

# **ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ РАДИОСИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЕНИЯ**

## **Семинар №1 Траектории движения объектов управления и системы координат**

### **Учебные вопросы:**

1. Траектории наведения.
2. Основные системы координат.
3. Методы наведения.
4. Двухточечные методы наведения (самонаведения).

### **Литература**

1. **Авиационные системы радиоуправления:** учебник для военных и гражданских ВУЗов и научно-исследовательских организаций. / Меркулов В.И., Чернов В.С., Гандурин В.А., Дрогалин В.В., Савельев А.Н. Под ред. В.И. Меркулова. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008 – 423 с.
2. **Радиосистемы и комплексы управления.** Учебник / Под ред. В.А.Вейцеля. – М.: Вузовская книга, 2016. – 574.: ил.+CD.
3. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. **Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления оружием летательных аппаратов. Т.1. Теоретические основы** / Под ред. М.С. Ярлыкова. – М.: Радиотехника, 2012, - 504 с.: ил.

**4. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления оружием летательных аппаратов. Т.2. Применение авиационных радиоэлектронных комплексов при решении боевых и навигационных задач / Под ред. М.С. Ярлыкова. – М.: Радиотехника, 2012, - 504 с.: ил.**

**5. Демидов В.П., Кутыев Н.Ш. Управление зенитными ракетами. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 335 с.: ил.**

**6. Неупокоев Ф.К. Стрельба зенитными ракетами. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1991. – 343 с.: ил.**

**7. Радиоуправление реактивными снарядами и космическими аппаратами / Гуткин Л.С., Борисов Ю.П., Валуев А.А., Зиновьев А.Л., Лебедев С.В., Первачев Е.П., Полищук Е.П., Пономарев Д.А. – М.: «Сов. радио», 1968. – 680.**

**8. Основы радиоуправления: Учебное пособие для вузов / Березин Л.В., Вейцель В.А., Волковский С.А., Жодзишский А.И., Жодзишский М.И., Карандасов В.И., Типугин В.Н., Чалов В.К. Под ред. В.А.Вейцеля и В.Н. Типугина. – М.: «Сов. радио», 1973, 464 с.**

# 1 Траектории наведения

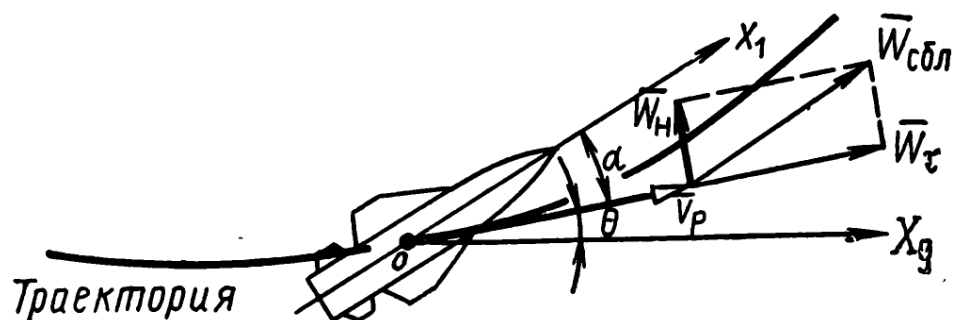
## 1.1 Основные понятия и определения

- **Кинематическая траектория** – *расчетная линия, по которой движется ОУ при идеальном выполнении закона управления* (ОУ рассматривается как материальная точка, СУ идеализируется в смысле отсутствия инерционности и случайных возмущающих возмущений, ИВС – отсутствие ошибок измерения датчиков).

**Кинематическую траекторию определяет метод наведения** (способ сближения).

- **Динамическая траектория** – расчетная линия движения ОУ с учетом его инерционных свойств, а также его системы управления (СУ).
- **Фактическая траектория** – реальная траектория движения ОУ, которая получается при учете влияния инерционных свойств ОУ и его СУ, случайных возмущений и ошибок измерения датчиков.
- **Фиксированные траектории** – при наведении на цель известными, неизменными или изменяющимися по известному закону координатами,  $X_c$  хранится в памяти на ПУ или ОУ, вид траектории  $X_T$  задается до пуска, управление  $\Delta X$  осуществляется по программе (**программное управление**) с использованием текущих значений  $X_u$ .
- **Нефиксированные траектории** – координаты цели  $X_c$  известны неточно (движущиеся, маневрирующие), или неизвестны (в том числе неподвижные).

## 1.2 Особенности движения объектов по криволинейной траектории



**Рисунок 1** - Составляющие ускорения ОУ при криволинейном движении:

$j_H = W_H$  - нормальное ускорение;  $j_\tau = W_\tau$  - тангенциальное ускорение;  $j_{сбл} = W_{сбл}$  - ускорение сближения

- **Нормальное ускорение** определяет отклонение от прямолинейного движения (правление полетом/траекторией):

$$j_H = V_P \dot{\Theta}; \quad (1)$$

$$j_H = \frac{V_P^2}{\rho_T} \quad (2)$$

- При **угловой скорости разворота**:

$$\dot{\Theta} = \frac{V_P}{\rho_T}, \quad (3)$$

где  $\rho_T$  - **радиус искривления траектории**.

- Чем больше кривизна траектории движения (чем меньше  $\rho_T$ ), тем большие нормальные ускорения может развивать объект при движении по этой траектории.
- **Перегрузка**  $n = j / g$  - отношение ускорения объекта к ускорению свободного падения.
- **Потребная перегрузка** – необходимая для движения ОУ по кинематической траектории (определяется методом наведения).
- **Располагаемая перегрузка** – фактически развиваемая ОУ при максимальном отклонении органов управления (ограничивается конструкцией ОУ, параметрами и условиями полета).

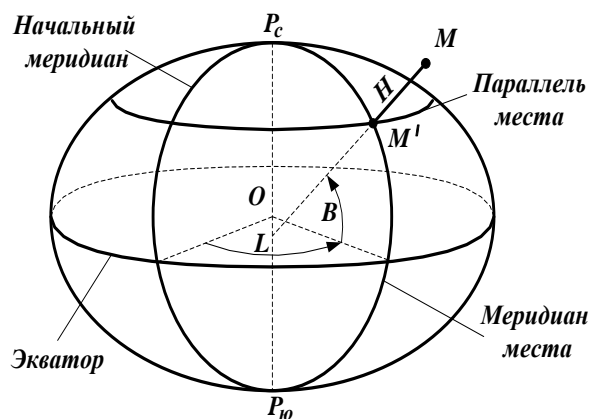
## **2 Основные системы координат**

- **Выбор опорной СК определяется областью применения объекта управления.**
- **Основные требования к СК:**
  - решение задач навигации/наведения с требуемой точностью;
  - получение наиболее простых математических соотношений (математическое описание);
  - охват достаточной по площади территории для использования единой системы координат;
  - наглядную информацию о местоположении ОУ относительно линии заданного пути (ЛЗП) или основных ее точек;
  - программирование/предсказание заданной траектории в возможно более короткие сроки.
- **Виды СК по масштабам (охвату):**
  - космические (горизонтальная; первая и вторая экваториальные; эклиптическая; галактическая, геоцентрическая, гелиоцентрическая);
  - глобальные (географическая; геосферическая; ортодромическая);
  - местные (сферическая, декартова, полярная).

**2.1 Глобальные системы координат** охватывают всю поверхность Земли, или ее значительную часть.

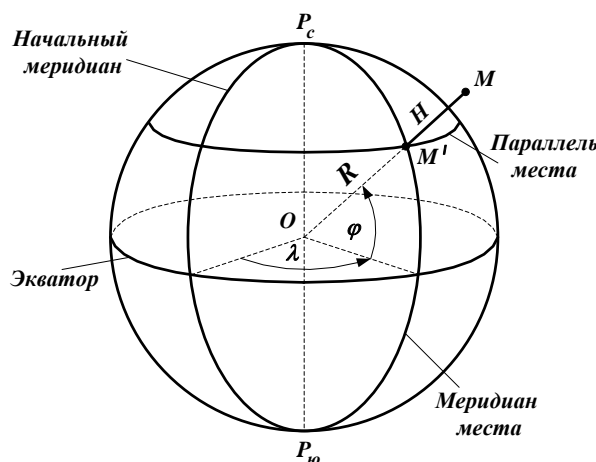
➤ **Виды глобальных СК** в зависимости от требуемой точности решения задач навигации/наведения:

- географическая;
- геосферическая;
- ортодромическая.



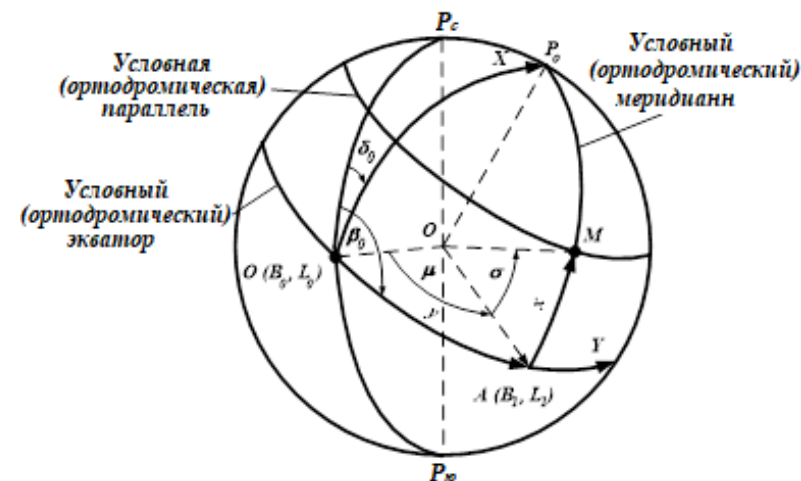
**Рисунок 3**

– Географическая  
(геодезическая) СК



**Рисунок 4**

– Геосферическая СК



**Рисунок 5**

– Ортодромическая СК

➤ **Географическая (геодезическая) система координат:**

- поверхность Земли аппроксимируется эллипсоидом вращения, который наиболее близок по форме к земной поверхности;
- положение точки на поверхности эллипсоида вращения определяется географическими широтой  $B$  и долготой  $L$ ;
- географическая широта точки  $M$  - угол между нормалью к поверхности эллипсоида в этой точке и плоскостью экватора (отсчитывается от плоскости экватора к полюсам от  $0$  до  $\pm 90^\circ$  - северная или южная).
- географической долготой точки  $M$  - двугранный угол между плоскостями Гринвичского меридиана и меридиана, проходящего через точку  $M$  (измеряется в обе стороны от Гринвичского меридиана в пределах от  $0$  до  $\pm 180^\circ$  - восточная или западная).

- Поверхность эллипсоида вращения имеет строгое математическое описание и позволяет получить формулы для решения задач навигации с высокой точностью.
- Формулы оказываются достаточно сложными и практически реализуются в современных пилотажно-навигационных комплексах (ПНК) на основе применения высокопроизводительных БЦВМ.

➤ **Геосферическая система координат:**

- эллипсоид вращения заменяется сферой;
- положение точки на поверхности определяется широтой  $\varphi$  и долготой  $\lambda$ ;
- геосферическая широта точки  $M$  - угол между радиусом-вектором из центра сферы в точку  $M$  и плоскостью экватора;
- понятие геосферической долготы соответствует понятию географической долготы.

➤ Позволяет упростить формульные зависимости, описывающие процессы навигации/наведения.

➤ **Ортодромическая СК:**

- произвольная сферическая система координат (определяется основной плоскостью отчета);
- **основная плоскость отсчета** - плоскость условного (ортодромического) экватора – выбирается/проходит через точки маршрута ОУ (например, через исходный и конечный пункты маршрута или **промежуточные пункты маршрута (ППМ)**);
- **смена ППМ определяет** смещение плоскости ортодромического экватора и положение ортодромического полюса  $C_o$  относительно геосферического полюса  $C$ .
- **угол сходимости меридиан  $\Delta$**  - угол между геосферическим и ортодромическим меридианами;
- положение точки на поверхности определяется широтой  $\sigma$  и долготой  $\mu$ ;



- **ортодромическая широта  $\sigma$  точки  $M$**  - угол между радиусом-вектором, проведенным из центра сферы в точку  $M$ , и плоскостью условного экватора;
  - **ортодромическая долгота  $\mu$**  - двугранный угол между плоскостью условного начального меридиана и плоскостью меридиана, проведенного через точку  $M$ .
- Движение ОУ, как правило, осуществляется в области ортодромического экватора при малых углах ортодромической широты (алгоритмы вычислений упрощаются за счет замены тригонометрических функций  $\sin \sigma \approx \sigma$ ,  $\cos \sigma \approx 1$ ).
- **При смене участков маршрута полета (после пролета очередного ППМ) изменяется положение ортодромической системы координат** так, чтобы на каждом частном участке маршрута ортодромический экватор совпадал с линией заданного пути. Такая **система координат называется частной ортодромической системой координат**.

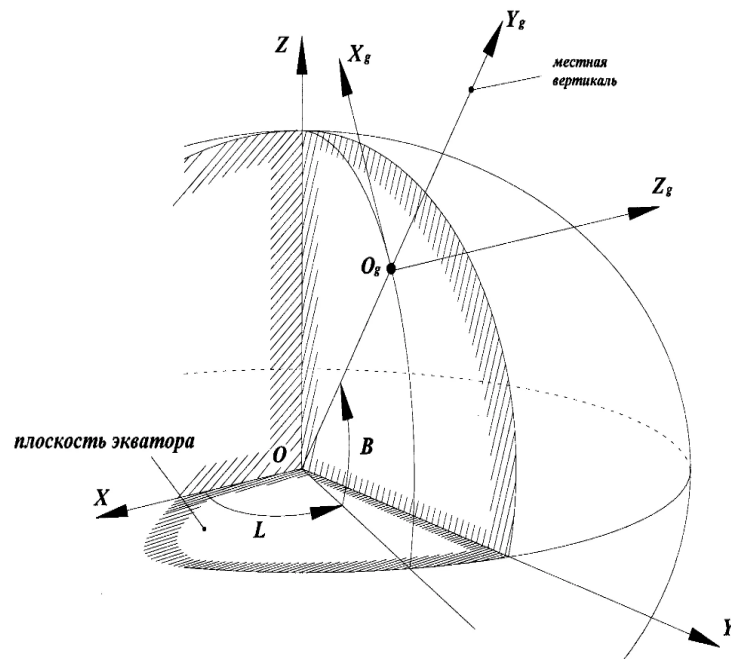
## 2.2 Местные системы координат

- Охватывают ограниченную часть земной поверхности и используются при перемещениях ОУ на расстояния до 300...400 км (по классификации РСБН – до 500 км), когда кривизной земной поверхности можно пренебречь без ущерба для точности решения навигационной задачи.
- Местные СК – начало которых находится в точке на поверхности Земли (сферическая, прямоугольная декартова (нормальная) и полярная).
- **Прямоугольные нормальные СК могут быть *неподвижными* и *подвижными*.**

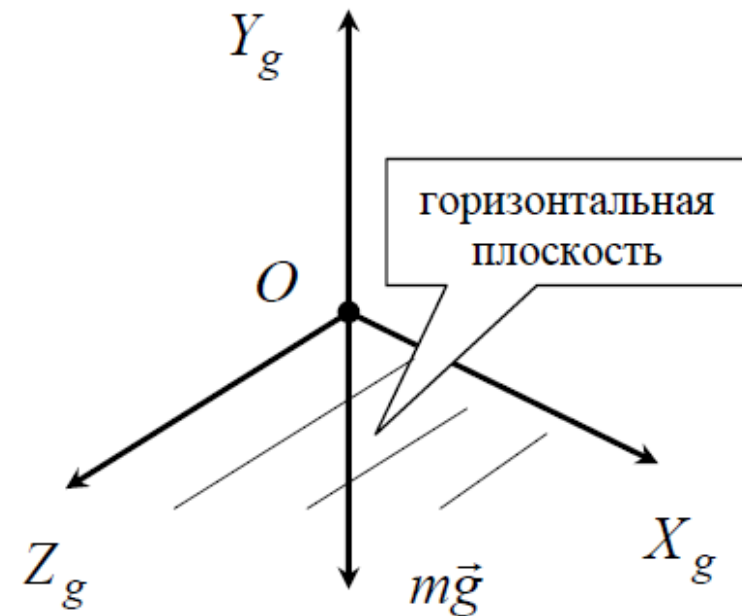
### 2.2.1 Нормальная система координат $OX_gY_gZ_g$ :

- **начало СК** совпадает с центром масс  $OY$ ;
- **ось  $OY_g$**  направлена вверх по местной вертикали;
- **оси  $OX_g$  и  $OZ_g$**  выбирают в соответствии с решаемой задачей:
  - **ось  $OX_g$**  направлена с юга на север по касательной к географическому меридиану;
  - **ось  $OZ_g$**  – параллельно географической параллели по касательной с запада на восток.

**Местная вертикаль** - прямая, совпадающая с направлением в рассматриваемой точке силы тяжести  $\vec{G} = m\vec{g}$ , где  $\vec{g}$  - ускорение свободного падения.



**Рисунок 4** – Положение нормальной СК по отношению к геоцентрической



**Рисунок 5** – Нормальная СК

- **Прямоугольная нормальная *неподвижная* нормальная СК  $O_0 X_g Y_g Z_g$ :**
  - ***начало СК*** – пункт управления, условная точка на поверхности Земли;
  - ***ось  $OY_g$***  - по местной вертикали;
  - оси  **$O_0 X_g$**  и  **$O Z_g$**  – неизменны и относительно Земли (в соответствии с решаемой задачей) ориентированы по касательным к географическому меридиану (на север) и географической параллели (на восток).
- **Прямоугольная нормальная *подвижная* нормальная СК  $O X_g Y_g Z_g$ :**
  - ***начало СК*** - центр масс ОУ;
  - ***ось  $OY_g$***  - по местной вертикали;
  - ***оси  $OX_g$ ,  $OZ_g$***  – в соответствии с решаемой задачей (***при небольших расстояниях между центрами неподвижной и подвижной СК – параллельно осям подвижной земной нормальной СК !!!***).
- **При описании динамики полета в атмосфере земные СК обычно считаются инерциальными, а Земля считается плоской:**
  - допускается пренебрежение вращением местной вертикали при движении ОУ;
  - вектор абсолютной скорости движения ЦМ ОУ заменяется на вектор земной скорости (скорость ОУ относительно воздушной среды + скорость ее перемещения относительно Земли);
  - вектор абсолютной угловой скорости заменяется на вектор угловой скорости относительно нормальной земной СК (земной угловой скорости).

### 2.2.2 Связанная система координат $OXYZ$ (подвижная):

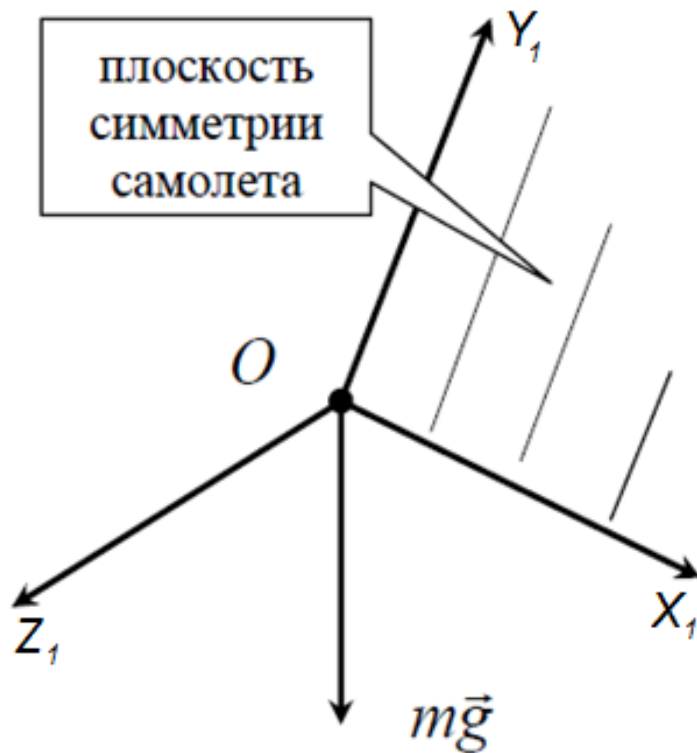
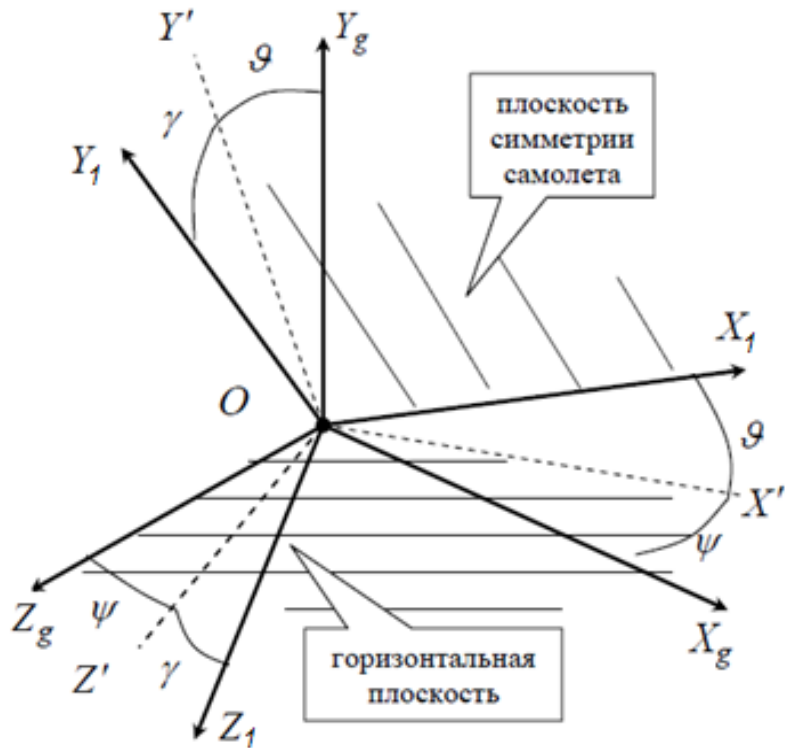


Рисунок 6 - Связанная СК

- **начало СК** совпадает с характерной точкой ЛА (центр масс);
- **ось  $OX_{CB} = OX_1$**  – продольная ось ЛА, лежащая в плоскости симметрии и направленная вперед (от «хвоста» к «носу» вдоль главной оси инерции или аэродинамической хорде);
- **ось  $OY_{CB} = OY_1$**  – нормальная ось, лежащая в плоскости симметрии и перпендикулярная продольной оси (вверх);
- **ось  $OZ_{CB} = OZ_1$**  – поперечная ось, перпендикулярная плоскости симметрии (вправо).

### 2.2.3 Ориентация ЛА в пространстве (положение связанной СК относительно нормальной):



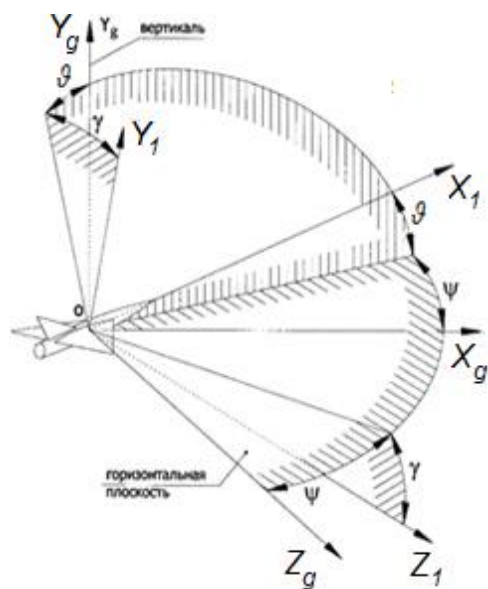
- $\psi$  - **угол рыскания** – угол между осью  $Ox_g$  нормальной СК и проекцией продольной оси связанной СК на горизонтальную плоскость  $Ox_gZ_g$  (положителен при повороте оси  $Ox_g$  для совмещения с проекцией продольной оси поворотом вокруг оси  $Oy_g$  по часовой стрелке, если смотреть в направлении оси  $Oy_g$ );
- $\theta$  - **угол тангажа** – угол между продольной осью  $Ox$  и горизонтальной плоскостью  $Ox_gZ_g$  нормальной СК (положителен, если продольная ось направлена вверх по отношению к плоскости);
- $\gamma$  - **угол крена** – угол между поперечной осью  $Oz$  и осью  $Oz_g$  нормальной СК (положителен, когда смещенная ось  $Oz_g$  совмещается с поперечной осью  $Oz$  поворотом по часовой стрелке, если смотреть в направлении продольной оси  $Ox$ ).

**Рисунок 7** - Ориентация связанной СК относительно нормальной

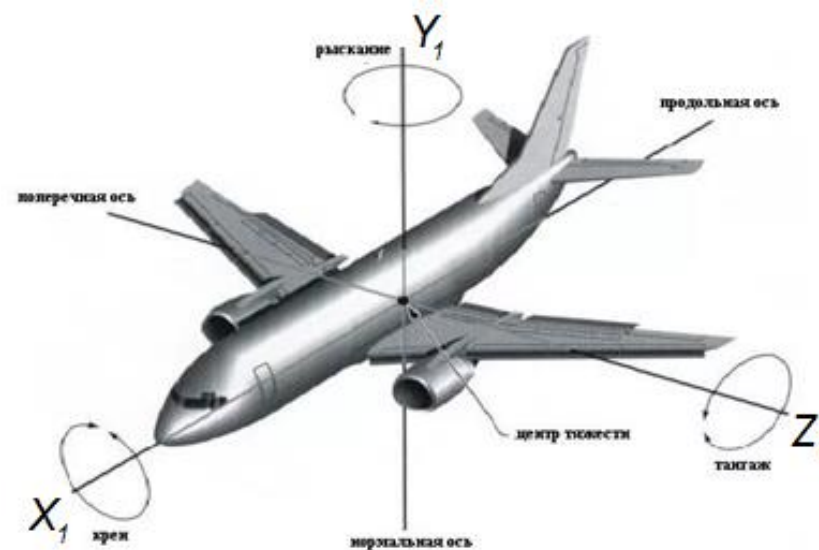
- **Курс ВС** – угол в горизонтальной плоскости между проекцией продольной оси ЛА и северным направлением меридиана («север» истинный, магнитный, ортодромический).



а)



б)



в)

**Рисунок 8 - Углы пространственной ориентации летательного аппарата**



#### 2.2.4 Скоростная система координат $OX_VY_VZ_V$ (подвижная):

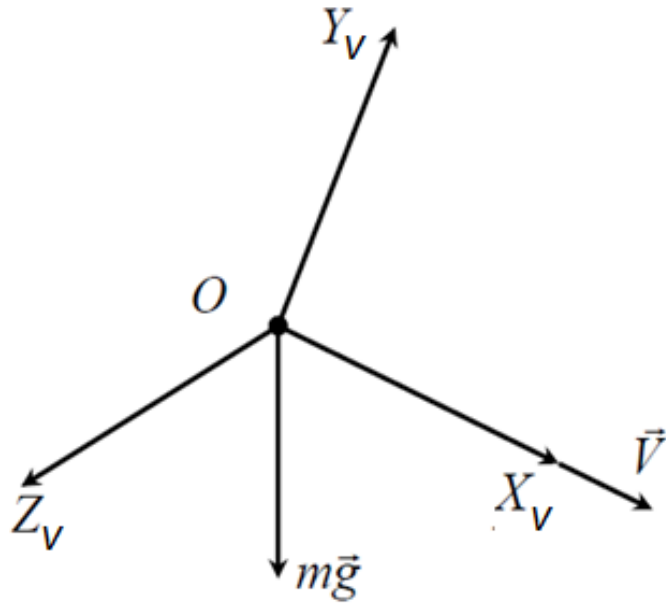


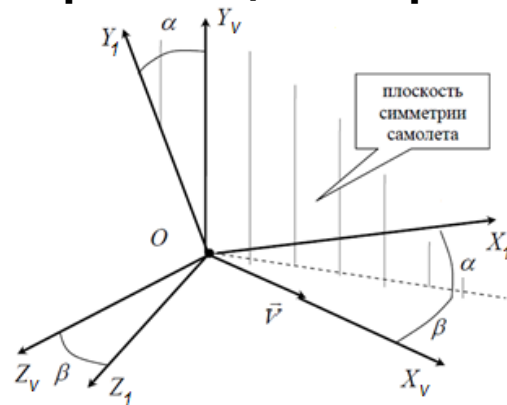
Рисунок 9 - Скоростная СК

- **Воздушная скорость** – скорость полета ЛА относительно воздушной среды (приборная, индикаторная, истинная).
- **Скоростная СК:**
  - **начало СК** совпадает с характерной точкой ЛА (центр масс);
  - **ось  $OX_V$**  – по вектору воздушной скорости ЛА;
  - **ось  $OY_V$**  – ось подъемной силы в плоскости симметрии ЛА (вверх при обычных условиях);
  - **ось  $OZ_V$**  – боковая ось, перпендикулярная плоскости симметрии (вправо).

- **Истинная воздушная скорость** – фактическая скорость летательного аппарата относительно воздуха.
- **Скорость ветра  $\vec{W}_\Pi$**  – скорость среды относительно какой-либо из земных СК.
- **Земная скорость  $\vec{V}_3$**  – скорость начала связанной СК относительно какой-либо земной СК (в т.ч. скорость среды: воздушная скорость + скорость воздушной среды).
- **Путевая скорость  $\vec{V}_\Pi$**  – проекция земной скорости на плоскость  $OX_gZ_g$  нормальной СК (векторная сумма горизонтальных составляющих воздушной скорости и скорости ветра/среды).
- **Приборная (индикаторная) воздушная скорость** – воздушная скорость на выходе прибора (приемник воздушного давления) при нормальных условиях (давление 1013,25 гПа (260 мм.рт.ст.) и 15°C), а также с поправками на плотность воздуха.

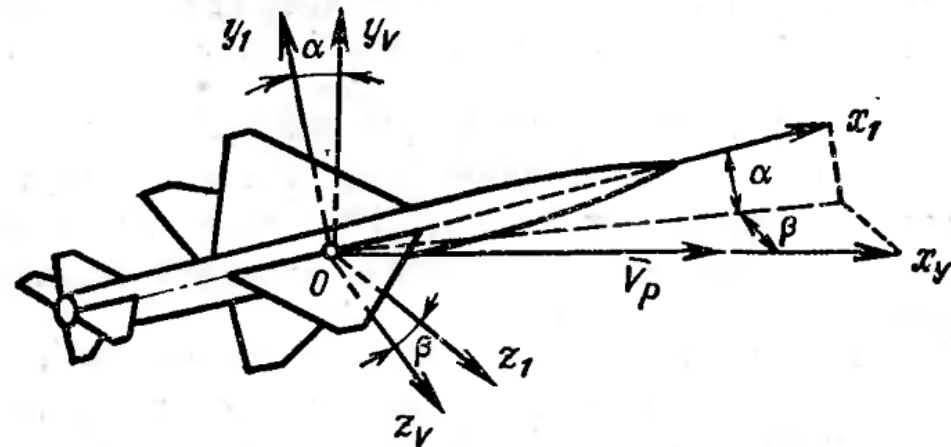
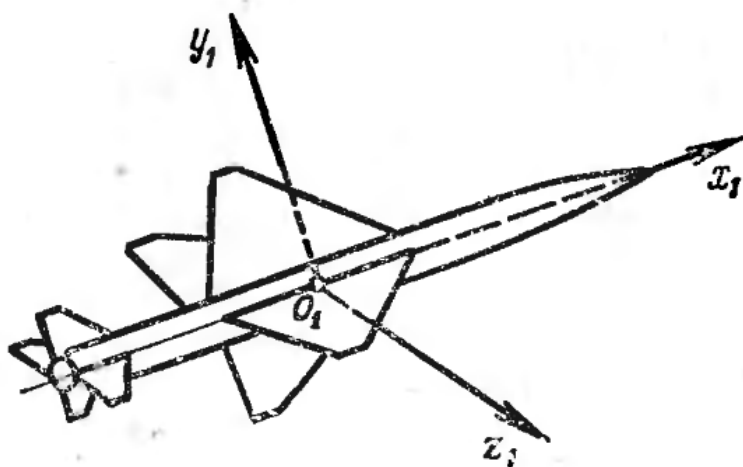


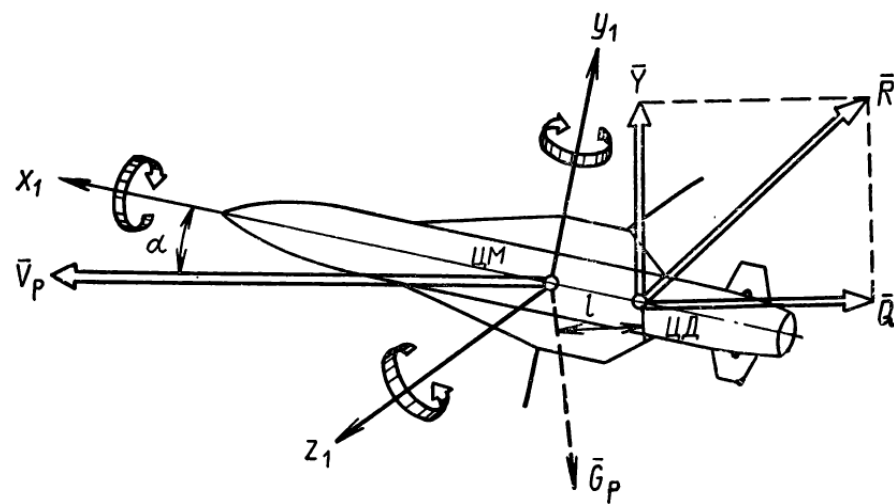
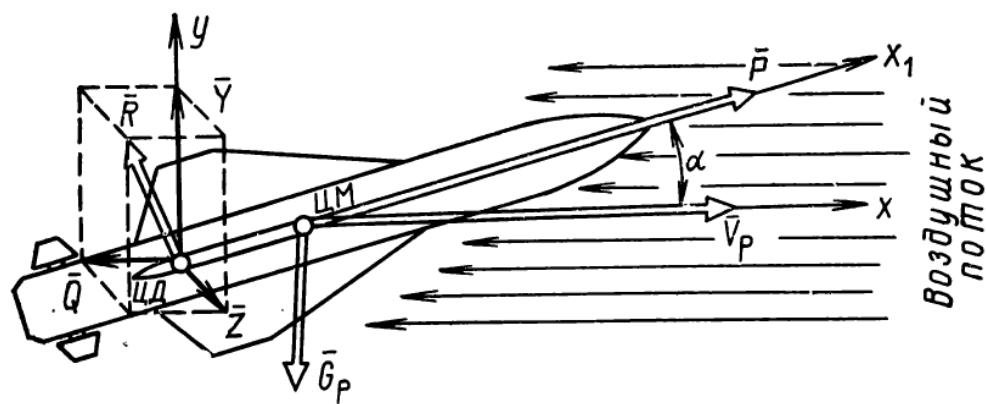
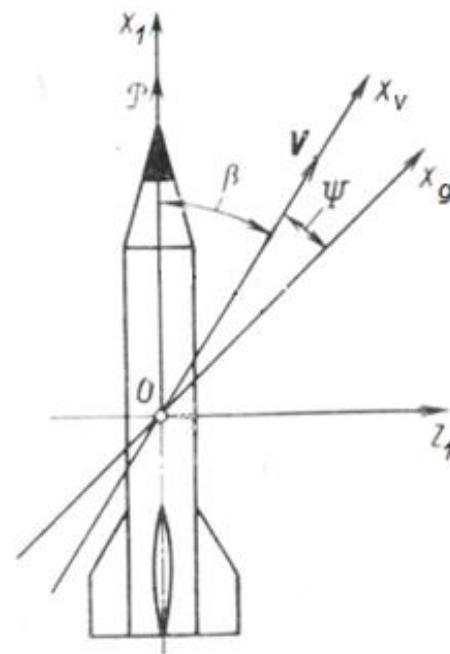
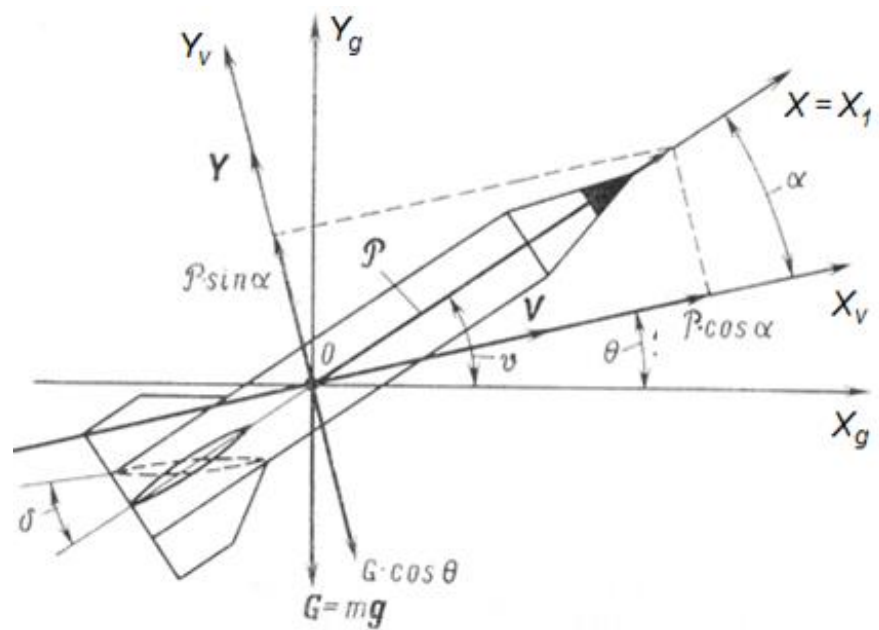
### 2.2.5 Ориентация скоростной СК и относительно связанной:



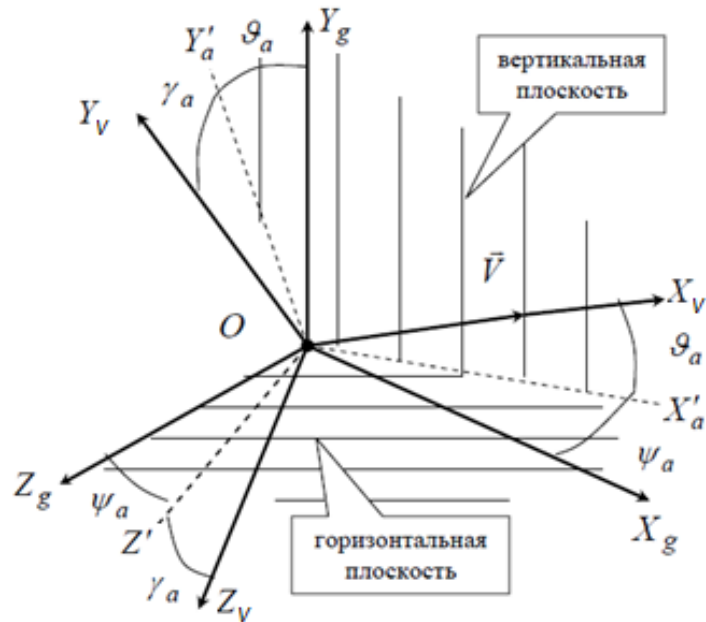
**Рисунок 10** - - Ориентация скоростной СК относительно связанной

- $\alpha$  - **угол атаки** – угол между проекцией воздушной скорости ЛА на плоскость  $OXY$  и продольной осью связанной СК (считается положительным, если проекция вектора скорости на нормальную ось отрицательна);
- $\beta$  - **угол скольжения** - угол между проекцией воздушной скорости ЛА на плоскость  $OXZ$  и продольной осью связанной СК (считается положительным, если проекция вектора скорости на поперечную ось положительна).





## 2.2.6 Ориентация скоростной СК относительно нормальной СК



**Рисунок 11** - Ориентация скоростной СК относительно нормальной

- $\psi_a$  - **скоростной угол рыскания** – угол между проекцией вектора скорости на плоскость  $OX_gZ_g$  и осью  $OX_g$  нормальной СК;
- $\theta_a = \Theta$  - **скоростной угол тангажа (угол наклона траектории)** – угол между скоростной осью  $OX_v$  и горизонтальной плоскостью  $OX_gZ_g$  нормальной СК;
- $\gamma_a$  - **скоростной угол крена** – угол между боковой осью  $OZ_v$  и осью  $OZ_g$  нормальной СК, смещенной в положение, при котором скоростной угол рыскания равен нулю.

### **3 Методы наведения**

#### **3.1 Общие сведения о методах наведения**

- **Метод наведения** - закон изменения во времени требуемых фазовых координат, который должен обеспечить выполнение целевого назначения РСКУ (нахождение ОУ на требуемой фазовой траектории, закон сближения ОУ с объектом преследования):
  - налагает требования на характер движения ОУ;
  - устанавливает связь между характером движения цели и законом движения ОУ;
  - определяет состав и алгоритмы функционирования датчиков информации.
- **Основные требования к методу наведения (способу формирования траектории):**
  - 1) минимум времени наведения;
  - 2) максимальная дальность действия;
  - 3) минимальные мгновенные перегрузки ОУ;
  - 4) минимальный расход энергии управляющих сигналов;
  - 5) минимальный расход топлива;
  - 6) минимум ошибок управления (наведения);
  - 7) практическая реализуемость;
  - 8) независимость от условий применения (инвариантность);
  - 9) сопряжение с методами наведения при сопряжении этапов;
  - 10) сопряжение методов наведения носителя с методами наведения транспортируемых (доставляемых) объектов управления.

## 3.2 Классификация методов наведения

### 3.2.1 По количеству объектов-участников процесса наведения:

- *двухточечные (самонаведения)* – ОУ и цель;
- *трехточечные* – ПУ, ОУ и цель.

### 3.2.2 По наличию/отсутствию упреждения:

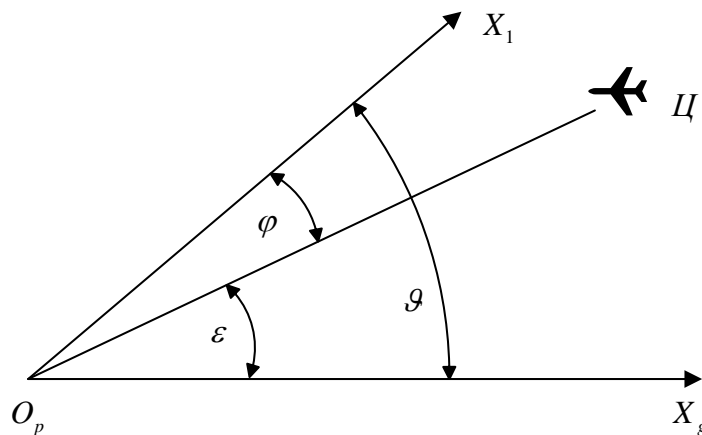
- *без упреждения;*
- *с упреждением.*

Таблица 1 – Классификация методов наведения

Классы	Двухточечные (самонаведения)	Трехточечные
Без упреждения (прямые)	<ul style="list-style-type: none"><li>• прямой;</li><li>• погони, флюгерный, путевой</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• совмещения, наложения, накрытия.</li></ul>
С упреждением	<ul style="list-style-type: none"><li>• прямой с постоянным углом упреждения;</li><li>• параллельного сближения (в мгновенную точку встречи);</li><li>• пропорционального наведения (со/без смещения смещением);</li><li>• модификация прямого и пропорционального наведения.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• полного спрямления;</li><li>• половинного спрямления.</li></ul>

## 4 Двухточечные методы наведения (самонаведения)

**4.1 Метод прямого наведения** - продольная ось  $OY$   $OX_1 = OX_{CB}$  в каждый момент времени должна совмещаться с направлением на цель, требуемый угол  $q_T$  должен быть равным нулю.



**Рисунок 1** – Кинематическая схема метода прямого наведения

$O_p$  и  $Ц$  – местоположение ОУ и цели в вертикальной плоскости;

$\varepsilon$  - угол наклона ЛВ «ОУ - цель» относительно горизонта - оси  $OX_g$  нормальной СК;

$\theta$  - угол тангажа ОУ;

$\varphi_{Ц}$  - угол между продольной осью ОУ (ось  $OX = OX_1 = OX_{CB}$  связанной СК) и ЛВ «ОУ - Ц»;

**Взаимная связь углов:**  $\varphi_{Ц} = \theta - \varepsilon$ . (4)

**Уравнение прямого метода** (уравнение идеальной связи):

$$\varphi_{Ц} = 0 ; \quad (5)$$

$$\theta = \varepsilon . \quad (6)$$

**Параметр рассогласования прямого метода** (алгоритм траекторного управления):

$$\Delta = \varphi_{Ц}; \quad (7)$$

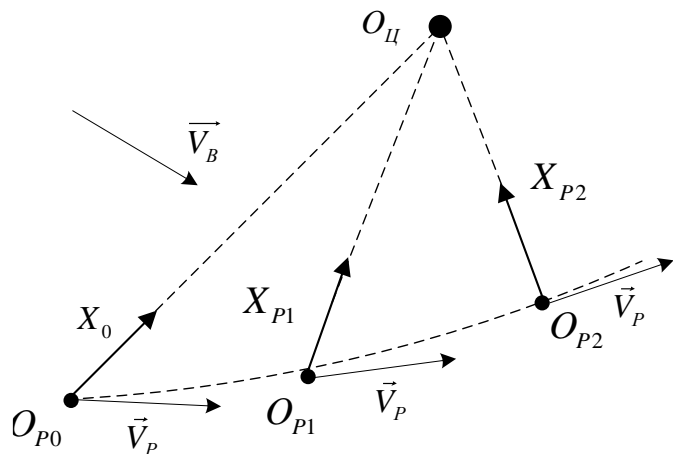
$$\Delta = \theta - \varepsilon . \quad (8)$$

➤ **Достоинства:**

- инвариантность к дальности наведения и высоте полета цели и ОУ;
- относительная простота ИВС:
  - ✓ для реализации необходимо измерять непосредственно бортовые пеленги  $\varphi_z$  и  $\varphi_v$  (**БРЛС, РГС, ТГС**) или углы  $\vartheta$  и  $\varepsilon$  с их последующим вычитанием;
  - ✓ возможность применения неподвижного координатора при совпадении осей ОУ и координатора.

➤ **Недостатки:**

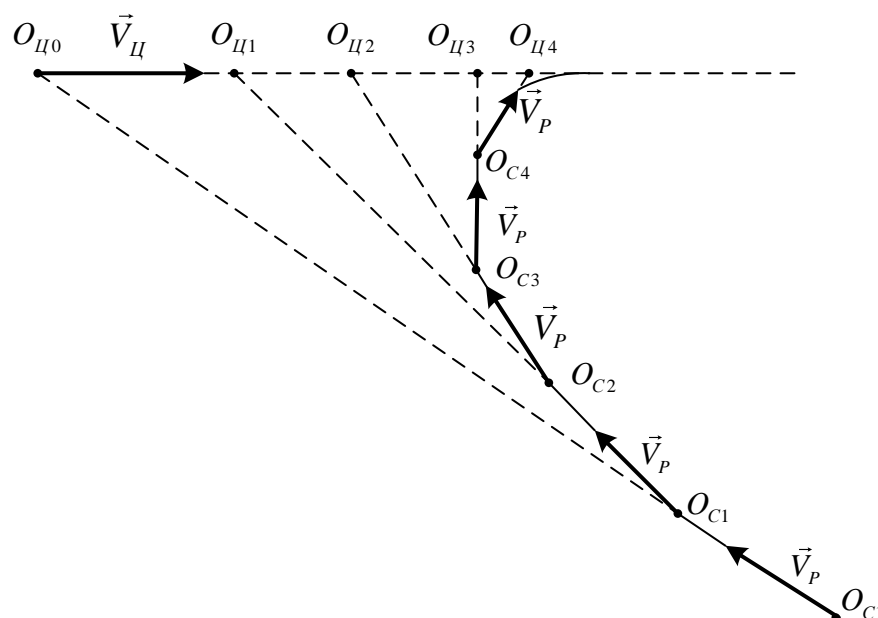
- **ограниченность применения** – только по неподвижным целям (скорость цели много меньше скорости ОУ);
- **низкая точность наведения** - большие поперечные (нормальные) перегрузки УО конечном этапе наведения (даже по неподвижным целям);
- **влияние ветра** – искривление траектории за счет сноса.



- точки  $O_{c0}, O_{c1}, O_{c2} \dots$  и оси  $O_{c0}X_{c0}, O_{c1}X_{c1} \dots$  – текущие положения ОУ и направление его продольной оси в моменты времени  $t_0 < t_1 < t_2$  при идеальном наведении;
- $V_B$  – вектор скорости ветра.

**Рисунок 2** – Влияние ветра на траекторию УО

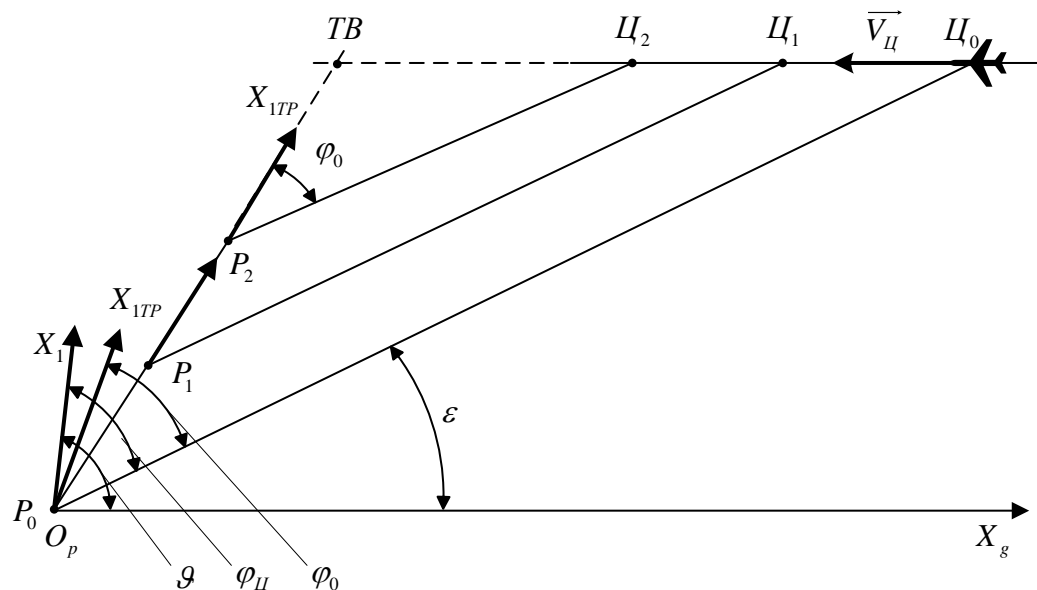
**Кривизна траектории будет тем больше, чем меньше скорость ОУ и больше скорость ветра в поперечном направлении.**



**Рисунок 3** – Графическое построение траектории прямых методов самонаведения



**4.2 Метод прямого наведения с постоянным углом упреждения** – в течение всего времени полета ОУ угол между продольной осью и линией визирования остается постоянным (развитие метода прямого наведения).



**Рисунок 4** – Кинематическая схема метода прямого наведения с постоянным углом упреждения

$\varphi_U$  - текущий угол между продольной осью ОУ (ось  $OX_1 = OX_{CB}$  связанной СК) и ЛВ (пеленг);

$\varphi_0$  - требуемый угол между продольной осью ОУ (ось  $OX_1 = OX_{CB}$  связанной СК) и ЛВ;

**Уравнение метода** (уравнение идеальной связи):

$$\varphi_U = \varphi_0; \quad (9)$$

$$\vartheta - \varepsilon = \varphi_0. \quad (10)$$

**Параметр рассогласования метода** (алгоритм траекторного управления):

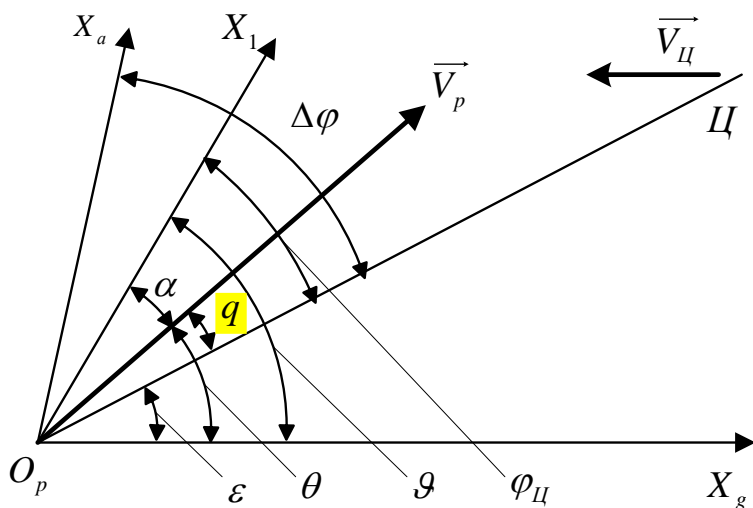
$$\Delta = \varphi_U - \varphi_0; \quad (11)$$

$$\Delta = \vartheta - \varepsilon - \varphi_0. \quad (12)$$

Метод обеспечивает меньшую кривизну траектории. Реализация – аналогична прямому.

**4.3 Метод погони** – с ЛВ «ОУ - цель» непрерывно совмещается **вектор истинной скорости ОУ**.

- **Флюгерный метод** – с ЛВ «ОУ - цель» непрерывно совмещается **вектор воздушной скорости ОУ**.
- При движении ОУ в невозмущенной атмосфере оба метода идентичны.



**Рисунок 5** – Кинематическая схема метода погони

$O_P X_K$  - направление оси координатора (визира, ГСН);  $\varphi_{Ц}$  - текущий угол между продольной осью ОУ (ось  $OX_1 = OX_{CB}$  связанной СК);  $q$  - угол отклонения вектора скорости ОУ относительно ЛВ «ОУ - Ц».

- **Уравнение метода** (уравнение идеальной связи):

$$q = 0; \quad (13)$$

$$\Theta = \varepsilon; \quad (14)$$

$$\varphi_{Ц} = \alpha. \quad (15)$$

- **Параметр рассогласования метода:**

$$\Delta = q; \quad (16)$$

$$\Delta = \Theta - \varepsilon; \quad (17)$$

$$\Delta = \varphi_{Ц} - \alpha. \quad (18)$$

➤ **Особенности метода погони:**

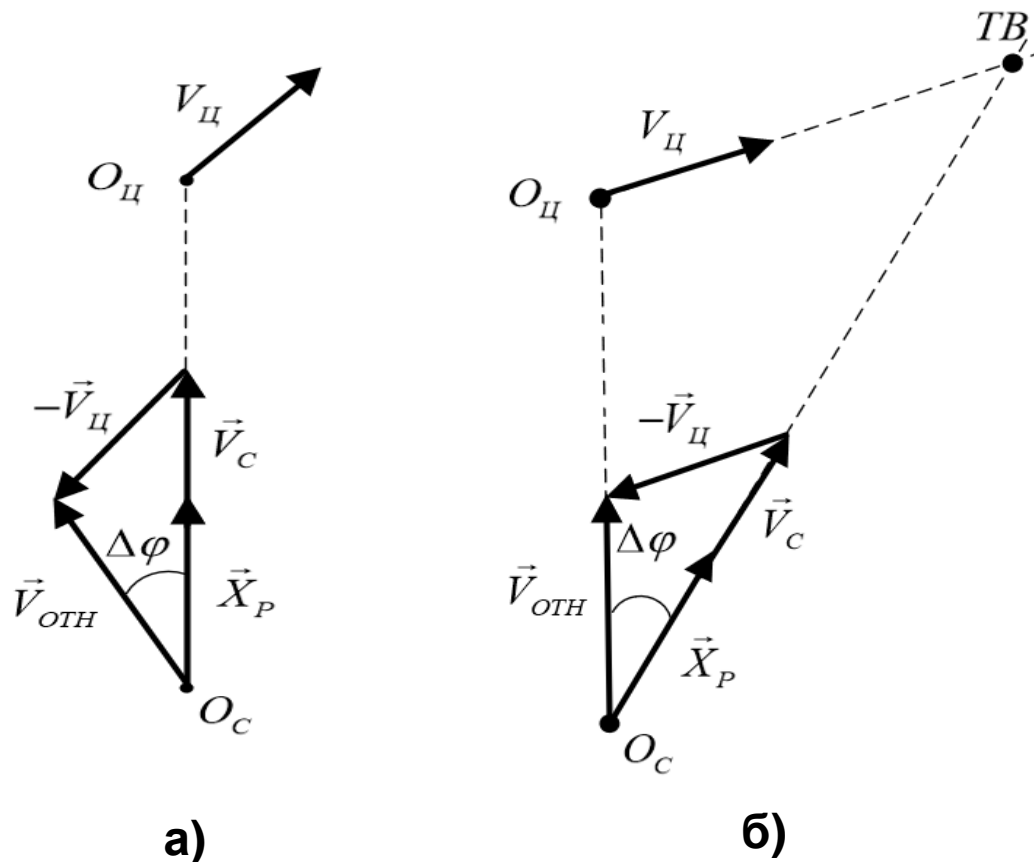
- ОУ независимо от своего положения относительно цели в момент начала наведения стремится выйти на одно и то же направление — строго в «хвост» цели;
- при угле скольжения (атаки)  $\alpha = 0$  ( $\beta = 0$ ) метод вырождается в метод прямого наведения, т.к.  $\varphi_{CB} = q_B + \alpha$  (в вертикальной плоскости),  $\varphi_{CG} = q_G + \beta$  (в горизонтальной плоскости).

➤ **Достоинства:**

- инвариантность к дальности наведения и высоте полета цели и ОУ;
- компенсирует наличие угла атаки и скольжения.

➤ **Недостатки:**

- ограниченность применения — только по неподвижным целям и при отсутствии ветра;
- искривление траектории за счет движения цели или бокового ветра;
- несовпадение мгновенного направления взаимного перемещения цели и ОУ, определяемого направлением вектора относительной скорости, с направлением на цель (необходимость угла упреждения — треугольник скоростей);
- кривизна траектории будет тем больше, чем больше скорость ОУ и больше скорость цели (ветра) в поперечном направлении;
- увеличение ошибок и времени наведения;
- уменьшение дальности действия.

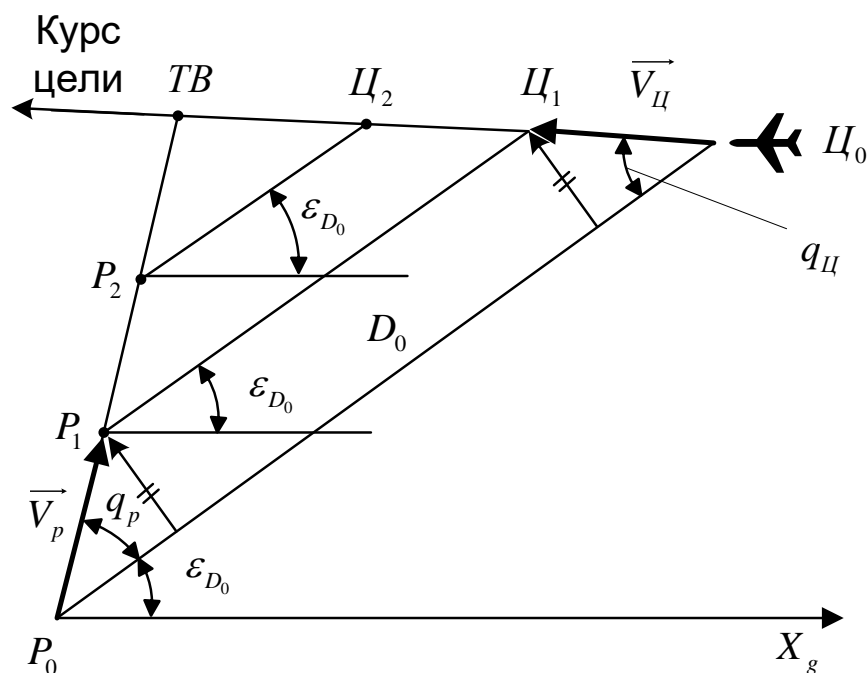


**Рисунок 6** - Треугольник скоростей при движении цели (необходимость угла упреждения)

- сложность выполнения маневра в диапазоне допустимых перегрузок на среднем и конечном этапах наведения (зависит от соотношения скоростей УО и цели);
- усложнение ИВС по сравнению с реализацией прямого метода наведения:
  - ✓ измерение или оценка угла  $\varphi_{ц}$  (между вектором скорости и ЛВ);
  - ✓ измерение пеленга  $\varphi_{ц}$  и угла атаки / скольжения  $\alpha/\beta$  (угломер БРЛС, РГС или ТГС, ФД - флюгерный датчик).

## 4.4 Метод параллельного сближения (в мгновенную точку встречи)

- в любой момент времени вектор скорости ОУ направлен в упрежденную точку (линия визирования перемещается параллельно сама себе).



**Рисунок 7** – Кинематическая схема метода параллельного сближения:

$\omega = \dot{\varepsilon}$  - угловая скорость вращения ЛВ;

$\varepsilon_{D_0}$  - угол наклона ЛВ в момент начала наведения.

➤ **Условия выполнения:**

$$\omega = \dot{\varepsilon} = \frac{V_P \sin q_P - V_{\zeta} \sin q_{\zeta}}{D} \approx 0; \quad (19)$$

➤ **Уравнение метода (варианты):**

$$\dot{\varepsilon} = 0; \quad (20)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{D_0}; \quad (21)$$

$$q_{PT} \approx \frac{V_{\zeta}}{V_P} \sin q_{\zeta}. \quad (22)$$

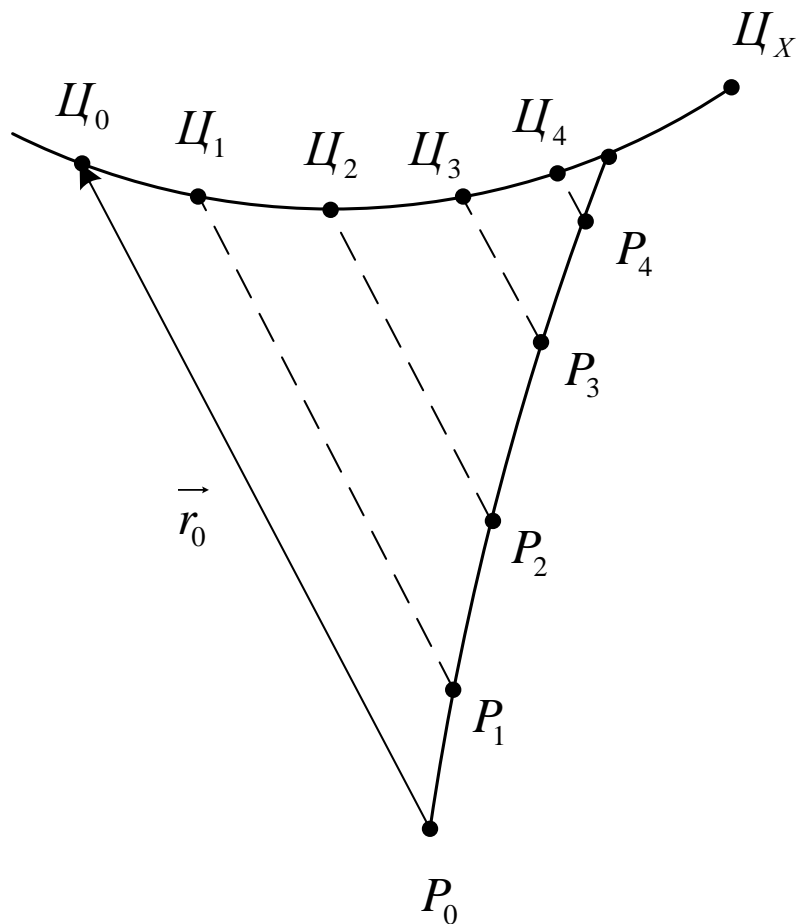
➤ **Параметр рассогласования (варианты):**

$$\Delta = \dot{\varepsilon}; \quad (23)$$

$$\Delta = \varepsilon - \varepsilon_{D_0}; \quad (24)$$

$$V_{\zeta} \sin q_{\zeta} = V_P \sin q_P, \text{ или } \quad (25)$$

$$\Delta = q_P - \frac{V_{\zeta}}{V_P} \sin q_{\zeta}. \quad (26)$$



- При наведении на неманеврирующую цель траектория ОУ прямолинейна.
- Для реализации метода необходим состав измерителей (датчиков), аналогичный реализации метода погони.

**Рисунок 8** - Метод параллельного сближения

## 4.5 Метод пропорционального наведения

- **Уравнение оптимального метода пропорционального наведения** (согласно ТАУ):

$$\mathbf{J}_{yO}^{Треб} = N_o |\dot{r}| \omega + 1,5 \mathbf{J}_\zeta, \quad (27)$$

где  $N_o = 3$  - навигационная постоянная,  $\dot{r}$  - скорость сближения,  $\mathbf{J}_\zeta$  - нормальное (боковое) ускорение цели.

- **Уравнение упрощенного метода пропорционального наведения** (цель движется равномерно и прямолинейно) – техническое упрощение оптимального правила (не надо измерять ускорение цели):

$$* \mathbf{J}_{yO}^{Треб} = N_o |\dot{r}| \omega. \quad (28)$$

- При пропорциональном наведении управление безынерционного объекта формируется пропорционально ускорению цели  $\mathbf{J}_\zeta$ .

- **Параметр рассогласования оптимального и упрощенного методов пропорционального наведения:**

$$\Delta = N_o |\dot{r}| \omega + 1,5 \mathbf{J}_\zeta - \mathbf{J}_{yO}; \quad (29)$$

$$* \Delta = N_o |\dot{r}| \omega - \mathbf{J}_{yO}. \quad (30)$$

- При учете  $\mathbf{J}_{yO} = \mathbf{V}_{yO} \dot{\Theta} \Rightarrow \mathbf{V}_{yO} \dot{\Theta} = N_o |\dot{r}| \omega$ :

$$\dot{\Theta} = \frac{N_o |\dot{r}|}{V_{yO}} \omega = C \omega. \quad (31)$$

- **Метод пропорционального наведения:** в любой момент времени **угловая скорость вращения вектора скорости ОУ** в плоскости управления должна быть **пропорциональна угловой скорости линии визирования ОУ – Ц (вариант 1)**.

- **Уравнение метода пропорционального наведения (вариант 1):**

$$\dot{\Theta}^{Треб} = C\dot{\varepsilon} = C\omega. \quad (31)$$

- **Параметр рассогласования (вариант 1):**

$$\Delta = \dot{\Theta} - C\omega. \quad (33)$$

При  $J_{yO} = V_{yO}\dot{\Theta}$  (34)

- **Уравнение метода пропорционального наведения (вариант 2):**

$$J_{yO}^{Треб} = CV_{yO}\omega = N_o |\dot{r}| \omega \quad (35)$$

- в любой момент времени **нормальное (боковое) ускорение ОУ** в плоскости управления должно быть **пропорционально угловой скорости линии визирования ОУ – Ц и скорости ОУ (вариант 2)**.

**Параметр рассогласования (вариант 2):**

$$\Delta = CV_{yO}\omega - J_{yO}. \quad (36)$$



## 4.6 Обобщения метода пропорционального наведения

- при  $C = 1$ :  $\dot{\Theta} = C\dot{\varepsilon}$ ,  $\Rightarrow \Theta = \varepsilon + q$ ,  
где  $q$  - постоянная интегрирования, или начальный угол упреждения;  
 $\Rightarrow \dot{\Theta} = \dot{\varepsilon} + \dot{q}$ ;  $\Rightarrow \dot{q} = \dot{\Theta} - \dot{\varepsilon} = (C - 1)\dot{\varepsilon} = 0$ ;  $\Rightarrow q = \text{const} = 0$  (37)  
**метод пропорционального наведения совпадает с методом погони** (в процессе наведения вектор скорости ОУ совпадает с ЛВ);
- при  $C \rightarrow \infty$ :  $\dot{\varepsilon} = \frac{J_{\text{Треб}}^{\text{УО}}}{CV_{\text{УО}}} \rightarrow 0$ , (38)  
 $\Rightarrow$  **метод пропорционального наведения совпадает с методом параллельного сближения** (в процессе наведения ОУ линия визирования перемещается параллельно сама себе);
- **при маневре цели** (изменении величины и направления ее вектора скорости) **угол упреждения должен изменяться** (нефиксированность траектории);
- **навигационная постоянная  $C \in [1, \infty[$  оказывает существенное влияние на вид траектории ОУ** (от кривизны при методе погони до прямолинейности при методе параллельного сближения) и **должна соответствовать условиям наведения**;

- **для реализации метода пропорционального наведения необходимо:**
- **измерять угловую скорость вращения ЛВ** в фиксированной СК (например, в земной или гироскопической);
  - **вырабатывать нормальное (боковое) ускорение ОУ**, пропорциональное угловой скорости ЛВ;
  - **выбирать коэффициент пропорциональности (навигационную постоянную)** в зависимости от условий применения (полусфера наведения (ракурс), дальность и соотношение скоростей объектов по величине и направлению, определяющие угловую скорость вращения ЛВ);
  - при  $C = 4 - 6$  **форма траектории достаточно близка к идеальной кинематической** ( $c = N_0 \rightarrow \infty$ );

#### 4.7 Модификация прямого метода и метода пропорционального наведения (последовательных упреждений)

- дополнительный угол упреждения выбирают пропорциональным угловой скорости линии визирования.

➤ **Параметр рассогласования (алгоритм траекторного управления):**

$$\Delta_{пу} = K_{\varphi}\varphi + K_{\omega}\omega, \quad (39)$$

где  $K_{\varphi}$  и  $K_{\omega}$  – постоянные коэффициенты, значения которых выбираются так, чтобы траектория наведения была близка к прямолинейной;

$\varphi$  – бортовой пеленг цели (относительно оси ОУ);

$\omega$  – угловая скорость ЛВ.

➤ **Состав датчиков (измерителей) ИВС:** угломер, формирующий оценки углов  $\varphi$  и угловых скоростей  $\omega$ .

## Задание для самостоятельной работы:

1. **Отработать материалы** семинара с использованием рекомендованной литературы.
2. **Знать:**
  - классификацию траекторий;
  - особенности движения объектов по криволинейной траектории;
  - факторы, определяющие классификацию систем координат;
  - классификацию и особенности систем координат;
  - основные параметры, характеризующие положение и движение объектов в различных системах координат;
  - понятие метода наведения и основные требования к ним;
  - факторы, определяющие классификацию методов наведения;
  - особенности основных методов самонаведения (трактовка, кинематическая схема, основные параметры и уравнения идеальной связи, алгоритмы траекторного управления, достоинства и недостатки, состав датчиков/измерителей);
3. **Уметь:**
  - моделировать и анализировать фрагменты криволинейной траектории;
  - изобразить кинематическую схему методов наведения в системе координат плоскости управления;
  - строить кинематическую траекторию графоаналитическим методом.
4. **Быть готовым:** ответить на вопросы для самоконтроля;

## Вопросы для самоконтроля

1. Поясните различие между различными видами траекторий наведения, определяющих их классификацию.
2. Охарактеризуйте возможную область применения нормальной неподвижной системы координат.
3. Охарактеризуйте нормальную неподвижную систему координат. Опишите возможную область применения и особенности нормальной подвижной системы координат.
4. Для чего необходима связанная система координат ОУ, предложите версии ее применения, и какие приборы/оборудование/датчики/измерители необходимы для этого ?
5. Какие системы координат позволяют охарактеризовать пространственную ориентацию ОУ, и какие приборы/оборудование/датчики/измерители необходимы для этого ?
6. Опишите возможную процедуру определения направления и скорости движения ОУ и какие приборы/оборудование/датчики/измерители необходимы для этого ?
7. Чем отличаются связанная и скоростная системы координат ОУ ? Опишите указанные системы координат, их взаимную ориентацию.
8. Охарактеризуйте понятие маневренности ОУ и факторы ее определяющие.
9. Что необходимо для сокращения радиуса разворота ОУ, чем он ограничен ?
10. Охарактеризуйте факторы, обеспечивающие движение ОУ по криволинейной траектории.

11. На что влияет метод наведения при управлении объектом ?
12. Перечислите и охарактеризуйте основные классы методов наведения ?
13. Изобразите кинематическую схему прямого метода наведения, запишите уравнения метода. Охарактеризуйте сущность метода.
14. Охарактеризуйте достоинства и недостатки прямого метода наведения, возможные варианты его реализации.
15. Постройте графически траекторию ОУ при наведении на маневрирующую/неманеврирующую цель при использовании прямого метода. Охарактеризуйте особенности метода.
16. Опишите особенности применения прямого метода с постоянным упреждением. Изобразите кинематическую схему.
17. Изобразите кинематическую схему метода погони, запишите уравнения метода. Охарактеризуйте сущность метода.
18. Охарактеризуйте достоинства и недостатки метода погони, возможные варианты его реализации.
19. Постройте графически траекторию ОУ при наведении на маневрирующую/неманеврирующую цель при использовании метода погони.
20. Объясните особенности реализации флюгерного метода наведения.
21. Изобразите кинематическую схему метода параллельного сближения, запишите уравнения метода. Охарактеризуйте сущность метода.

22. Охарактеризуйте достоинства и недостатки метода параллельного сближения, возможные варианты его реализации.

23. Постройте графически траекторию ОУ при наведении на маневрирующую/неманеврирующую цель при использовании метода параллельного сближения.

24. Изобразите кинематическую схему метода пропорционального наведения, запишите уравнения метода.

25. Охарактеризуйте достоинства и недостатки метода пропорционального наведения, возможные варианты его реализации.

26. Охарактеризуйте особенности реализации модификаций прямого метода и метода пропорционального наведения.

27. Поясните условия трансформации метода пропорционального наведения в методы погони/прямой.