

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:

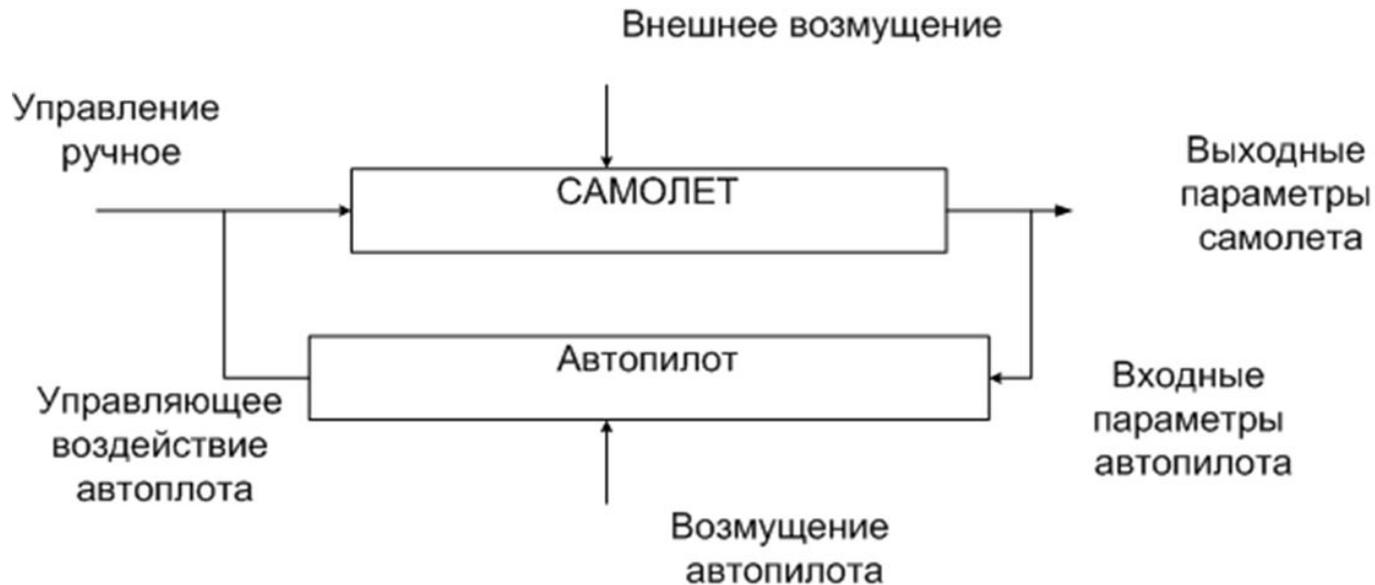
$$\delta_B^{АП_\vartheta} = k_{\omega_z} \omega_z + k_\vartheta (\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_{зад}),$$

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)



Состав автопилота:

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

Порядок включения автопилота в механическую проводку управления рулем высоты:

- параллельную схему включения исполнительного устройства сервопривода в механическую проводку управления рулем высоты (прямые обратимые системы управления);
- последовательную схему (бустерные и электродистанционные)

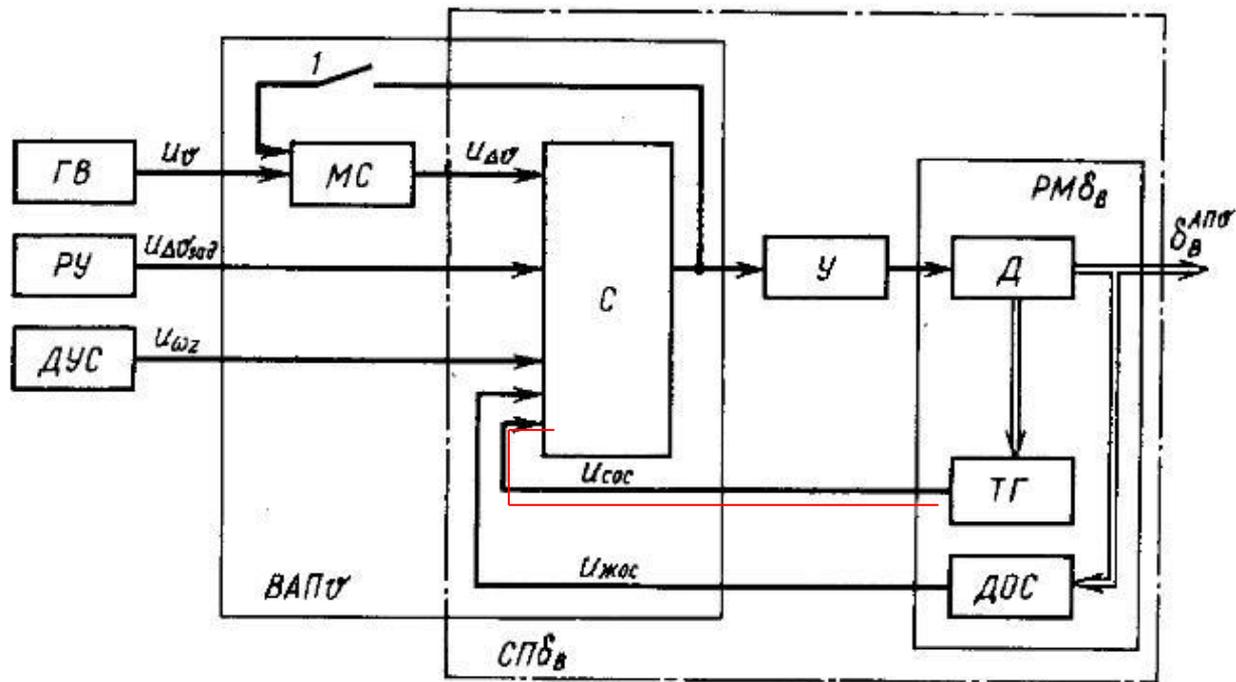
Особенность автопилота

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

По принципу действия сервопривода

- электромеханические
- электрогидравлические

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

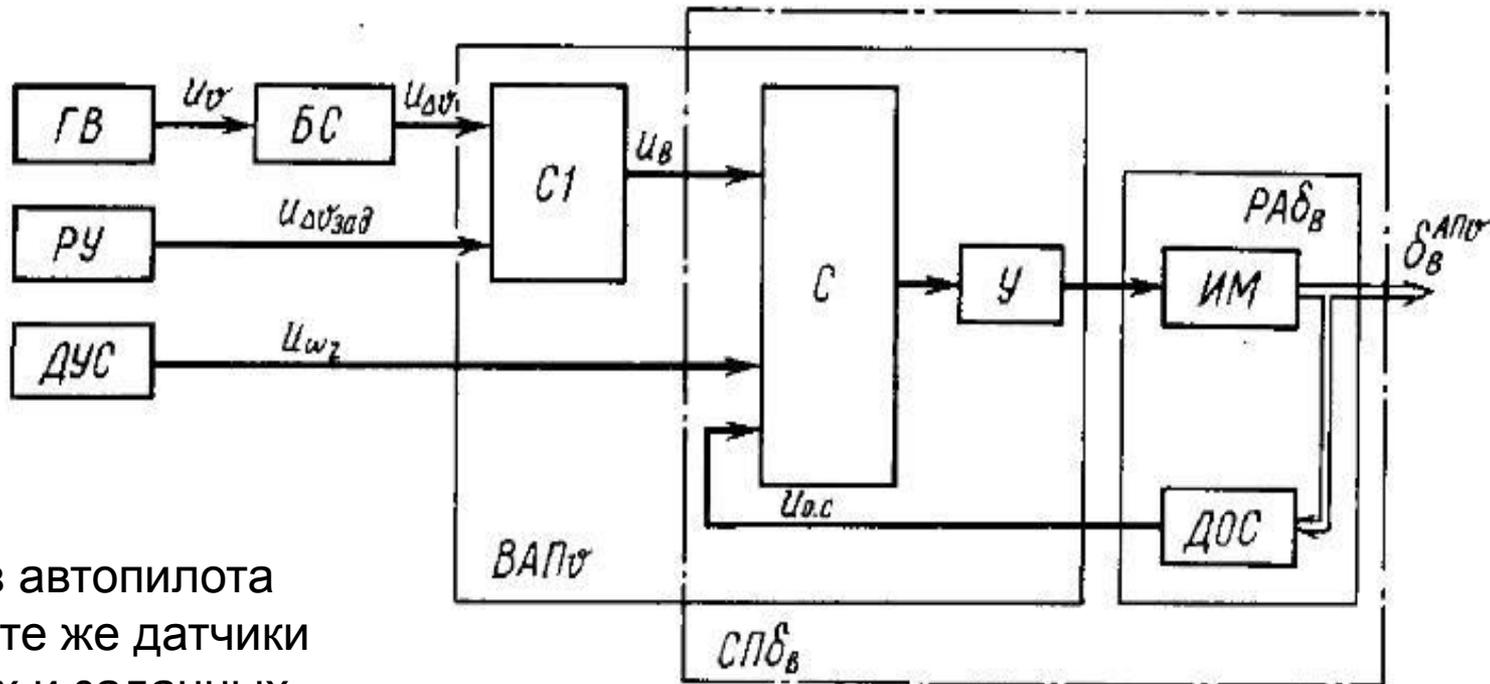


Состав автопилота: датчик угловой скорости тангажа ДУС, датчик угла тангажа - гировертикаль ГВ, задатчик угла тангажа - рукоятка управления РУ, механизм согласования МС и сервопривод руля высоты. Механизм согласования вместе с сумматором сервопривода образуют канал руля высоты вычислителя автопилота ВАП σ . Сервопривод СПД 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

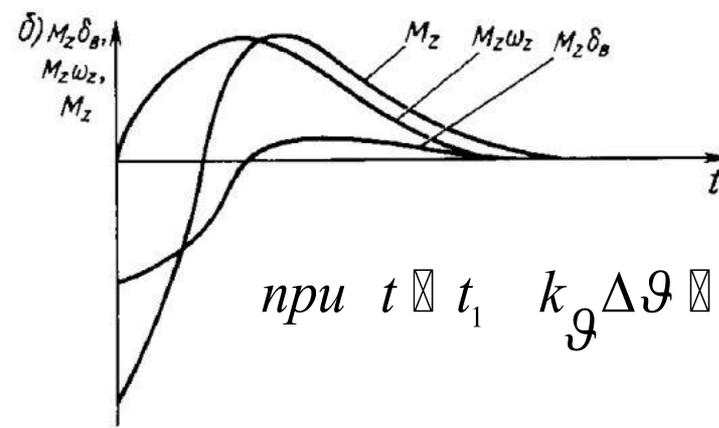
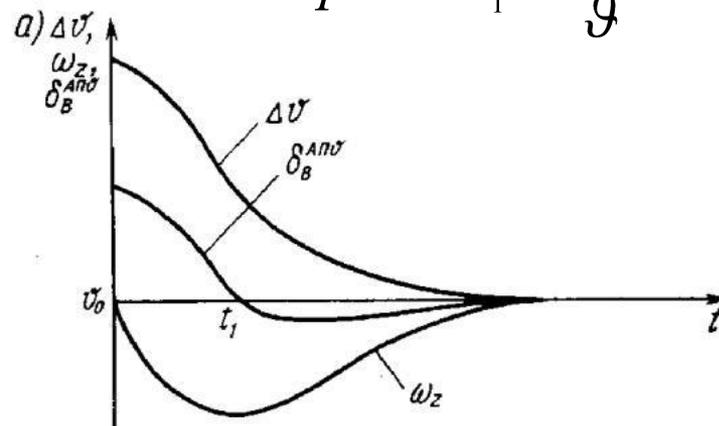
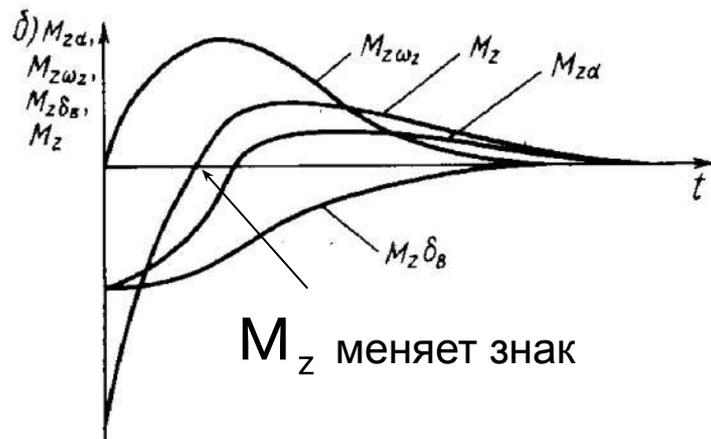
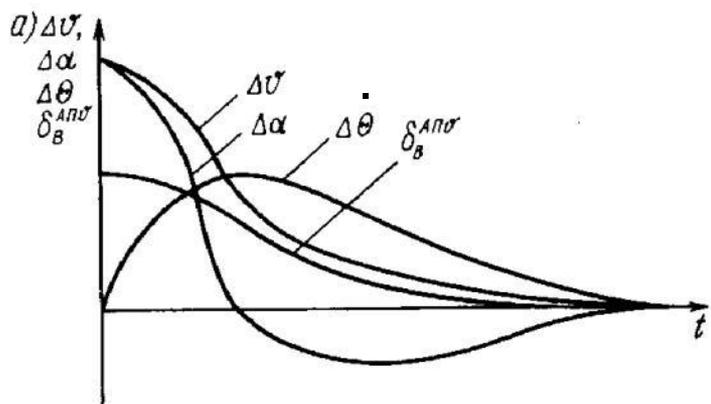
1.2.1 Процесс устранения начального значения угла тангажа

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

$$\delta_e^{АП_9} = k_g (\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_{зад}),$$

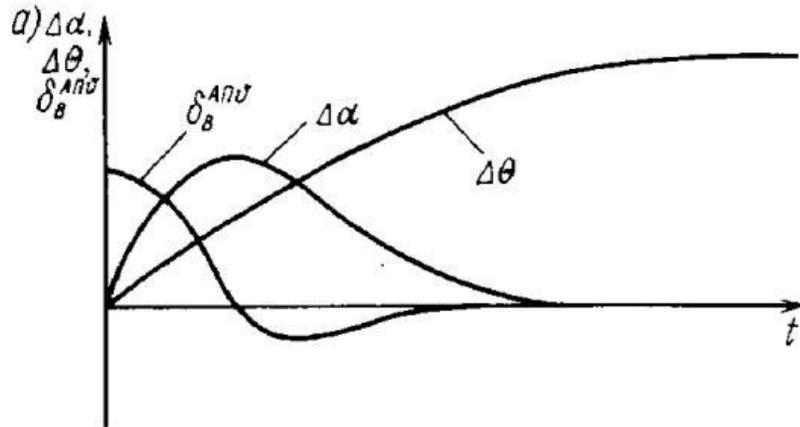
$$\delta_e^{АП_9} = k_{\omega_z} \omega_z + k_g (\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_{зад}),$$

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



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

Показатели качества управления по тангажу:

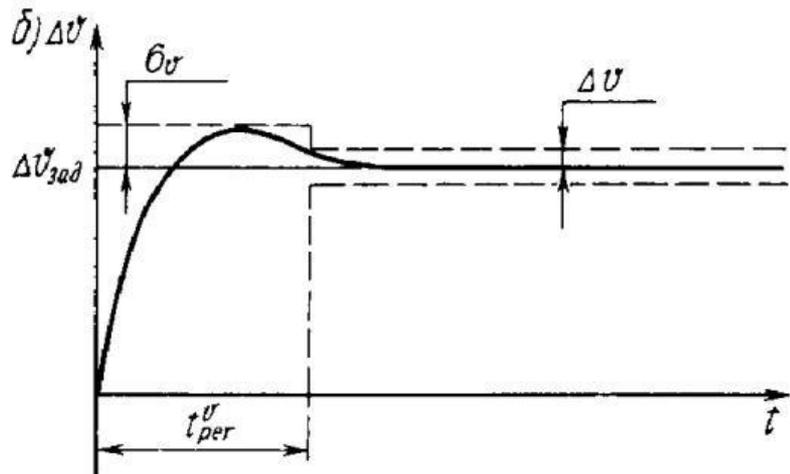


1. Точность стабилизации угла

тангажа $\Delta_{\vartheta} = |\Delta\vartheta - \Delta\vartheta_{\text{зад}}|$

2. Перерегулирование тангажа σ_{ϑ}

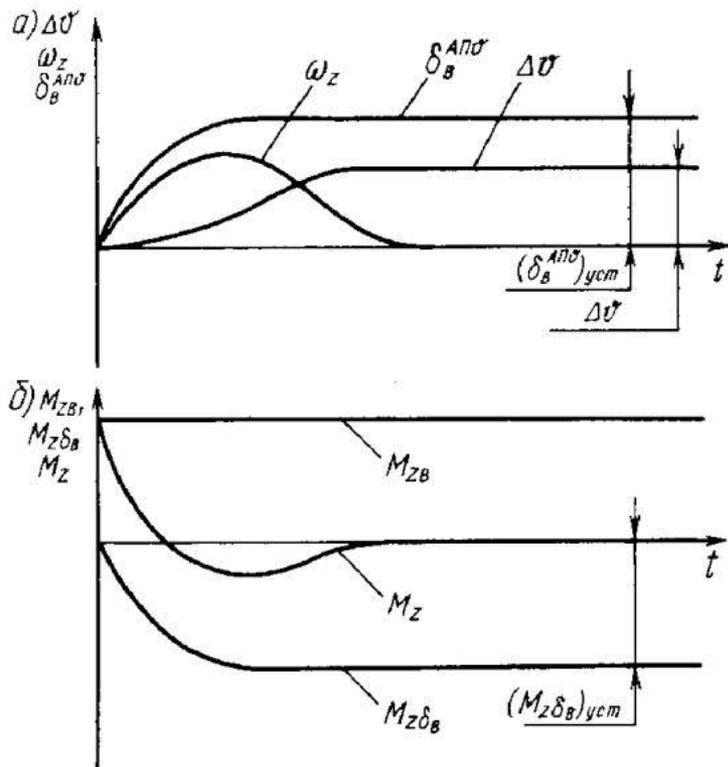
3. Время регулирования тангажа $t_{\text{пер}}^{\vartheta}$



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}



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

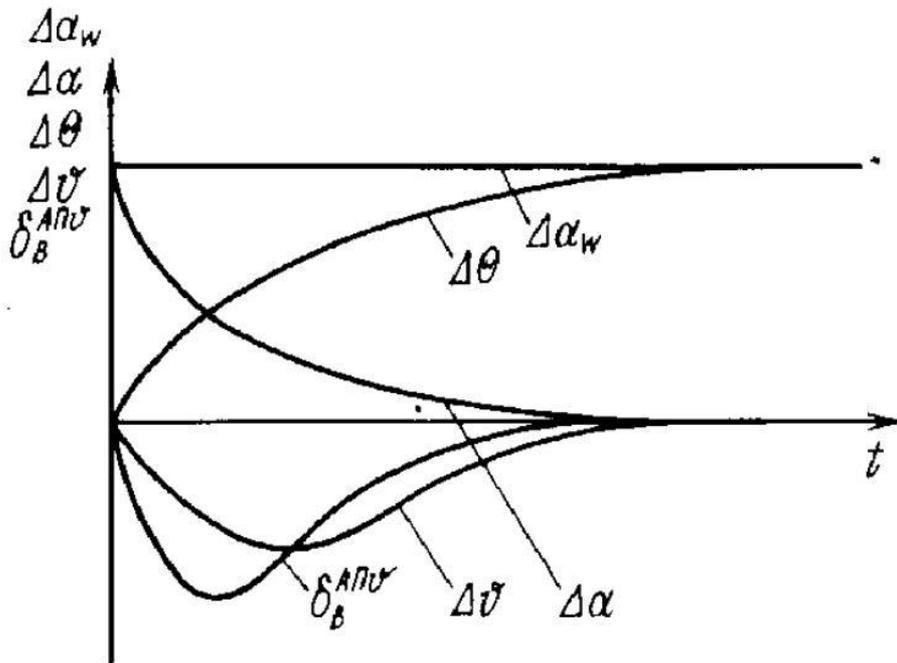
$$(M_{z\delta_B})_{уст} = -M_{zB} = m_z^{\delta_B} S b_a \frac{\rho V^2}{2} (\delta_B^{АП\varphi})_{уст}$$

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

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

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

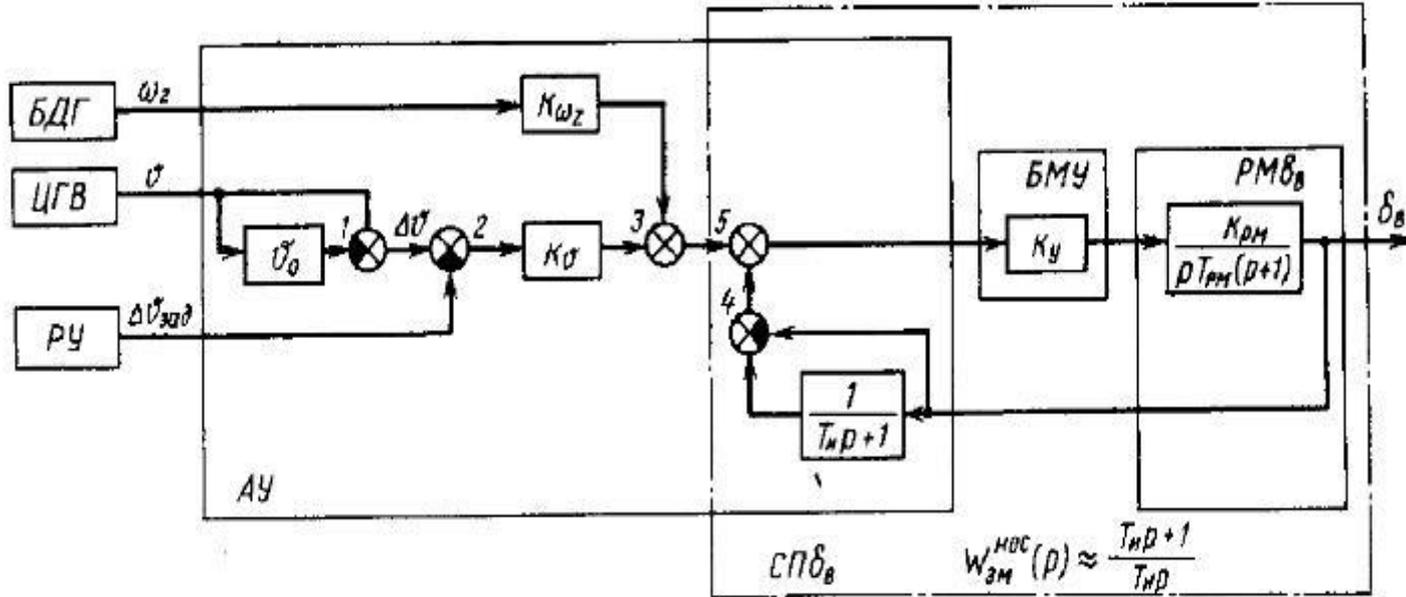
1.3. Способы обеспечения астатизма контура тангажа (лекция 2)

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.

1.3.1. Автопилот 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

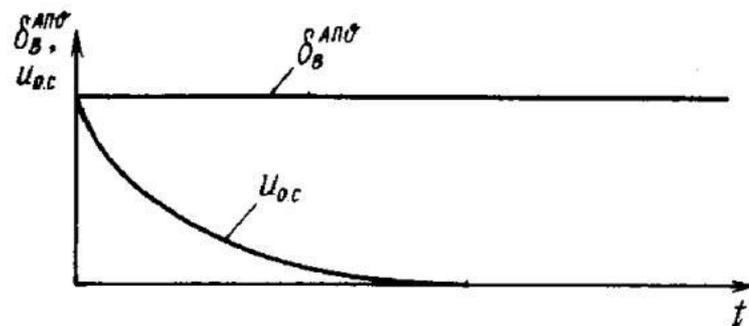
$$\frac{1}{T_{иp}+1} \delta_B^{АП_9} - \delta_B^{АП_9} = -\frac{T_{иp}}{T_{иp}+1} \delta_B^{АП_9}.$$

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

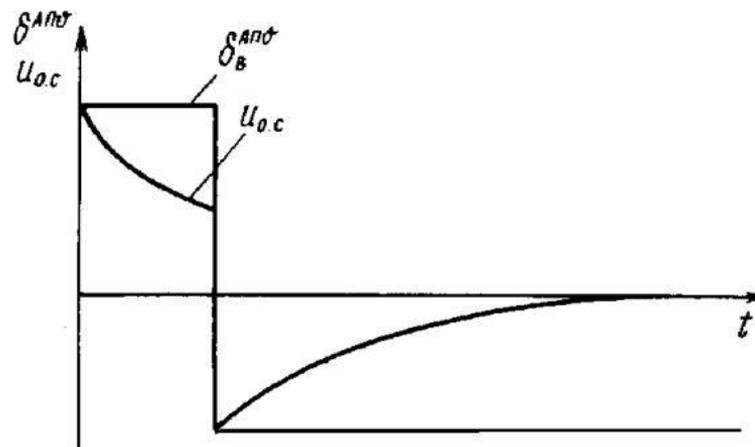
$$u_{oc} = k_{oc} \delta_B^{АП_3} e^{-t/T_{и}}$$

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

постоянное отклонение рулей не приводит к статической ошибке



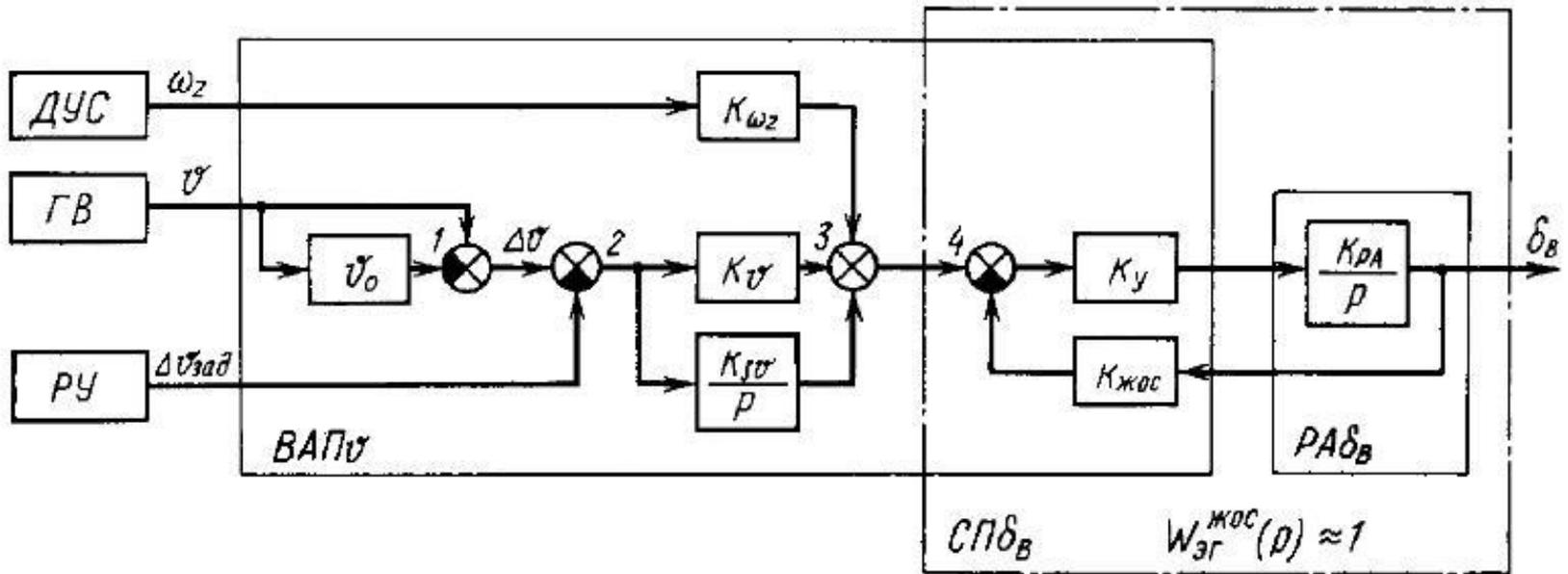
2. При отклонении руля высоты по закону прямоугольного импульса сигнал обратной связи u_{oc} будет состоять из двух участков экспонент. И если $T_{и}$ больше длительности импульса, то сигнал повторяет импульс, что соответствует СП с ЖОС.



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**

1.3.2. Автопилот тангажа с ПИД-управлением (пропорционально-интегрально-дифференциальное управление)

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

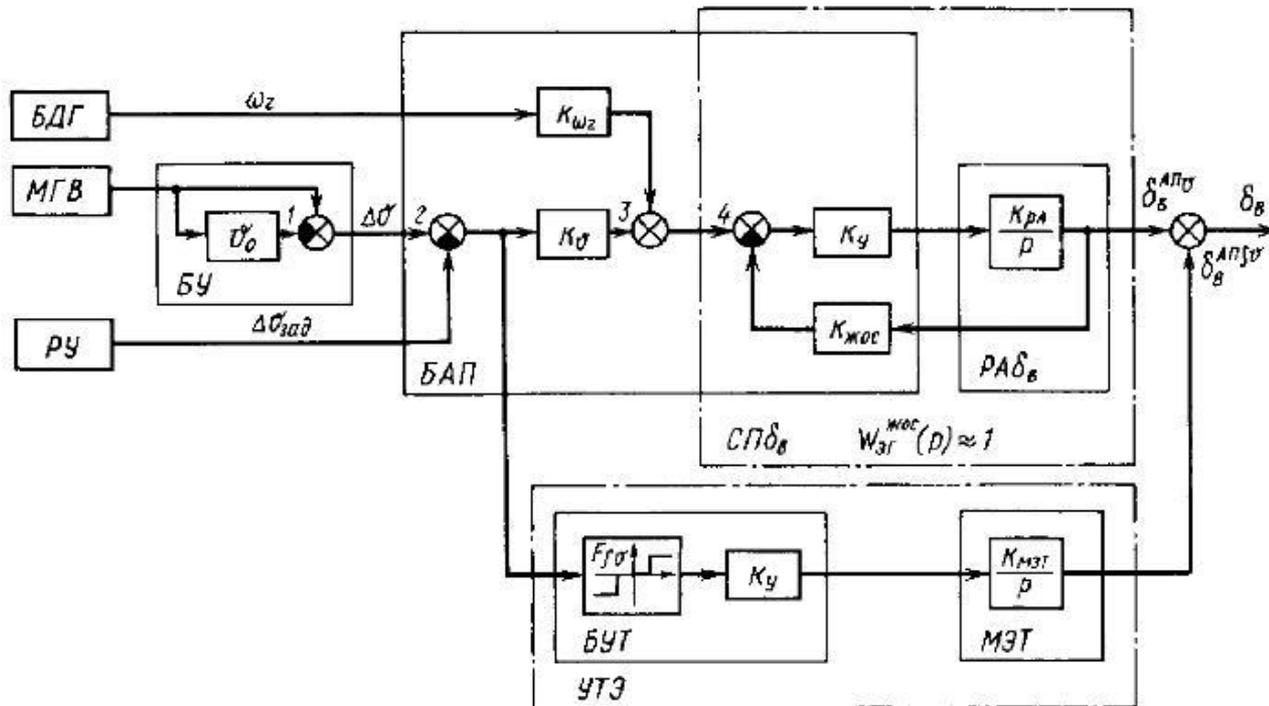


Данный закон аналогичен рассмотренному процессу для автопилота угла тангажа с изодромной обратной связью в сервоприводе

1.3.3. Автопилот тангажа с дополнительным интегрирующим сервоприводом

$$\delta_B = \delta_B^{АП_9} + \delta_B^{АП} \int_0^t \vartheta$$

Интегрирующая составляющая закона управления $\delta_B^{АП} \int_0^t \vartheta$ получается путем пропускания сигнала через лектромеханический привод устройства триммерного эффекта УТЭ с передаточной функцией $W_{утэ}(p) = F_{\int_0^t} k_{\int_0^t} / p$, где $F_{\int_0^t}$ нелинейное звено с зона нечувствительности

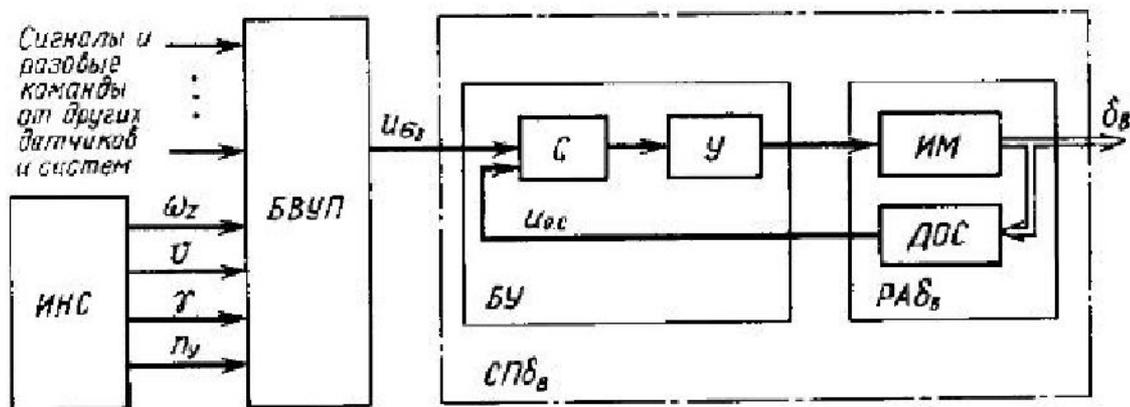


1.4. Особенности законов управления автопилотов угла тангажа.

Автопилот угла тангажа и нормальной перегрузки (АП $\Theta_{п.у}$) – 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:

$$\delta_{\text{в}}^{\text{АП}\Theta_{п.у}} = k_{\omega_z} \omega_z + k_{\Delta n_y} (\Delta n_y - \Delta n_{y.\text{зад}}), \quad \Delta n_{y.\text{зад}} = k_{\Delta \Theta} (\Delta \Theta_{\text{зад}} - \Delta \Theta)$$



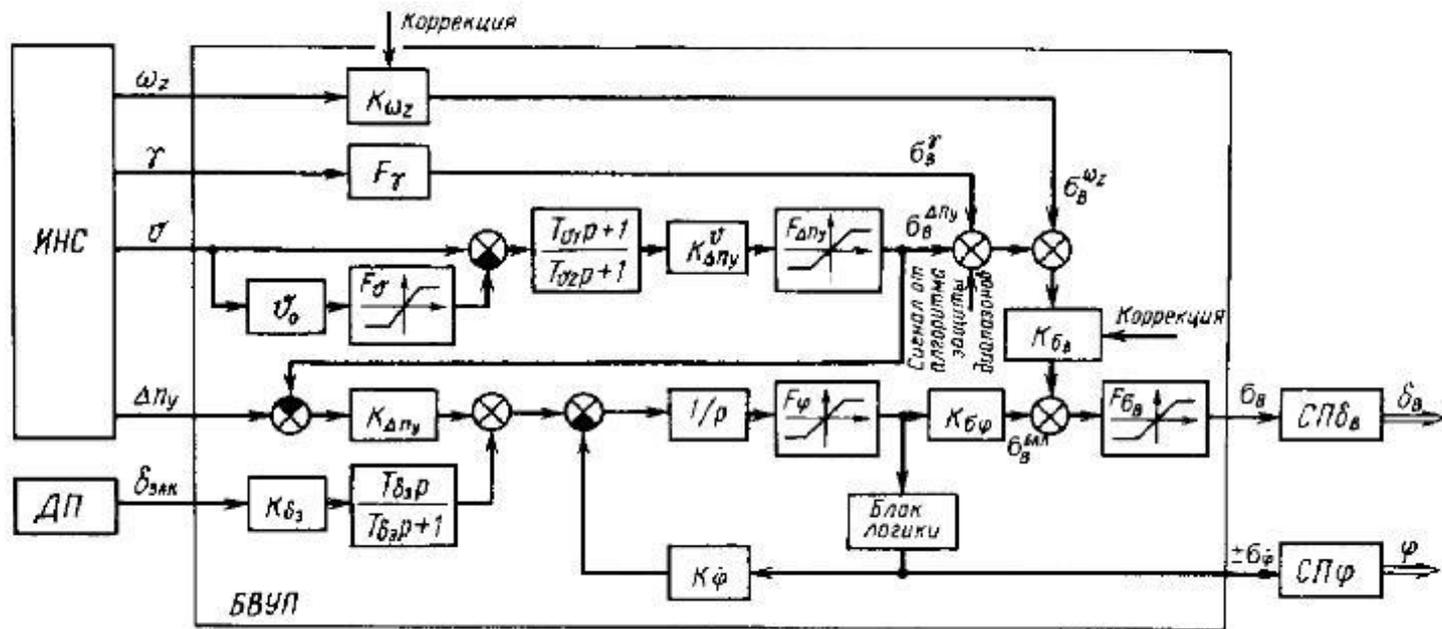
Закон управления цифроаналогового автопилота в режиме стабилизации угла тангажа имеет вид

$$\delta_B^{АП\Theta ny} = F_{\sigma_B} [k_{\sigma_B} (M)(\sigma_B^{\omega_z} + \sigma_B^{\Delta ny}) + \sigma_B^{бал}]$$

$$\sigma_B^{\omega_z} = k_{\omega_z} (M)\omega_z \quad \sigma_B^{\Delta ny} = F_{\Delta ny} k_{\Delta ny} \frac{T_{91}p+1}{T_{92}p+1} [\vartheta - F_{\vartheta} \upsilon_0]$$

$$\sigma_B^{\gamma} = F_{\gamma} \gamma = \frac{1 - \cos \gamma}{\cos \gamma}$$

$$\sigma_B^{бал} = k_{\sigma_{\varphi}} \frac{F_{\varphi}}{p} [k_{\Delta ny} (\Delta n_y - \sigma_B^{\Delta ny}) + k_{\delta_{зак}} \frac{T_{\delta_{зак}} p}{T_{\delta_{зак}} p + 1} \delta_{зак}]$$



1.5. 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.