динамики движения по данной траектории.
2. Стабилизация ЦМ ВА относительно желаемой траектории (задача слежения)