

Лекция 1

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ УГЛОМ ТАНГАЖА

Угол тангажа - это **угол** между продольной осью ОХ связанной СК и плоскостью горизонта.

Средства автоматического управления угловым положением самолета:

- автопилоты угла тангажа;
- автопилоты угла крена;
- автопилоты курса;
- автопилот тангажа и нормальной перегрузки.

Понятие "автопилот":

- в виде самостоятельных подсистем;
- в виде соответствующих режимов САУ.

1.1. Автопилот угла тангажа

Автопилот угла тангажа (АП) - средство автоматического управления, обеспечивающее стабилизацию и управление продольным короткопериодическим движением самолета на всех этапах полета путем отклонения руля высоты при возникновении рассогласования между значениями текущего и заданного углов тангажа.

Простейший автопилот угла тангажа реализует следующий закон управления рулем высоты:

$$\delta_B^{АП_\vartheta} = k_{\omega_z} \omega_z + k_\vartheta (\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_{зад}),$$

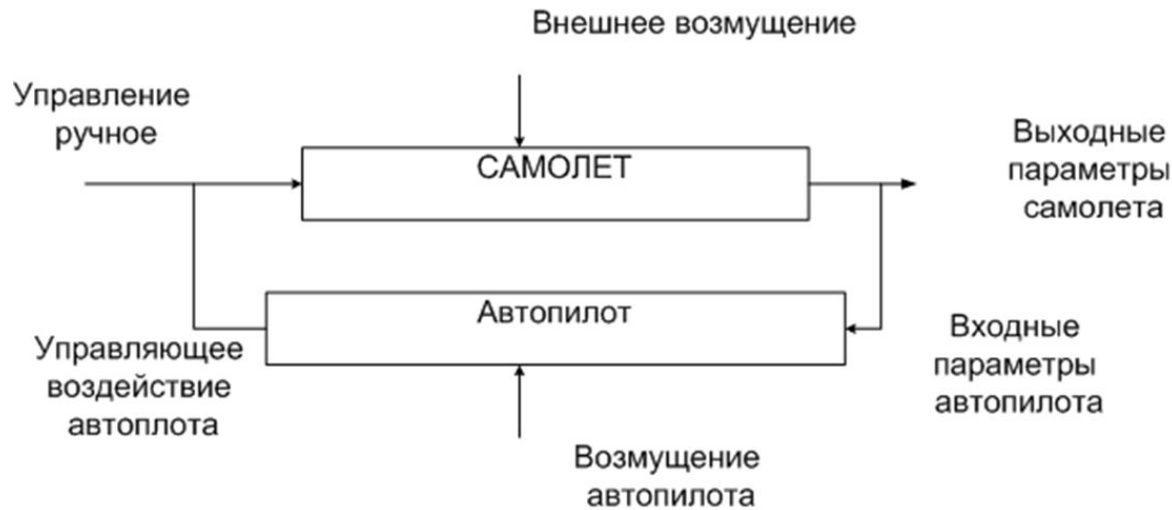
где $\delta_B^{АП_\vartheta}$ — автоматическое отклонение руля высоты от балансировочного положения автопилотом угла тангажа.

$\Delta\vartheta, \Delta\vartheta_{зад}$ соответственно приращения текущего и заданного значений угла тангажа

k_ϑ передаточный коэффициент по углу тангажа, определяющий, на какой угол должен отклониться руль высоты при возникновении рассогласования между значениями приращений текущего и заданного углов тангажа в 1° .

k_{ω_z} передаточный коэффициент по угловой скорости (смотри ранее, определяет угол отклонения руля высоты при отклонении угловой скорости самолета на 1 град/сек)

Контур автопилота



Состав автопилота:

- **Датчики** определения текущих и заданных параметров ЛА;
- **Вычислитель**, формирующий управляющий сигнал;
- **Сервопривод**, обрабатывающий управляющий сигнал;
- **Обратная связь**, обеспечивающая пропорциональность отработки сервоприводом сформированного управляющего сигнала.

Особенность автопилота

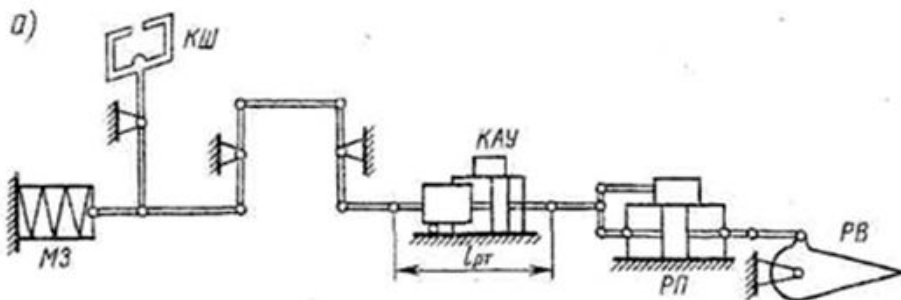
исключается возможность совместного управления рулем высоты автопилотом и пилотом от колонки штурвала.

По принципу действия сервопривода

- электромеханические
- электрогидравлические

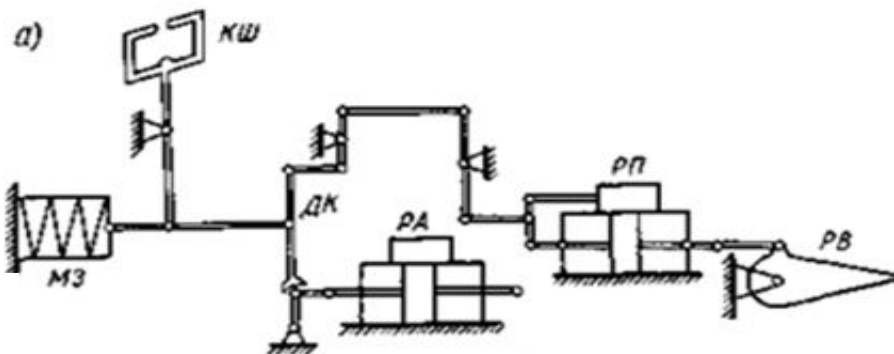
Порядок включения исполнительного устройства автопилота в механическую проводку управления рулем высоты:

- последовательные схемы (бустерные и электродистанционные);
- параллельные схемы включения (прямые обратимые системы управления);

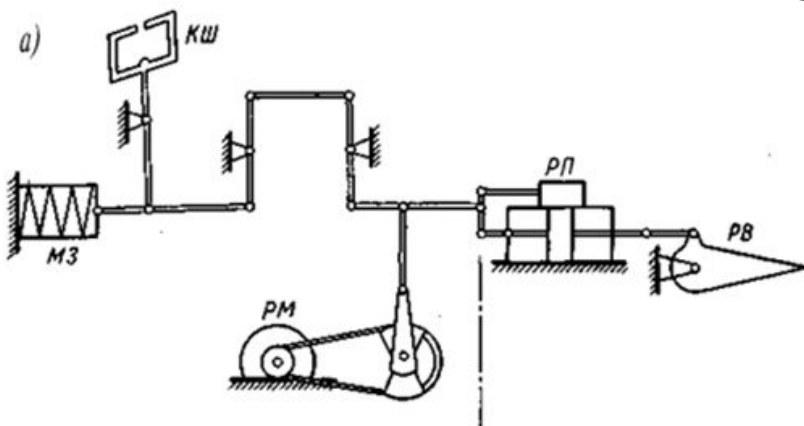


Кинематическая схема последовательного включения исполнительного устройства автоматики в проводку управления через раздвижную тягу

Кинематическая схема последовательного включения исполнительного устройства автоматики в проводку управления через дифференциальную качалку:



Кинематическая схема параллельного включения исполнительного устройства автоматики в проводку управления:



Система продольного управления с САУ, включённой по параллельной схеме при наличии вспомогательного привода:

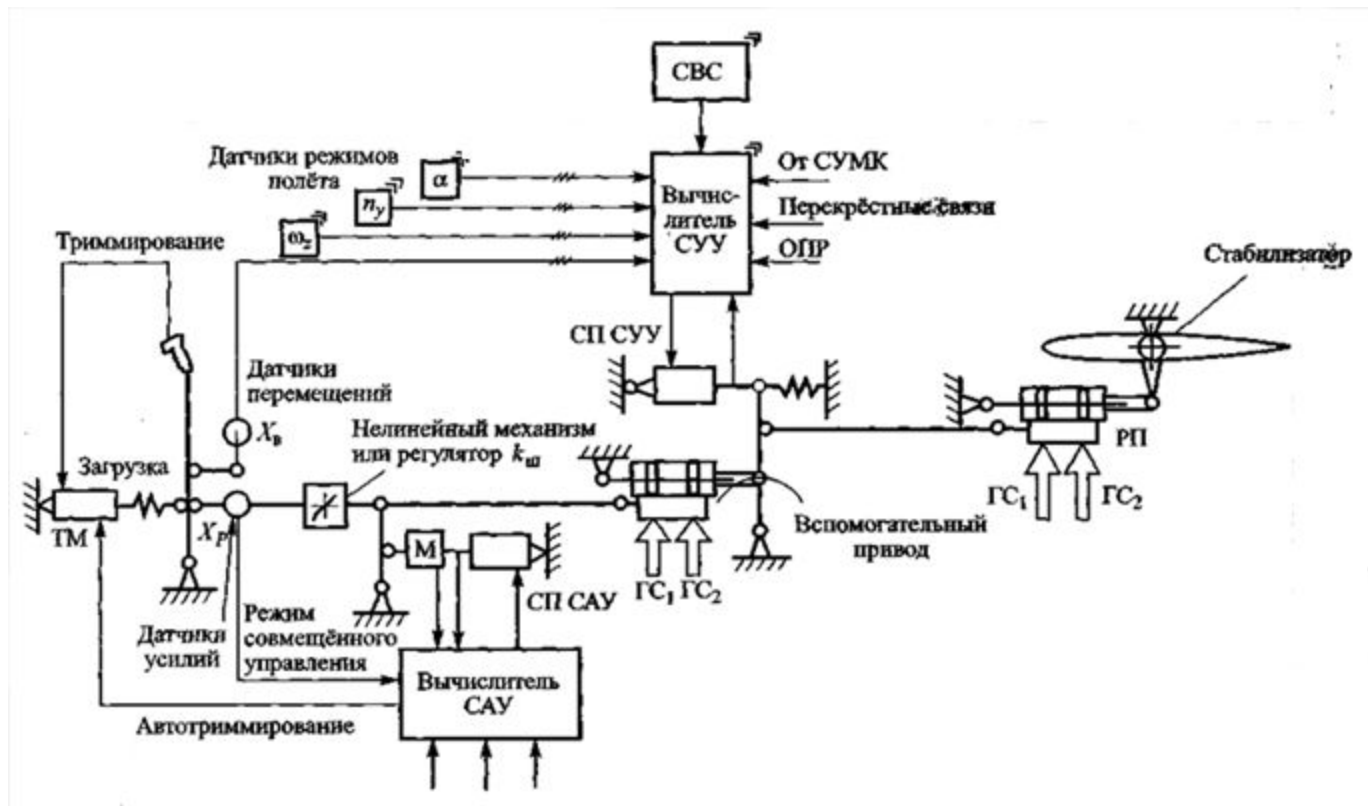


Схема продольного управления с САУ, включённой по последовательной схеме

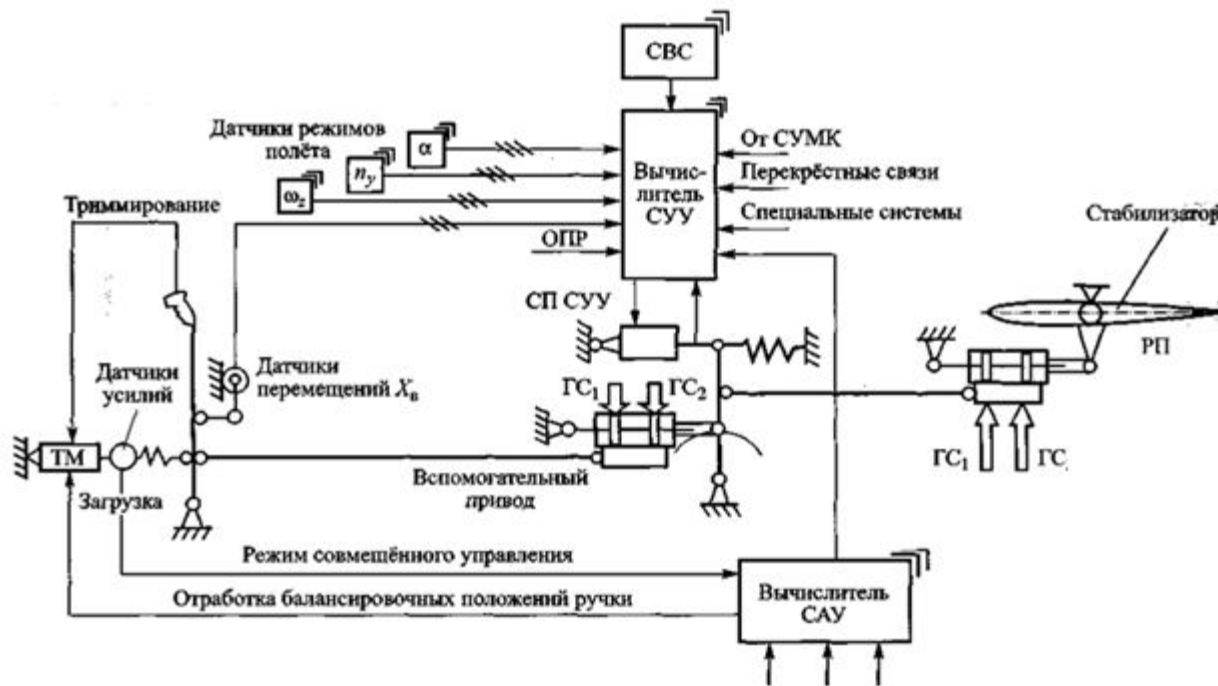
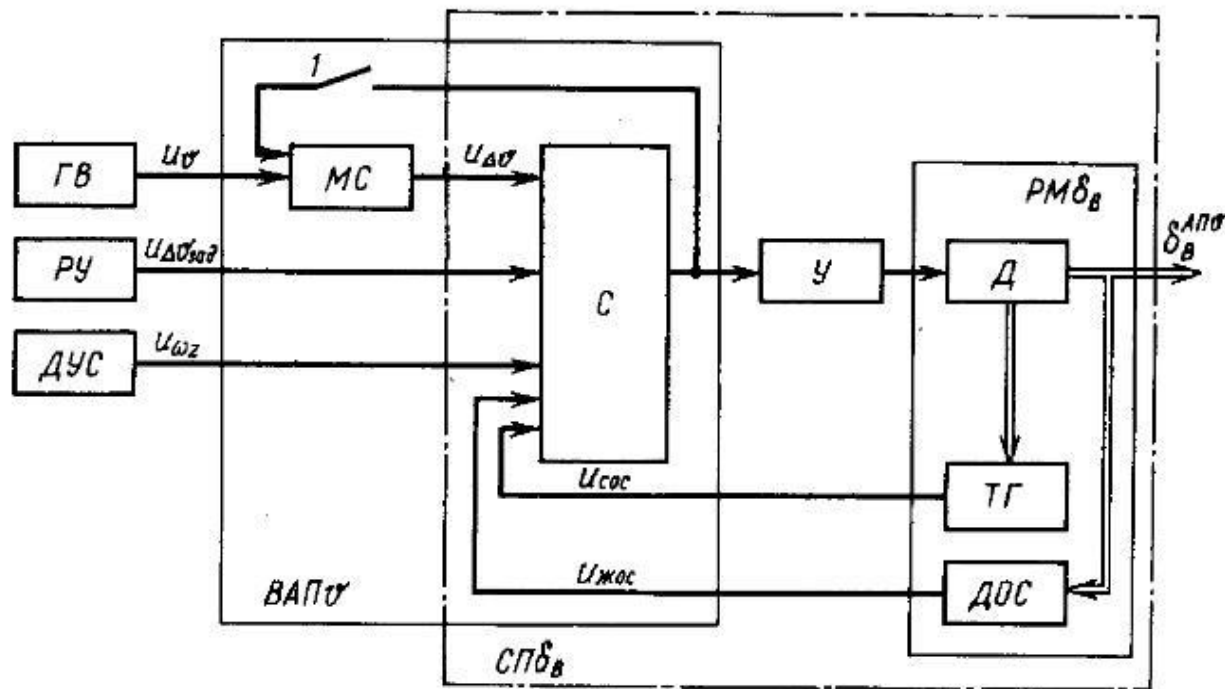


Схема аналогового электромеханического автопилота угла тангажа с жесткой и скоростной обратными связями в сервоприводе

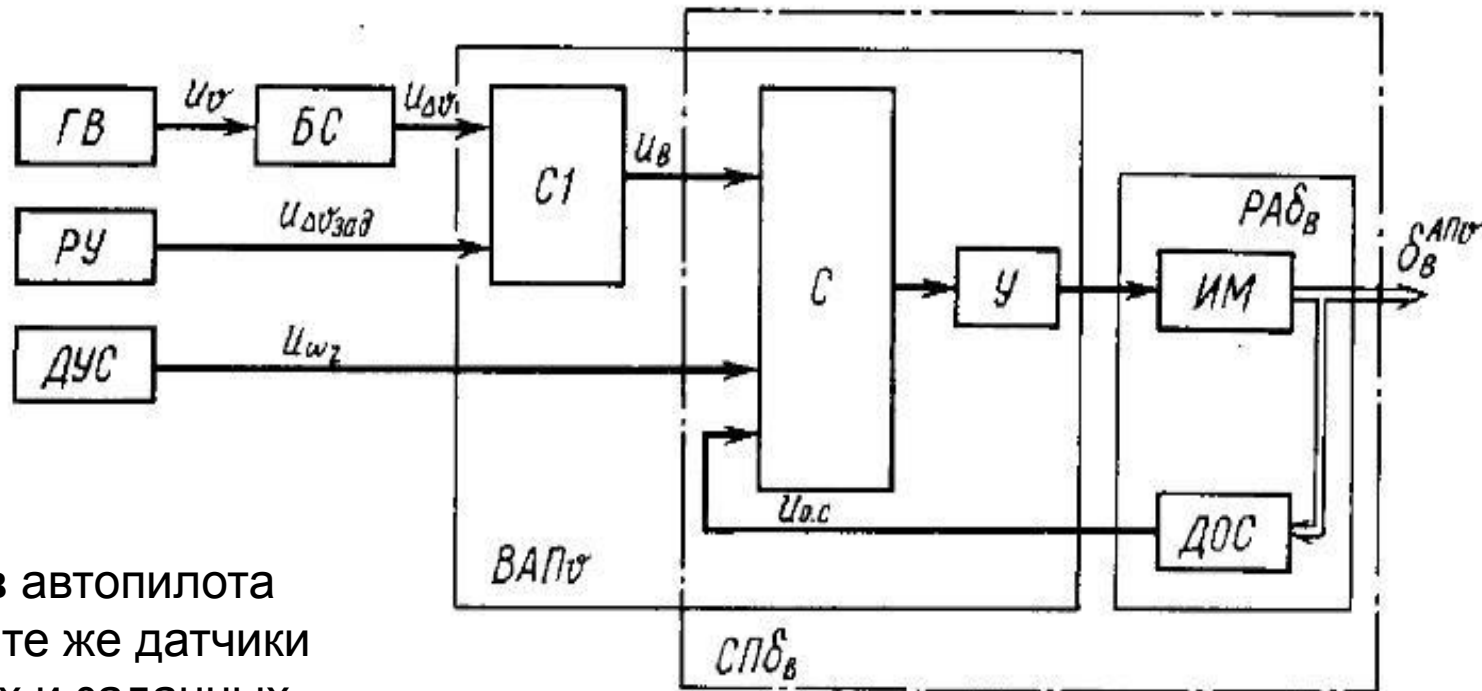


Состав автопилота: датчик угловой скорости тангажа ДУС, датчик угла тангажа - гировертикаль ГВ, задатчик угла тангажа - рукоятка управления РУ, механизм согласования МС и сервопривод руля высоты. Механизм согласования вместе с сумматором сервопривода образуют канал руля высоты вычислителя автопилота ВАП θ . Сервопривод СП δ_v включает в себя сумматор (С), усилитель (У), рулевую машину РМ δ_v .

Режимы работы АП

- 1. СОГЛАСОВАНИЕ** - рулевая машина высоты не включена, а положение ее выходного вала согласовано с положением руля высоты. На вход механизма согласования поступает сигнал, пропорциональный алгебраической сумме сигналов угла текущего тангажа и сигнала ОС с РМ. Происходит синхронизация канала тангажа до включения его в режим стабилизации и запоминание текущего значения угла тангажа в МС (1-вкл). Автопилот готовится к безударному включению для управления рулем высоты.
- 2. СТАБИЛИЗАЦИЯ** - рулевая машина подключается для управления рулем высоты. Сигнал $u_{\Delta\vartheta}$ пропорционален разности значений угла тангажа и балансировочного положения руля высоты на момент включения режима стабилизации. МС отключается от сумматора С (контакт 1 размыкается). Любое отклонение самолета по углу тангажа под действием внешних возмущений от того угла тангажа, который имел самолет в момент включения режима стабилизации, воспринимается автопилотом как рассогласование, которое необходимо парировать. Закон управления выглядит: $\delta_B^{АП\vartheta} = k_{\omega_z} \omega_z + k_{\vartheta} \Delta\vartheta$, Обработка руля пропорциональна рассогласованию $(\vartheta - \vartheta_0)$
- 3. УПРАВЛЕНИЕ** – Пилот воздействуя на рукоятку управления «Спуск-подъем», задает управляющий сигнал по тангажу. АП реализует закон управления $\delta_B^{АП\vartheta} = k_{\omega_z} \omega_z + k_{\vartheta} (\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_{зад})$.
По «положению» рукоятки управления (или по скорости)

Функциональная схема аналогового электрогидравлического автопилота угла тангажа



Состав автопилота входят те же датчики текущих и заданных параметров, что и в электромеханическом автопилоте.

Отличие:

- в сервоприводе только ЖОС;
- режим стабилизации угла тангажа включается при стриммированном положении руля высоты, шток РА в нейтрал;
- блок согласования БС запоминает текущее значение угла тангажа самолета аналогично МС

В процессе эксплуатации осуществляется

Проверка работоспособности:

- Включение питания АП;
- Включение режимов АП;
- Включение сигнализации режимов АП;
- Реакция на изменение входных сигналов текущих и заданных;

Проверка передаточных коэффициентов

Регулировка передаточных коэффициентов

1.2. Управление продольным короткопериодическим движением

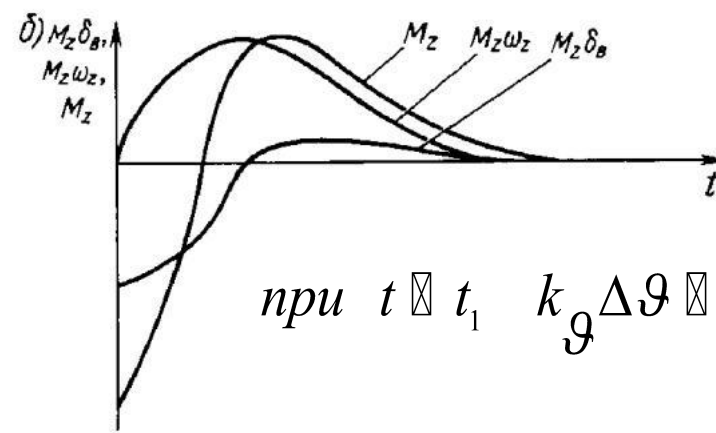
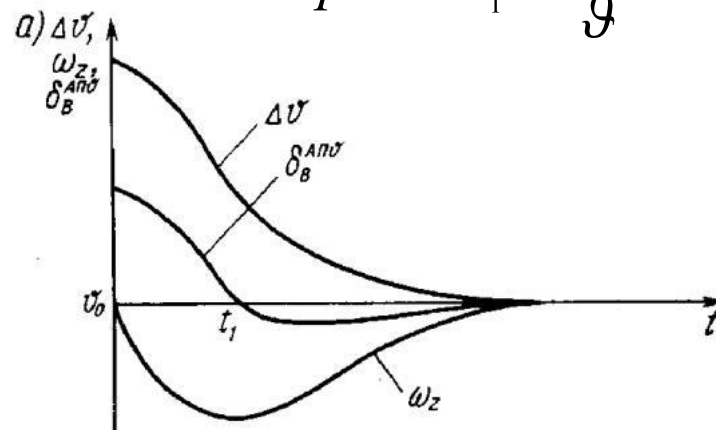
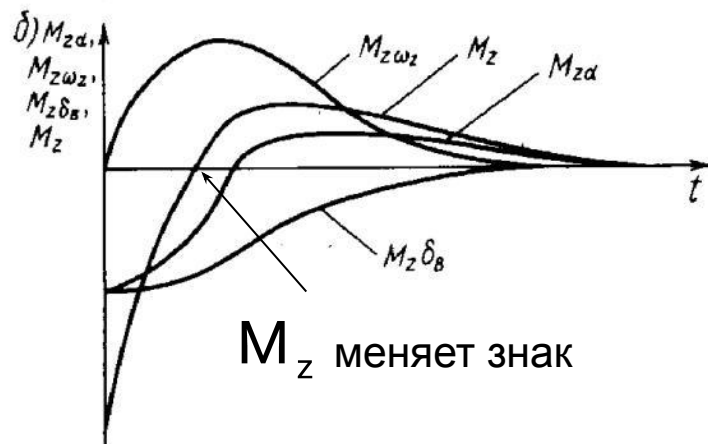
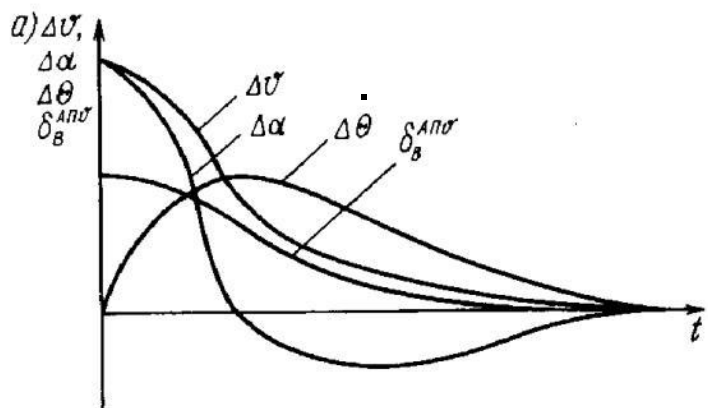
1.2.1 Процесс устранения начального значения угла тангажа

$$M_z = M_{z\delta_B} + M_{z\alpha} + M_{z\omega_z}$$

$$\delta_e^{АП9} = k_g (\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_{зад}),$$

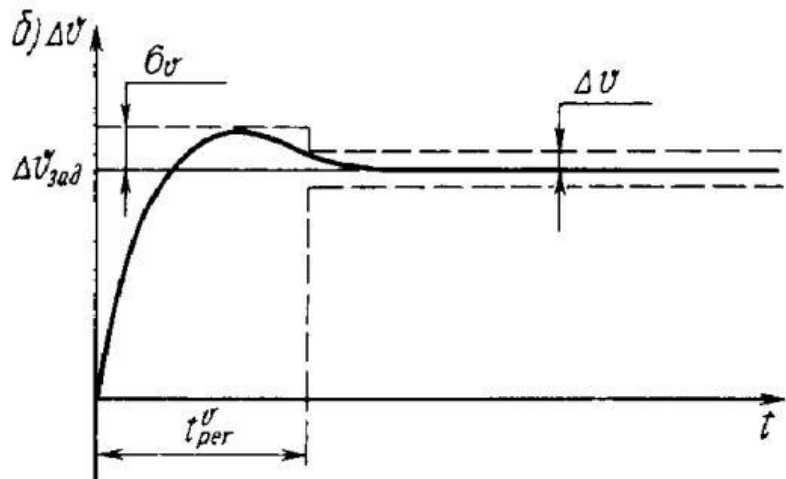
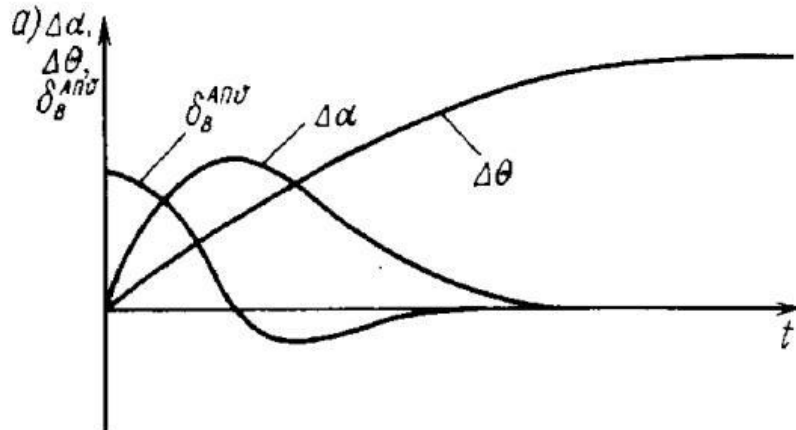
$$\delta_e^{АП9} = k_{\omega_z} \omega_z + k_g (\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_{зад}),$$

$$\text{при } t \gg t_1 \quad k_g \Delta\vartheta \gg k_{\omega_z} \omega_z$$



$$\text{при } t \gg t_1 \quad k_g \Delta\vartheta \gg k_{\omega_z} \omega_z$$

Показатели качества управления по тангажу:

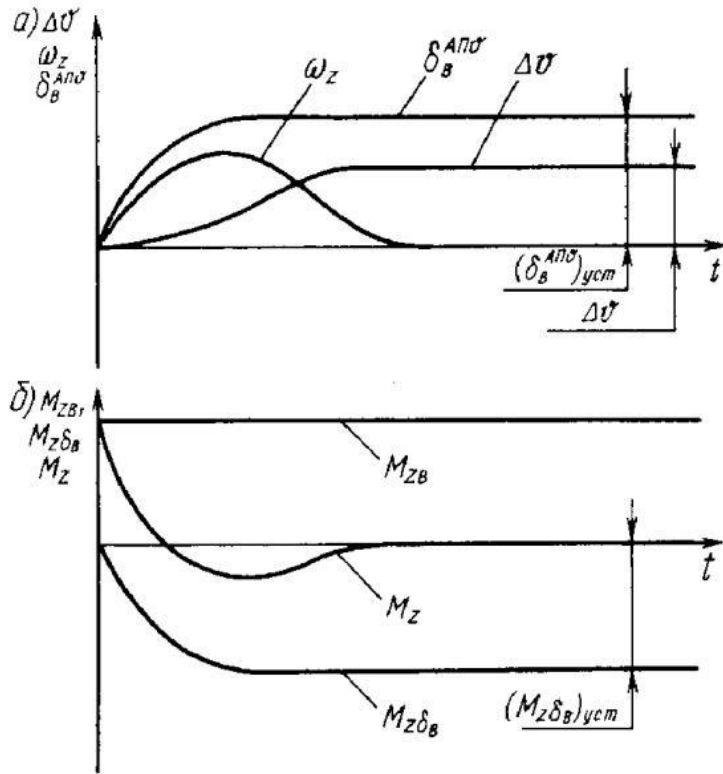


1. Точность стабилизации угла тангажа $\Delta_{\vartheta} = |\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_{зад}|$
2. Перерегулирование тангажа σ_{ϑ}
3. Время регулирования тангажа $t_{пер}^{\vartheta}$

Переходные процессы при оптимальных значениях передаточных коэффициентов закона управления АП

$$k_{\omega_z}^* \text{ и } k_{\vartheta}^*$$

1.2.2. Процесс устранения автопилотом угла тангажа с жесткой обратной связью в сервоприводе внешнего ступенчатого моментного возмущения M_{zB}



$$\delta_B^{АП9} = k_{\omega_z} \omega_z + k_{\varphi} (\Delta\varphi - \Delta\varphi_{зад}),$$

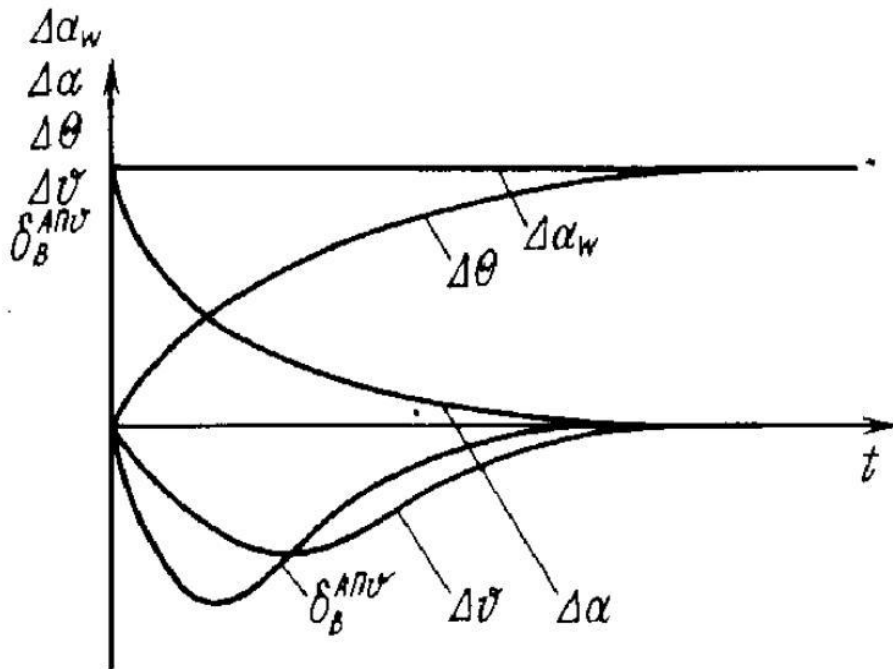
$$(M_{z\delta_B})_{уст} = -M_{zB} = m_z^{\delta_B} S b_a \frac{\rho V^2}{2} (\delta_B^{АП9})_{уст}$$

$$(\delta_B^{АП9})_{уст} = k_{\varphi} \Delta\varphi_{уст}$$

$$\Delta\varphi_{уст} = -\frac{M_{zB}}{k_{\varphi}} \frac{2}{m_z^{\delta_B} S b_a \rho V^2}$$

Автопилот угла тангажа с жесткой обратной связью в сервоприводе является статическим по отношению к ступенчатому внешнему возмущающему моменту тангажа.

1.2.3. Процесс устранения автопилотом угла тангажа с жесткой обратной связью в сервоприводе ступенчатого внешнего вертикального ветрового возмущения W_y



Постоянная нормальная составляющая ветра W_y не влияет на точность стабилизации угла тангажа автопилотом.

1. Угол атаки самолета практически мгновенно изменяется на величину $\Delta\alpha_w = W_y / V^0$

2. Угол тангажа и наклона траектории $\Delta\theta = (\Delta\vartheta - \Delta\alpha + \Delta\alpha_w)$

сначала сохраняют свои значения,

3. Ввиду увеличения угла атаки увеличивается подъемная сила и поворачивается вектор путевой скорости вверх.

4. Момент поворачивает продольную ось самолета навстречу ветру, оба явления уменьшают угол атаки, и начинают возрастать углы тангажа и наклона траектории,

5. Автопилот отклоняет рули высоты, тангаж возвращается к прежнему значению.

6. Самолет приобретает скорость ветра и сохраняет значения углов атаки, тангажа и отклонение рулей высоты, которые были до момента попадания самолета в вертикальный поток воздуха. Однако приращение угла наклона траектории изменяет исходный режим полета.

1.2.4. Процесс устранения автопилотом угла тангажа с жесткой обратной связью в сервоприводе ступенчатого внешнего силового возмущения

1. Уменьшение массы вызовет поворот вектора скорости вверх.
2. Произойдет уменьшение угла атаки и уменьшение подъемной силы.
3. Установится такое значение угла атаки, при котором обеспечится равенство подъемной силы новому значению силы тяжести самолета.
4. Уменьшение угла атаки приведет к уменьшению момента статической устойчивости $M_{z\alpha}$ что вызовет поворот продольной оси самолета и изменение угла тангажа.
5. Автопилот среагирует на это изменение отклонением рулей высоты.
6. Установится такое отклонение рулей высоты, при котором момент $M_{z\delta_B}$ при изменившемся угле атаки уравнивает управляющий момент $M_{z\alpha}$.

Отклонение рулей высоты автопилотом угла тангажа с жесткой обратной связью в сервоприводе возможно лишь при наличии рассогласования по углу тангажа.

Статическую ошибку можно определить из следующего соотношения:

$$\Delta\vartheta_{уст} = -\frac{2}{k_\vartheta} \frac{m_z^{\delta_B}}{m_z^\alpha} \frac{\Delta mg}{c_y^\alpha S \rho V^2}.$$

Статическая ошибка прямо пропорциональна изменению массы самолета и обратно пропорциональна передаточному коэффициенту автопилота по углу тангажа

Лекция 2.

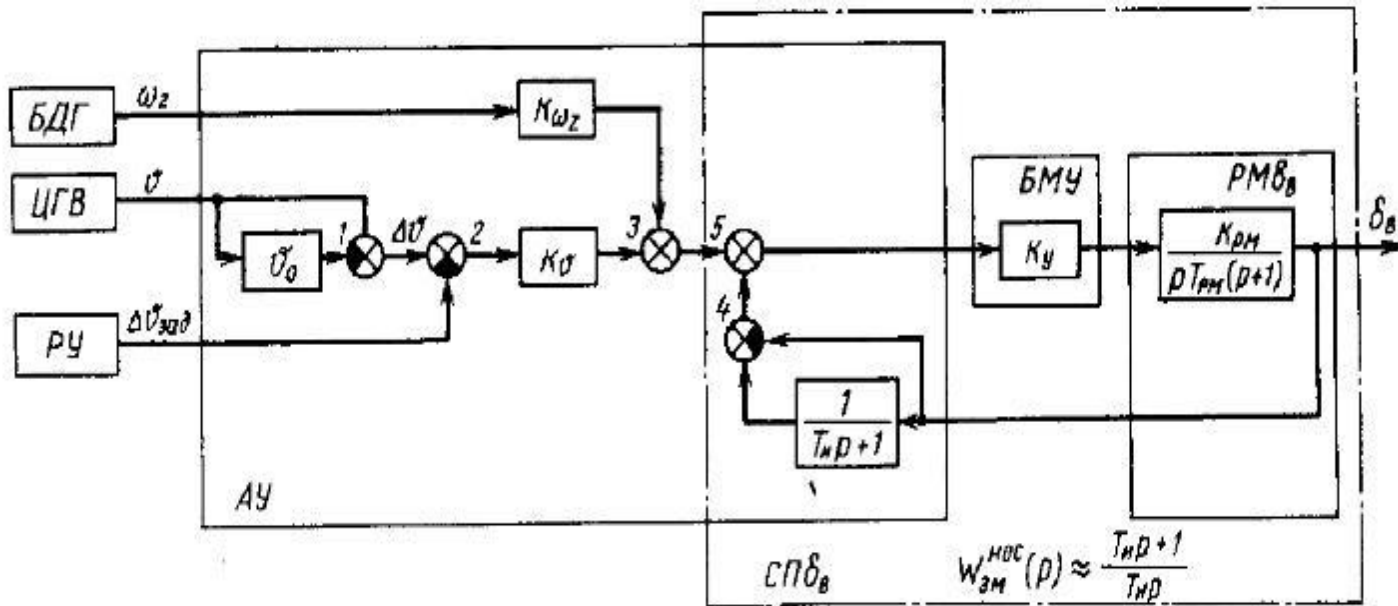
Особенности законов управления автопилотов угла тангажа.

*Для обеспечения **астатизма** применяются три основных способа.*

1. Первый способ основан на интегрирующих свойствах сервопривода, охваченного изодромной обратной связью.
2. Второй способ предполагает введение в закон управления автопилота сигнала, пропорционального интегралу от рассогласования по углу тангажа.
3. Третий способ предусматривает использование дополнительного параллельного интегрирующего сервопривода.

1. Закон управления автопилота угла тангажа с изодромной обратной связью в сервоприводе

$$\frac{T_{иp}}{T_{иp}+1} \delta_B^{АП_9} = k_{\omega_z} \omega_z + k_{\vartheta} \Delta\vartheta$$



Изодромную обратную связь можно получить :

$$W_{RC}(p) = T_{иp} / (T_{иp} + 1).$$

- пропуская управляющий сигнал через реально дифференцирующее звено;
- путем суммирования сигнала, пропорционального отклонению вала рулевой машины высоты, взятого с обратным знаком, и этого же сигнала, пропущенного через электромеханизм согласования с передаточной функцией апериодического звена

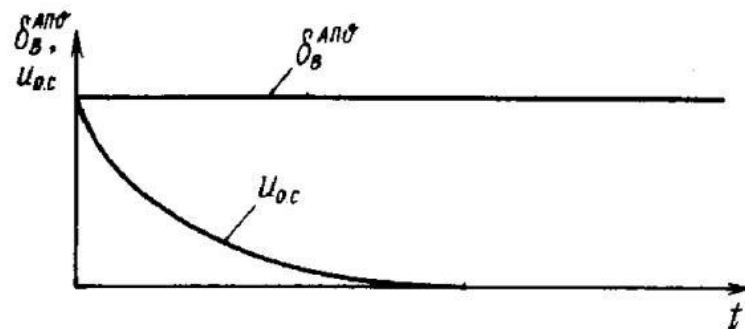
$$\frac{1}{T_{иp}+1} \delta_B^{АП_9} - \delta_B^{АП_9} = -\frac{T_{иp}}{T_{иp}+1} \delta_B^{АП_9}.$$

1. Если автопилот отклоняет руль высоты на угол $\delta_B^{АП_3}$, то сигнал изодромной обратной связи будет изменяться по экспоненциальному закону

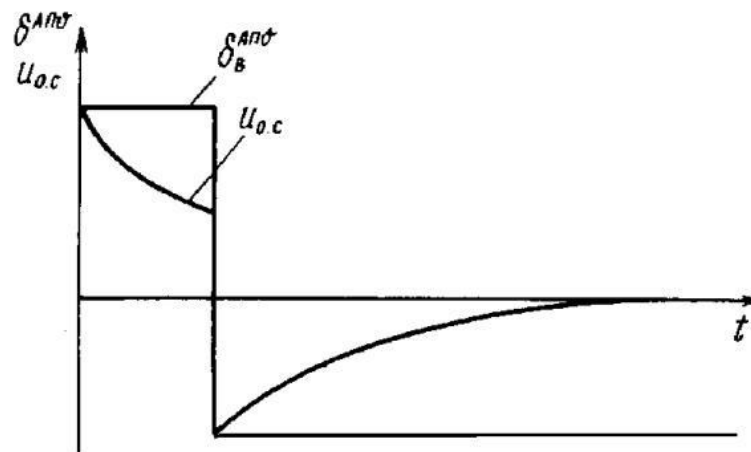
$$u_{oc} = k_{oc} \delta_B^{АП_3} e^{-t/T_{и}}$$

$$u_{oc}(\infty) = 0$$

постоянное отклонение рулей не приводит к статической ошибке



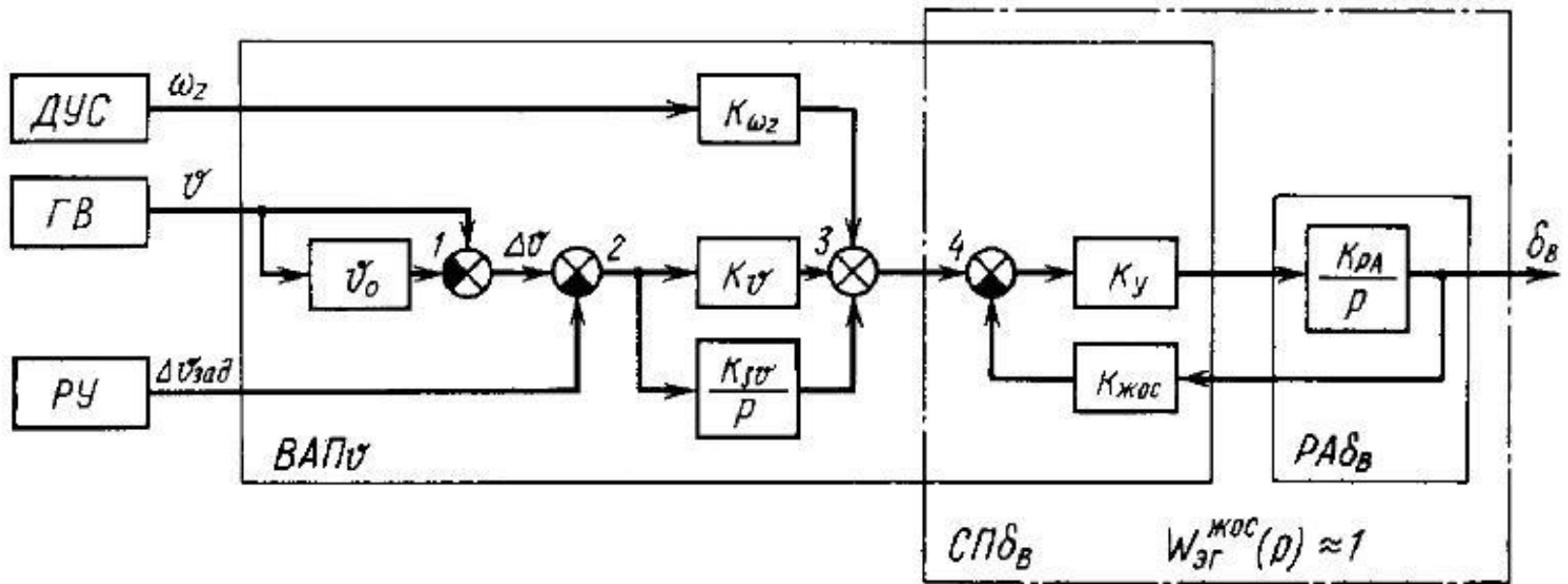
2. При отклонении руля высоты по закону прямоугольного импульса сигнал обратной связи u_{oc} будет состоять из двух участков экспонент. И если $T_{и}$ больше длительности импульса, то сигнал повторяет импульс, что соответствует СП с ЖОС.



Движение самолета по углу тангажа является быстрым движением, совершающимся в течение 1-2 с. Управление самолета-быстрое движение. **Т.о. при медленном движении-изодром и астатизм, при быстром-ЖОС**

2. Закон управления автопилота, реализующего принцип пропорционально-интегрально-дифференциального управления (ПИД-управления), имеет вид

$$\delta_B^{АП9} = k_{\omega_z} \omega_z + k_{\vartheta} \Delta\vartheta + \frac{k_{\int\vartheta}}{p} \Delta\vartheta$$

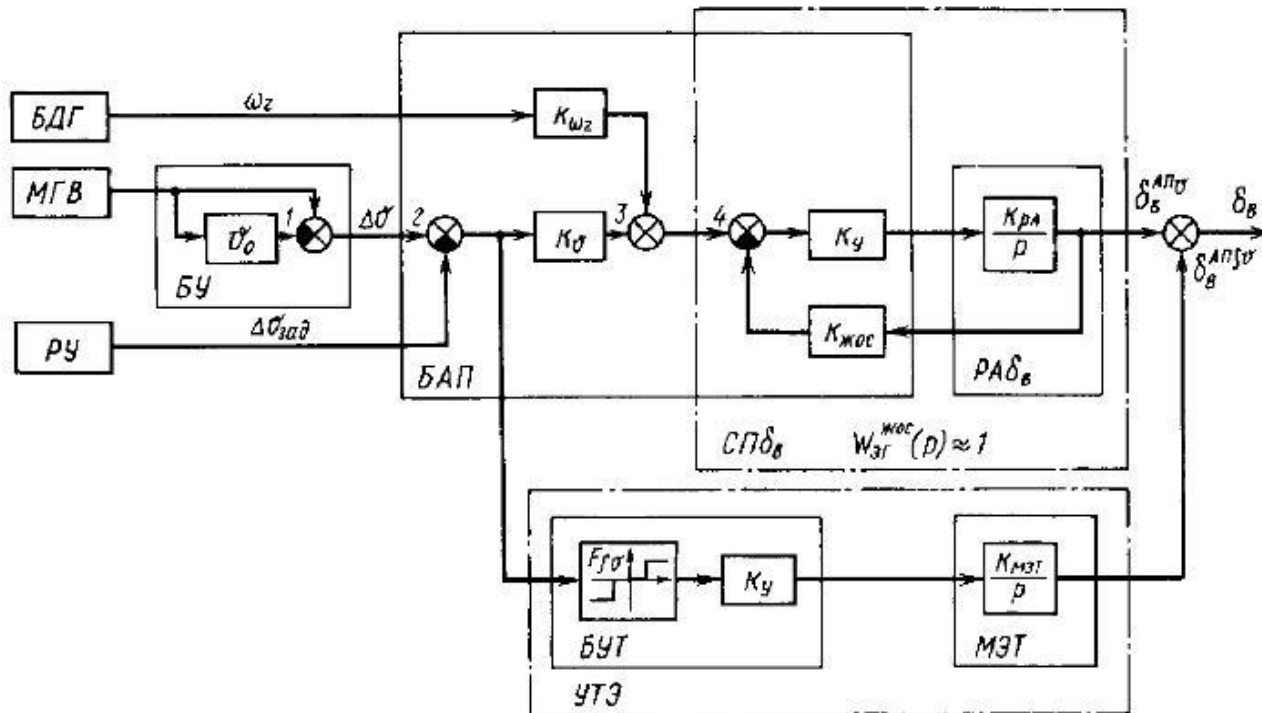


Данный закон аналогичен рассмотренному процессу для автопилота угла тангажа с изодромной обратной связью в сервоприводе

3. Использование дополнительного параллельного интегрирующего сервопривода

$$\delta_B = \delta_B^{АП\vartheta} + \delta_B^{АП} \int \vartheta$$

Интегрирующая составляющая закона управления $\delta_B^{АП} \int \vartheta$ получается путем пропускания сигнала через лектромеханический привод устройства триммерного эффекта УТЭ с передаточной функцией $W_{утэ}(p) = F_{\int\vartheta} k_{\int\vartheta} / p$, где $F_{\int\vartheta}$ нелинейное звено с зона нечувствительности

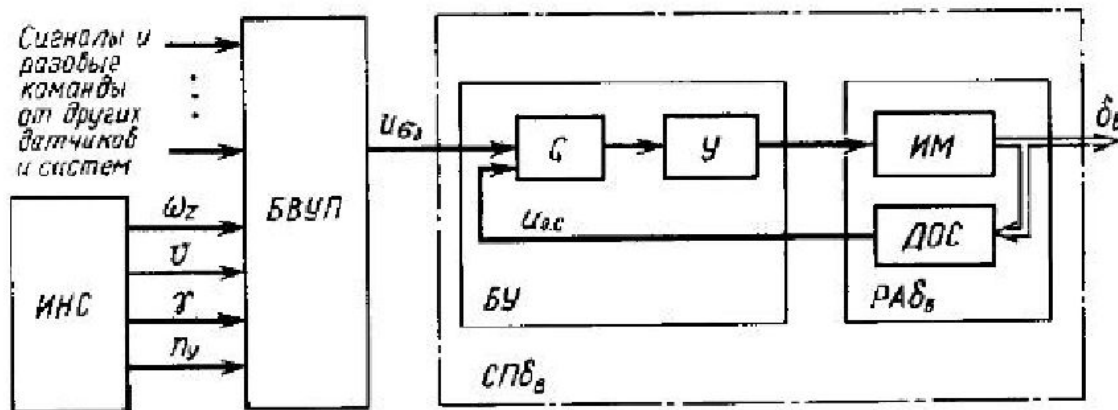


Цифроаналоговые автопилоты угла тангажа

Автопилот угла тангажа и нормальной перегрузки (АП Θn_y) – средство автоматического управления, обеспечивающее управление и стабилизацию продольного короткопериодического движения самолета на всех этапах полета путем отклонения рулей высоты при возникновении рассогласования между значениями текущего и заданного приращения нормальной перегрузки, причем заданное приращение нормальной перегрузки получается как разность между значениями приращений текущего и заданного значений угла тангажа.

Простейший АП тангажа и нормальной перегрузки:

$$\delta_B^{\text{АП}\Theta n_y} = k_{\omega_z} \omega_z + k_{\Delta n_y} (\Delta n_y - \Delta n_{y,\text{зад}}), \quad \Delta n_{y,\text{зад}} = k_{\Delta n_y}^s (\Delta \Theta_{\text{зад}} - \Delta \Theta)$$



ВЛИЯНИЕ ОТКАЗОВ НА КАЧЕСТВО СТАБИЛИЗАЦИИ ТАНГАЖА.

Пассивные отказы автопилота угла тангажа в контуре сервопривода приводят к потере автоматической стабилизации и управления углом тангажа.

Пассивный отказ по сигналу угловой скорости тангажа приводит к уменьшению эффективности демпфирования продольных короткопериодических колебаний при стабилизации угла тангажа

Активные отказы автопилота угла тангажа в контуре сервопривода или по сигналам угловой скорости и угла тангажа приводят к перекладке рулей высоты вследствие отработки вала рулевой машины или штока рулевого агрегата на максимальный ход. Это может вывести самолет на недопустимые нормальные перегрузки.

Влияние погрешностей измерителей угла тангажа и угловой скорости тангажа проявляется в статических ошибках по углу тангажа.

Разрегулировки передаточных коэффициентов закона управления приводят к снижению качества стабилизации и управления углом тангажа.