

Алгоритмы управления полётом БЛА

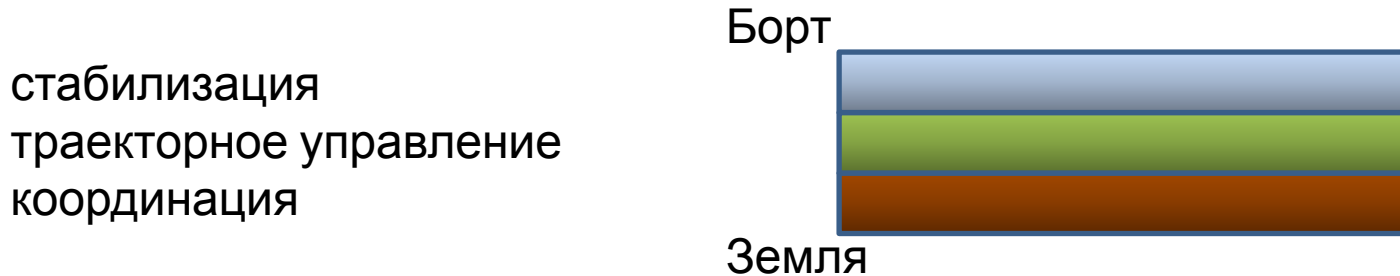
Система управления полётом (СУП) – часть управляющего комплекса БЛА

Аналогия с СУП других типов ЛА (беспилотных и пилотируемых)

Три уровня управления:

- координация (целеуказание, маршрутизация, наведение,...)
- траекторное управление (управление движением ЦМ)
- управление угловым движением (стабилизация, обеспечение устойчивости и управляемости)

Наземная и бортовая части СУП



Дистанционное пилотирование – ручная стабилизация и траекторное управление

Дистанционное управление – автоматическая стабилизация и ручное и траекторное управление

Автономный полёт – автоматические стабилизация и траекторное управление

Особенности для различных аэродинамических типов ЛА:

- планирующие (самолёты)
- мультироторные (коптеры) и с газодинамическим управлением
- вертолёты (управляемый вектор тяги винта)



Основной принцип аэродинамического управления ЛА планирующего типа

– создание (изменение) поперечных сил («подъёмной» и «боковой») путём изменения углов атаки и крена плоскокрылых аппаратов или углов атаки и скольжения - крестокрылых.

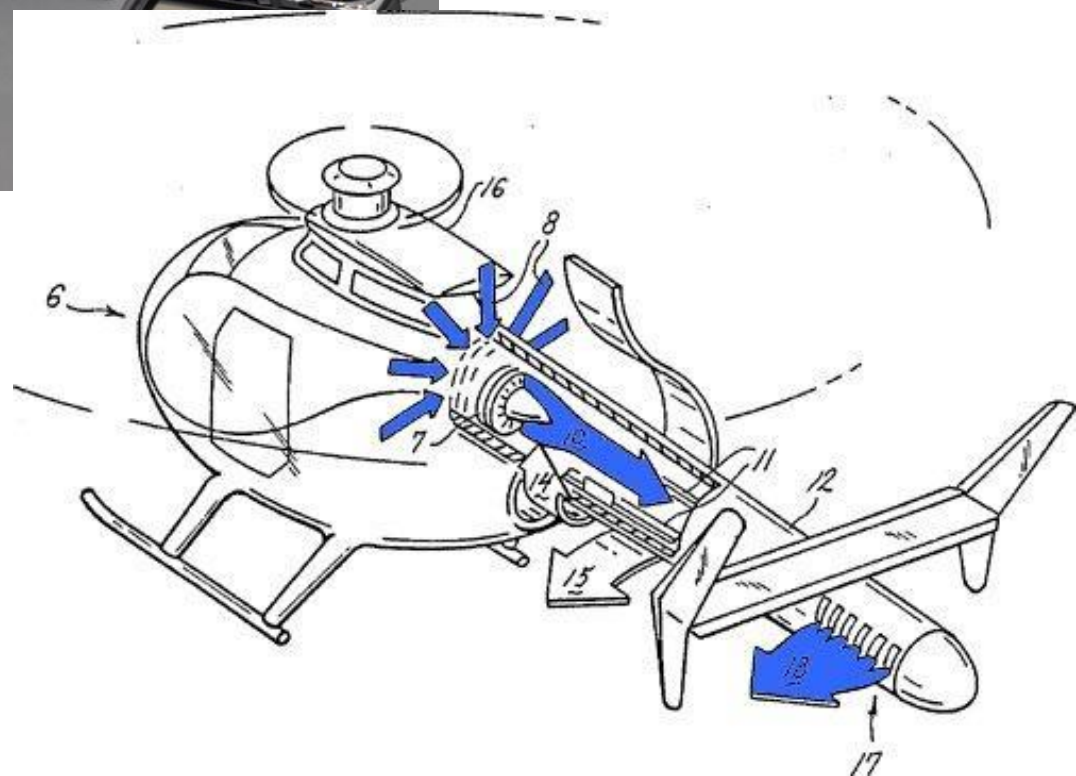
Альтернативы – непосредственное управление боковой и подъёмной силами средствами механизации крыла (закрылки, предкрылки, интерцепторы) или поворотным крылом, а также – газодинамическим управлением.

Изменение углов атаки, крена и скольжения – путем изменения углового положения ЛА – углов тангажа, крена и рыскания.

Моменты для изменения этих углов создаются рулями высоты (тангаж), направления (рыскание) и элеронами (крен).

Таким образом, **управление траекторным движением** (движением ЦМ) осуществляется **за счёт управления угловым движением**.

Система управления угловым движением – система стабилизации (автопилот), работающая в режимах стабилизации и слежения.



Основной принцип управления мультироторных ЛА и винтокрылых ЛА со струйным управлением

(вектор тяги – всегда по нормальной оси)

– создание (изменение) горизонтальных («пропульсивных») сил («продольной» и «боковой») путём изменения углов тангажа и крена аппаратов с соответствующим поворотом вектора тяги.

Изменение углов тангажа и крена – путем «разнотяга» винтов мультироторных аппаратов или реактивными струями у аппаратов со струйным управлением.

Таким образом, **управление траекторным движением** (движением ЦМ) осуществляется также **за счёт управления угловым движением**.



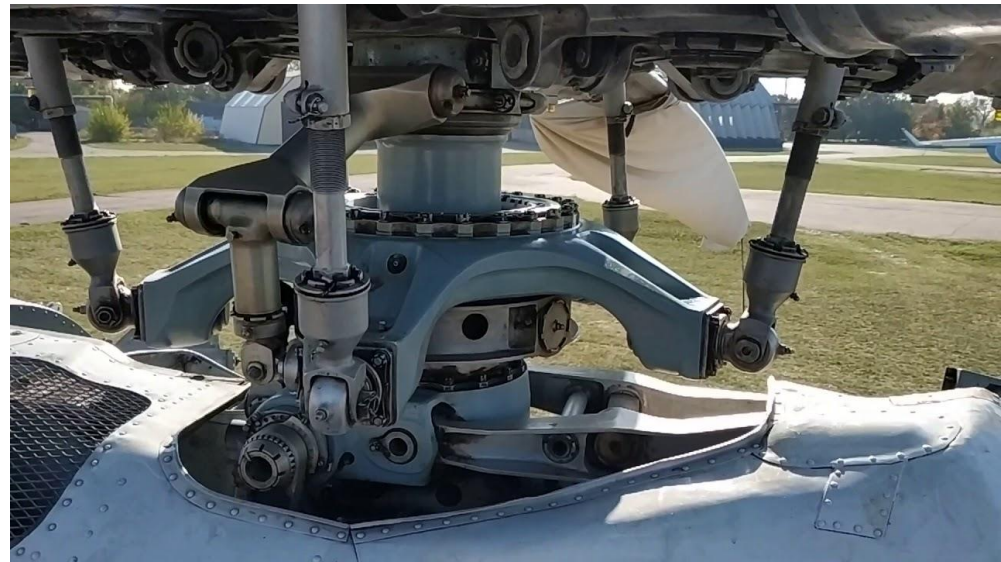
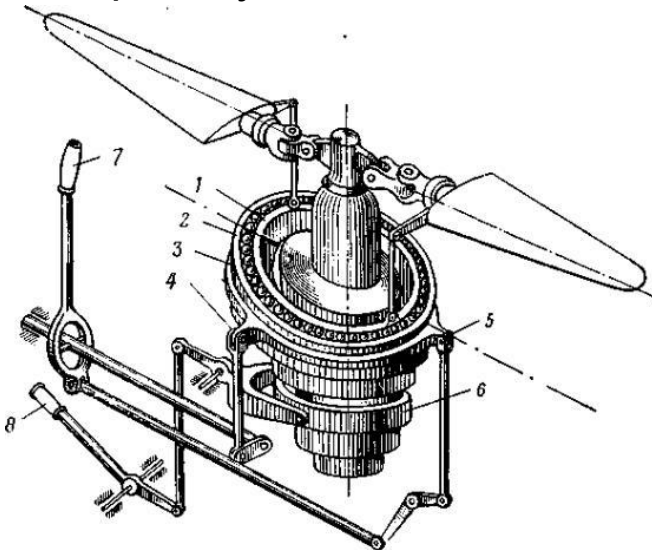
Основной принцип аэродинамического управления ЛА вертолётного типа

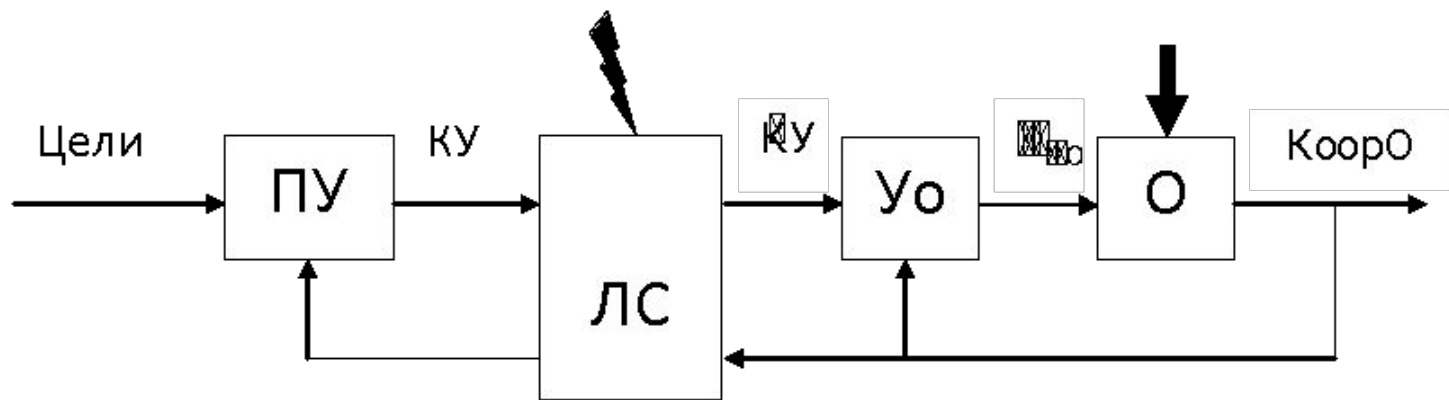
– создание (изменение) горизонтальных («пропульсивных») сил («продольной» и «боковой») путём циклического изменения углов лопастей.

Альтернативы – наклон самого аппарата за счёт моментов, возникающих при циклическом изменении углов лопастей.

Для циклического изменения углов лопастей создан **автомат перекоса**.

Таким образом, **управление траекторным движением** (движением ЦМ) осуществляется за счёт **управления винтом**.



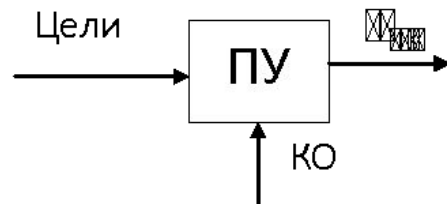


Создание моделей и исследование динамических свойств разрабатываемой системы

Модель формирования команд управления

При дистанционном пилотировании

(ручная стабилизация и траекторное управление)

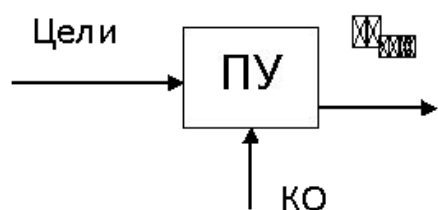


Символ: прямоугольник с крестоштриховкой и маленький квадрат с крестоштриховкой — команды на управляющие элементы ЛА
(рули, элероны, управление тягой (ДУ, винтов))

Модель ПУ = модель человека-оператора в зависимости от средств отображения информации и органов управления

При дистанционном управлении

(автоматическая стабилизация и ручное траекторное управление)



 – команды на систему обеспечения устойчивости и управляемости ЛА (систему стабилизации, работающую в режиме следящей системы)

Модель ПУ = модель ЛПР или человека-оператора в зависимости от средств отображения информации и органов управления

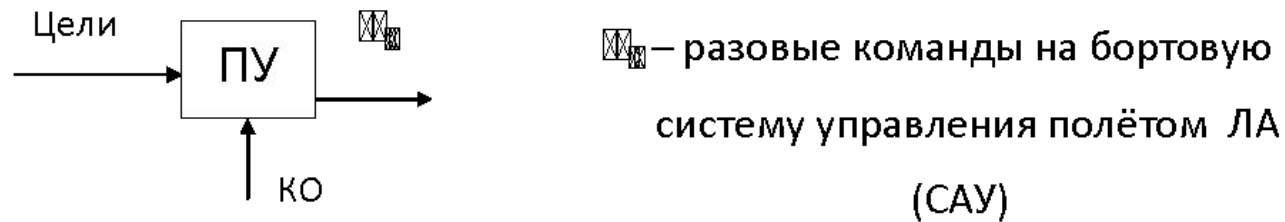
 – «вперед-назад», «правее-левее», «выше-ниже»,...

Эти команды соответствуют изменению задающих сигналов,
отслеживаемых бортовой системой

(семантика может быть разная, чаще всего – по приращению или по значению)

При автономном полёте

(автоматическая стабилизация и траекторное управление)

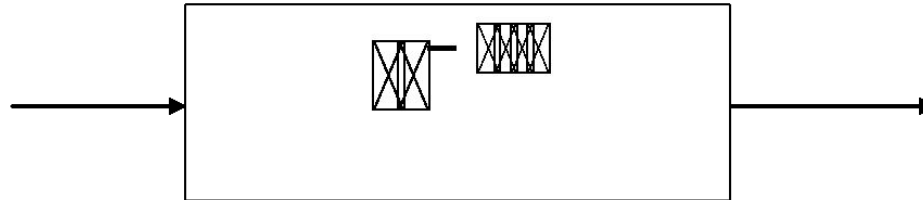


Модель ПУ = модель ЛПР в зависимости от средств отображения и ввода информации

— команды на изменение полётного задания, переключения режимов управления,...

Программа полёта (маршрут, полётное задание) введены заранее.

Модель линий связи без учёта помех



Модель помех с учётом их обработки (статистическая)

Модель объекта (с бортовой СУ):

- расчётная – со всеми **возможными** упрощениями;
- «полная» - для испытаний (проверок)

Расчётная:

- для задания целевых точек, маршрута и т.п. – кинематика ЦМ и динамика в перегрузках

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2$$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} t$$

$$\vec{a} = - \vec{g}$$

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2$$

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a} t$$

$$\vec{a} = \vec{a}_0 + \vec{a}_1 \psi$$

- для синтеза алгоритмов управления

Уравнения движения ЛА в траекторной СК

Кинематики ЦМ

$$\dot{x}_c = x_c \dot{\psi} \sin \psi$$

$$\dot{y}_c = x_c \dot{\psi} \cos \psi$$

$$\dot{z}_c = -x_c \dot{\psi} \sin \psi$$

Динамики ЦМ

$$\ddot{x}_c = -\dot{x}_c + \dot{y}_c \dot{\psi} \sin \psi - \dot{z}_c \dot{\psi} \sin \psi$$

$$\ddot{y}_c = (\dot{x}_c + \dot{y}_c \dot{\psi} \cos \psi) \dot{\psi} \sin \psi - (\dot{x}_c + \dot{y}_c \dot{\psi} \cos \psi) \dot{\psi} \cos \psi - \dot{z}_c \dot{\psi} \cos \psi$$

$$-\dot{x}_c \dot{\psi} \cos \psi = (\dot{x}_c + \dot{y}_c \dot{\psi} \cos \psi) \dot{\psi} \sin \psi + (\dot{x}_c + \dot{y}_c \dot{\psi} \cos \psi) \dot{\psi} \cos \psi$$

Кинематики углового движения

$$\dot{\psi} = \dot{\psi} \sin \psi + \dot{\psi} \cos \psi$$

$$\dot{\psi} = \frac{1}{\sin \psi} \dot{\psi} \sin \psi - \dot{\psi} \cos \psi$$

$$\dot{\psi} = \dot{\psi} - \dot{\psi} \dot{\psi} \sin \psi = \dot{\psi} - \dot{\psi} \dot{\psi} \sin \psi - \dot{\psi} \dot{\psi} \cos \psi$$

Динамики углового движения

$$\ddot{\psi} = ((J_y - J_z) \omega_y \omega_z + M_{Rx}) / J_x$$

$$\ddot{\psi} = ((J_z - J_x) \omega_z \omega_x + M_{Ry}) / J_y$$

$$\ddot{\psi} = ((J_x - J_y) \omega_x \omega_y + M_{Rz}) / J_z$$

«Полная» модель O

$$\begin{aligned} \text{Diagram 1} &= c^B \text{Diagram 2}; \\ \text{Diagram 3} + \text{Diagram 4} - \text{Diagram 5} &= \text{Diagram 6} - \text{Diagram 7}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array}^{ce} &= \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array} \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array} \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array}; \\ \frac{\begin{array}{c} \square \square \square \\ \square \end{array}^{cs}}{\begin{array}{c} \square \square \end{array}} &= - \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array}^{ce} \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array} - \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array} \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array} - \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array} \begin{array}{c} \square \square \\ \square \end{array}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \end{array} &= \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \end{array} \\ &= \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \end{array} \\ &= \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \end{array} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \end{array} = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \end{array} - \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \end{array};$$

$$\boxtimes = \left(\begin{array}{|c|} \hline \boxtimes \\ \hline \end{array}^2 + \begin{array}{|c|} \hline \boxtimes \\ \hline \end{array}^2 + \begin{array}{|c|} \hline \boxtimes \\ \hline \end{array}^2 \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$\mathbf{R} = -\mathbf{R}_{\text{rot}}(\mathbf{R}^T \mathbf{T}); \quad \theta = \arcsin(\mathbf{R}_{\text{rot}}/\mathbf{R});$$

$$\square\square\square = -\square\square_T\square\square\square + \Delta\square\square.$$

Банк аэродинамики (аэродинамических коэффициентов)

$$\bar{R}_A = \bar{R}_A \begin{pmatrix} \text{характеристики ЛА,} \\ \text{параметры движения ЛА,} \\ \text{параметры управления ЛА,} \\ \text{параметры воздушной среды} \end{pmatrix}$$

$\mathbf{X} = \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2$

характеристики ЛА,
 параметры движения ЛА,
 параметры управления ЛА,
 параметры воздушной среды

Характеристики ЛА: $S, l, b_{\text{сак}}, \lambda, \chi, \dots$

Параметры движения ЛА: N , α , β , ...

Параметры управления ЛА: $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \dots$

Параметры воздушной среды: $\rho(H)$, $a(H)$, $\mu(H)$,...

$$\begin{aligned} \square_{\square} &= \square_{\square} \square, \square \square, \square, \square_B, \square_S, \dots \square, \square, \dots \square = \frac{\square^2}{2} \square_{\square} \square, \square_B, \square_S, \dots, \square, \square, \dots \square \end{aligned}$$

$$\mathbb{E}_{\mathbb{P}} = \mathbb{E}_{\mathbb{P}}(\mathbb{E}, \mathbb{E}\mathbb{E}\mathbb{E}\mathbb{E}, \mathbb{E}, \mathbb{E}_{\mathbb{B}}, \mathbb{E}_{\mathbb{B}}, \dots, \mathbb{E}, \mathbb{E}, \dots) = \frac{\mathbb{E}^2}{2} \mathbb{E}\mathbb{E}\mathbb{E}_{\mathbb{B}} \mathbb{E}_{\mathbb{B}}, \mathbb{E}_{\mathbb{B}}, \mathbb{E}_{\mathbb{B}}, \dots, \mathbb{E}, \mathbb{E}\mathbb{E}, \dots \mathbb{E}$$

$$\mathbb{E}_\mathbb{P} = \mathbb{E}_\mathbb{P}(\mathbb{E}, \mathbb{E} \otimes \mathbb{E}, \mathbb{E}, \mathbb{E}_B, \mathbb{E}_3, \dots \mathbb{E}, \mathbb{E}, \dots) = \frac{\mathbb{E}^2}{2} \mathbb{E} \otimes \mathbb{E} \otimes \mathbb{E}_B, \mathbb{E}_3, \mathbb{E} \otimes \dots, \mathbb{E}, \mathbb{E} \otimes \dots \mathbb{E}$$

...

Изменения массы Δm и момента инерции

[illegible]

Модель двигательной установки (ДУ) и расхода

$$\bar{P} = \bar{P} \begin{pmatrix} \text{характеристики ДУ,} \\ \text{параметры движения ЛА,} \\ \text{параметры воздушной среды} \end{pmatrix}$$

$\square\square\square = \square\square\square\square$

характеристики ДУ,
 параметры движения ЛА, $\square$
 параметры воздушной среды

Модели приводов с учётом шарнирных моментов

$$\vec{F}_{\text{д}} = \vec{F}_d(\vec{v}, \rho) \quad (\text{параметры движения ЛА, параметры воздушной среды})$$

Модель силы тяжести

$$\bar{g} = \bar{g}(\varphi, \lambda, H) \quad - \text{геоид}$$
$$\bar{g} = \bar{g}(\varphi, H) \quad - \text{ эллипсоид вращения}$$

$\bar{g} = \bar{g}(H)$ – сфера или плоскость (стандартная атмосфера ГОСТ 4401-81)

Модель атмосферы и ветра

$\rho = \rho(\text{Параметры движения ЛА}),$

$$\mu = \mu(\text{Параметры движения ЛА}),$$

■ ■ ■

The diagram shows a 2x2 grid of 4x4 blocks on the left, followed by an equals sign. To the right of the equals sign are three terms representing the decomposition:

- A 2x2 grid of 2x2 blocks.
- A 2x2 grid of 4x4 blocks.
- A 2x2 grid of 2x2 blocks.

Особенности моделей многороторных аппаратов

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{r}_0}{dt} &= 0 \\ \frac{d\mathbf{r}_0}{dt} &= \mathbf{r}_0 \omega - \mathbf{r}_{c6} \omega \mathbf{r}_0; \\ \frac{d\mathbf{r}_0}{dt} &= 0 \end{aligned}$$

$$\mathbf{r}_0 = \frac{1}{\xi^2} \mathbf{r} - \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_4;$$

$$\mathbf{r}_0 = -\mathbf{r}_{01} + \mathbf{r}_{02} - \mathbf{r}_{03} + \mathbf{r}_{04};$$

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r} \frac{1}{\xi^2} - \mathbf{r}_1 \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3 \frac{1}{\xi^2} + \mathbf{r}_4 \mathbf{r}_3 + \mathbf{r}_4 \mathbf{r}_4,$$

$$\text{где } \mathbf{r}_{c6} = \mathbf{r} - \frac{\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_3 \mathbf{r}_3 + \mathbf{r}_4 \mathbf{r}_4}{0};$$

$\mathbf{r}_0$ - расстояние от геометрического центра до осей вращения винтов;

$\mathbf{r}_{0i}$ - расстояние от геометрического центра до центра масс вдоль продольной оси;

$\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \mathbf{r}_3 + \mathbf{r}_4$ - сила тяги, складывающаяся из сил тяги каждого из четырех винтов;

$-\mathbf{r}_0$
 $\mathbf{r} \mathbf{r}_0$ - проекции аэродинамической силы планера («ненесущей» части аппарата, то есть -

без учёта винтов);

$\mathbf{r}_{01}, \mathbf{r}_{02}, \mathbf{r}_{03}, \mathbf{r}_{04}$ - моменты из-за сопротивления вращению каждого из четырех винтов, зависящие, также как и тяга, от скорости их вращения.

Для аппаратов рассматриваемого типа аэродинамическая сила планера (без учёта винтов) сводится к силе сопротивления, которую с достаточной точностью можно принять пропорциональной квадрату скорости $F_{\text{с}} = \frac{\rho^2}{2} S_{\text{пл}}(C_{\text{с}})$. Здесь ρ - плотность воздуха в кг/м³, $S_{\text{пл}}$ - характерная площадь несущей части аппарата, $C_{\text{с}}(Re)$ - аэродинамический коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса Re

Модель тяги каждого винта в простейшем случае – статическая

$$F_{\text{в}} = F_{\text{ст}}(V_{\text{в}}),$$

но, с учётом высокой скорости вращения, приходится учитывать динамику, в первом приближении – апериодическим звеном

$$F_{\text{в}} = \frac{F_{\text{ст}}(V_{\text{в}})}{T_{\text{в}}^2 \omega^2 + 2T_{\text{в}}\omega + 1},$$

Так как управление по каждому из каналов задействует все четыре винта, то при одновременном управлении каждый канал будет испытывать воздействие других каналов.

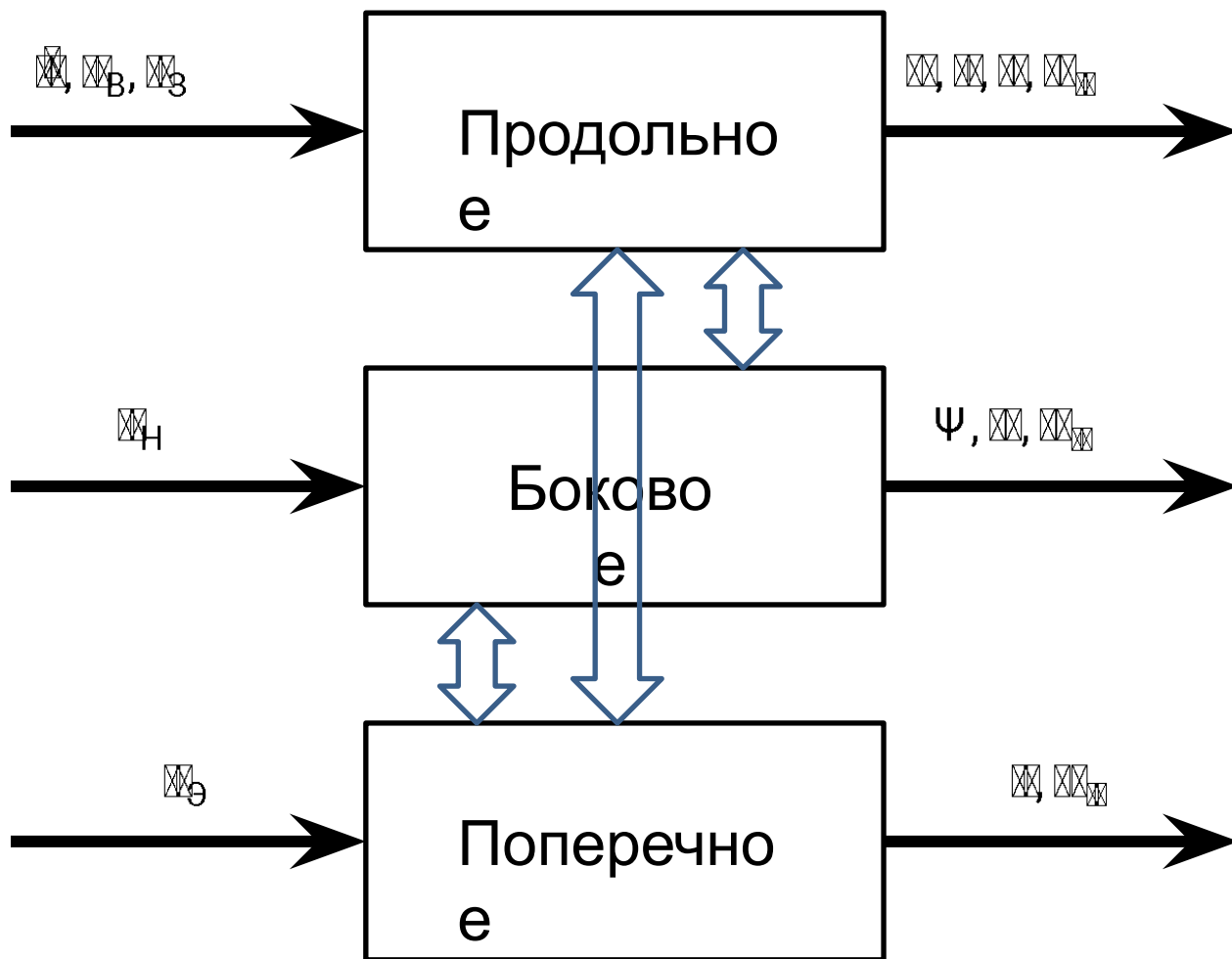
Как видно из выражений для сил и моментов, управление тангажом и движением в направлении продольной оси осуществляется разницей тяг передних и задних винтов, управление рысканием и движением в поперечном направлении – правых и левых, а в нормальном направлении для поддержания скорости – одновременным изменением тяги всех четырёх винтов. Диагональное расположение винтов, попарно вращающихся в разных направлениях, обеспечивает при управлении по остальным каналам отсутствие момента рыскания, по крайней мере – пока тяга некоторых из винтов не выходит на ограничения. Управляющие сигналы $u_{\alpha i}$ на каждый из четырех винтов формируются из сигналов управления по тангажу u_{α} , крену u_{β} , рысканию u_{γ} и скорости u_{δ} , которые добавляются к сигналам $u_{0\delta}$, соответствующим балансировочному режиму висения, то есть режиму, при котором суммарная тяга равна силе тяжести:

$$\begin{aligned} u_{\alpha 1} &= u_{01} + u_{\alpha} + u_{\beta} - u_{\gamma} + u_{\delta} u_{\alpha}; \\ u_{\alpha 2} &= u_{02} + u_{\alpha} - u_{\beta} - u_{\gamma} - u_{\delta} u_{\alpha}; \\ u_{\alpha 3} &= u_{03} + u_{\alpha} - u_{\beta} + u_{\gamma} + u_{\delta} u_{\alpha}; \\ u_{\alpha 4} &= u_{04} + u_{\alpha} + u_{\beta} + u_{\gamma} - u_{\delta} u_{\alpha}. \end{aligned}$$

Декомпозиции:

Разделение каналов
пространственного движения

Стабилизация и траекторное
управление



Уравнения продольного движения ЛА

$$\ddot{x} = 0, \quad \psi = \dot{\psi} = \ddot{\psi} = 0$$

Кинематики ЦМ

$$\dot{x}_c = \dot{x} + \dot{\psi} y_c$$

$$\dot{y}_c = \dot{y} - \dot{\psi} x_c$$

Динамики ЦМ

$$\ddot{x}_c = -\ddot{x} + \ddot{\psi} y_c$$

$$\ddot{y}_c = \ddot{y} - \ddot{\psi} x_c$$

Кинематики углового движения

$$\dot{\alpha} = \dot{\psi}$$

Динамики углового движения

$$\ddot{\alpha} = (\ddot{\psi} + \ddot{\theta}) / \cos \alpha$$

$$\alpha = \vartheta - \theta$$

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[\mathbb{E}_\mu] &= \mathbb{E}_\mu[\mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots] \\
 &= \frac{\mathbb{E}_\mu^2}{2} \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}_\mu &= \mathbb{E}_\mu(\mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots) \\
 &= \frac{\mathbb{E}_\mu^2}{2} \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}_\mu &= \mathbb{E}_\mu(\mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots) \\
 &= \frac{\mathbb{E}_\mu^2}{2} \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots, \mathbb{E}_\mu, \mathbb{E}_\mu, \dots]
 \end{aligned}$$

Возмущения

- реальные и заменяющие «отброшенное» при упрощениях

Ветер   , 

Влияние других составляющих движения

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \square & \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square & \square \\ \hline \end{array} = - \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \square & \square \\ \hline \square & \square \\ \hline \square & \square \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \square & \square & \square & \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square & \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square & \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square & \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square & \square & \square & \square \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \square & \square & \square & \square \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \square & \square & \square & \square \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{X} & \text{X} & \text{X} \\ \hline \text{X} & \text{X} & \text{X} \\ \hline \text{X} & \text{X} & \text{X} \\ \hline \end{array} = (\begin{array}{|c|c|} \hline \text{X} & \text{X} \\ \hline \text{X} & \text{X} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{X} & \text{X} & \text{X} \\ \hline \text{X} & \text{X} & \text{X} \\ \hline \end{array}) / \begin{array}{|c|c|} \hline \text{X} & \text{X} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{aligned} \square_{\square} &= \square_{\square} \square, \square \square \square, \square, \square, \square_B, \square_3, \square_H, \square_9, \dots \square = \\ &= \square_{\square} \square, \square \square \square, \square, \square, \square_B, \square_3, \dots \square + \Delta \square_{\square} \square, \square_H, \square_9, \dots \square \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \square_{\square} &= \square_{\square} \square \square, \square \square \square \square, \square, \square_B, \square_3, \square_9, \dots \square = \\ &= \square_{\square} \square \square, \square \square \square \square, \square, \square_B, \square_3, \dots \square + \Delta \square_{\square}(\square_9, \dots) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \square_{\square} &= \square_{\square} \square, \square \square \square, \square, \square_B, \square_S, \square_{\square}, \square_{\square}, \square_H, \square_9, \dots \square = \\ &= \square_{\square} \square, \square \square \square, \square, \square_B, \square_S, \square_{\square}, \dots \square + \Delta \square_{\square} (\square, \square_{\square}, \square_{\square}, \square_H, \square_9, \dots) \end{aligned}$$

Возмущения ветровые –
независимые от движения,
возмущения от других каналов
– **зависят** в том числе и от
параметров продольного
движения

Разделение продольного движения ЛА на каналы скорости и высоты (управление скоростью и управление высотой)

Канал скорости:

тяга → скорость

$$\dot{V} = -\frac{D}{m} + \frac{T}{m} - \frac{D_{\text{доп}}}{m}$$

Канал высоты:

руль высоты → момент тангажа → угол тангажа
→ угол атаки → наклон траектории → высота

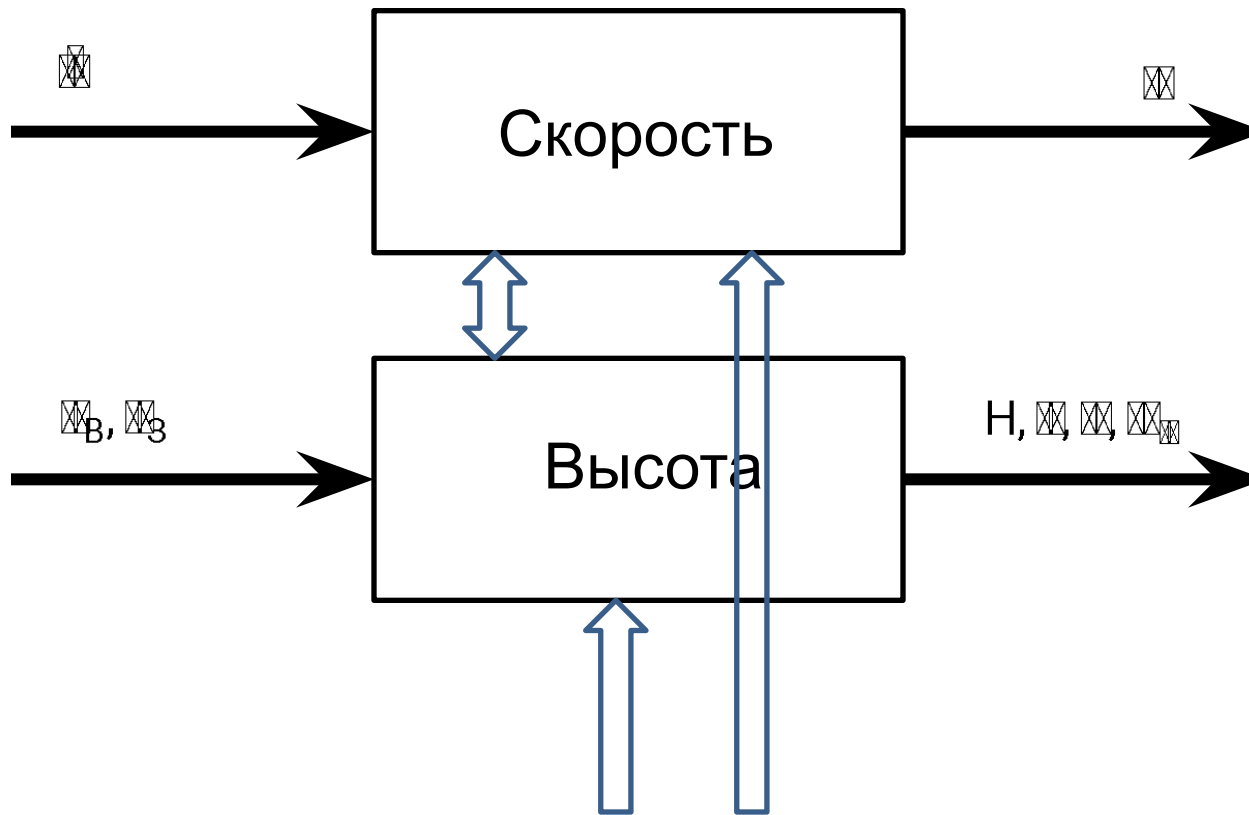
$$\dot{\theta} = \frac{M}{J_y}$$

$$\dot{\alpha} = \frac{M}{J_y} + \frac{M_{\text{доп}}}{J_y} - \frac{D_{\text{доп}}}{mV}$$

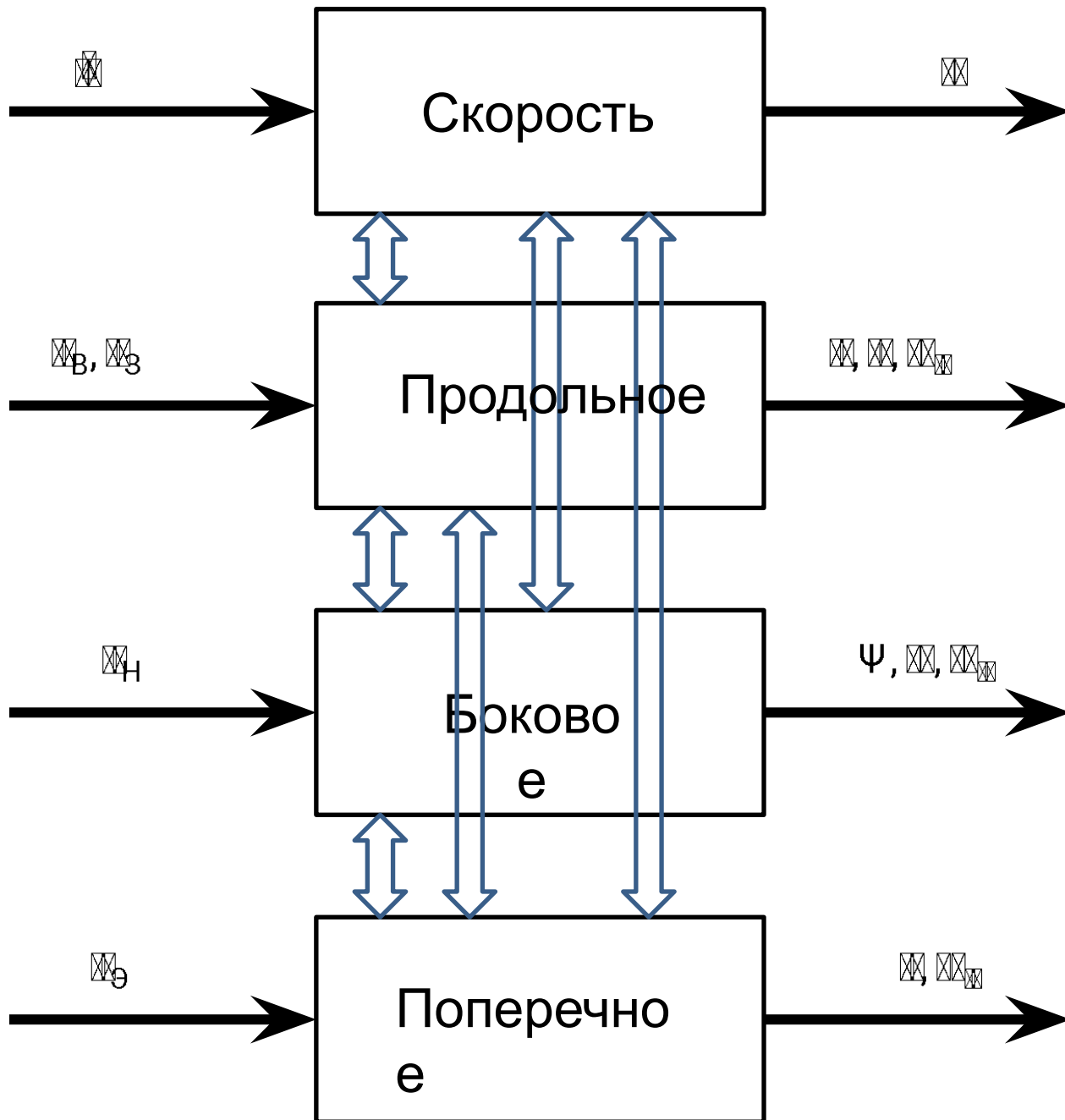
$$\dot{\alpha} = \frac{M}{J_y}$$

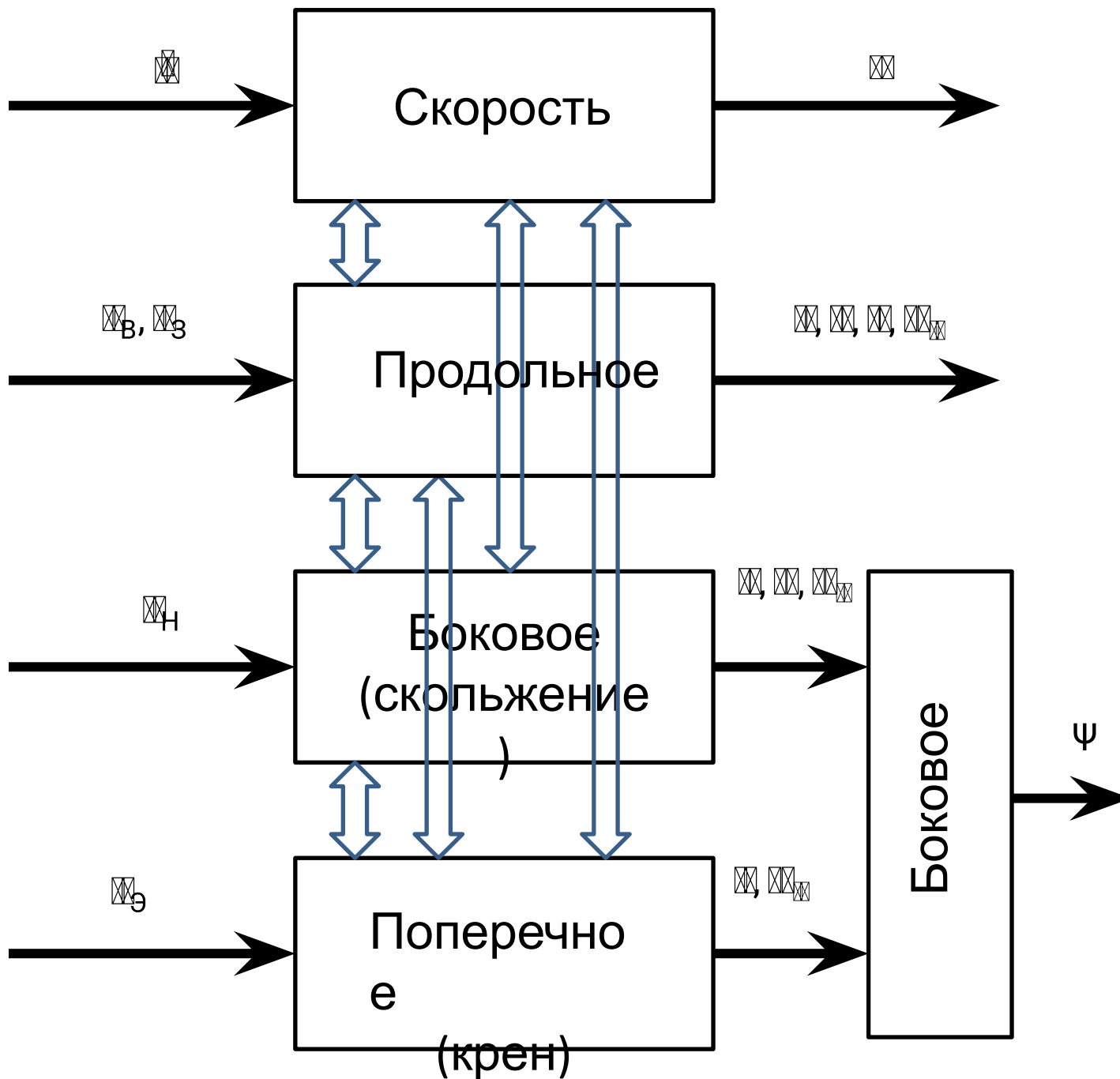
$$\dot{\alpha} = \left(\frac{M}{J_y} + \frac{M_{\text{доп}}}{J_y} \right) / \frac{D_{\text{доп}}}{mV}$$

$$\alpha = \vartheta - \theta$$



Управление скоростью – автомат тяги
– следящая система, изменяющая силу тяги
в зависимости от ошибки между текущей скоростью и её
заданным значением.





Основной принцип аэродинамического управления высотой ЛА

– изменение угла наклона траектории изменением подъёмной силы путём изменения угла атаки.

Альтернативы – непосредственное управление подъёмной силой средствами механизации крыла (закрылки, предкрылки, интерцепторы) или поворотным крылом, а также – газодинамическим управлением.

Изменение угла атаки – путем изменения углового положения ЛА – угла тангажа.

Момент для изменения этого угла создаётся рулём высоты.

Таким образом, управление траекторным движением по наклону траектории и высоте осуществляется за счёт управления угловым движением по тангажу.

Система управления угловым движением – система стабилизации (автопилот), работающая в режимах стабилизации и слежения.

Поворот траектории

Текущее положение определяется углами α и Ψ , требуемое – углами α_3 и Ψ_3 .

Это – часть задачи перелёта из точки с координатами $\mathbf{r}_g = (x_g, y_g, z_g)^T$ и скоростью $\mathbf{v}_g = (\alpha, \Psi)$ в точку с координатами $\mathbf{r}_3 = (x_{g3}, y_{g3}, z_{g3})^T$ и скоростью $\mathbf{v}_3 = (\alpha_3, \Psi_3)$.

Один из способов – решение краевой задачи

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}(\alpha, \Psi, \tau)$$

$$\mathbf{r} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \quad \mathbf{v} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$$

$$\mathbf{v}_3 = \mathbf{v}(\alpha, \Psi)$$

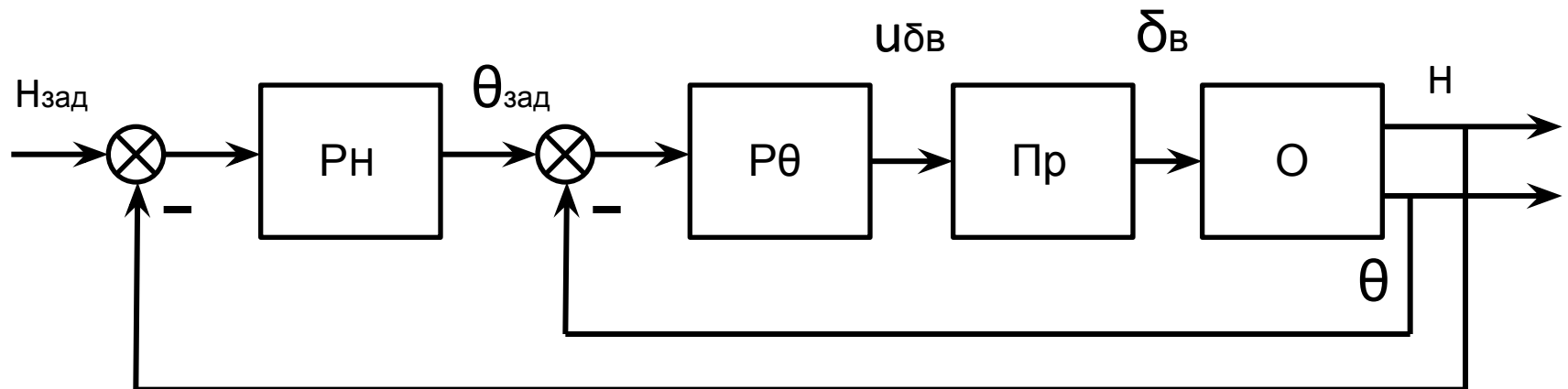
- более сложной, чем исходная (даже – при отсутствии возмущений)!

Основной способ – использование принципа управления по ошибке:

- создавать воздействие в зависимости от ошибки (например, пропорционально ей);
- гасить скорость при приближении к цели.

Возможный алгоритм управления высотой:

- по разнице между заданной и текущей высотой задаётся угол наклона траектории, «отработка» которого осуществляется системой управления угловым движением (поворотом по тангажу).



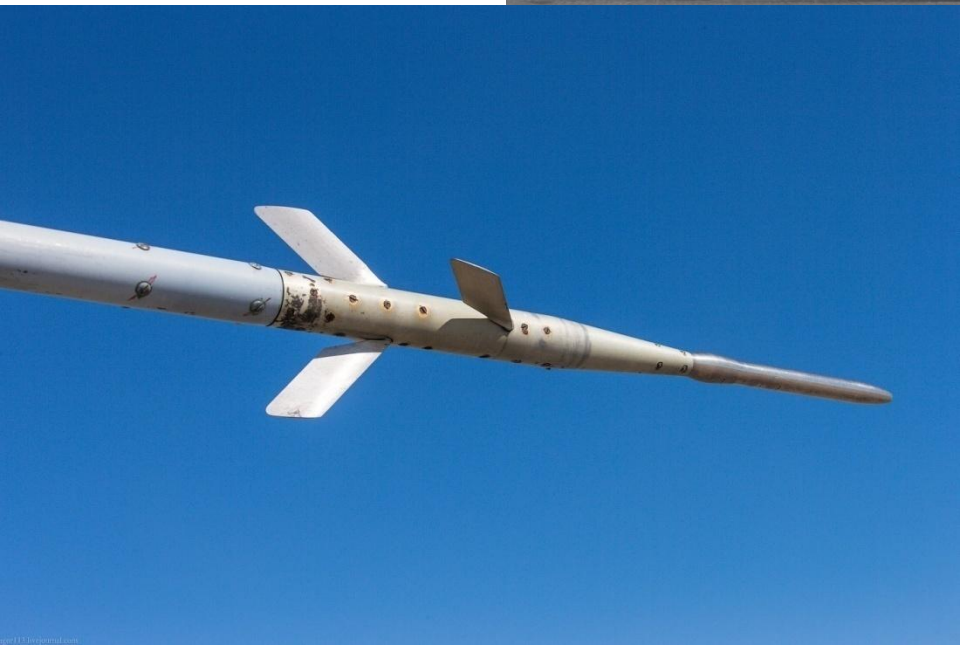
Так как $\dot{H} = H_{зад} - H$, а $\dot{\theta} = \dot{H} \cdot \frac{1}{H}$,

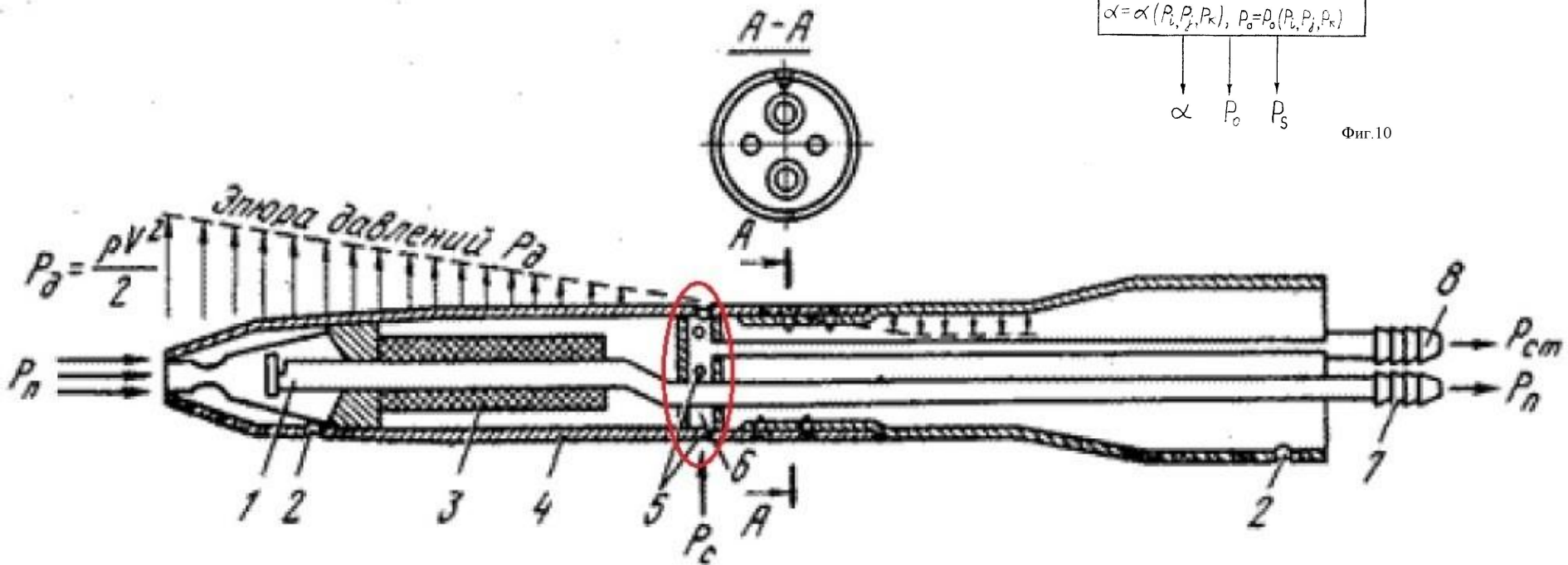
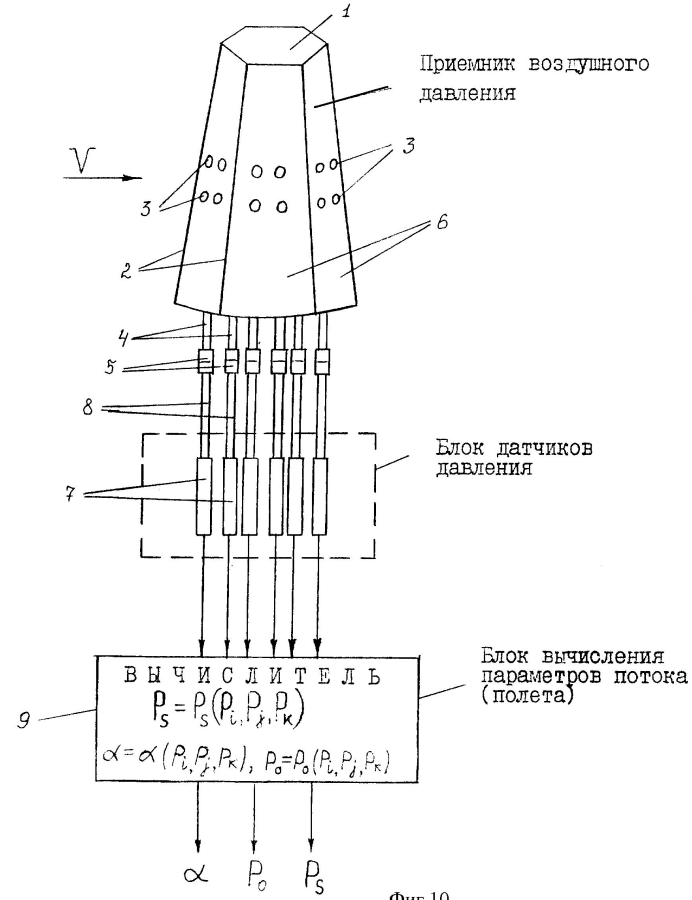
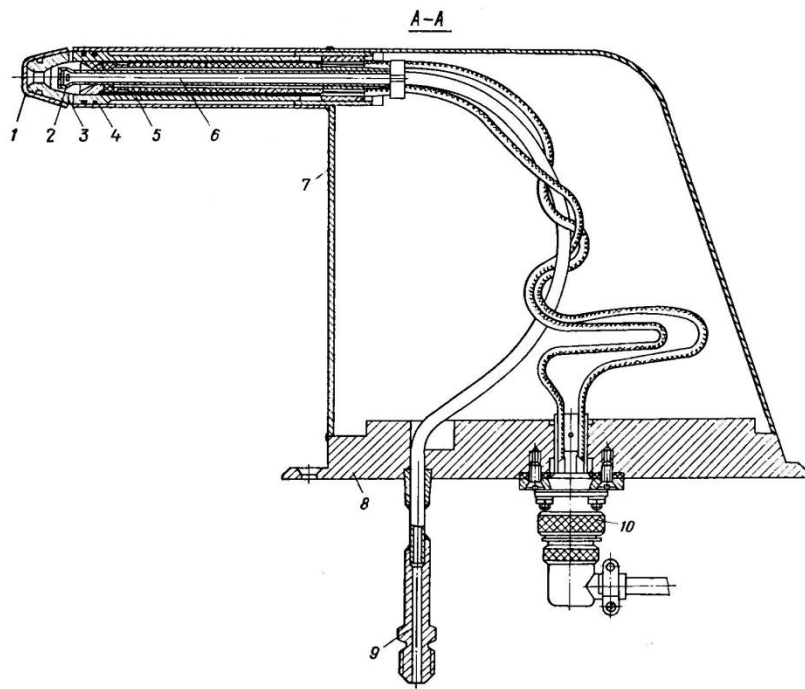
то есть угол θ в первом приближении пропорционален скорости изменения высоты, то такой подход почти идеально соответствует принципу управления по ошибке с гашением скорости при приближении к заданному значению

Измерения:

- высоты (высотомеры (альтиметры) – барометрические и радиовысотомеры);
- ускорения (ДЛУ – датчики линейных ускорений, акселерометры);
- угла атаки (флюгарки) – **большие динамические ошибки**;
- скоростного напора (приёмники воздушных давлений (ПВД), система воздушных сигналов (СВС), трубка Пито (Пито-Рейнольдса-Прандтля));
- датчик угла тангажа (гироскопический);
- датчик угловой скорости (ДУС).

Исполнительные устройства – приводы (рулей высоты, закрылков, предкрылков).





Измерения угла наклона траектории?

Измерение линейного ускорения (перегрузки),
угла атаки или угла тангажа

Традиционно – перегрузочный или тангажный автопилот.

$$\gamma = (\alpha + \theta) / \beta$$

$$\beta \gamma = \alpha - \theta$$

(из уравнения $\beta \gamma = \alpha + \theta - \theta$)

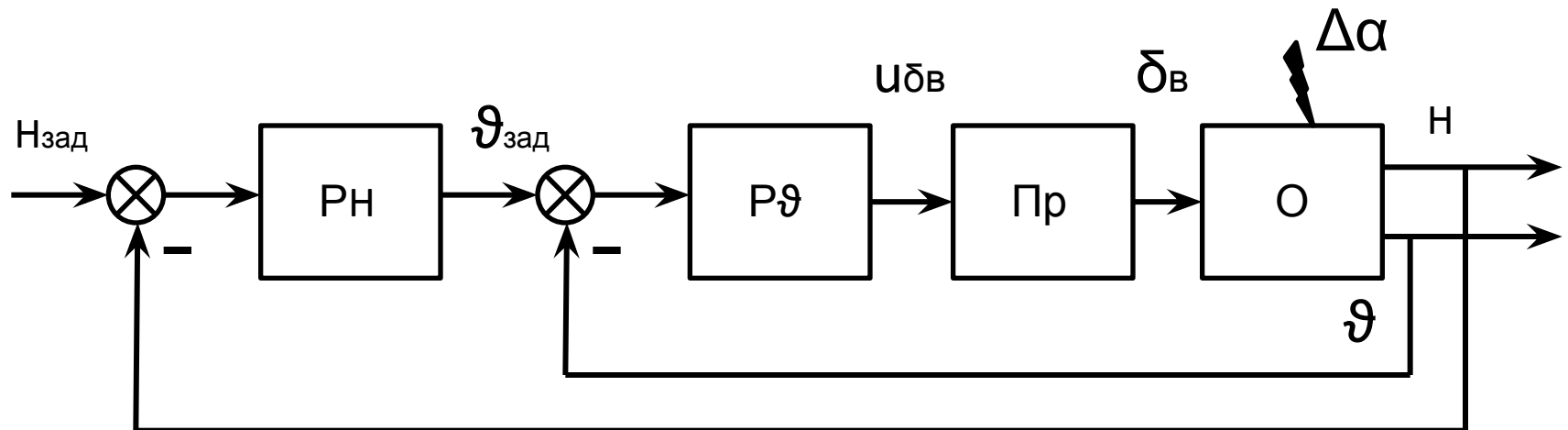
$$\beta \gamma = \alpha$$

$$\gamma = (\alpha + \theta) / \beta$$

$$\alpha = \beta \gamma - \theta$$

Управление высотой тангажным автопилотом:

- по разнице между заданной и текущей высотой задаётся угол тангажа, «отработка» которого осуществляется системой управления угловым движением (поворотом по тангажу);
- для обеспечения устойчивости внешнего контура необходимо замыкание по вертикальной скорости (на схеме не показано).



Нет непосредственной связи между изменением высоты и углом тангажа!

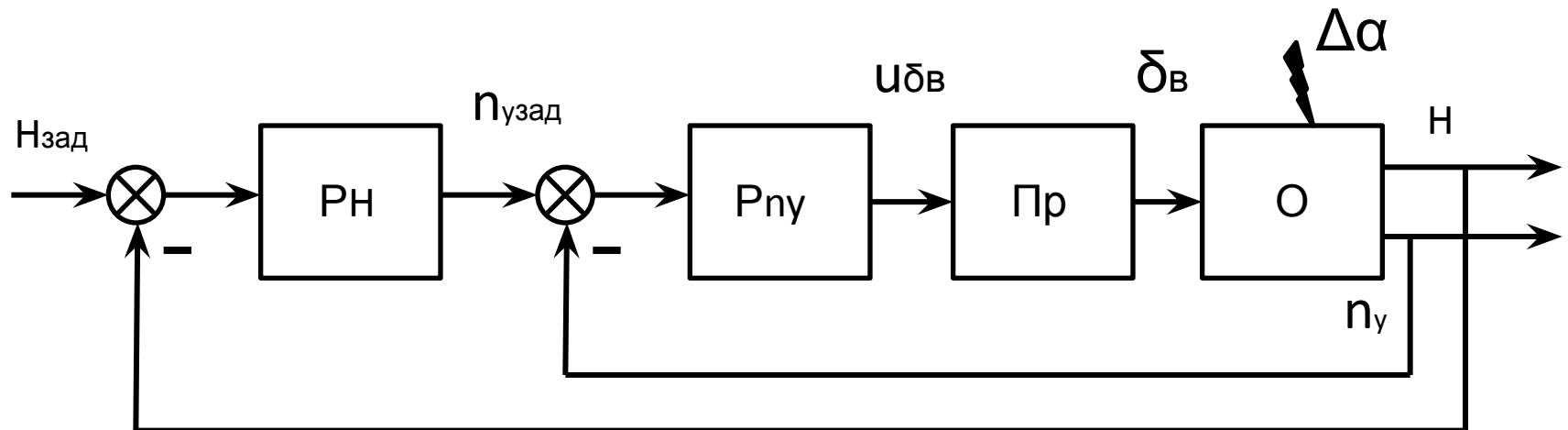
Работоспособность зависит от того, насколько угловое движение «быстрее» траекторного, так как для искривления траектории нужно менять угол атаки, а не угол тангажа, но при близкой скорости изменения углов тангажа и наклона траектории угол атаки $\alpha = \vartheta - \theta$ будет меняться медленно!

«Затянутая» отработка возмущений по углу атаки, так как при появлении возмущения $\Delta\alpha$ угол тангажа измениться не сразу, а лишь под действием изменившегося момента тангажа.

По этой же причине – необходимость отдельного контура по ограничению угла атаки (чтобы избежать выхода на закритические значения).

Управление высотой перегрузочным автопилотом:

- по разнице между заданной и текущей высотой задаётся перегрузка, «отработка» которой осуществляется системой управления угловым движением;
- для обеспечения устойчивости внешнего контура желательно использовать интеграл от перегрузки (на схеме не показано).



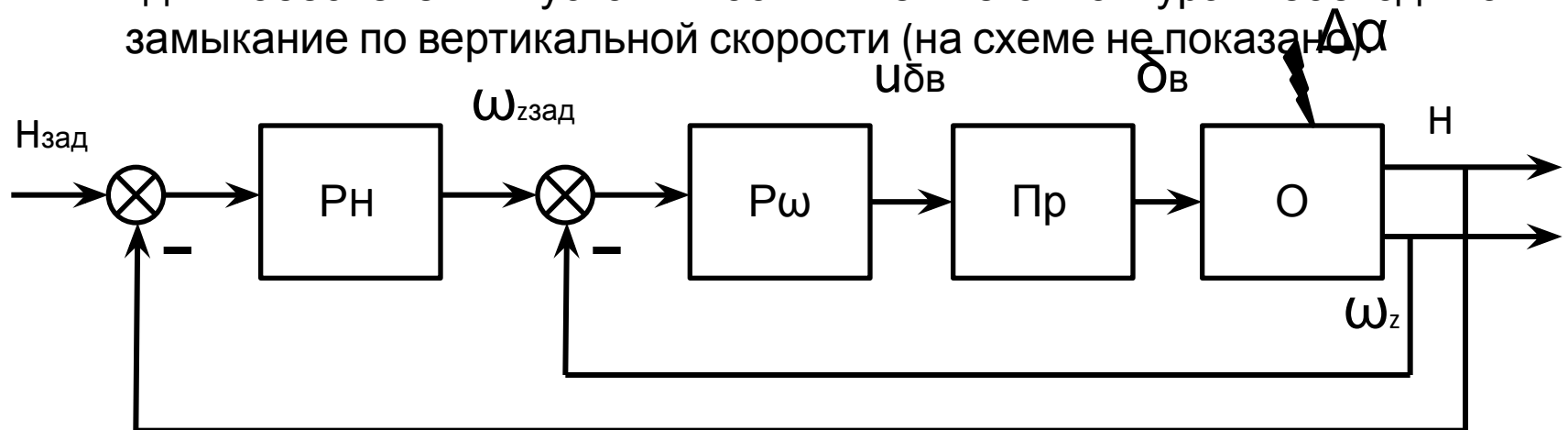
Непосредственная связь между перегрузкой и изменением наклона траектории и почти непосредственное влияние перегрузки на изменение высоты!

«Затянутая» отработка заданной перегрузки.

Остаётся необходимость отдельного контура по ограничению угла атаки (чтобы избежать выхода на закритические значения).

Управление высотой изменением угловой скорости:

- по разнице между заданной и текущей высотой задаётся угловая скорость ЛА, «отработка» которой осуществляется системой управления угловым движением;
- для обеспечения устойчивости внешнего контура необходимо замыкание по вертикальной скорости (на схеме не показано);



Прямое воздействие на первопричины всех изменений из-за чего не нужно решать промежуточных задач!

Так как при механическом движении (в том числе – полёте) воздействовать можно лишь на изменение скорости, то и воздействовать будем на скорость, а положение использовать как информацию для определения ошибки.

При аэродинамическом управлении аэродинамическим ЛА воздействие для искривления траектории создаётся поворотом аппарата, можно пытаться осуществлять траекторное управление управлением угловой скоростью.

Например, в продольном канале нужное изменение высоты обеспечивать управлением угловой скоростью тангажа.

Но – все недостатки тангажного автопилота!

Контур управления угловым движением (устойчивости и управляемости)

$$\ddot{\alpha} = \ddot{\vartheta} + \ddot{\theta} - \ddot{\alpha}_{\text{desired}}$$

$$\ddot{\alpha} = \ddot{\alpha}_{\text{desired}}$$

$$\ddot{\alpha} = (\ddot{\alpha}_{\text{desired}} + \ddot{\alpha}_{\text{desired}}) / 2$$

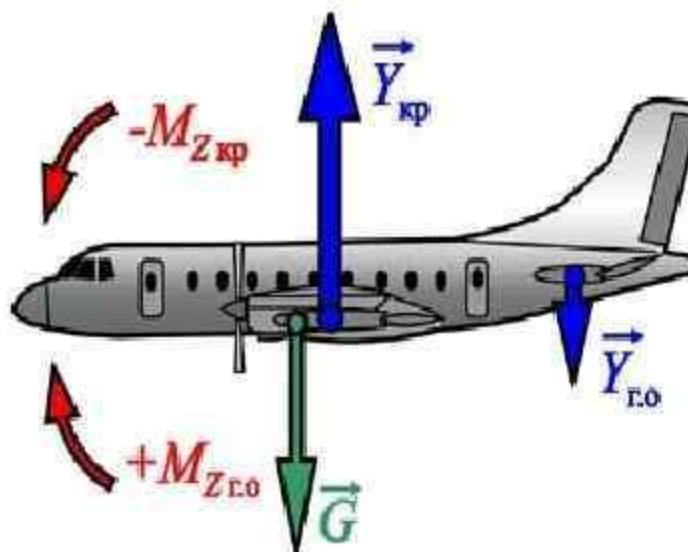
$$\alpha = \vartheta - \theta$$

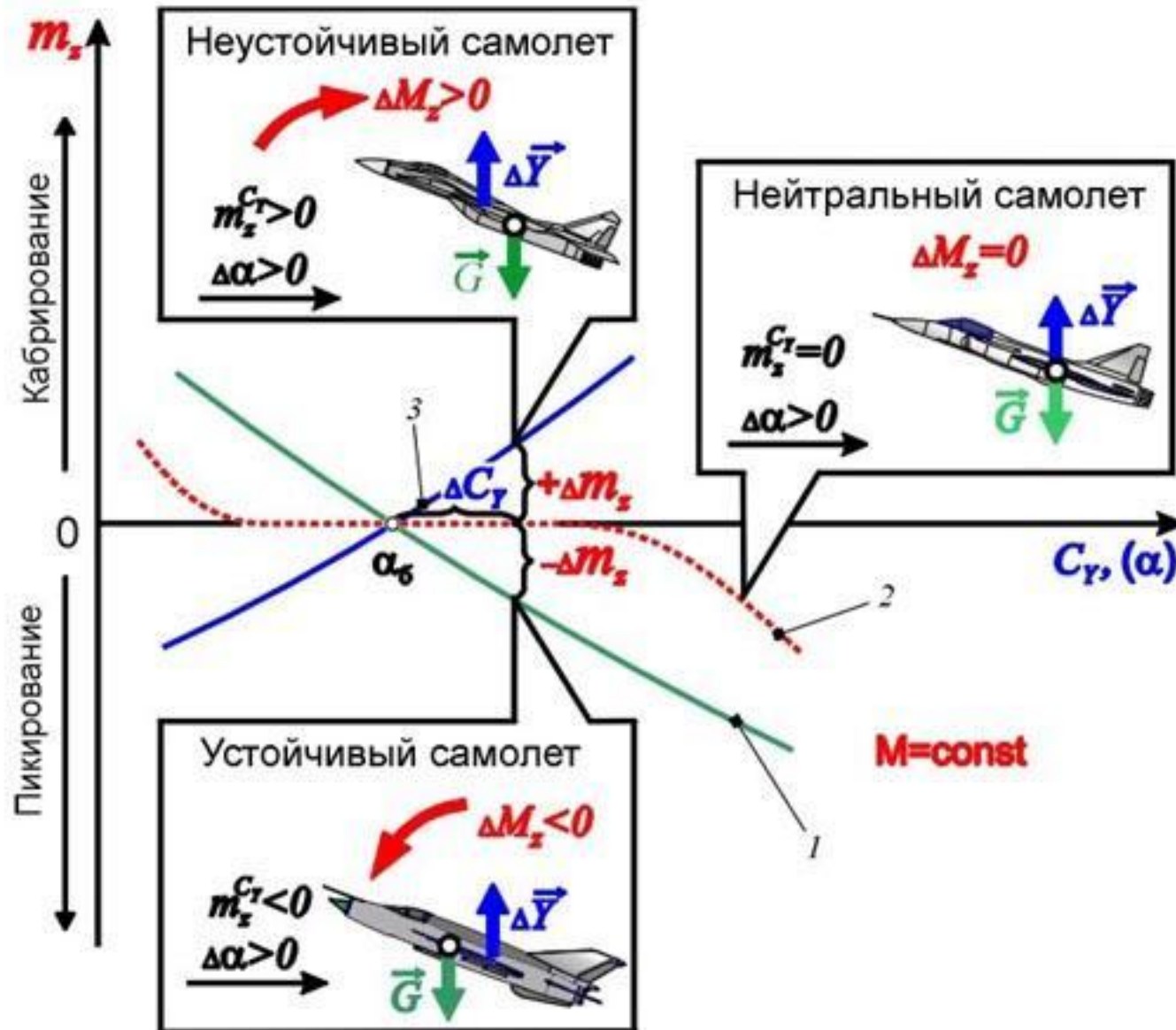
$$\ddot{\alpha} = \frac{\ddot{\alpha}_{\text{desired}}^2}{2} \ddot{\alpha}_{\text{desired}}, \ddot{\alpha}_B, \ddot{\alpha}_3, \dots, \ddot{\alpha}, \ddot{\alpha}_{\text{desired}}, \dots$$

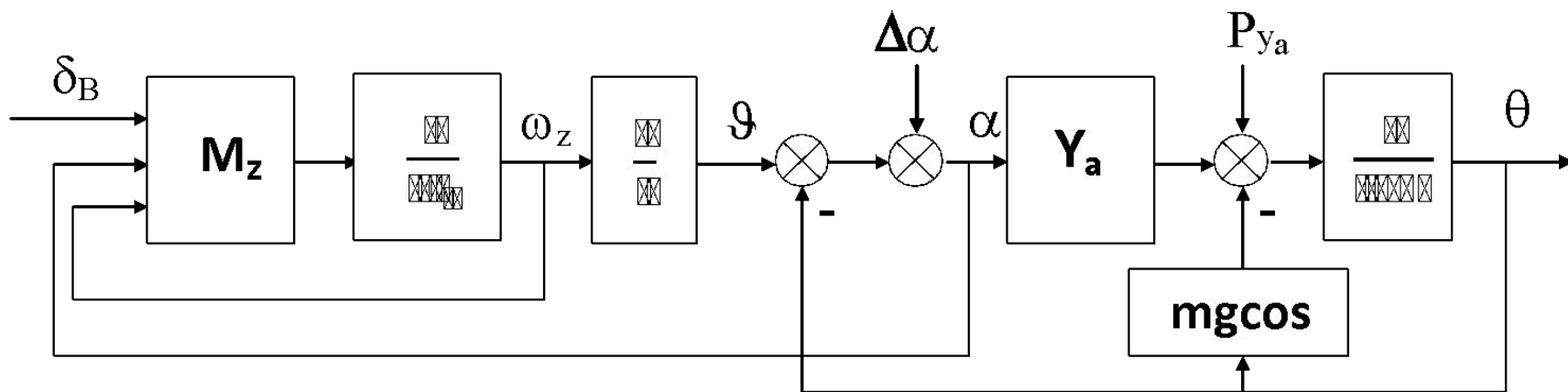
$$\ddot{\alpha} = \frac{\ddot{\alpha}_{\text{desired}}^2}{2} \ddot{\alpha}_{\text{desired}}, \ddot{\alpha}_B, \ddot{\alpha}_{\text{desired}}, \dots, \ddot{\alpha}, \ddot{\alpha}_{\text{desired}}, \dots$$

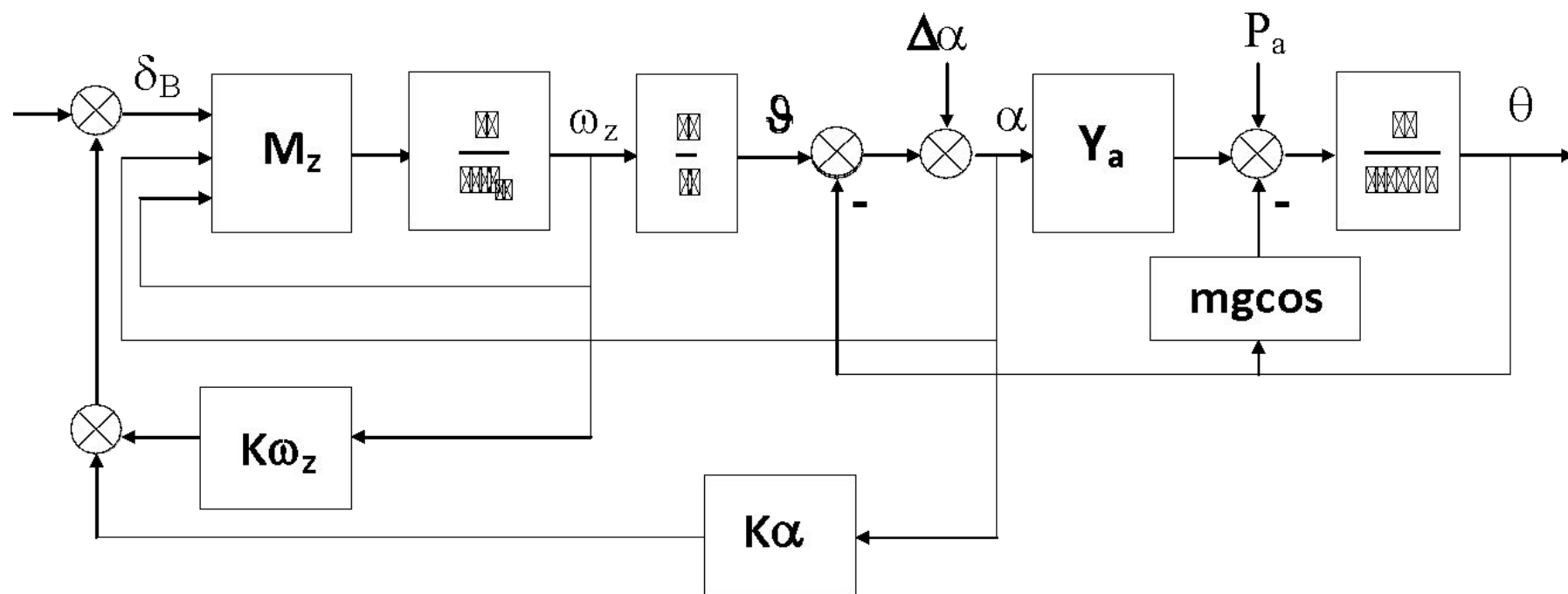
Балансировка самолета

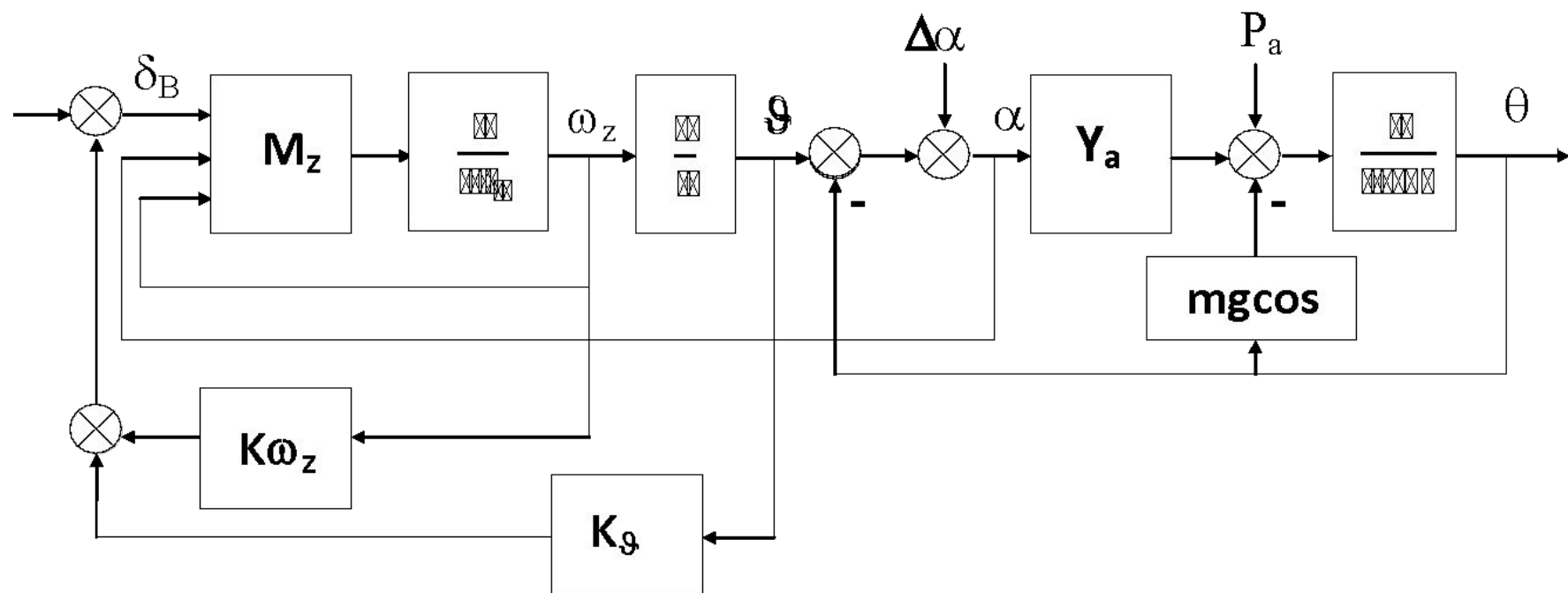
- $M_{z_{кр}}$ - пикирующий момент
- + $M_{z_{г.о}}$ - кабрирующий момент





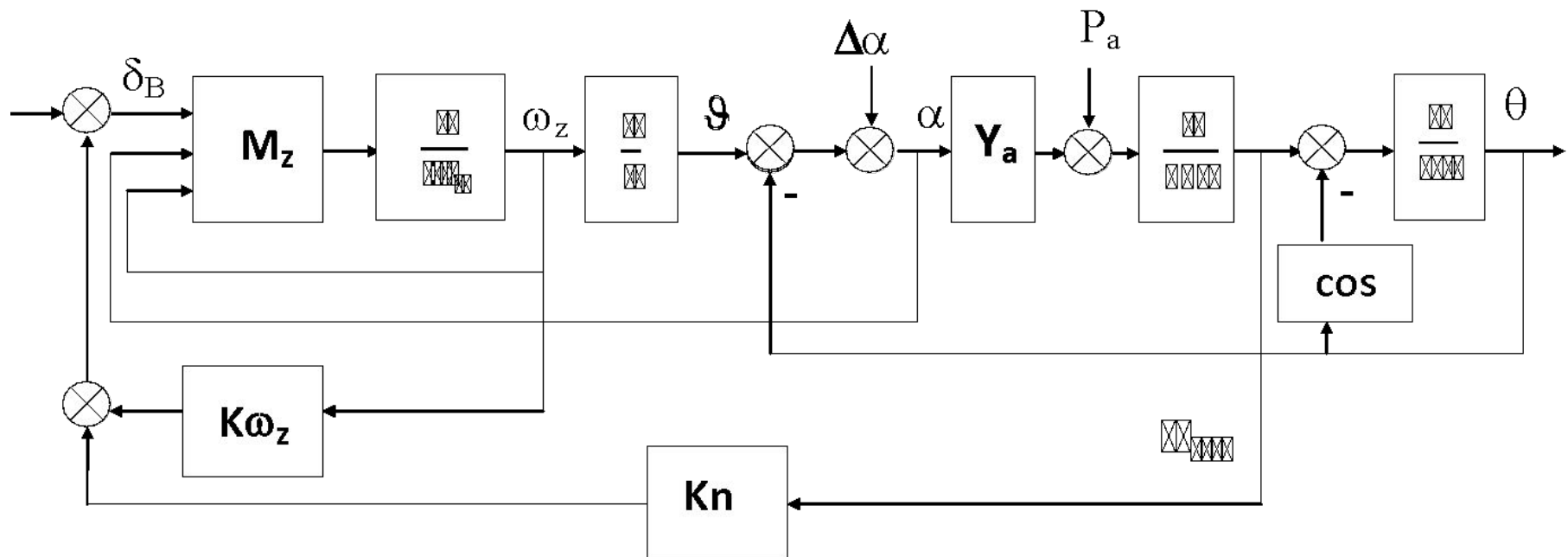


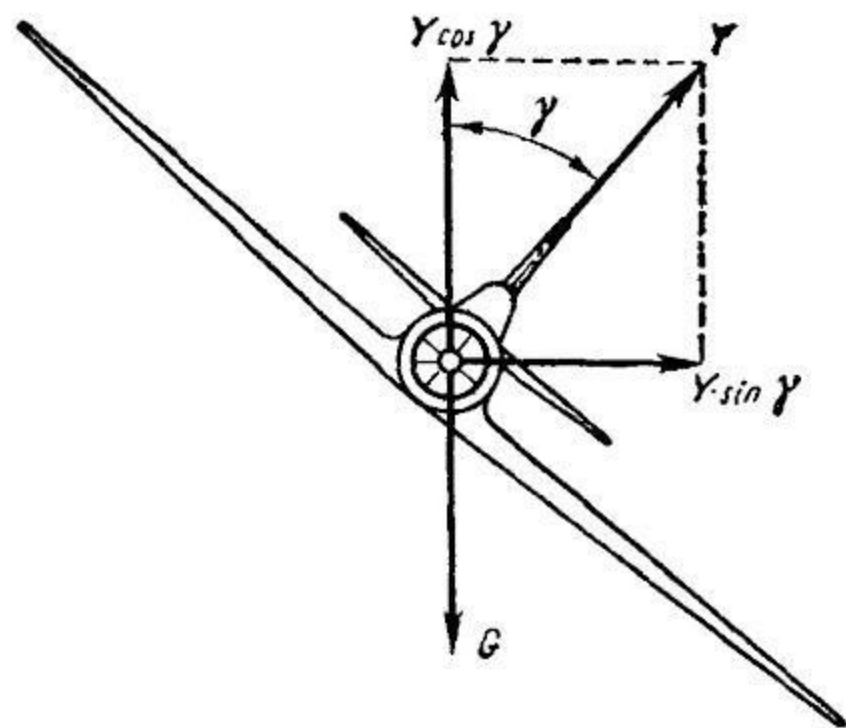




$$\dot{\alpha} = (\dot{\delta}_B + \dot{\theta}) / \cos \alpha$$

$$\dot{\theta} = \dot{\alpha} - \dot{\delta}_B$$





$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Diagram 1} = \text{Diagram 2} + \text{Diagram 3} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Diagram 1} = \text{Diagram 2} + \text{Diagram 3} \\ \hline \end{array}$$

[illegible]

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Diagram 1} = \text{Diagram 2} + \text{Diagram 3} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Diagram 1} = \text{Diagram 2} + \text{Diagram 3} \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \diagdown \\ \square \\ \diagup \end{array} \begin{array}{c} \diagup \\ \square \\ \diagdown \end{array} = \begin{array}{c} \diagdown \\ \square \\ \diagup \end{array} \begin{array}{c} \diagup \\ \square \\ \diagdown \end{array} + \begin{array}{c} \diagdown \\ \square \\ \diagup \end{array} \begin{array}{c} \diagup \\ \square \\ \diagdown \end{array}$$

$$\text{Diagram 1} = \text{Diagram 2} + \text{Diagram 3}$$

$$\text{Diagram 1} = \text{Diagram 2} + \text{Diagram 3}$$

$$\text{Diagram 1} = \text{Diagram 2} + \text{Diagram 3}$$