

# Теория гиросtabilизаторов

В. М. Терешков, ИУ2-73

Пр.: В. В. Фатеев, ИУ2

## Литература:

Пелькоф Д. С. Гироскопы и гиросtabilизаторы, т. 1.

——— " ———. Гироскопических систем.  
Проектирование.

Бесегерский, Фабрикант. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации.

Назаров. Командные гироскопические приборы

Распопов. Гиросtabilизаторы на ДНГ.

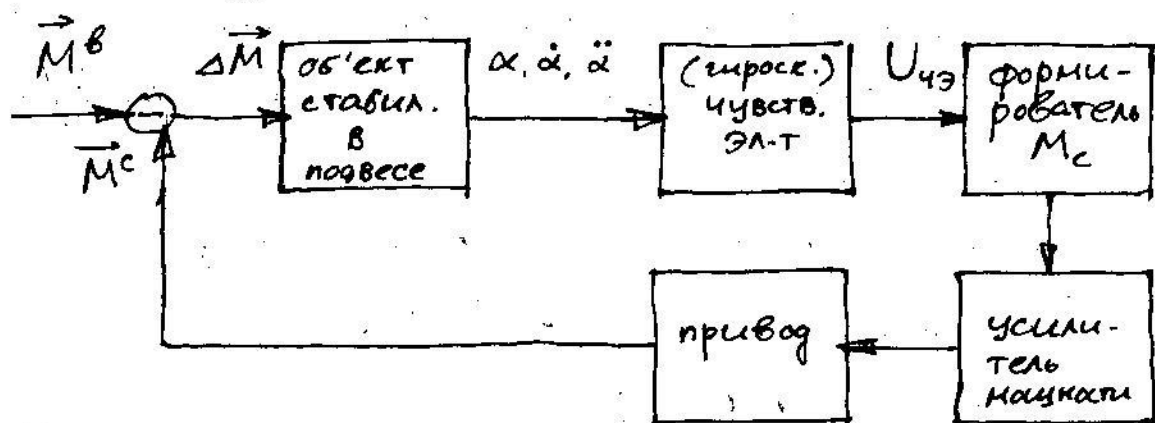
## Гиросtabilизаторы

исп. для стабилизации углового положения объекта в инерц. пространстве и управление этим положением. Обычно чувств. элементы — гироскопы. В воен. технике др. типы эл-тов не используются вообще.

Стабилизаторы бывают 1, 2, 3-осные; активные (потребляют энергию шибке), пассивные, полупассивные (энергия потребляется только на поддержание собств. кинетич. моментов гироскопов); индикаторные, силовые, индикаторно-силовые.

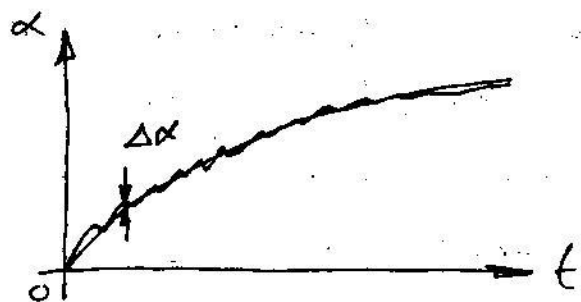
## Принцип действия

Гиросtabilизатор следит за внешним возмущающим моментом  $M^в$  и компенсирует его моментом стабилизации  $M^с$ .



Гиросtabilизатор может не сохранять положения объекта, но должно быть выполнено условие  $\sum_i M_{\alpha_i} = M^в - M^с = 0$ .

## В характеристике



может быть существенно или среднее значение  $\omega_{сст} = \langle \alpha \rangle$  (в ИМС), или отклонение от среднего значения  $\Delta \alpha$ .

## Классификация

- 1) По типу стабилизации:
  - словное;
  - индикаторное;
  - индикаторно-словное.
- 2) По типу привода ЭЛ-ТА:
  - 3-степенной мроской любого типа (в основе индикаторных стабилизаторов);
  - 2-степенной мроской (в основе словных стабилизаторов)
  - БУС;
  - интегрирующей мроской.
- 3) По кол-ву осей:
  - 1-осное;
  - 2- — — — —;
  - 3- — — — —.

4) По кол-ву шросков на одну ось:

— 1 шросок

— 2 шроска

5) По типу привода:

— электрический (редукторный или безредукторный);

— пневматический (при очень больших  $M_c$ ; передача энергии затруднена);

— гидравлический;

— реактивный (на космич. объектах)

6) По типу подвеса\*

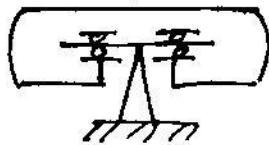
— 1-осные (исп. редко):

а) наружный карданов:



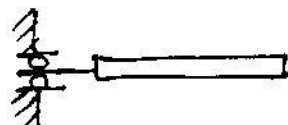
Исп. шарикоподшипники;  
угол поворота любой.

б) внутренний карданов:



Угол поворота ограничен.  
Компактен.

в) консольный:



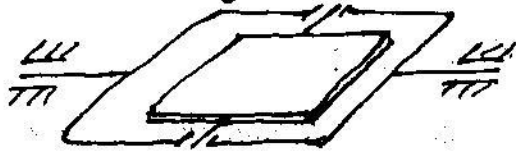
\* г.б. жестким,  
легким, де-  
шевым не  
затенять объект

Подшипники сильно нагружены.  
Угол поворота любой.

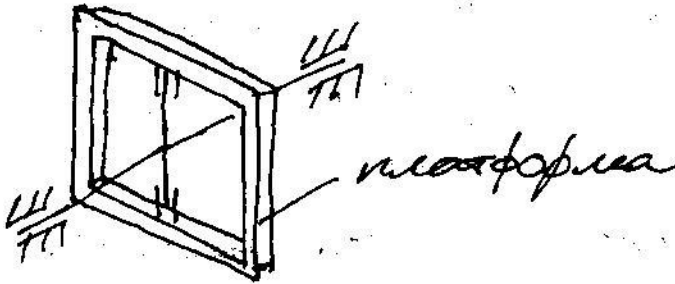


— 2-осные :

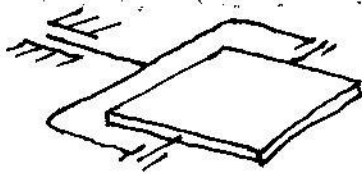
а) наружный карданов :



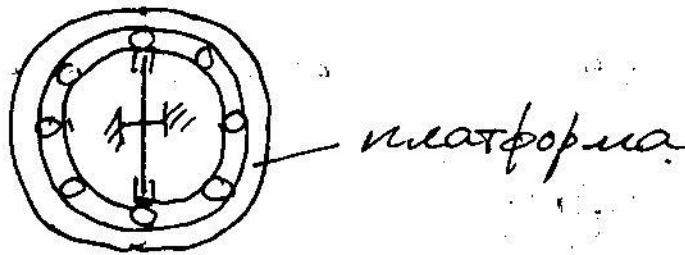
б) внутр. карданов :



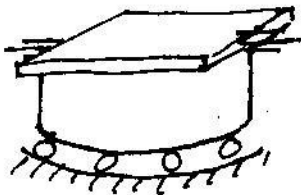
в) консольный :



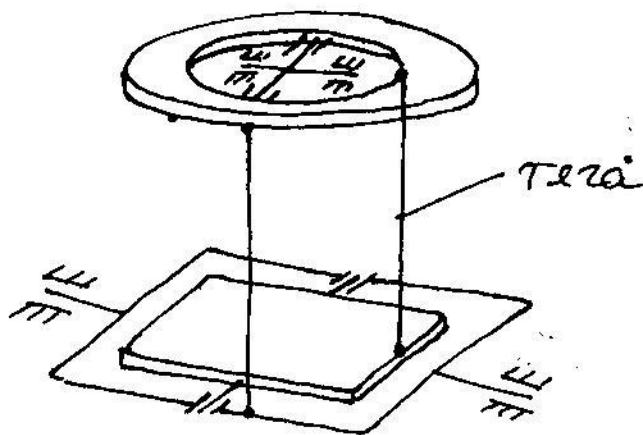
г) подшипники большого диаметра



д) дуговой

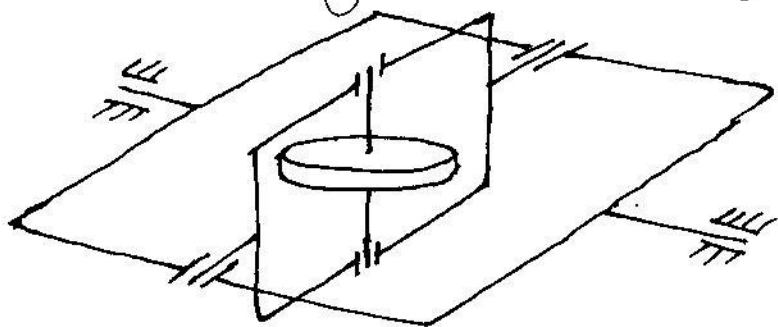


е) с платформой-повторителем:

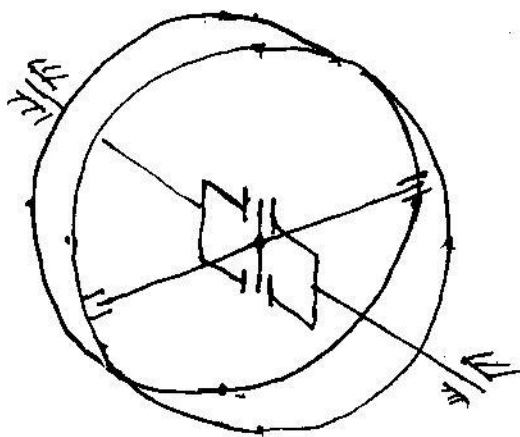


— 3-осное :

а) карточный карданов :

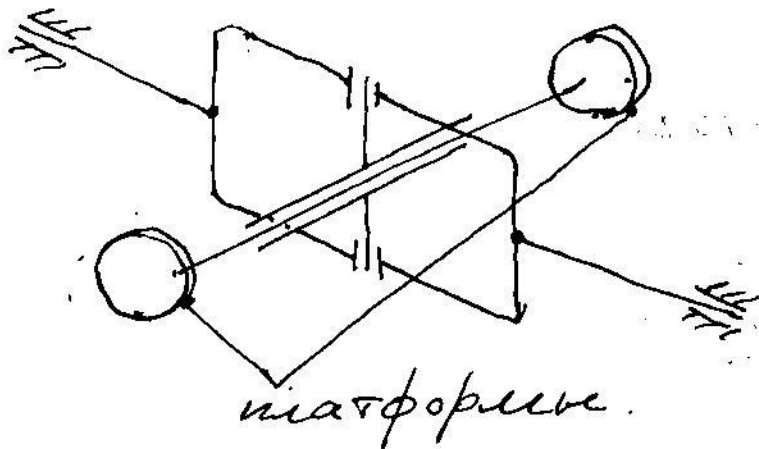


б) внутр. карданов :

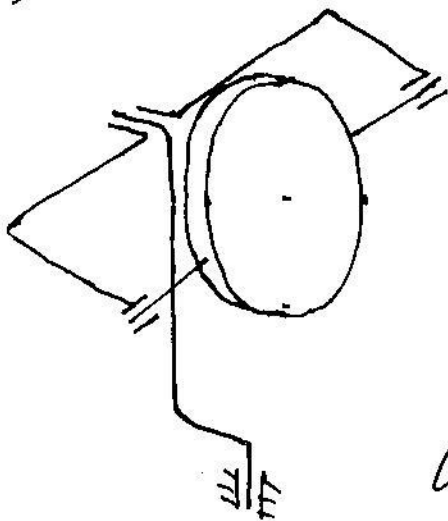


Хороший обзор;  
углы малы :

в) гантельный:

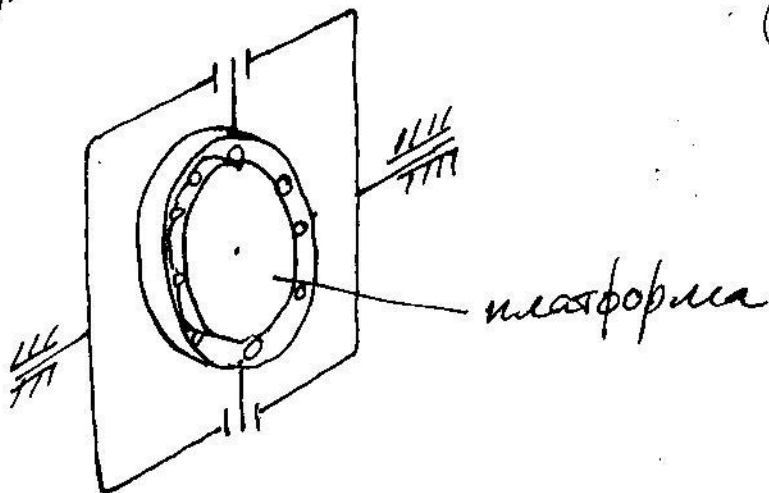


г) консольный:



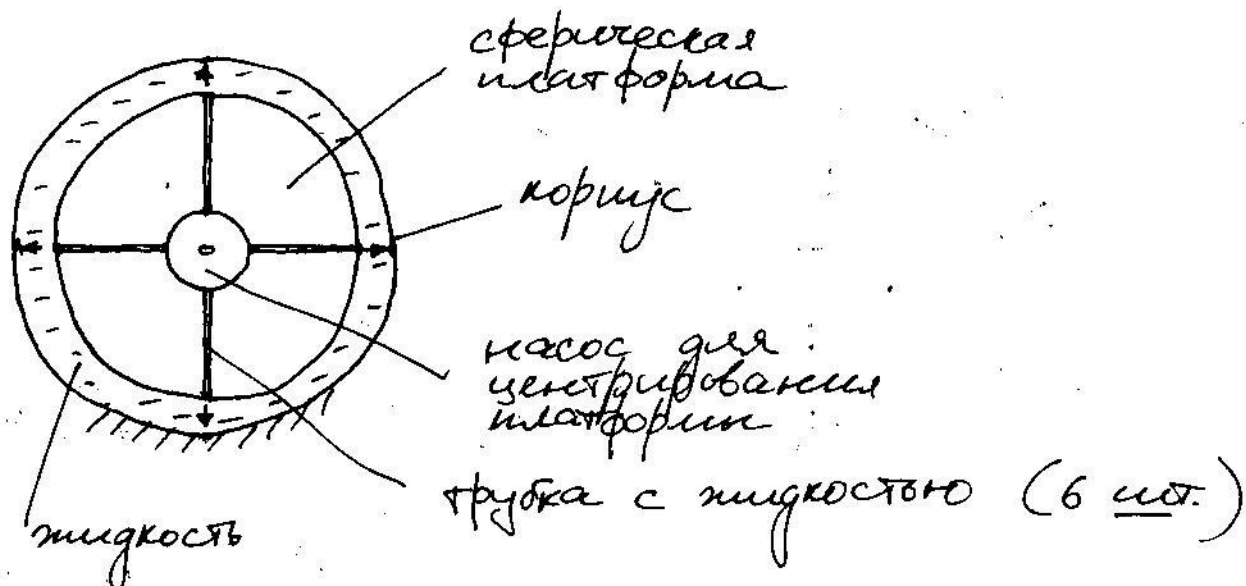
Сильно нагружен  
Исп. в телеаппаратуре.

д) с охватывающим подшипником:

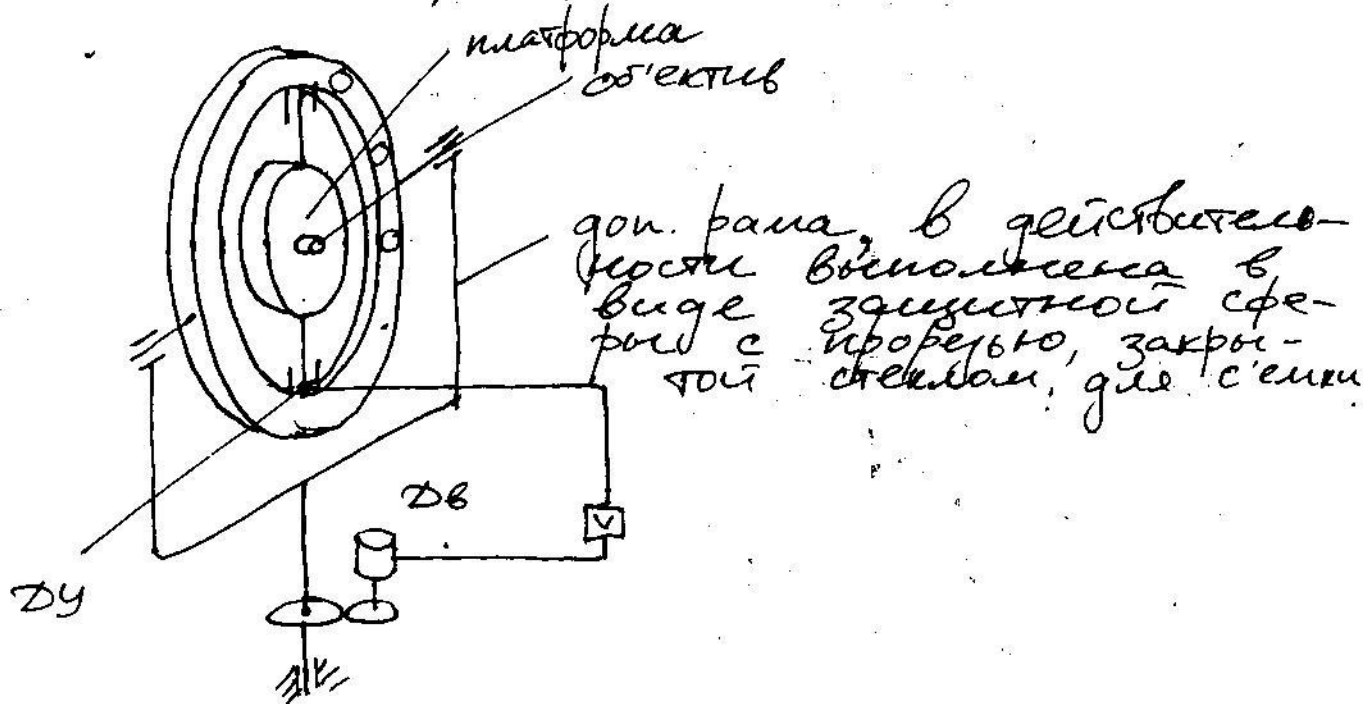


Малонагрузный. Исп. в телеаппаратуре

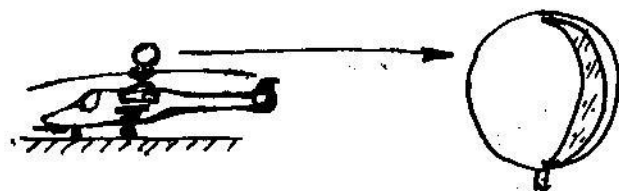
е) маятниковый.

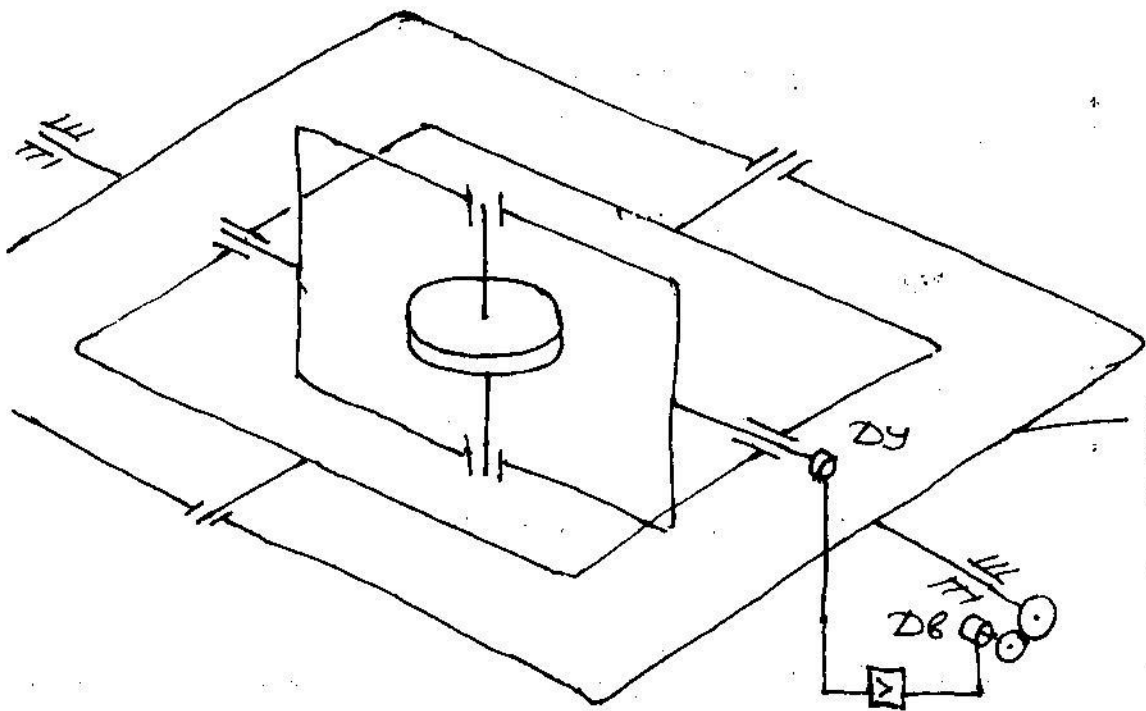


ж) многорамочные. Удобны в эксплуатации (не затеняют объект на платформе); исп. на высокоманевренных ЛА (нет опасности складывания рам).



Удобнейший вариант исп. в боевых вертолетах:

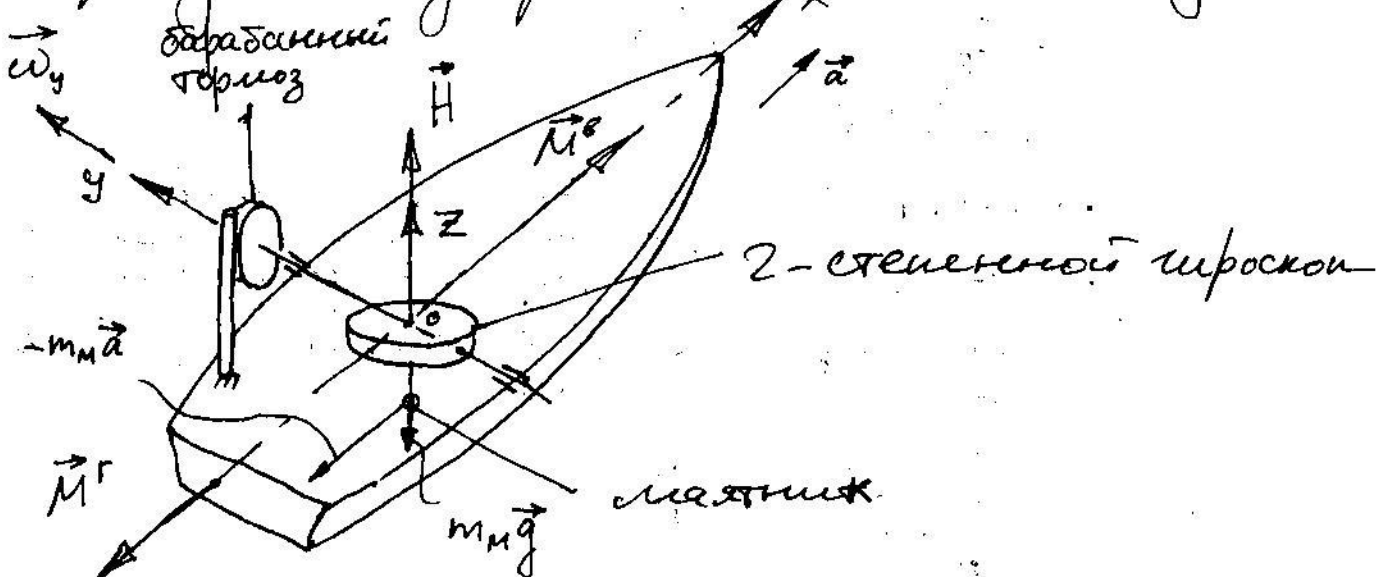




гол. валя;  
 в редуктора -  
 служит скла-  
 дивание вах.  
 или "входивание"  
 платформ.

### История предмета

1904 г. - построен первый (судовой) ги-  
 росtabilизатор для стабилизации по  
 крену. (качку уменьшил с  $40^\circ$  до  $1^\circ$ )



$Ox$  - ось стабилизации;

$Oy$  - ось прецессии;

$M^0$  - возмущающий момент волны

Момент  $M^0$  передается с судна на  
 гироскоп; возникает прецессия

с  $\omega_y = \frac{M^0}{H}$ . Гироскоп действует

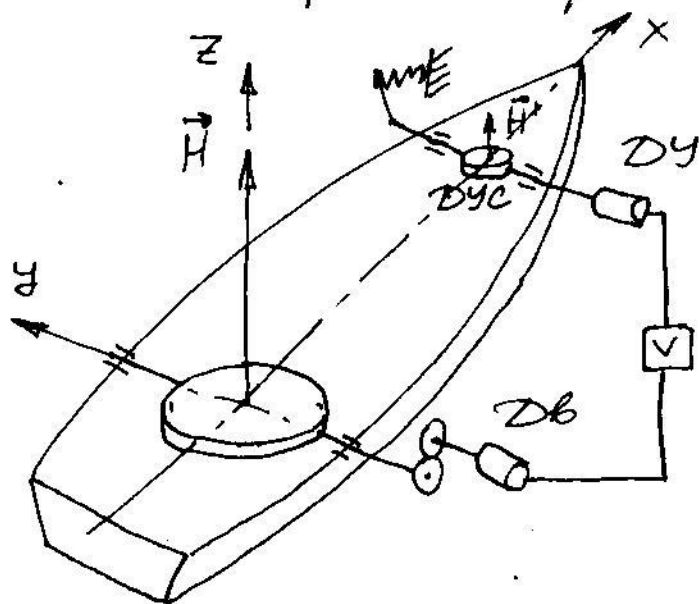
на судно реактивным гироскопом  
моментом  $\vec{M}^{\Gamma} = \vec{H} \times \vec{\omega}_y$ . Для судна

$$\sum_i M_{ix} = M_x^e + M_x^{\Gamma} = M_x^e - H \cdot \frac{M_x^e}{H} = 0.$$

Угол поворота гироскопа ограничен;  
это допустимо, если момент  $M_x^e$   
знакопеременный и  $\langle M_x^e \rangle = 0$ .

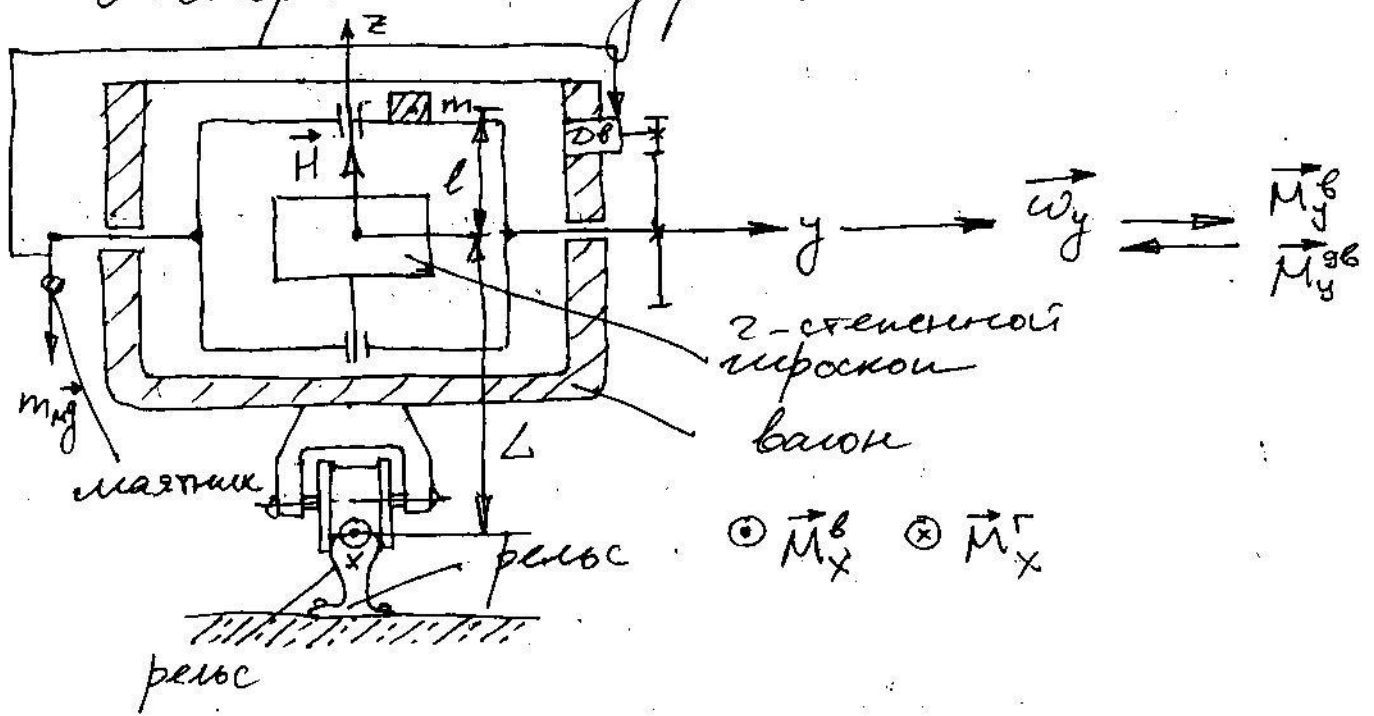
Гироскоп выставляется по маятнику,  
к-рост, к сонаменту, создает  
момент силы  $-m_m \vec{a}$  при уско-  
рительном движении судна и  
силе  $m_m \vec{g}$  при прецессии ги-  
роскопа

1911 г. - построен гиростабилизатор Сперри



Связь от Dy к двигателю управляет  
динамиком.

1910 г. — предложен гиростабилизатор для  
монорельсовой дороги.



$Ox$  - ось стабилизации

$Oy$  - ось прецессии

$$\sum_i M_{ix} = M_x^v + M_x^g = M_x^v - H \cdot \frac{M_x^v}{H} = 0.$$

Может возникнуть и возмущающий момент  $M_y^v$ . Чтобы вагон не стал падать, фиксируется отклонение от вертикали с помощью маятника  $m_m$ ; сигнал об угле отклонения передается на двигатель, который парирует  $M_y^v$  моментом  $M_y^{gv}$ .

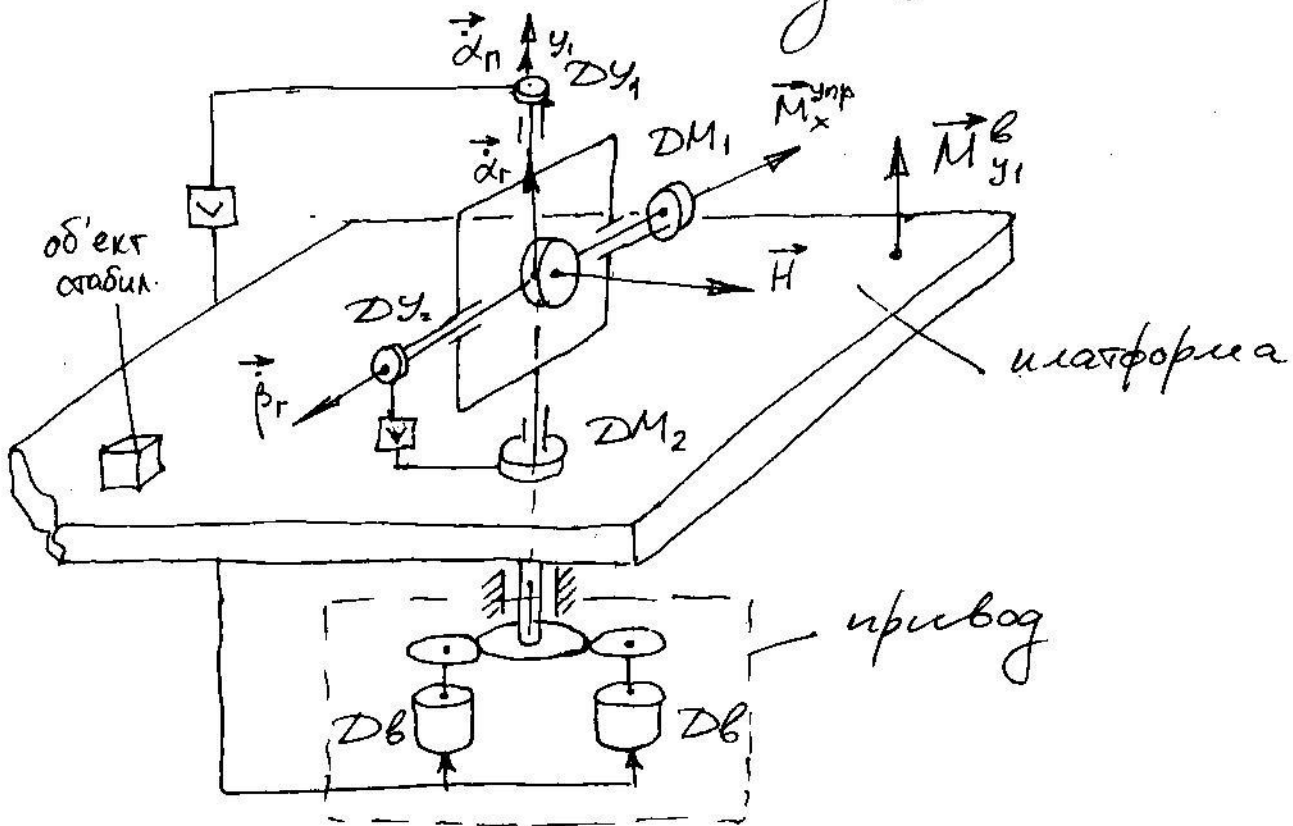
Все эти приборы громоздки и опасны.

1924 г. — предложен индикаторно-силовой гиростабилизатор (чувствительный гироскоп, силовые элементы — гироскоп и двигатель рауфюзки).

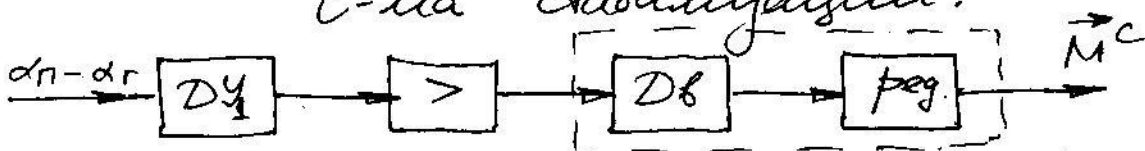
1948 г. - построена центральная гиросфера ЦГВ.

Индикаторные гиросtabilизаторы.  
Адресный индикаторный гиросtabilизатор  
с 3-степенным гироскопом

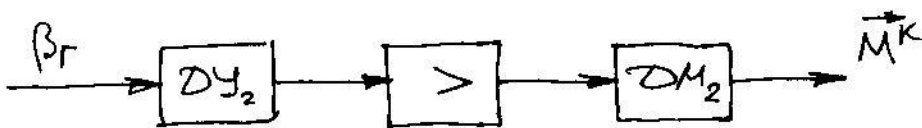
Гироскоп расположен на платформе так, что одна ось чувствительности // на оси стабилизации, и дополнен системой стабилизации.



С-ма стабилизации:



С-ма латеральной коррекции:



Гироскоп имеет 3 степени свободы отн. платформы и не оказывает на нее



никакого силового воздействия. Т.о., гироскоп здесь — только чувствит. эл-т, измеряющий при помощи ДУ, пометки матрицы в инерц. ср-ве.

Под действием нек-рого момента  $\vec{M}_{y_1}^в$  матрица начинает поворачиваться; на ДУ, возникает сигнал, пропорциональный  $\alpha_{п-а_{п}}$ , к-рый подается на привод, развивающий момент

$$\vec{M}_{y_1}^с = - \vec{M}_{y_1}^в$$

при нек-ром значении  $\alpha_{п} = \alpha_{п}^*$ , т.е. статической ошибкой. Ее существование принципиально\*

Матричная коррекция преобразует складывание рамок

### Требования к эл-там

#### ①. Гироскоп

- малая масса и габариты, т.к. гир. момент не используется.
- высокие скорости управления, т.е. мощный ДУ.

#### ②. Подвес

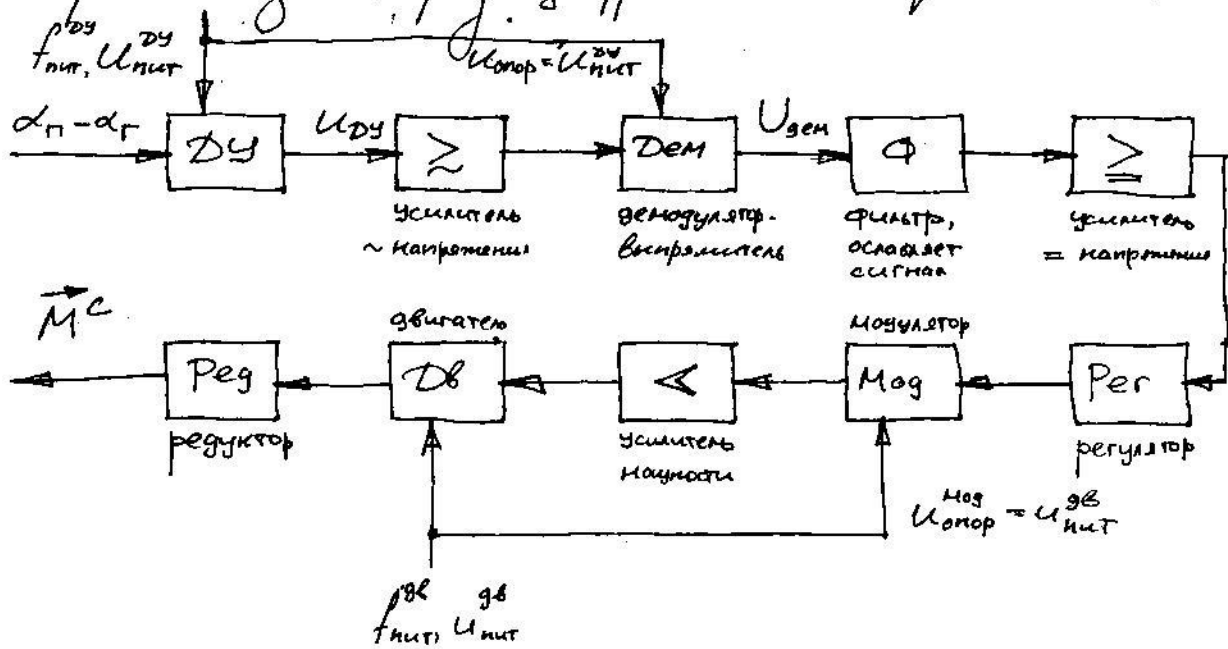
- жесткость в поступат. направлении,

\* Т.о., стабилизатор — следующая с-ма в тормозном режиме.

- малая масса и габариты;
- условная жесткость в цепи передачи момента, чем обусловлено отсутствие запаздывания; отсутствие инерции в редукторе, механически либо отсутствие редуктора как такового, либо вероятное выключение 2 двигателей.

③ Электроника и т.п.

- отсутствие фазозадающих звеньев;
- высокие КПД;
- малые габариты;
- отвод тепла  $\approx 1/3$  фазы;
- низкий уровень шумов;
- преобразование аналоговых фаз в цифровые перед цифровыми при выс. частоте



# Преимущества индукционного преобразователя

- малая масса и габариты;
- высокая управляемость.

## Недостатки:

- высокие требования к системе стабилизации (см. выше).

## Ур-я движения

Ур-я платформы:

$$I_0 \ddot{\alpha}_n + D_0 \dot{\alpha}_n + M^c = M_{y1}^{вп}$$

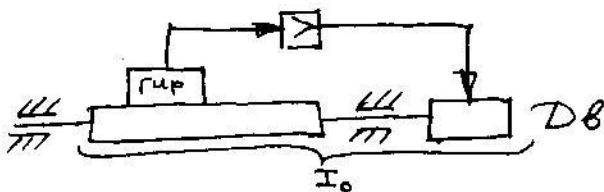
Ур-я гироскопа:

$$\begin{cases} A \ddot{\beta}_r + D_\beta \dot{\beta}_r - H \dot{\alpha}_r = M_x^в \\ I \ddot{\alpha}_r + D_\alpha (\dot{\alpha}_r - \dot{\alpha}_n) + H \dot{\beta}_r + K_\alpha \beta_r = M_{y1}^{вр} \end{cases}$$

Влияние гироскопа на платформу мало; им пренебрегают.

## Модели преобразователя

### 1) Местная модель



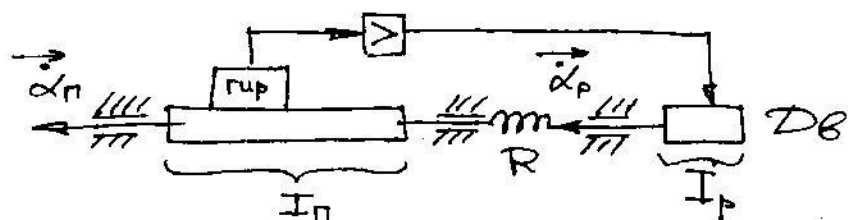
$$M^c = -K(\alpha_r - \alpha_n);$$

$$I_0 \ddot{\alpha}_n + D_0 \dot{\alpha}_n + K \alpha_n = K \alpha_r + M_{y1}^{вп}$$

В  $I_0$  входит и момент инерции ротора двигателя;  $D_0$  преимущественно вызывает демпфирование в двигателе.

## 2) Нелёгкая модель

Нелёгкость учитывается сосредоточенной в редукторе.



$$\begin{cases} I_n \ddot{\alpha}_n + D_n \dot{\alpha}_n + R(\alpha_n - \alpha_p) = M_{y1}^{вн}, \\ I_p \ddot{\alpha}_p + D_p \dot{\alpha}_p + R(\alpha_p - \alpha_n) + K(\alpha_n - \alpha_r) = M_{y1}^{вн} \end{cases}$$

### Динамика

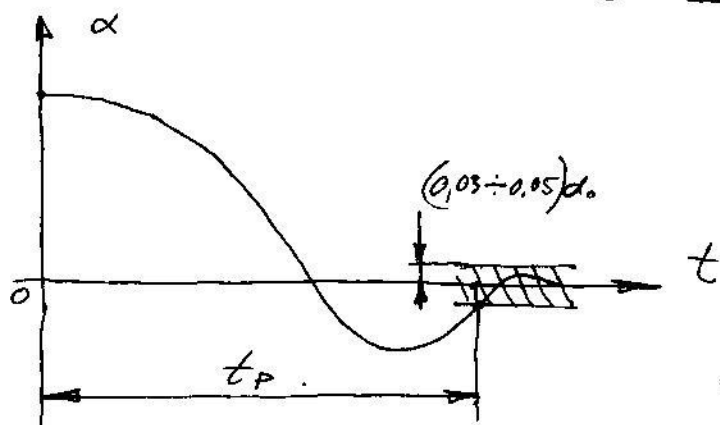
и устойчивость простого преобразователя

$$I_0 \ddot{\alpha}_n + D_0 \dot{\alpha}_n + K \alpha_n = K \alpha_r + M_{y1}^{вн}. \quad (*)$$

Устойчивость исследуем по однородному уравнению

$$\ddot{\alpha} + 2\zeta \omega_0 \dot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = 0, \quad \text{где}$$

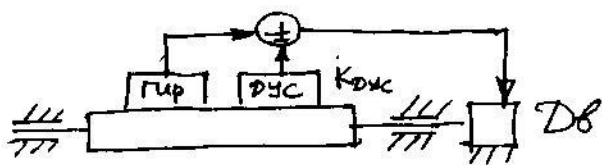
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{I_0}}; \quad \zeta = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_0}{I_0 \omega_0}$$



Уменьшить динамику ошибку можно увеличивем  $\omega_0$ , но при этом жесткость канала обр. связи возрастает до величины, сравнимой с жесткостью редуктора; жесткая модель становится неадекватной. Поэтому на

практике исп.  $\omega_0 = (50 \div 100) \Gamma_y$ . Это-  
рой способ уменьшить  $t_p$  - выбрать  
оптимальное  $\xi = 0,5 \div 0,7$ :

- подбором параметров с-мы;
- применением ДУС:

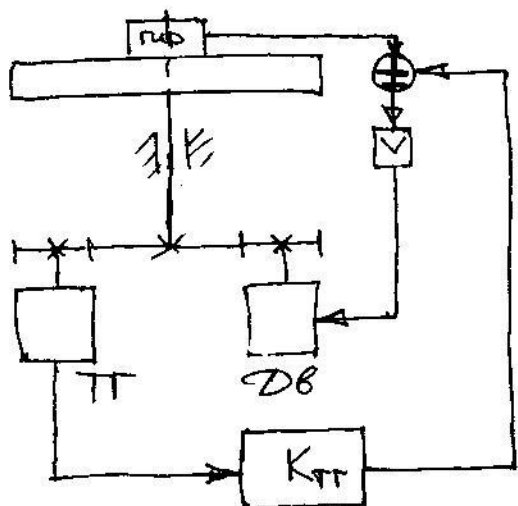


Коэф. демпфирования в ур-и (\*)  
становится равным  $D'_0 = D_0 \pm K_{ДУС}$ .

Частота колебаний ДУС должна  
быть меньше на порядок  
выше  $\omega_0$ ; При этом мож-  
но считать, что  $K_{ДУС}$  не зави-  
сит от  $\omega_0$ .

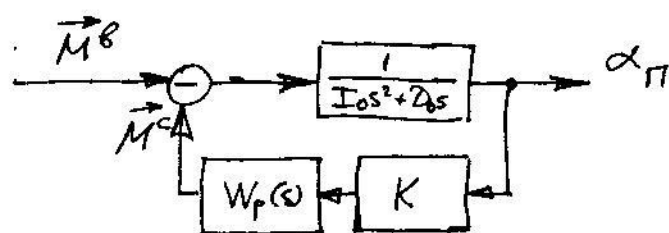
В кач-ве ДУС можно исп.  
вибрационное гироконны.

- введением тахогенератора (двигателя  
в обратном режиме):



Недостаток: ТТ уменьшает скорость мат-формы относительно носителя (именно скорость  $\dot{\theta}$ ), поэтому полимно уменьшения коэф. демпфирования:  $D_0' = D_0 \pm K_{TT}$  — в ур-и появляется обратный возмущающий член  $\pm K_{TT} \cdot \dot{\theta}$ . Т.о., в авиации этот способ почти неэффективен.

— введением регулятора (корректирующего звена)



$K = \prod_i K_i$  — общий коэф. жесткости

Для разомкнутой с-мы передат. ф-ция от  $\vec{M}_B$  к  $\vec{M}_C$

$$W(s) = \frac{1}{I_0 s^2 + D_0 s} \cdot K \cdot W_p(s) = \frac{K_c}{s} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1} \cdot W_p(s), \text{ где}$$

$K_c = K / D_0$  — добротность по скорости,

$T_0 = I_0 / D_0$  — постоянная времени

X-е ур-е при отсутствии регулятора ( $W_p(s) = 1$ ):

$$1 + W(s) = 0;$$

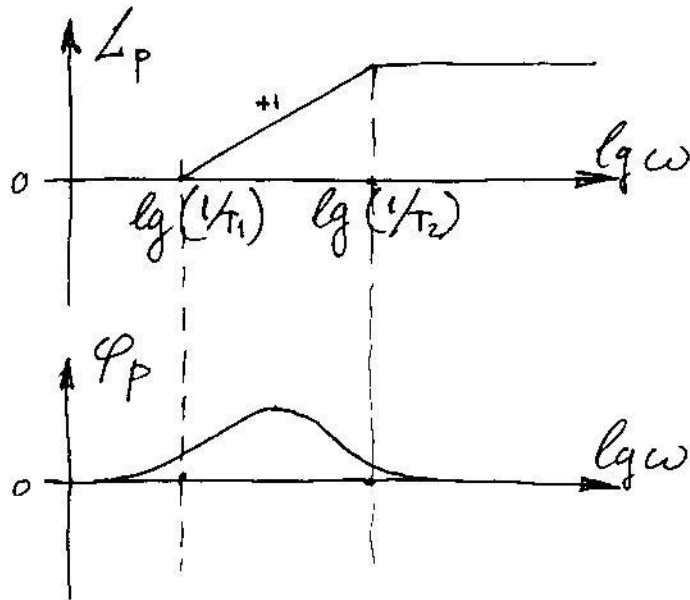
$$1 + \frac{K}{I_0 s^2 + D_0 s} = 0;$$

$$I_0 s^2 + D_0 s + K = 0.$$

Для повышения устойчивости вводят дифференцирующую функцию

$$W_p(s) = \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} ; T_1 > T_2.$$

$T_2 \neq 0$  необходимо, поскольку  $W_p(s) = 1 + T_1 s$  физически нереализуемо (требуется бесконечная мощность на высоких частотах)



на высоких частотах)

Функция выписывается в виде RC-цепей.

Введем  $W_p(s)$  в ур-е:

$$I_0 s^2 + D_0 s + K \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} = 0.$$

При  $T_2 \approx 0$

$$I_0 s^2 + (D_0 + T_1 K) s + K = 0 ; D_0' = D_0 + T_1 K$$

при  $T_2 \neq 0$

$$I_0 T_2 s^3 + (I_0 + D_0 T_2) s^2 + (D_0 + K T_1) s + K = 0.$$

Критерий Гурвица требует:

$$(I_0 + D_0 T_2)(D_0 + K T_1) > K I_0 T_2.$$

Пусть естеств. демпфирование нет:  $D_0 = 0$ .

Тогда

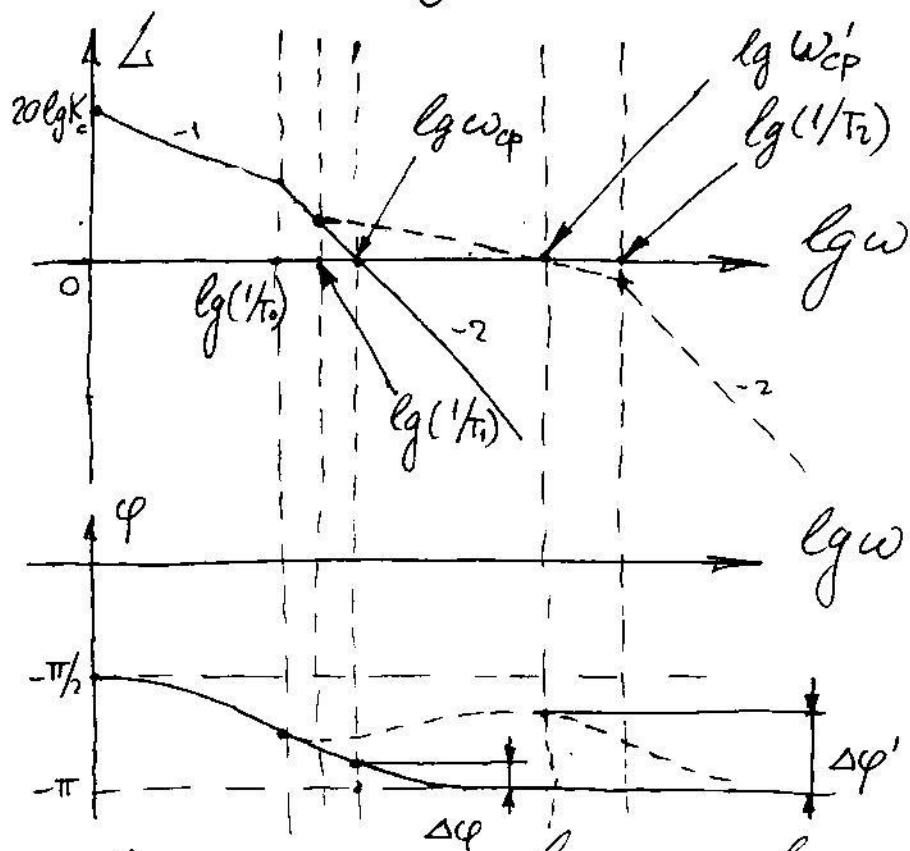
$$I_0 K T_1 > I_0 K T_2 ;$$

$$T_1 > T_2.$$

Далее условие для практических расчетов критерия Найквиста. Построим АЧХ разомкнутой С-мы.

$$W(s) = \frac{K_c}{s} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1} \cdot W_p(s);$$

$$\Delta(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)|; \quad \varphi(\omega) = \arg W(j\omega)$$



С-ма даже в отсутствие регулятора устойчива, однако запас по фазе  $\Delta\varphi$  мал. Кроме того, переключение АЧХ под наклоном  $-2$  ( $-2 \cdot 20$  дБ/дек) с осью частот ухудшает показатели качества переходного процесса. Поэтому вводим регулятор с

$$h = \frac{T_1}{T_2} = 5 \div 10.$$

При этом желательно иметь

$$\Delta\varphi' = \frac{\pi}{6} \div \frac{\pi}{3}$$



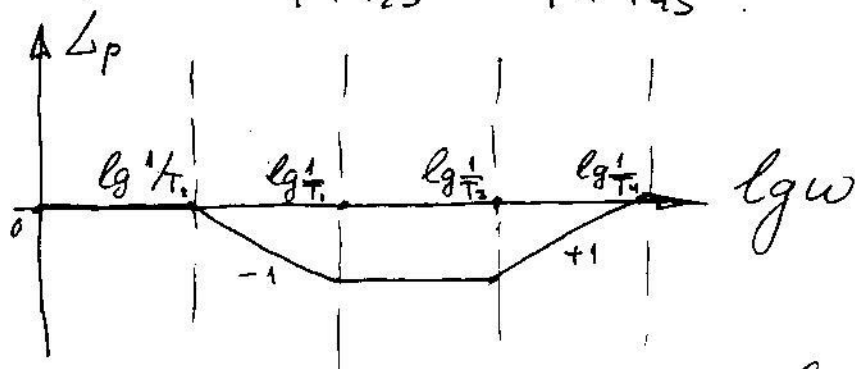
Иногда связывают  $h$  с показателем колебательности

$$M = \frac{\max |\Phi(j\omega)|}{\Phi(0)},$$

полагая  $M = 1 \div 1,5$ ;  $h = \frac{M+1}{M-1}$ .

В результате введения регулятора повышается частота среза  $\omega_{ср}' > \omega_{ср}$ .  
 Выбирать расположение  $T_1$  (или  $T_2$ ) нужно так, чтобы локальный максимум  $\varphi'(\omega)$  приходился примерно на  $\omega_{ср}'$ . Высокая жесткость  $K$  хороша, но слишком сильное увеличение  $\omega_{ср}'$  нежелательно, т.к. приближает к вылету за жесткость, к-рая вообще не учтена в модели. Чтобы ограничить  $\omega_{ср}'$ , исп. регулятор вида

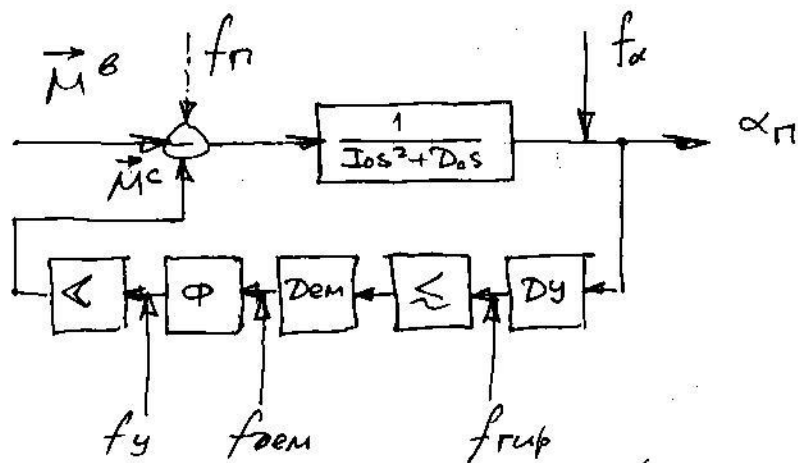
$$W_p(s) = \frac{1+T_1s}{1+T_2s} \cdot \frac{1+T_3s}{1+T_4s}$$



Важные  $T_i$  надо выбирать так, чтобы  $1/T_3 < \omega_{ср}' < 1/T_4$ , где наклон суммарной ЛАЧХ  $-2+1 = -1$ .

## Помехозащитность

Помеха есть возмущение на частоте выше частоты среза:  $\omega > \omega_{ср}$ .

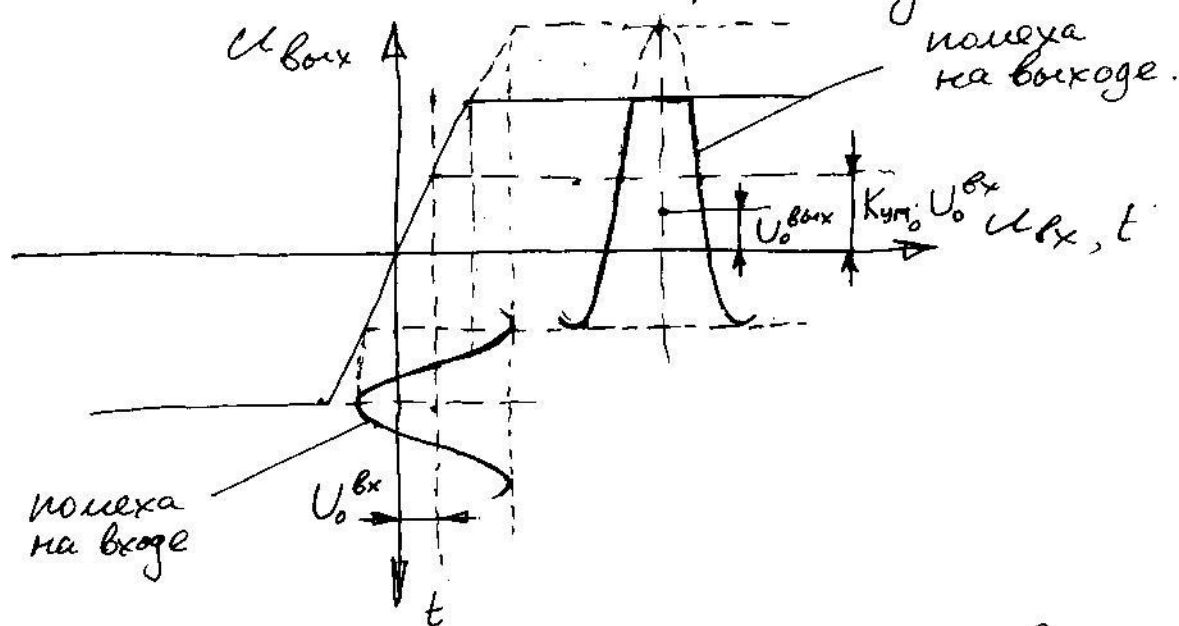


Все помехи  $f_i$  приводятся умножением  $f_i$  на  $W_{ik}(s)$  последующих звеньев в к компаратору:  $f_{п} = \sum_i f_i \cdot \prod_k W_{ik}(s)$ .

Помехи снижают коэф. усиления усилителя, приводят к нагреву усилителя и двигателя; вибрациям; шуму.

Для снижения влияния помех в тракт вводят фазонадвигательные звенья фазового вида на частотах  $\omega > 10 \omega_{ср}$ , тем помехают суммарную ЛАЧХ, но при этом требуется сохранить достаточный запас по фазе  $\Delta\varphi'$ . Используют тем. п. на высокой частоте ЛАЧХ фазового и замкнутой с.м. совпадают. Судя правило, по к-рану сумма всех постоянных времени  $\sum_i T_i \approx \frac{1}{10 \omega_{ср}}$  по аперодическим звеньям с.м. подавления помех.

Было сказано, что помехи уменьшают  
коэф. усиления усилителя мощности  
Покажем, как это происходит.



Разложив помеху на выходе в ряд Фурье,  
обнаружим, что постоянная составля-  
ющая  $U_0^{\text{вых}} < K_{\text{ум}} \cdot U_0^{\text{вх}}$ , т.е. истинный  
коэф. усиления  $K_{\text{ум}} = \frac{U_0^{\text{вых}}}{U_0^{\text{вх}}} < K_{\text{ум0}}$ .

### Точность стабилизации.

Ошибка (отклонение от заданного  
положения в измер. пр-ве) бывает  
статическая (при  $t \rightarrow \infty$ ), динами-  
ческая (переходный процесс).

К статич. ошибкам относятся и свя-  
занные с медленно изменяющи-  
мися возмущениями

Часто нормируется коэф. подавления  
колебаний — отношение амплитуды  
колебаний носителя к ам-  
плитуде колебаний модулятора,  
вызванных колебаниями носителя

Услови:

$$I_0 s^2 \alpha_{II} + D_0 s \alpha_{II} + K \alpha_{II} = K \alpha_{I} + M_{y1}^e ;$$

$$\alpha_{II} = \frac{K \alpha_{I} + M_{y1}^e}{I_0 s^2 + D_0 s + K}.$$

В уст. режиме при  $\alpha_I = 0$ ;  $M_{y1}^e = \text{const}$

$$\alpha_{II}^{\text{уст}} = \frac{M_{y1}^e}{K}.$$

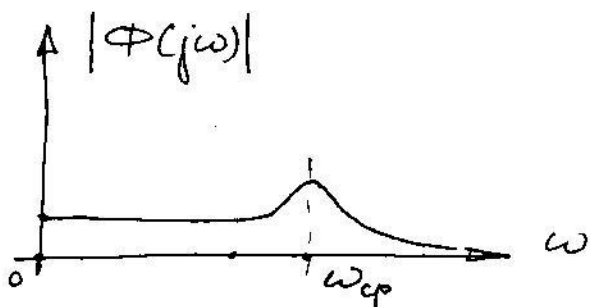
Эта величина (статич. ошибка) сводится к увеличению коэф. усиления  $K$  (но не до потери устойчивости). Улучшение точности важно в войне, если требуется з.л.-т. — ДНГ.

В уст. режиме при  $\alpha_I = \text{const}$ ,  $M_{y1}^e = 0$

$$\alpha_{II}^{\text{уст}} = \alpha_I.$$

Т.о., требуется внимательно выбирать выноску.

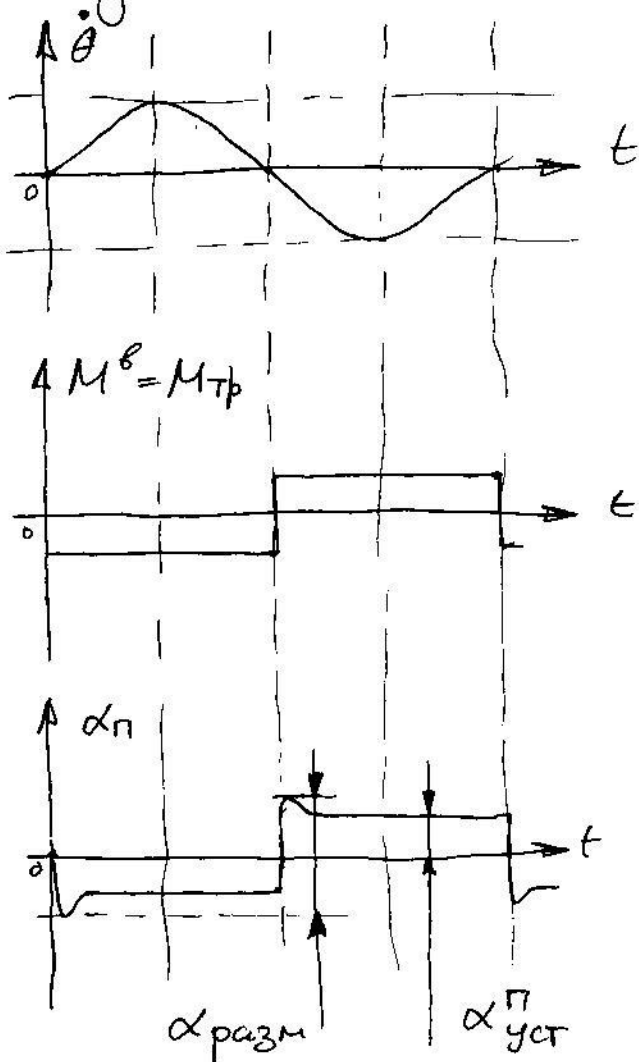
$$\Phi(s) = \frac{1}{I_0 s^2 + D_0 s + K}.$$



Рабочие частоты должны выбираться слева от пика при  $\omega = \omega_{ср}$ .

При гармонич. колеб. носителя момент времени закономерно, чередующиеся переходные процессы

переходные :



Если перерегулирование  $\sigma$  мало,  
то размах

$$\alpha_{разм} = 2 \alpha_{уст}^п \cdot (1 + \sigma) \approx 2 \alpha_{уст}^п$$

Возмущающие моменты  
смагиваются у моментов трения,  
управления, небаланса, тяжести,  
неравномерности, обкатки, инерции внеш. тел.

$$M_{\dot{x}}^b = M_{\dot{x}}^{упр} + M_{\dot{x}}^{тр} + M_{\dot{x}}^T + M_{\dot{x}}^{НБ} + M_{\dot{x}}^{НХ}$$

Собств. скорость прецессии смагива-  
ется у составляющих, не завися-  
щих от перегрузок  $\omega_0$ , пропорци-

осевых перемещении  $\omega_1 n$ , пропорциональных квадрату перемещения  $\omega_2 n^2$ :

$$\omega_{\text{сеп}} = \omega_0 + \omega_1 n + \omega_2 n^2,$$

при этом  $\omega_1$  опр. небалансом,  $\omega_2$  — неравномерностью.

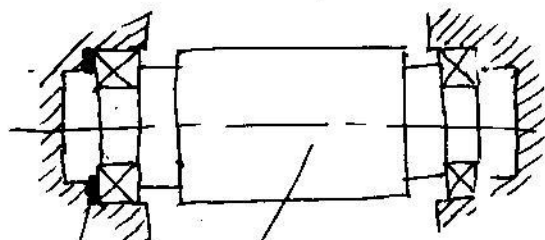
$$M_{y_1}^B = M_{y_1}^{TF} + M_{y_1}^T + M_{y_1}^{НБ} + M_{y_1}^{НЖ} + M_{y_1}^{ОБ} + M_{y_1}^Ч$$

1)  $M_{y_1}^{TF}$  возникает в подшипниках, токоподводах коммутаторного типа в многооборотных стабилизаторах. В последнем случае опр. кол-вом коммутаторов  $k$ , кол-вом контактов  $n_i$ , силой притяжения  $F_i$ , коэф. трения  $f_i$ , радиусом кольца  $R_i$ :

$$M_{y_1}^{TF} = \sum_{i=1}^k n_i F_i f_i R_i$$

Аналогично трение в коммутаторе двигателя, но оно умножается на передат. число редуктора  $i$  при приведении его к оси стабилизации редуктора.

Рассмотрим трение в подшипниках



платформа  
шариковый подшипник

$$M_{y1}^{TP} = M_0 + (1,5 F_a + 1,25 F_r) \cdot K \cdot \frac{D}{d}, \text{ где}$$

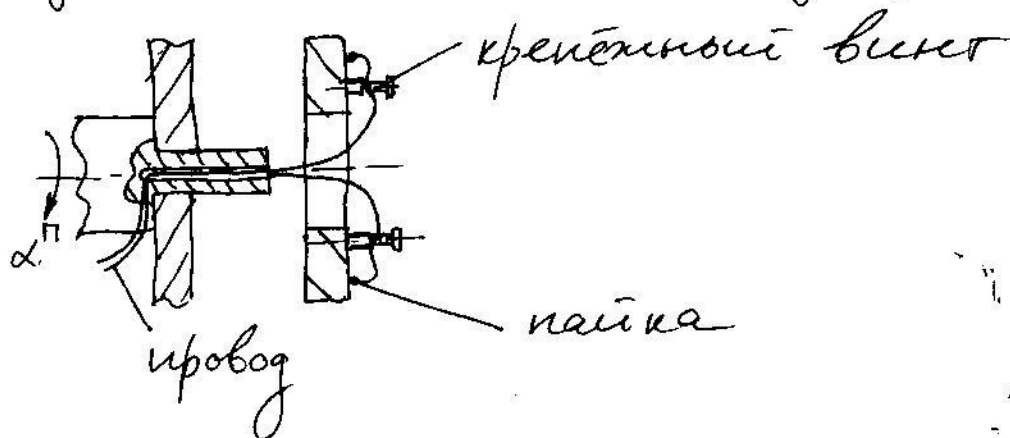
$F_a, F_r$  - осевая и рад. силы;

$$K = 0,001 \div 0,005;$$

$D$  - диаметр окружности центров шариков;

$d$  - диаметр шариков.

2)  $M_{y1}^T$  возникает в толкостях:



$$M_{y1}^T = K \cdot \frac{n}{\epsilon} \cdot \alpha_{\max}^П, \text{ где}$$

$n$  - кол-во шароводов;

$l$  - длина шаровода;

$K$  - коэфф. тяжения;  $K = 5 \div 8 \frac{\text{н} \cdot \text{см}^2}{\text{раг}}$

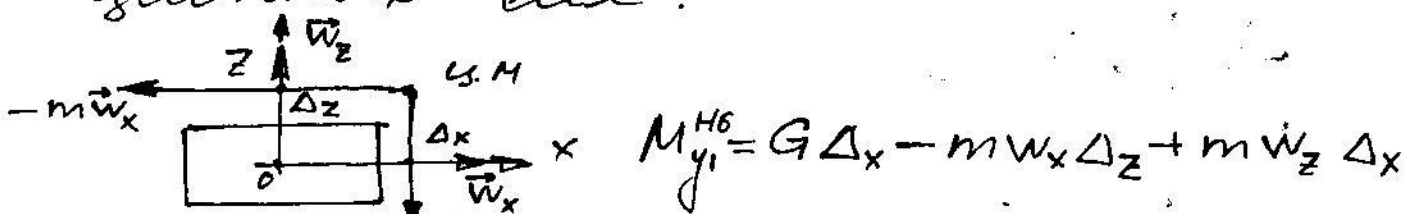
3)  $M_{y1}^{НБ}$  возникает силой тяжести (весом)  $G$  и инерционными силами на нек-ром месте  $\Delta l$ . Характерной силой служит проувержение  $G \Delta l$ .

Обязательна балансировка в 2 ил-тях перемещением масс (обычно передатки винт - гайка) до уравновешивания

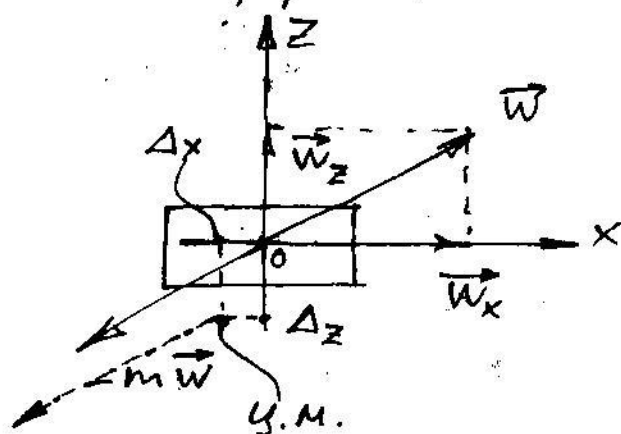
$$M_{y1}^{НБ} = M_{y1}^{TP}$$



При больших ускорениях балансировку ведут на мостах. Это важно, поскольку к моменту силы тяжести добавляются большие моменты инерционных сил:



4)  $M_{y1}^{Hx}$  исследуем на балансовой платформе, полагая жесткость подвеса по осям  $x$  и  $z$  равной  $c_x$  и  $c_z$ . Тогда смещение центра масс под действием сил инерции  $-m\vec{w}$



$\Delta x = \frac{m w_x}{c_x}$ ;  $\Delta z = \frac{m w_z}{c_z}$ ,  
а момент сил инерции отн. оси stability -

зачи.

$$M_{y1}^{Hx} = m w_z \Delta x - m w_x \Delta z =$$

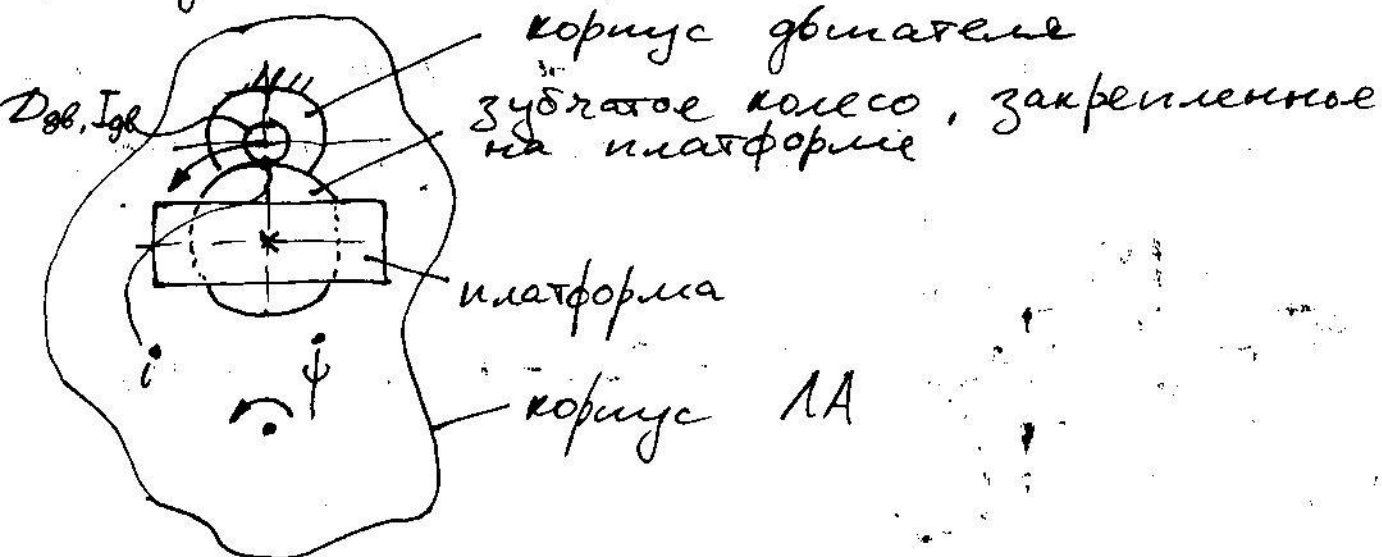
$$= m^2 w_x w_z \left( \frac{1}{c_x} - \frac{1}{c_z} \right)$$

возникает при  $c_x \neq c_z$  (отсюда и название).

Стремятся увеличить жесткости и уравнять их.



5)  $M_{y_1}^{об}$  - момент обкатки.



Если носитель вращается с угл. скоростью  $\psi$ , то зубчатое колесо обкатывается по периметру платформы, т.е. двигатель выходит из тормозного режима, в точке трения ротора двигателя о статор  $n/z$  зубчатое зацепление передается на платформу и рассматривается как возмущающий момент скоростной обкатки. Ускорение  $\ddot{\psi}$  создаёт момент инерционной обкатки.

В с-ме отсчёта ЛА (в отн. движении)

$$\frac{\omega_{об}^{отн}}{\omega_{п}^{отн}} = (-1)^n \cdot i, \quad \text{где } n - \text{число зацеплений}$$

$$\omega_{п}^{отн} = -\dot{\psi};$$

$$\omega_{об}^{отн} = -\dot{\psi} i (-1)^n;$$

в абс. движении

$$\omega_{об} = \dot{\psi} + \omega_{об}^{отн} = \dot{\psi} (1 - (-1)^n \cdot i).$$

Тогда момент скоростной обкатки

$$\begin{aligned} M_{y_1}^{\text{об.ск}} &= -D_{gв} \cdot \dot{\omega}_{gв}^{\text{отн}} \cdot i \cdot (-1)^n = \\ &= D_{gв} \dot{\psi} i^2 (-1)^{2n} = \\ &= D_{gв} \dot{\psi} i^2. \end{aligned}$$

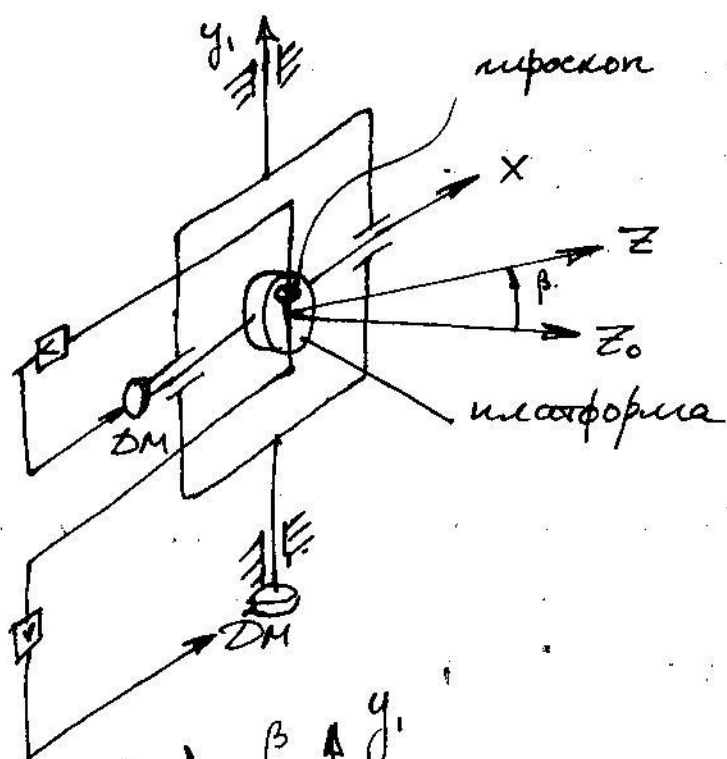
Чтобы уменьшить момент  $M_{y_1}^{\text{об.ск}}$ , на самолётах и ракетах стараются уменьшить редукцию до значений  $i = (70 - 100)$

Аналогично, момент инерционной обкатки

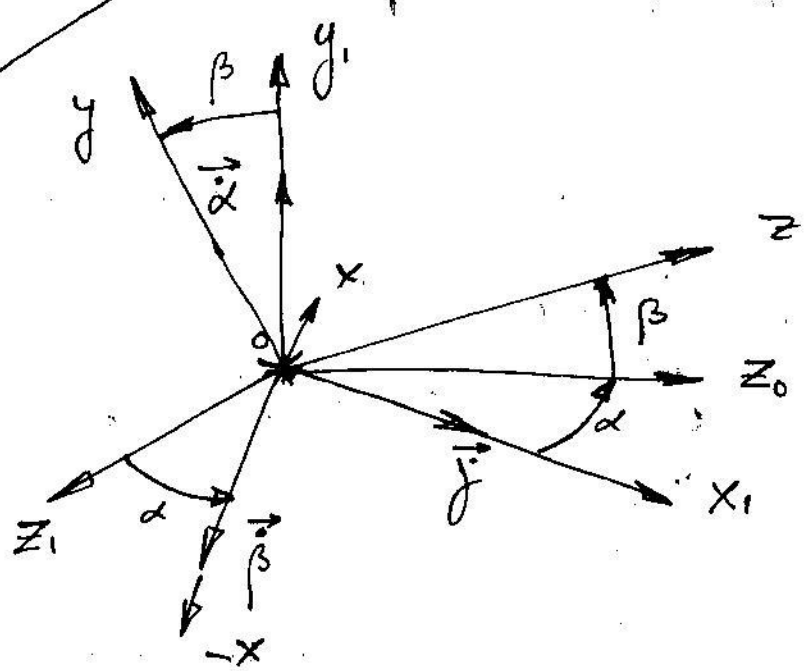
$$\begin{aligned} M_{y_1}^{\text{об.ин}} &= -I_{gв} \ddot{\omega}_{gв} \cdot i \cdot (-1)^n = \\ &= -I_{gв} \ddot{\psi} (1 - i(-1)^n) \cdot i \cdot (-1)^n \approx \\ &\approx I_{gв} \ddot{\psi} i^2. \end{aligned}$$

Момент  $M_{y_1}^{\text{об.ин}}$  считается уменьшенным редукции или применением буредукторных двигателей, но они громоздки и имеют большое энергопотребление. В последнем случае  $M_{y_1}^{\text{об.ин}} = 0$ ,  $M_{y_1}^{\text{об.ск}}$  мал.

6)  $M_{y_1}$  создается инерцией повеса. Возникает в 2- и 3-осных гиростабилизаторах.



Сигнал снимается с торч тех осей, на датчик момента которой подается.



$0xyz$  - трёхгранник платформы;

$0x_1y_1z_1$  - трёхгранник носителя;

$0x_2y_2z_2$  - трёхгранник рамки;

$\vec{j}$  - угл. скорость носителя;

$\vec{\omega}^P = \vec{j} + \vec{\alpha}$  - угл. скорость рамки;

$\vec{\omega}^N = \vec{j} + \vec{\alpha} + \vec{\beta}$  - угл. скорость платформы

$$\begin{cases} \omega_{x_1}^P = -j \sin \alpha \approx -j \alpha; \\ \omega_{y_1}^P = \alpha; \\ \omega_{z_0}^P = j \cos \beta \approx j; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega_x^P = -\dot{\beta} + \omega_x^P = 0; \\ \omega_{y_1}^P = \omega_{y_1}^P \cos \beta - \omega_{z_0}^P \sin \beta = 0; \\ \omega_z^P = \omega_{y_1}^P \sin \beta + \omega_{z_0}^P \cos \beta \end{cases}$$

откуда

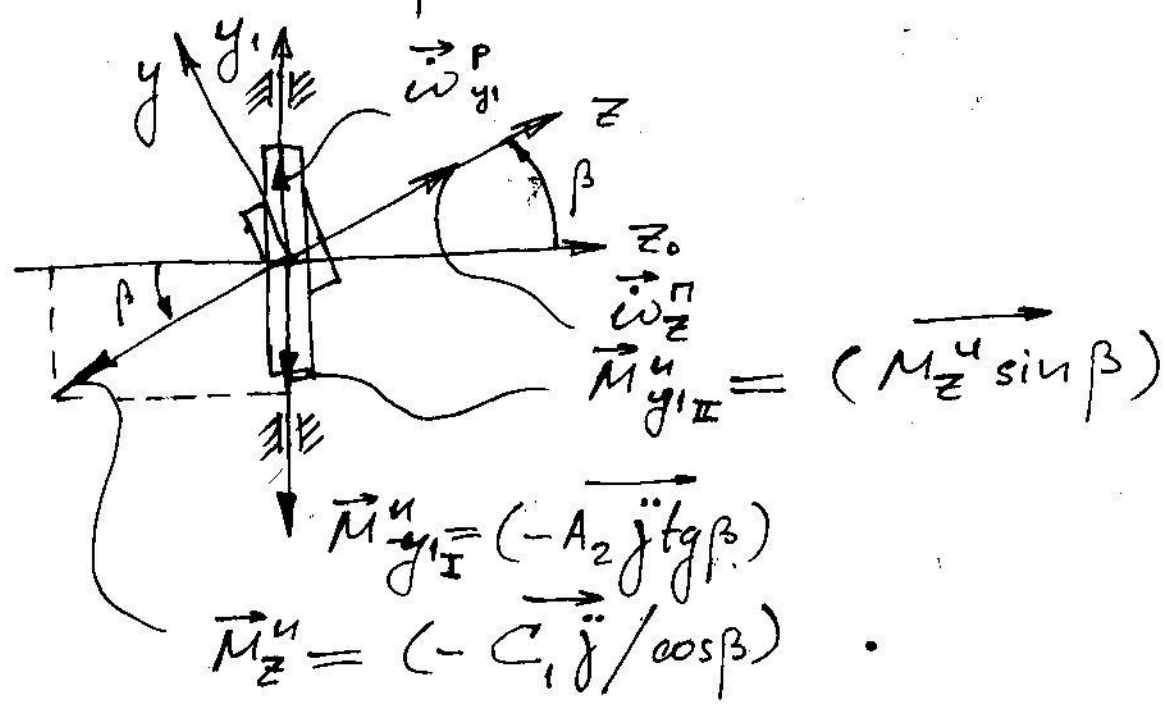
$$\omega_{y_1}^P = \omega_{z_0}^P \operatorname{tg} \beta \approx j \operatorname{tg} \beta;$$

$$\begin{aligned} \omega_z^P &\approx j \operatorname{tg} \beta \sin \beta + j \cos \beta = \\ &= j \frac{\sin^2 \beta + \cos^2 \beta}{\cos \beta} = \frac{j}{\cos \beta} \end{aligned}$$

Положим, что  $\beta$  уменьшается медленно,  $\dot{\beta} \approx 0$ . Тогда

$$\dot{\omega}_{y_1}^P = \ddot{j} \operatorname{tg} \beta;$$

$$\dot{\omega}_z^P = \frac{\ddot{j}}{\cos \beta}$$



Суммарный момент

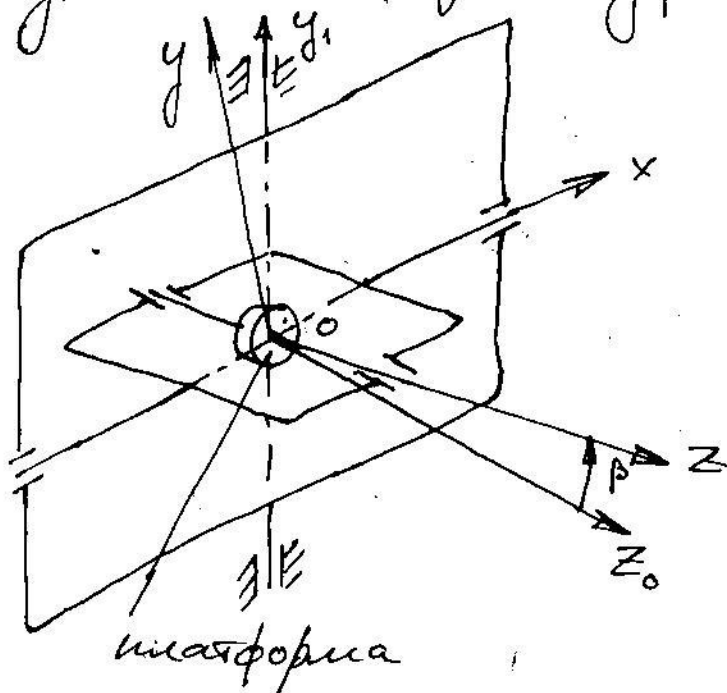
$$M_{y_1}^u = M_{y_1}^u + M_{y_1}^u = -(A_2 + C_1) \ddot{j} \operatorname{tg} \beta.$$

Он действует вокруг оси наружной рамы

в 2-осном стабилизаторе.

Если  $\gamma = \gamma_0 \sin \nu t$ , то

$$M_{y_1}^{II} = (A_2 + C_1) \gamma_0 \nu^2 \operatorname{tg} \beta \sin \nu t$$

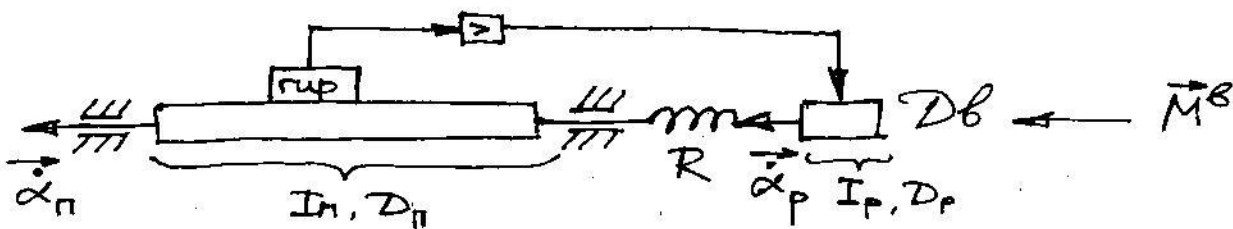


Внутр. рамку 3-осного стабилизатора можно считать платформой 2-осного стабилизатора (с трехгранником  $Oxyz$ ), так что по оси  $Oy_1$  будет действовать соответствующий момент  $M_{y_1}^{II}$ .

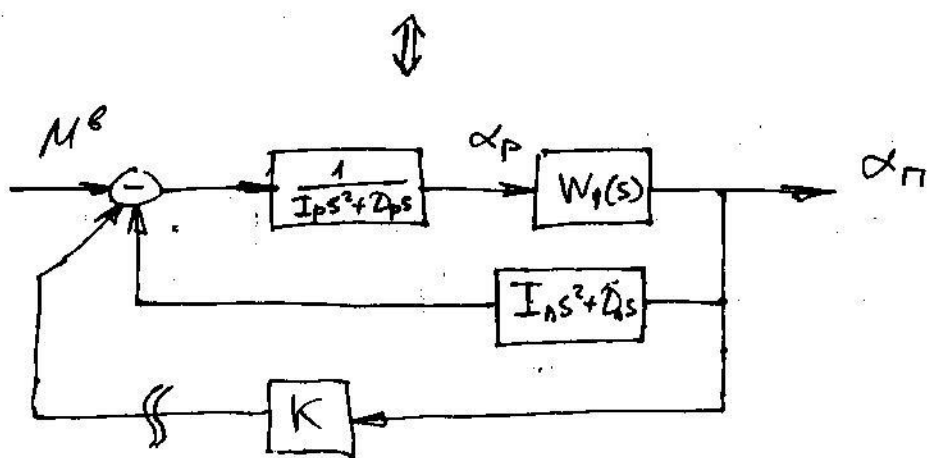
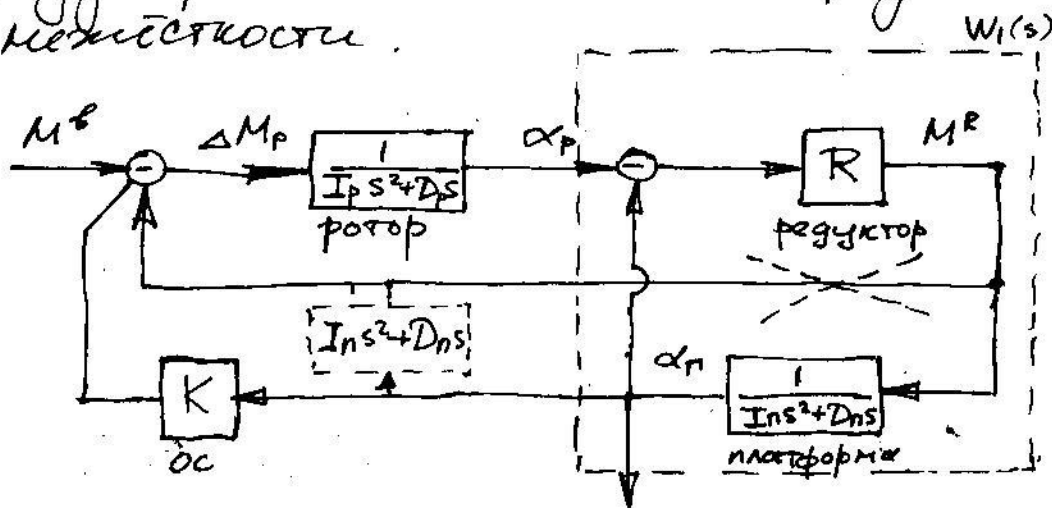
### Суммарный возмущающий момент

Все моменты достигают амплитудных значений в разное время, но из-за ошибки расчета фаз суммируются именно амплитуды, иногда даже с запасом.

# Влияние инертности регулятора на устойчивость



Регулирование само по себе не учитывается; регулятор считается только средоточием инертности.



$$W_1(s) = \frac{R}{I_n s^2 + D_n s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R}{I_n s^2 + D_n s}} = \frac{R}{I_n s^2 + D_n s + R} = \frac{1}{T_1^2 s^2 + 2\zeta_1 T_1 s + 1} \quad \text{где}$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{I_n}{R}}$$

$$W(s) = \frac{\frac{1}{I_p s^2 + D_p s} \cdot \frac{R}{I_n s^2 + D_n s + R}}{1 + \frac{R \cdot (I_n s^2 + D_n s)}{(I_p s^2 + D_p s)(I_n s^2 + D_n s)}} \cdot K =$$

$$= \frac{RK}{I_p I_n s^4 + (I_p D_n + I_n D_p) s^3 + (I_p R + D_n D_p + I_n R) s^2 + R(D_p + D_n) s}$$

$$= \frac{RK}{s} \frac{1}{I_p I_n s^3 + (I_p D_n + I_n D_p) s^2 + (I_p R + D_n D_p + I_n R) s + R(D_p + D_n)}$$

$$= \frac{RK}{s(D_p + D_n)R} \frac{1}{1 + T_0 s} \frac{1}{1 + 2\xi_p T_p s + T_p^2 s^2}$$

Найдем  $T_0, T_p, \xi_p$  как коэффициенты:

$$\begin{cases} I_p I_n = R(D_p + D_n) \cdot T_0 T_p^2; \\ (I_p D_n + I_n D_p) = R(D_p + D_n) \cdot (T_p^2 + 2\xi_p T_p T_0); \\ (I_p R + D_n D_p + I_n R) = R(D_p + D_n) (T_0 + 2\xi_p T_p); \\ R(D_p + D_n) = R(D_p + D_n). \end{cases}$$

Предполагаем, что  $T_0 \gg T_p, \xi_p$  мало.

Тогда

$$T_0 = \frac{I_p R + D_n D_p + I_n R}{R(D_n + D_p)}$$

Плюс, кроме того,  $I_n > I_p, D_n < D_p$ .

Тогда

$$T_0 = \frac{I_n}{D_n + D_p}$$

Получим величину, равную постоянной времени платформы в жесткой модели.

Далее,

$$T_P^2 = \frac{I_P I_n \cdot (\cancel{D_n + D_p})}{R (\cancel{D_p + D_n}) \cdot I_n} = \frac{I_P}{R};$$

$$T_P = \sqrt{\frac{I_P}{R}}$$

Получим величину, равную постоянной времени регулятора при неподвижной платформе.

Далее,

$$\begin{aligned} \Sigma_P &= \frac{1}{2T_P T_0} \cdot \left( \frac{I_P D_n + I_n D_p}{R(D_n + D_p)} - T_P^2 \right) = \\ &= \frac{(D_n + D_p) \cdot \sqrt{R}}{2 I_n \sqrt{I_P}} \cdot \frac{\cancel{I_P D_n} + I_n D_p - \cancel{I_P D_n} - I_P \cancel{D_p}}{R(D_n + D_p)} \approx \\ &\approx \frac{D_p}{2 \sqrt{I_P R}} \end{aligned}$$

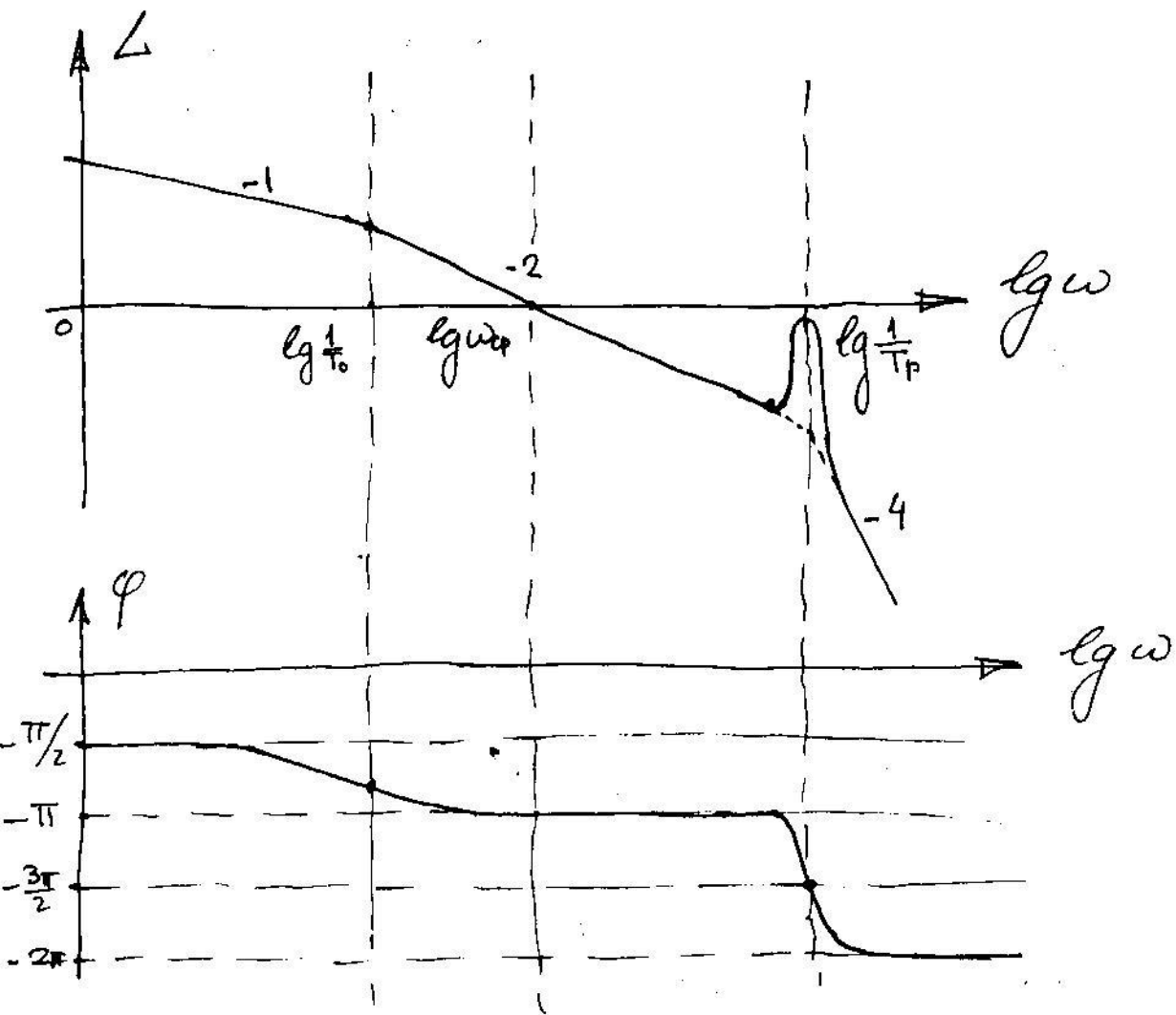
Итак,

$$W(s) = \frac{K}{s(D_p + D_n)} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1} \cdot \frac{1}{T_P^2 s^2 + 2 \Sigma_P T_P s + 1}$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{W(s) \text{ в жесткой модели.}}$

Т.о., учет нежесткости сводится к введению доп. колебательного звена, отвечающего колебаниям фактора при неподв. основании.





Т.о., в ЛАЧХ появляется значит. резонансный пик — зона потенциальной неустойчивости. Инженерный критерий устойчивости в том, чтобы было

$$L(\omega_p) = L\left(\frac{1}{T_p}\right) < 0.$$

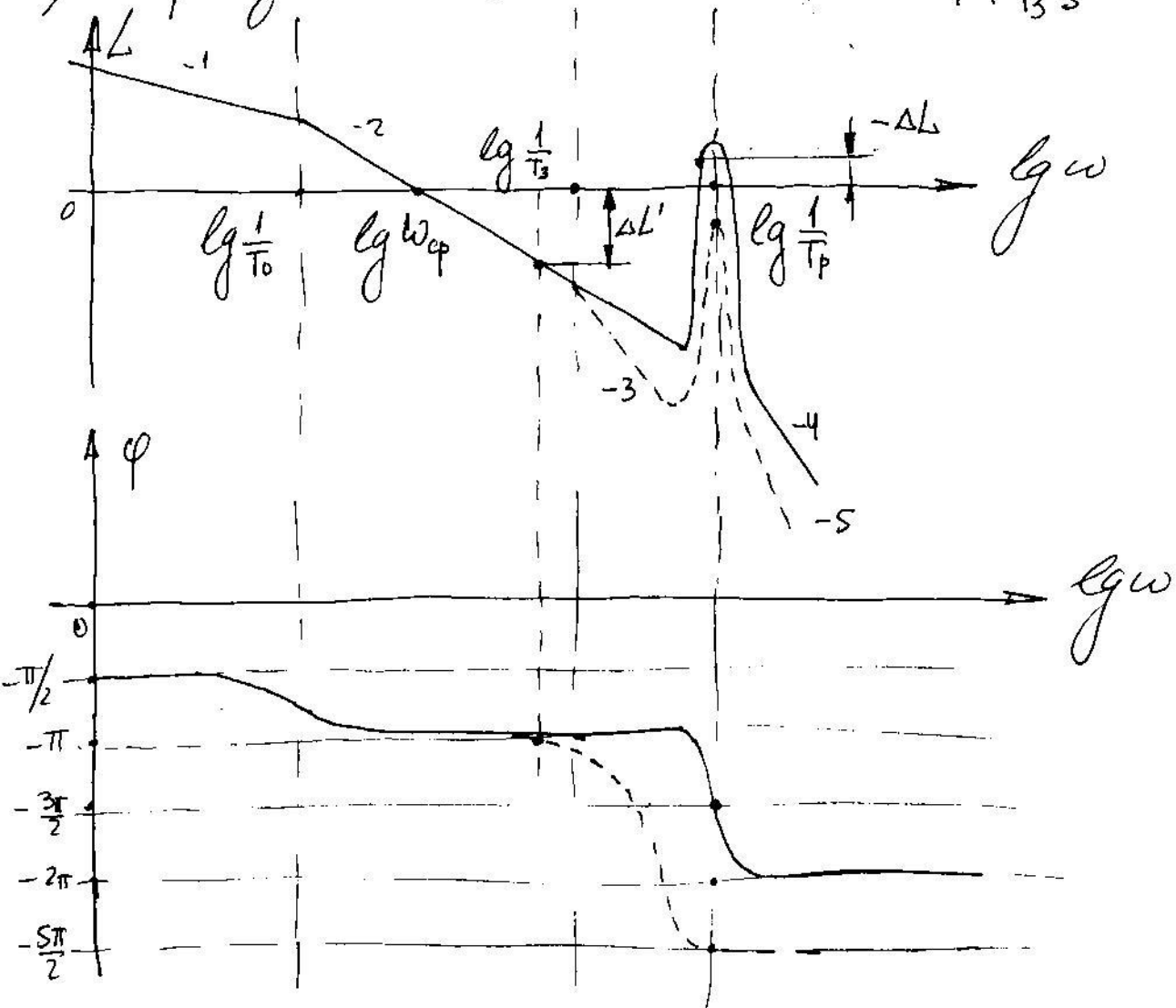
или

$$\omega_p = 10\omega_0.$$

Величина  $I_p$  - приведенный момент инерции, учитывающий моменты инерции колес редуктора, выбирается в 1,3 - 1,4 раза больше момента инерции ротора двигателя.

Динамич. коррекция  
нелинейного преобразователя

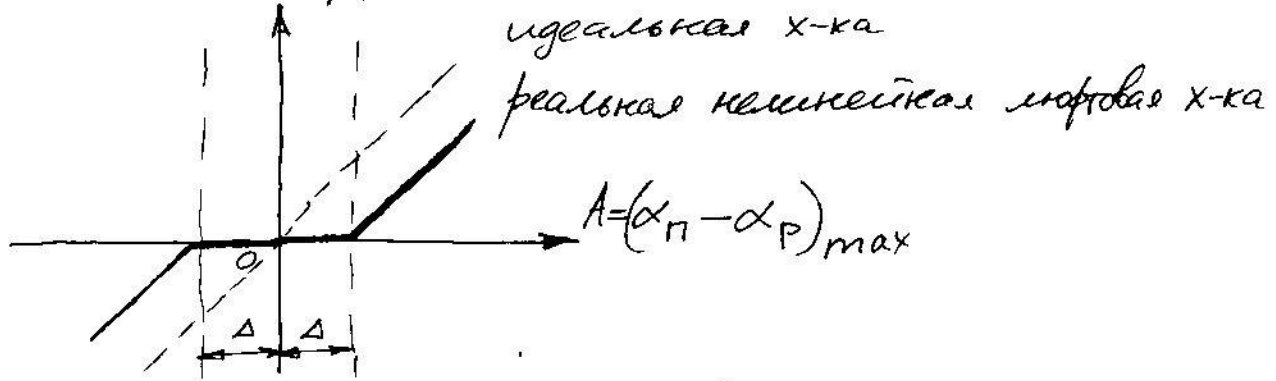
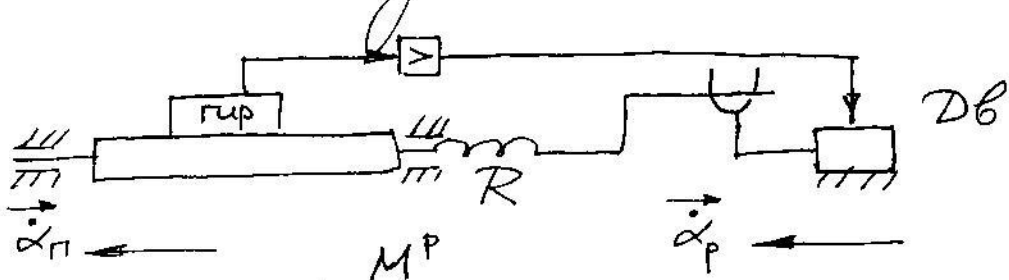
1) Антидифференциальное звено:  $W_p(s) = \frac{1}{1+T_3s}$



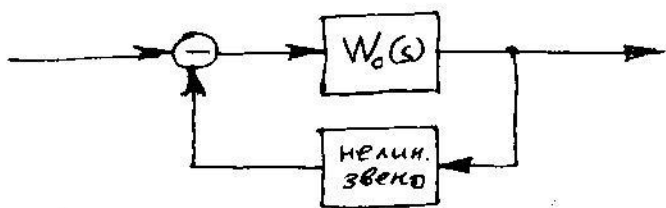
2) Фазонадающее звено:

# Влияние люфта редуктора

Люфт вносит запаздывание, провоцирующее неустойчивость.



Для исследования редуктора с люфтом удобно применить метод гармонической линеаризации Вейнштейна: с-ча разбивается условно на линейную часть и нелинейный звено:



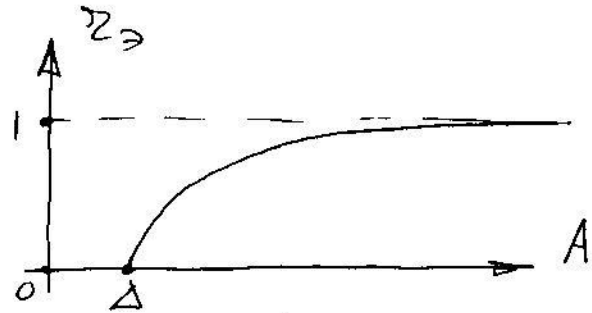
Предполагается, что лн. часть инерционна. Гармонич. сигнал на входе с частотой  $\omega$  искажается нелин. звеном. На его выходе сигнал негармонический. Он может быть разложен в ряд Фурье по частотам  $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$ . Из-за инерционности лн. части все

Высшие гармоники подавляются.

В нашем случае экв. ёмкость

$$R_3 = R \cdot \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \left( \arcsin \frac{\Delta}{A} - \frac{\Delta}{A} \sqrt{1 - \frac{\Delta^2}{A^2}} \right) \right],$$

относит. экв. ёмкость  $\tau_3 = \frac{R_3}{R}$



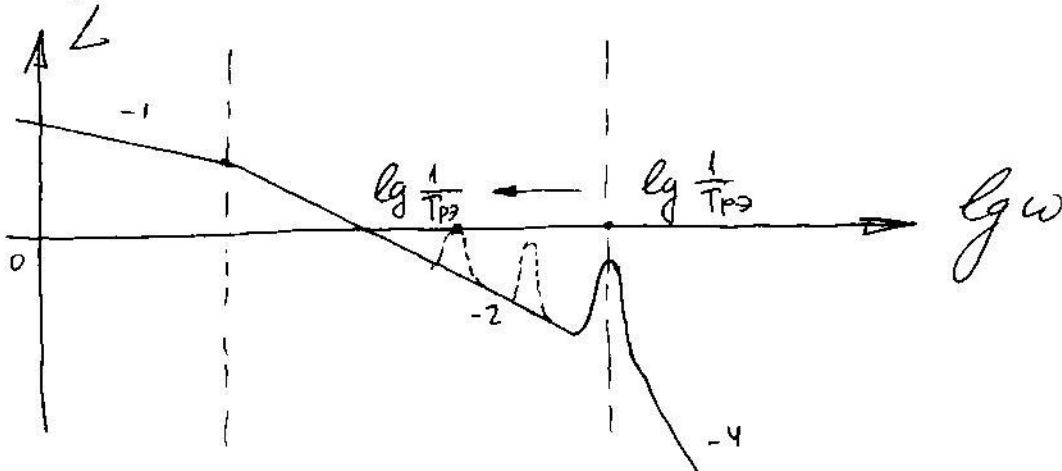
То, при больших амплитудах  $\tau_3 \approx 1$ , эффектом можно пренебречь.

Экв. передаточная f-ция

$$W(s) = \frac{K}{s(D_n + D_p)} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1} \cdot \frac{1}{(T_{p3}^2 s^2 + 2 \zeta_3 T_{p3} s + 1)}, \text{ где}$$

$$T_0 = \frac{I_n}{D_n + D_p}; \quad T_{p3} = \sqrt{\frac{I_p}{R_3}}; \quad \zeta_3 = \frac{D_p}{2 \sqrt{I_p R_3}};$$

$T_{p3}, \zeta_3 \parallel A$ .



С уменьшением амплитуды ( $L \rightarrow \infty$ ) уменьшается  $\tau_3$  и  $\frac{1}{T_{p3}} = \sqrt{\frac{R_3}{I_p}}$ , резонансный пик смещается влево.

При  $\omega_0$  касании оси частот

устанавливаются автоколебания.  
 Условием этого служит

$$\Delta(\omega_{p3}) = \Delta\left(\frac{1}{T_{p3}}\right) = 0$$

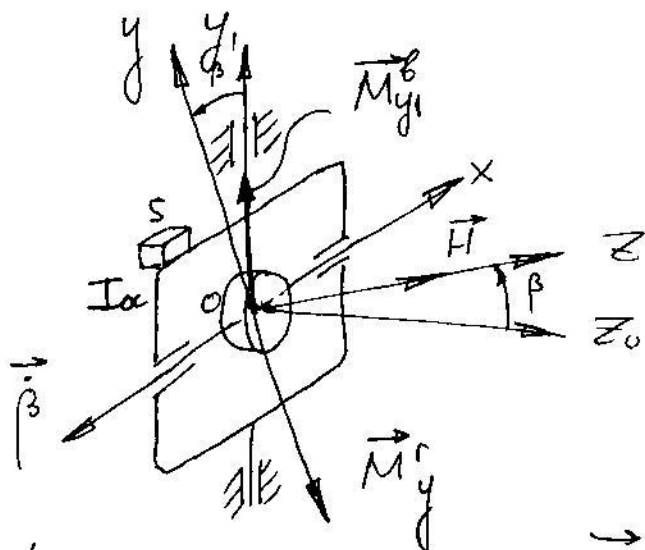
или, приближенно,

$$\frac{K}{(D_n + D_p) T_0} \cdot \frac{T_{p3}^2}{2 \xi_p} = \frac{K (D_n + D_p) I_p \sqrt{I_p R_3}}{(D_n + D_p) I_n R_3 D_p} =$$

$$= \frac{K I_p \sqrt{I_p}}{I_n R_3 D_p} = 1.$$

Отсюда отнимается амплитуда автоколебаний  $A$ .

## Символьные преобразователи Астатизм гироскопа как преобразователь



$Oy_1$  - ось стабилизации  
 $S$  - объект стабилизации

Под действием  $\vec{M}_{y_1}^v$  возникает прецессия со скоростью  $\dot{\beta} = \frac{M_{y_1}^v}{H \cos \beta}$  и гироскопический момент  $M_y^r = H \dot{\beta}$ . Его составляющая по оси стабилизации

$$M_{y_1}^r = M_y^r \cos \beta = \frac{H M_{y_1}^v}{H \cos \beta} \cdot \cos \beta = M_{y_1}^v$$

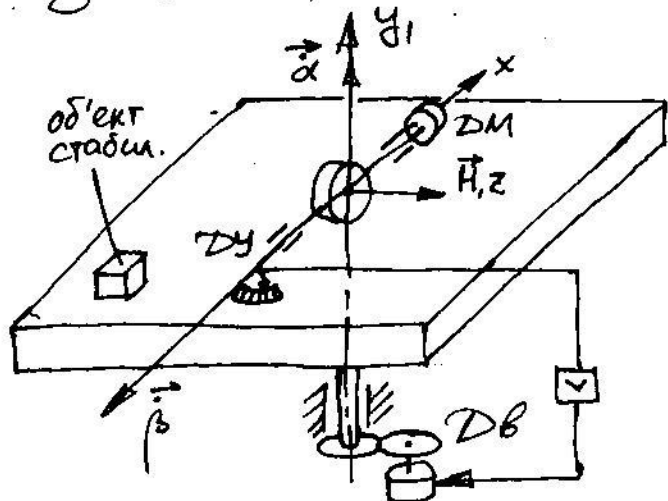
$\nabla \cdot 0$ ,  $\vec{M}_{y_1}^r + \vec{M}_{y_1}^v = \vec{0}$ . Объект стабили-

зировак почти при любых  $\beta \neq \frac{\pi}{2}$  и  $H$ .  
 Если использовать точно теорию, то нужно  
 учесть муфтационные колебания и му-  
 тационный бросок.

Фиктивная жесткость  $K = \frac{(H \cos \beta)^2}{A_0}$   
 муфтационный бросок  $\alpha_{нб} = \frac{M_{y1}}{K}$   
 муфтационные колебания имеют  
 частоту  $\omega_0 = \frac{H \cos \beta}{\sqrt{I_0 A_0}}$

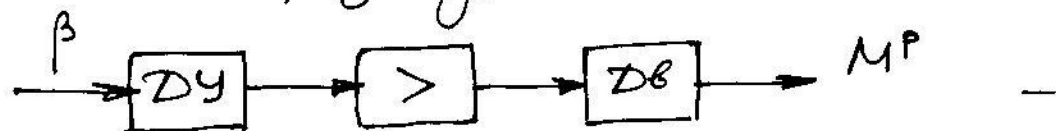
То, с уменьшением  $H \cos \beta$  уменьша-  
 ется жесткость (увеличивается процесс  
 $\alpha_{нб}$ ) и время переходного процес-  
 са. При  $\beta = \frac{\pi}{2}$  процесс выливается  
 Указанные недостатки устраняются в  
 гибридном стабилизаторе.

Одноосный гибридный стабилизатор  
 представляет собой платформу с 1 осью  
 стабилизации, на к-рой установлен  
 2-степенной гироскоп так, что его  
 ось чувствит-ти // на ось стабилиза-  
 ционной, и с. на разгрузке.



$Ox$  - ось прецессии;  
 $Oy_1$  - ось стабилизации.

С-ма разгрузки:



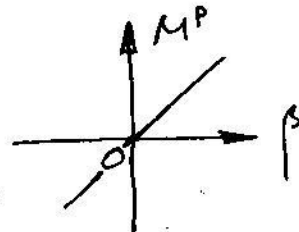
предназначена для обеспечения малости рабочих узлов  $\beta$ .

Требования:

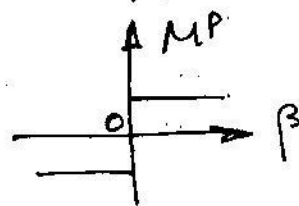
- большая жесткость подвеса, малое трение;
- как можно большая свобода поворота эл-та по оси  $Ox$ ; только при выполнении этого условия стабилизатор явл. силовым в соотв. смысле слова;
- малые возмущения (трение, тачение) от  $DY$ .
- принципиально высокий кинетич. момент поворота эл-та;
- мощный ДМ для обеспечения приемлемых скоростей управления;
- жесткие требования к сфере разгрузки, особенно приводам: достаточные люфты, жесткость и т.п., т.к. её задача — лишь поддержание малых узлов  $\beta$ . Это осн. преимущество силового стабилизатора перед индукторным.

С-ма разгрузки может быть:

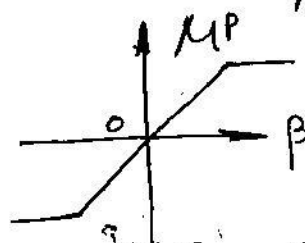
- линейной:



- релейной:



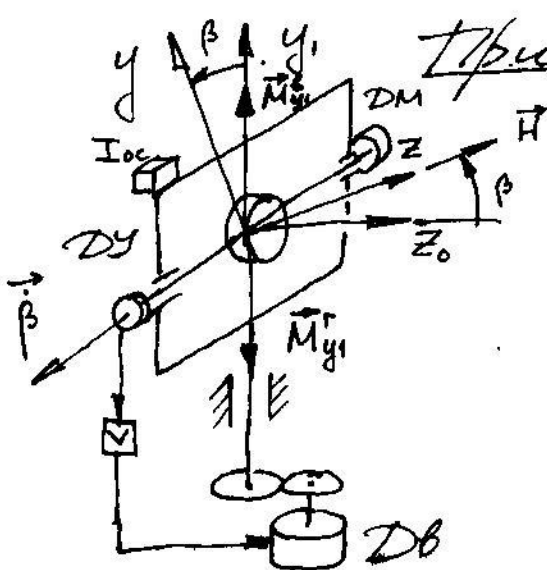
- смешанной (линейной с ограничением):



В дальнейшем имеется в виду линейная с-ма разгрузки или линейный участок смешанной, так что

$$M^P = K_P \beta, \text{ где } K_P - \text{коэфф. разгрузки.}$$

Этот коэфф. принудительной раши не играет. Много важнее момент гироскопа и его фиктивная жесткость  $K_\Phi = \frac{H^2}{A_0}$ .



### Принцип действия

Рассмотрим реакцию прибора на внеш. момент  $\vec{M}_{y_1}$  по прецессионной  $\vec{H}$  в 3 этапа:



1)  $t=0$ ;  $M_{y1}^e > 0$ ;  $\beta=0$ .  
 С-ма разгрузки не работает, т.к.  $\beta=0$ .

$$\dot{\beta} = \frac{M_{y1}^e}{H};$$

$$M_{y1}^r = H\dot{\beta} = H \cdot \frac{M_{y1}^e}{H} = M_{y1}^e;$$

$$\vec{M}_{y1}^e + \vec{M}_{y1}^r = \vec{0}.$$

Т.о., на первом этапе внеш. момент уравновешивается только гироскопич. моментом.

2)  $t>0$ ;  $M_{y1}^e > 0$ ;  $\beta > 0$ .

$$\dot{\beta} = \frac{M_{y1}^e - M^p}{H \cos \beta};$$

$$M_y^r = H\dot{\beta} = H \frac{M_{y1}^e - M^p}{H \cos \beta} = \frac{M_{y1}^e - M^p}{\cos \beta};$$

$$M_{y1}^r = M_y^r \cos \beta = M_{y1}^e - M^p;$$

$$\vec{M}_{y1}^e + \vec{M}_{y1}^r + \vec{M}^p = \vec{0}$$

Т.о., на втором этапе внеш. момент уравновешивается суммой гироскопич. момента и момента разгрузки.

3)  $t=\infty$ ;  $M_{y1}^e > 0$ ;  $\beta = \beta^*$ ;

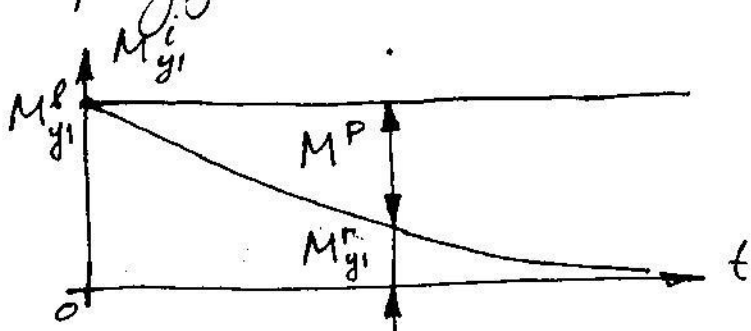
$$\dot{\beta}^* = \frac{M_{y1}^e - M^p}{H \cos \beta^*} = 0.$$

Гироскоп останавливается; гироскопич. момента нет.

Т.о., на третьем этапе внеш. момент уравновешивается только

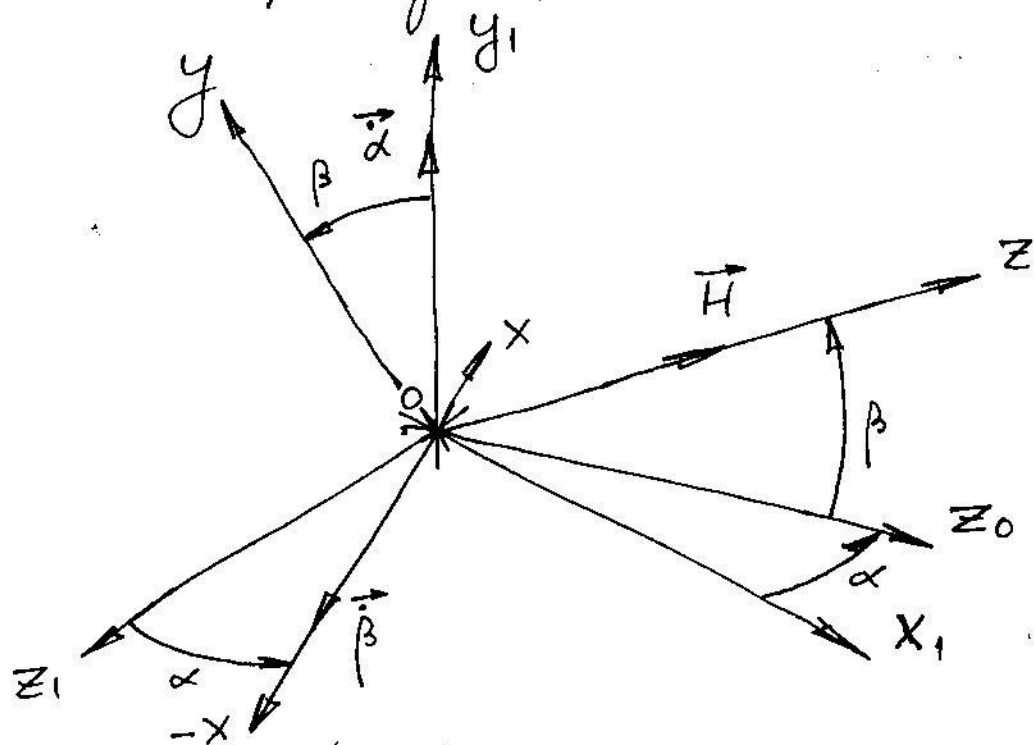
моментами разгрузки.

На практике  $\beta^*$  не превосходит неск. градусов.



Управление осуществляется ДМ по оси  $Ox$ :  $\dot{\alpha} = \frac{M_x^{уп}}{H \cos \beta}$

Ур-я движения



- $Ox_1y_1z_1$  - трёхгранник носителя;
- $Oxy_1z_0$  - трёхгранник платформы;
- $Oxyz$  - трёхгранник Резалье

Составим ур-я движения гироскопа - затора по 2 осям  $Ox$  и  $Oy_1$  как 3-степенного гироскопа по прик-

шину Даламбера;

$$\begin{cases} A_0 \ddot{\beta} + D_\beta \dot{\beta} - H \dot{\alpha} \cos \beta + M_x^e = 0; \\ -I_0 \ddot{\alpha} - D_\alpha \dot{\alpha} - H \dot{\beta} \cos \beta - K_p \beta + M_{y_1}^e = 0. \end{cases}$$

В  $I_0$  включены моменты инерции всех подвижных частей отн. осм  $Oy_1$ .  
 При малых  $\beta$   $\cos \beta \approx 1$   $\sin \beta \approx \beta$

$$\begin{cases} A_0 \ddot{\beta} + D_\beta \dot{\beta} - H \dot{\alpha} = -M_x^e; \\ I_0 \ddot{\alpha} + D_\alpha \dot{\alpha} + H \dot{\beta} + K_p \beta = M_{y_1}^e, \text{ где} \end{cases}$$

$$A_0 = A + A_1 + I_p^{Dy} + I_p^{Dm};$$

$$\begin{aligned} I_0 &= A_2 + (A + B_1) \cos^2 \beta + C_1 \sin^2 \beta + \\ &+ I_{\alpha c} + I_p^{Dy} + I_p^{D\beta} \cdot i^2 \approx \\ &\approx A_2 + A + B_1 + I_{\alpha c} + I_p^{Dy} + I_p^{D\beta} \cdot i^2; \end{aligned}$$

$D_\alpha, D_\beta$  - коэфф. демпфирования;  $D_\beta$  должен быть мал; см. Требования

### Прецессионное движение гиросtabilизатора

Отбросим в ур-ях инерционные члены и демпфирующие члены. Получим:

$$\begin{cases} H \dot{\alpha} = M_x^e; \\ H \dot{\beta} + K_p \beta = M_{y_1}^e \end{cases}$$

Дополнительно положим  $M_x^e = 0$ . Тогда

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = 0; \\ \dot{\beta} + \frac{K_p}{H} \beta = \frac{M_{y_1}^e}{H}. \end{cases}$$

Обозначим:

$$\varepsilon = \frac{K_p}{H} - \text{уг. скорость прецессии};$$

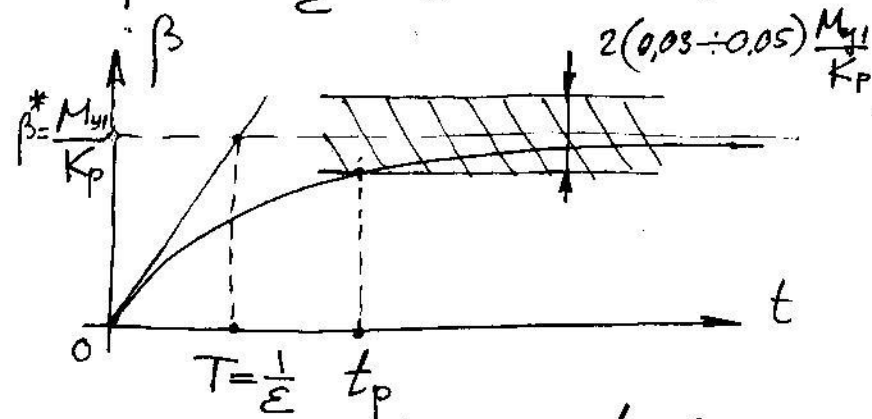
$$m_{y_1} = \frac{M_{y_1}^e}{H} - \text{уг. момент}.$$

$$\dot{\beta} + \varepsilon\beta = m_{y1};$$

$$\beta = c_1 e^{-\varepsilon t} + \frac{m_{y1}}{\varepsilon}.$$

Если потребовать  $\beta(0) = 0$ , то

$$\beta = \frac{m_{y1}}{\varepsilon} (1 - e^{-\varepsilon t}) = \frac{M_{y1}}{K_p} (1 - e^{-\varepsilon t}).$$



Время регулирования

$$t_p = (3 \div 4) T = (3 \div 4) \frac{H}{K_p}$$

может быть велико. Напр., при  $H = 10^4$  сн.см.с;  $K_p = 10^5$  сн.см;  $M_{y1} = 1000$  сн.а

$$\beta^* = \frac{M_{y1}}{K_p} = 0,01$$

$$t_p = 3 \frac{H}{K_p} = 9,3 \text{ с.}$$

Но это нецелесообразно, т.к. по вех. координатам переходного процесса нет воодуше.

### Внешние трения

При  $\beta > 0$  момент сухого трения направлен противоположно, т.е. в положительн. направлении оси  $Ox$ ; однако момент трения по оси  $Oy$ , при  $\alpha > 0$  направлен в отриц. сторону.

$$\begin{cases} H\ddot{\alpha} = \pm M\dot{\beta}; \\ H\dot{\beta} + K_p\beta = M\dot{y}_1 \mp M\dot{\alpha} \end{cases}$$

Отсюда, полагая  $m_{\dot{\alpha}} = \frac{M\dot{\alpha}}{H}$ ,  $m_{\dot{\beta}} = \frac{M\dot{\beta}}{H}$ , имеем:

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \pm m_{\dot{\beta}}; \\ \dot{\beta} = m_{y_1} \mp m_{\dot{\alpha}} \end{cases} \quad (*)$$

Если момент времени не меняет знака, то

$$\beta = \frac{m_{y_1} \mp m_{\dot{\alpha}}}{\varepsilon} (1 - e^{-\varepsilon t}).$$

Логично предположить, что  $m_{y_1} > m_{\dot{\alpha}}$ .

$$\dot{\beta} = \frac{m_{y_1} \mp m_{\dot{\alpha}}}{\varepsilon} [ -(-\varepsilon) \cdot e^{-\varepsilon t} ] =$$

$$= (m_{y_1} \mp m_{\dot{\alpha}}) \cdot e^{-\varepsilon t} > 0.$$

В 1-м ур-н с-мос (\*) выбираем верхний знак:

$$\dot{\alpha} = m_{\dot{\beta}} > 0.$$

Во 2-м ур-н также выбираем верхний знак:

$$\beta = \frac{m_{y_1} - m_{\dot{\alpha}}}{\varepsilon} [ 1 - e^{-\varepsilon t} ];$$

$$\alpha = m_{\dot{\beta}} t + \alpha_0.$$

Т.о., переходный процесс по оси  $Ox$  преимущественно не изменяется, но появляется уход по оси  $Oy_1$ , вызванный трением,

действующим в течение времени  
рециркуляции:

$$\alpha = \frac{M_{\beta}}{H} \cdot (3 \div 4) \frac{H}{K_p} = (3 \div 4) \frac{M_{\beta}}{K_p}$$

Если предположиме  $m_{y1} > m_{\alpha}$   
некорректно, то движения не будет

### Устойчивость силового гиростабилизатора Критерий Гурвица

$$\begin{cases} A_0 s^2 \beta + D_{\beta} s \beta - H s \alpha = 0; \\ I_0 s^2 \alpha + D_{\alpha} s \alpha + H s \beta + K_p \beta = 0 \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} -Hs & A_0 s^2 + D_{\beta} s \\ I_0 s^2 + D_{\alpha} s & Hs + K_p \end{vmatrix} = 0;$$

$$I_0 A_0 s^4 + (I_0 D_{\beta} + A_0 D_{\alpha}) s^3 + (D_{\alpha} D_{\beta} + H^2) s^2 + H K_p s = 0$$

Применим критерий Гурвица: коэфф.  
при  $s^0$  равны 0, следовательно, асим-  
птотической устойчивости по коорди-  
натам нет.

Сделаем подстановку  $p = s\alpha$ . Тогда

$$I_0 A_0 s^3 + (I_0 D_{\beta} + A_0 D_{\alpha}) s^2 + (H^2 + D_{\alpha} D_{\beta}) s + H K_p = 0$$

Снова применим критерий Гурвица:

$$a_0 = I_0 A_0 > 0; a_1 = I_0 D_{\beta} + A_0 D_{\alpha} > 0; a_2 = H^2 + D_{\alpha} D_{\beta} > 0; a_3 = H K_p > 0;$$

$$\Delta' = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0 \quad \text{или}$$

$$(I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha)(H^2 + D_\alpha D_\beta) > I_0 A_0 H K_p$$

Эти требования выполнить, вообще говоря, возможно. Но многие параметры плохо поддаются изменению: моменты инерции опр. объектом стабилизируем, моменты момента - требованиями к конструкции жесткости и т.д.

Удобно менять только  $K_p$ :

$$K_p < \frac{(I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha)(H^2 + D_\alpha D_\beta)}{H I_0 A_0}$$

или, при  $D_\beta \approx 0$ ,

$$K_p < \frac{H D_\alpha}{I_0}$$

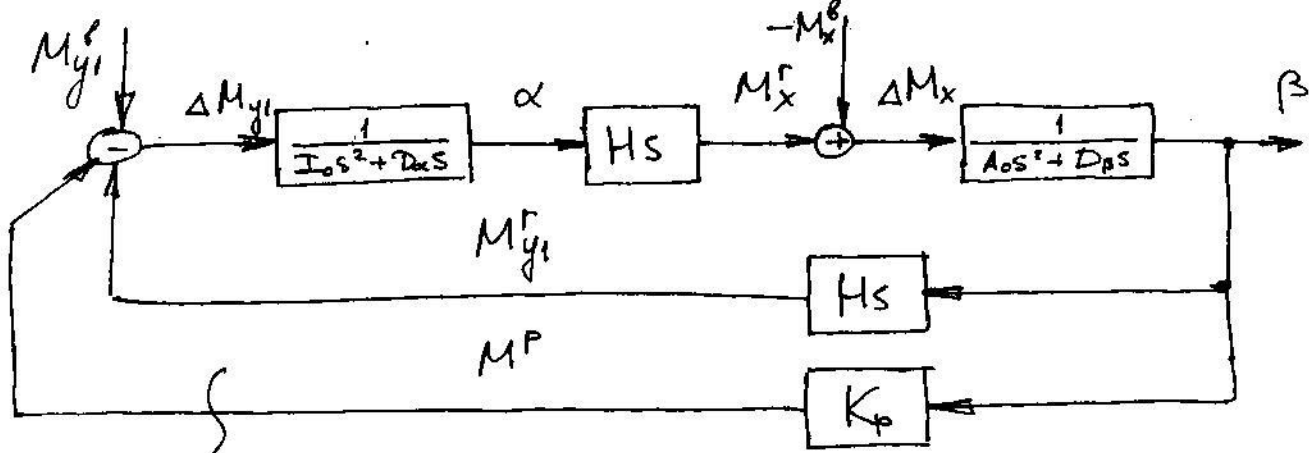
Т.о., при большом моменте инерции объекта устойчивость обеспечить трудно; для таких объектов лучше исп. индикаторные стабилизаторы.

Критерий Найквиста

Структурная схема

силового цифрового стабилизатора

$$\begin{cases} A_0 s^2 \beta + D_\beta s \beta = -M_x + H s \alpha = \Delta M_x; \\ I_0 s^2 \beta + D_\alpha s \alpha = M_{y1} - H s \beta - K_p \beta = \Delta M_{y1}. \end{cases}$$



В схеме 2 обр. связи; канал разгрузки, по сравнению с канальным мр. момента, имеет упр. интегратор, что вносит запаздывание, ухудшает устойчивость и т.д. Разомкнем обр. связь по каналу разгрузки:

$$W(s) = \frac{\frac{1}{I_0 s^2 + D_\alpha s} \cdot Hs \cdot \frac{1}{A_0 s^2 + D_\beta s}}{1 + \frac{1}{I_0 s^2 + D_\alpha s} \cdot Hs \cdot \frac{1}{A_0 s^2 + D_\beta s} \cdot Hs} \cdot K_p =$$

$$= \frac{HK_p s}{I_0 A_0 s^4 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s^3 + (D_\alpha D_\beta + H^2) s^2}$$

$$= \frac{HK_p}{s} \cdot \frac{1}{I_0 A_0 s^2 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s + (D_\alpha D_\beta + H^2)}$$

$$= \frac{K_p}{Hs} \cdot \frac{1}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1}, \text{ где}$$

$T = \sqrt{\frac{I_0 A_0}{H^2}}$  — постоянная времени ну-тацционных колебаний гироскопа;

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{A_0 D_\alpha}{TH^2} = \frac{1}{2} \frac{A_0 D_\alpha H}{H^2 \sqrt{I_0 A_0}} = \frac{1}{2} \frac{D_\alpha}{H} \sqrt{\frac{A_0}{I_0}}$$

коэфф. затухания колебаний гироскопа



Здесь принято  $D_{\beta} \approx 0$ . Видно, что динамика цепи определяется не столько каналом фазорезки, сколько параметрами микроскопа, а это неудобно с той точки зрения, что регулировать удаётся только  $K_p$ .

$$\begin{aligned} \Phi_{M_{y_1}^e \rightarrow \alpha}(s) &= \frac{1}{I_0 s^2 + D_{\alpha} s} = \\ &= 1 + \frac{1}{I_0 s^2 + D_{\alpha} s} \cdot Hs \cdot \frac{1}{A_0 s^2 + D_{\beta} s} \cdot (Hs + K_p) \\ &= \frac{A_0 s^2 + D_{\beta} s}{I_0 A_0 s^4 + (I_0 D_{\beta} + A_0 D_{\alpha}) s^3 + (D_{\alpha} D_{\beta} + H^2) s^2 + H K_p s} \\ &= \frac{A_0 s + D_{\beta}}{I_0 A_0 s^3 + (I_0 D_{\beta} + A_0 D_{\alpha}) s^2 + (D_{\alpha} D_{\beta} + H^2) s + H K_p} \end{aligned}$$

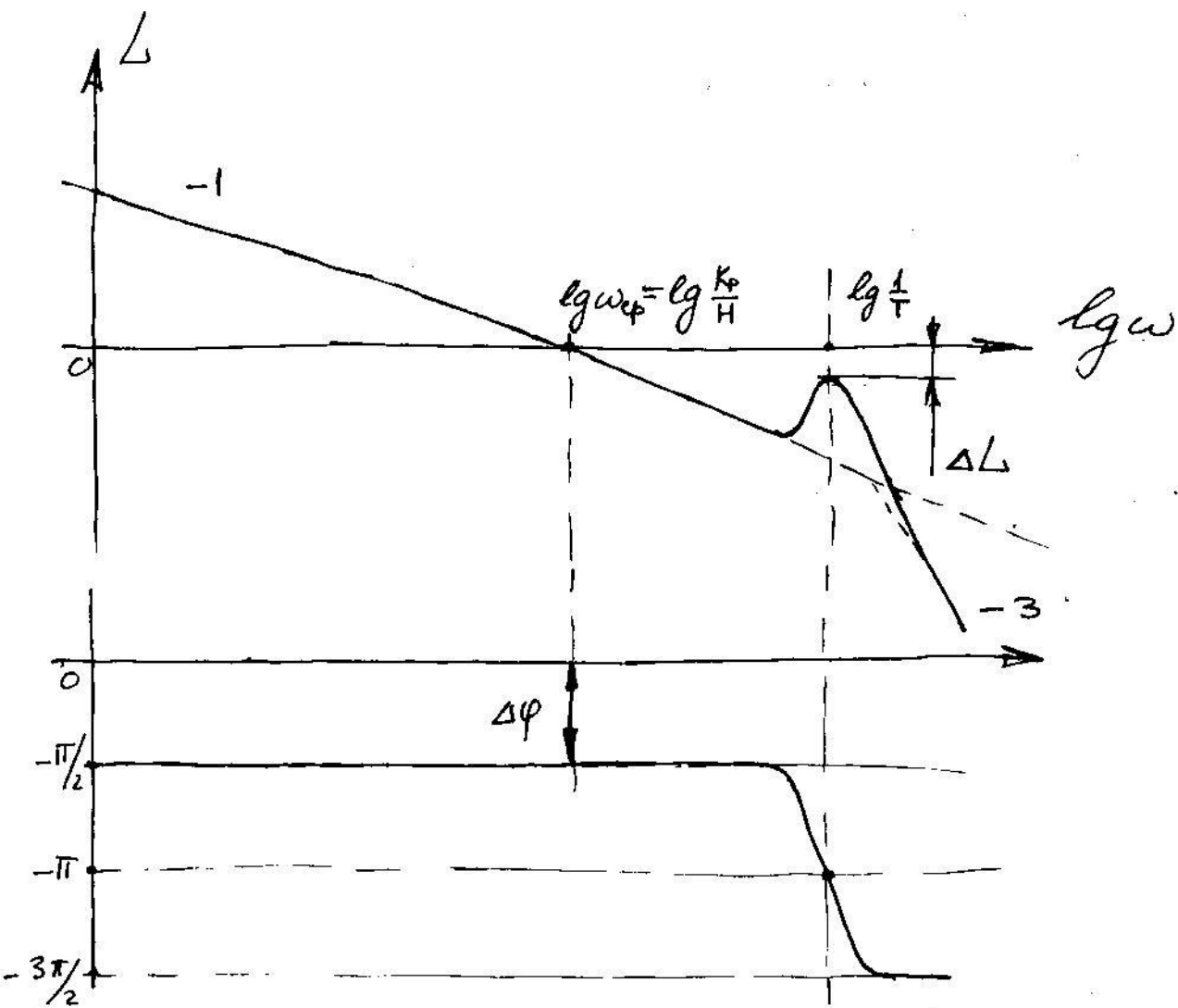
$$\begin{aligned} \Phi_{M_{y_1}^e \rightarrow \beta}(s) &= \frac{\frac{Hs}{(I_0 s^2 + D_{\alpha} s)(A_0 s^2 + D_{\beta} s)}}{1 + \frac{Hs(Hs + K_p)}{(I_0 s^2 + D_{\alpha} s)(A_0 s^2 + D_{\beta} s)}} = \\ &= \frac{H}{I_0 A_0 s^3 + (I_0 D_{\beta} + A_0 D_{\alpha}) s^2 + (D_{\alpha} D_{\beta} + H^2) s + H K_p} \end{aligned}$$

[Самостоятельно получить  $\Phi_{M_{y_1}^e \rightarrow \alpha}(s)$ ,  $\Phi_{M_{y_1}^e \rightarrow \beta}(s)$ ]

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{K_p}{H\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2\xi T \omega)^2}}$$

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2\xi T \omega}{1 - T^2 \omega^2}$$

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$$



$\Delta \varphi \approx \pi/2$ . При  $\omega = \omega_{cp}$ , т.о., проблем с устойчивостью нет. Однако пик при  $\omega = \frac{1}{T}$  явно выражен и значительно уменьшает  $\Delta L$ . Неустойчивость тем возможнее, тем больше  $K_p$  и меньше  $\xi$ .

Условие устойчивости

$$A(1/T) = \frac{K_p T}{H} \cdot \frac{1}{2\xi} = \frac{K_p}{H} \cdot \frac{\sqrt{I_0 A_0}}{H} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{2H}{D_\alpha} \cdot \sqrt{\frac{I_0}{A_0}} =$$

$$= \frac{K_p I_0}{H D_\alpha} < 1;$$

$$K_p < \frac{H D_\alpha}{I_0}$$

Условие получено тем же, что

и по критерию Гурвица.  
 Существенно, что воздействовать на  
 величину  $\xi$  пока почти не удаётся,  
 т.к.  $\xi$  не зависит от  $K_p$

Если ввести показатель колебательно-  
 сти

$$M = \frac{|\Phi(j\omega)|}{|\Phi(0)|}$$

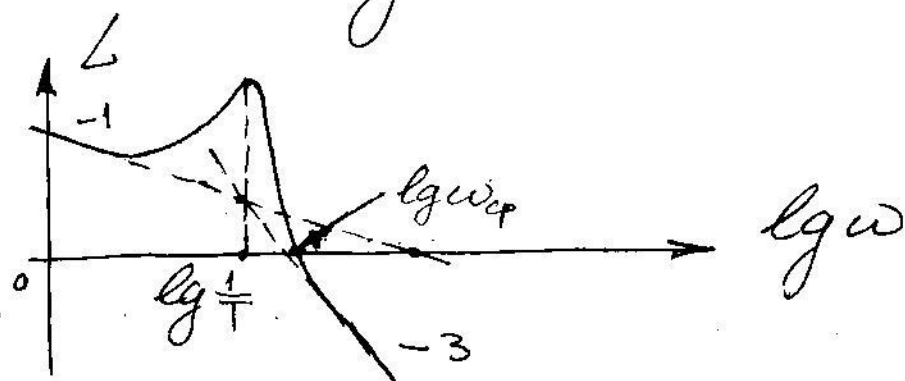
то приблизительно

$$\Delta L = 20 \lg \frac{M}{M+1}$$

для индуктивных стабилизаторов  $M = 1 \div 1.2$ ,  
 для силовых стабилизаторов  $M = 1.5 \div 5$ .

### Гиростабилизаторы на малых микроскопах

В таких приборах роль канала раз-  
 грузки повышается, что создаёт про-  
 блемы с устойчивостью:



В таких стабилизаторах  $\omega_{р} > \frac{1}{T}$ , что  
 можно считать их определением.  
 Область опасности неустойчивости  
 смещается к частоте среза. Без  
 корр. звеньев дифференцирование при-

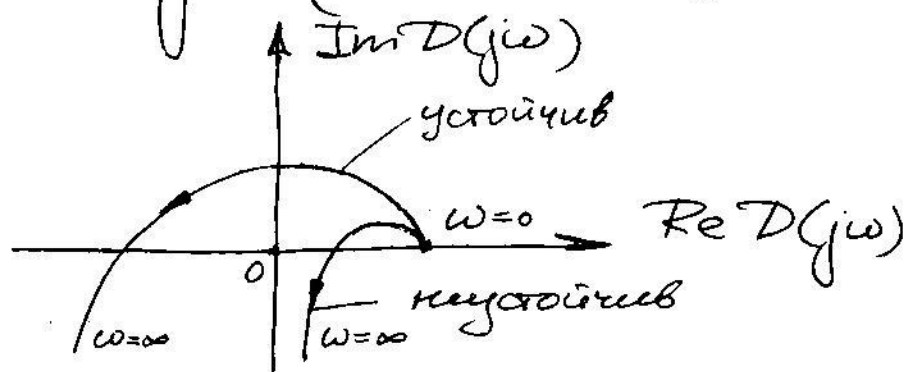
бор неустойчив, а эти звенья стабилизируют полехоизационность. Стабилизатор неустойчив.

### Критерий Михайлова

Пусть  $D_B = 0$ .

$$D(s) = I_0 A_0 s^3 + A_0 D_2 s^2 + H^2 s + K_p H$$

$$D(j\omega) = (-A_0 D_2 \omega^2 + K_p H) + j\omega \cdot (H^2 - I_0 A_0 \omega^2)$$



### Качество регулирования

Пусть  $D_B = 0$

Хле ур-е

$$I_0 A_0 s^3 + A_0 D_2 s^2 + H^2 s + K_p H = 0$$

решим методом непр. коэфф., представив его в виде

$$HK_p (1 + T_a s) (1 + 2\zeta T s + T^2 s^2) = 0$$

или

$$HK_p [1 + (T_a + 2\zeta T) s + (T^2 + 2\zeta T T_a) s^2 + T_a T^2 s^3] = 0$$

Приравняем коэфф. при одинаковых степенях  $s$ :

$$\begin{cases} I_0 A_0 = HK_p T_a T^2; \\ A_0 D_\alpha = HK_p (T^2 + 2\xi T T_a); \\ H^2 = HK_p (T_a + 2\xi T); \\ HK_p = HK_p \end{cases}$$

Пусть  $T_a \gg T$ ;  $\xi < 1$ . Тогда

$$T_a = \frac{H}{K_p};$$

$$T = \sqrt{\frac{I_0 A_0}{H^2}};$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{D_\alpha}{H} \sqrt{\frac{A_0}{I_0}}.$$

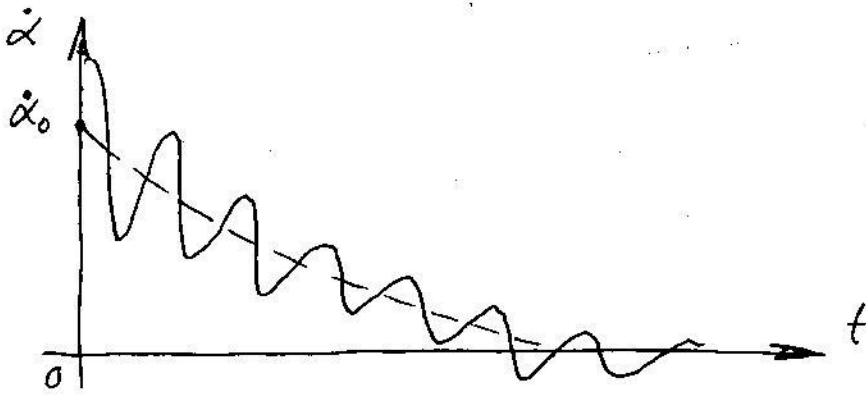
Многогран  $1 + 2\xi Ts + T^2 s^2$  определяет  
колебательные колебания;  $1 + T_a s$  -  
Х-ки канала разгрузки.

Корни этих многочленов  $s_1 = -\frac{1}{T_a}; s_2; s_3$

Имеем:

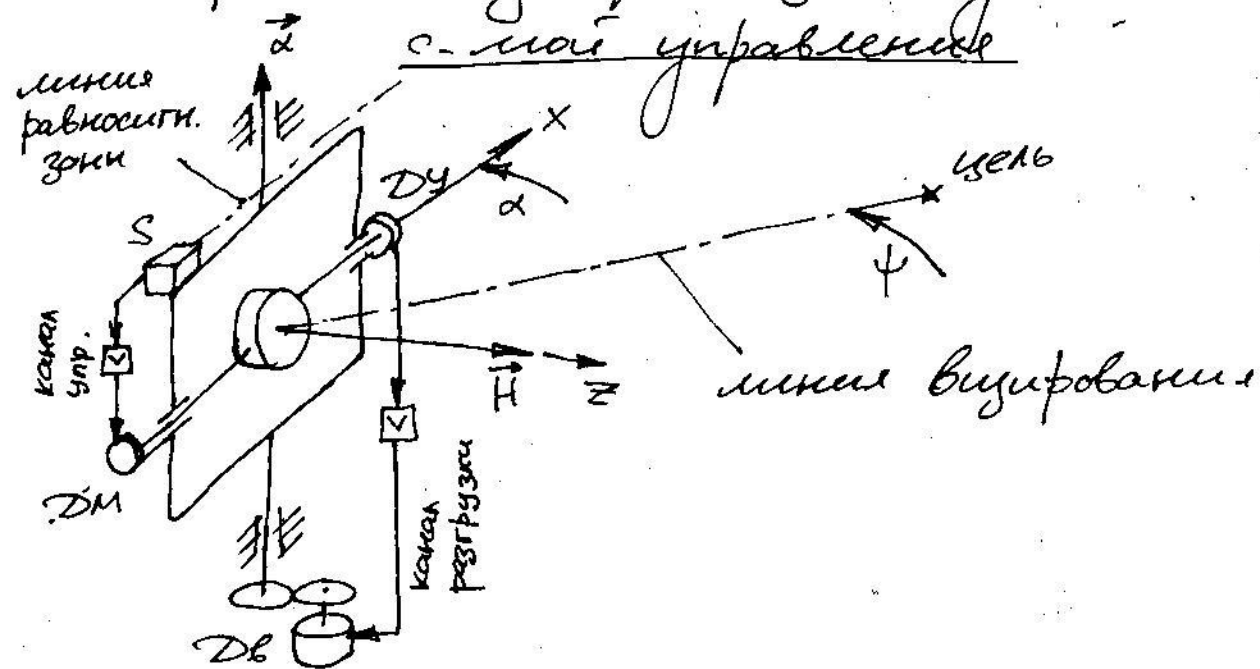
$$\dot{\alpha} = C_1 e^{-t/T_a} + A e^{-\xi t/T} \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t}{T} + \varphi\right),$$

где  $C_1, A, \varphi$  - постоянные интегрирования  
 $\dot{\alpha}_0$ , переходный процесс есть  
экспонента, определяемая на-  
параметрами канала разгрузки и  
шроскона, и колебательная  
на ней синусоида, опреде-  
ляемая только параметрами  
шроскона.



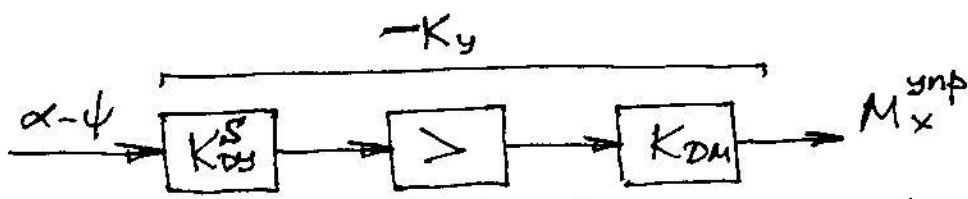
Обычно экспонента затухает быстрее, поэтому время регулирования определяется затуханием синусоиды, так что влияние на время почти не удаётся. В общем, качество регулирования плохое.

Устойчивость силового  
микростабилизатора с замкнутой  
с-мой управления



Для приведения объекта стабилизации  $S$  на цель требуется выполнение фав-ва  $\alpha - \psi = 0$ .

Это обеспечивается с-мой управления;



Момент  $M_x^{ynp}$  вызывает прецессию до сближения линии равновесия зоны и вынуждения.

Скорость прецессии

$$\dot{\alpha} = \frac{M_x^{ynp}}{H}$$

можно с точностью до дрейфа считать угл. скоростью линии вынуждения

$$\omega_{ЛВ} = \dot{\alpha}$$

Если нужно знать эту скорость, можно измерить ток  $I_{DM}$  датчика момента и, т.о.,  $M_x^{ynp}$ .

Ур-е движения при  $M_x^{ynp} = -K_y(\alpha - \psi)$ .

$$\begin{cases} A_0 s^2 \beta - H s \alpha - K_y \alpha = -K_y \psi; \\ I_0 s^2 \alpha + D_\alpha s \alpha + H s \beta + K_p \beta = 0 \end{cases}$$

Гл. определитель:

$$\Delta = \begin{vmatrix} -(Hs + K_y) & A_0 s^2 \\ (I_0 s^2 + D_\alpha s) & (Hs + K_p) \end{vmatrix}$$

X-е ур-е:

$$-\Delta = \underbrace{I_0 A_0}_{a_0} s^4 + \underbrace{A_0 D_\alpha}_{a_1} s^3 + \underbrace{H^2}_{a_2} s^2 + \underbrace{H(K_p + K_y)}_{a_3} s + \underbrace{K_p K_y}_{a_4} = 0$$

$$\Delta' = \begin{vmatrix} a_0 & a_3 & 0 & 0 \\ a_1 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix}$$

Условия устойчивости по Гурвицу:

- 1)  $a_j > 0; j = \overline{0; 4};$
- 2)  $a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0;$
- 3)  $a_1 (a_2 a_3 - a_1 a_4) - a_3^2 a_0 > 0;$

⇔ е.

- 1)  $K_p > 0; K_y > 0;$
- 2)  $A_0 D_\alpha H^2 > I_0 A_0 H (K_p + K_y);$   
 $K_p + K_y < \frac{H D_\alpha}{I_0}$
- 3)  $A_0 D_\alpha H^3 (K_p + K_y) > A_0^2 D_\alpha^2 K_p K_y + I_0 A_0 H^2 (K_p + K_y)^2$   
 Обычно членом  $A_0^2 D_\alpha^2 K_p K_y$  пренебрегают —  
 ют, ибо  $K_p K_y < (K_p + K_y)^2; A_0 < I_0; D_\alpha < H.$

Тогда

$$K_p + K_y < \frac{H D_\alpha}{I_0}$$

Т.о., величина  $K_p$ , соответствующая границе устойчивости, оказывается меньше, чем без канала управления, на величину  $K_y$ ; устойчивость снижается.

Общий вывод: следовой стабилизатор менее устойчив, чем индикаторный.

Точность стабилизации

$$\begin{cases} A_0 s^2 \beta + D_\beta s \beta - H s \alpha = -M_x, \\ I_0 s^2 \alpha + D_\alpha s \alpha + H s \beta + K_p \beta = M_{y1} \end{cases}$$

По правилу Крамера



$$\Delta = \begin{vmatrix} -Hs & (A_0 s^2 + D_\beta s) \\ (I_0 s^2 + D_\alpha s) & (Hs + K_p) \end{vmatrix};$$

$$\Delta_\alpha = \begin{vmatrix} -M_x & (A_0 s^2 + D_\beta s) \\ M_{y1} & (Hs + K_p) \end{vmatrix};$$

$$\Delta_\beta = \begin{vmatrix} -Hs & -M_x \\ (I_0 s^2 + D_\alpha s) & M_{y1} \end{vmatrix};$$

$$\alpha(s) = \frac{-\Delta_\alpha}{-\Delta} = \frac{M_x (Hs + K_p) + M_{y1} (A_0 s^2 + D_\beta s)}{I_0 A_0 s^4 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s^3 + (H^2 + D_\alpha D_\beta) s^2 + H K_p s}$$

$$\beta(s) = \frac{-\Delta_\beta}{-\Delta} = \frac{M_{y1} Hs - M_x (I_0 s^2 + D_\alpha s)}{I_0 A_0 s^4 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s^3 + (H^2 + D_\alpha D_\beta) s^2 + H K_p s}$$

Выходной координатой явл.  $\alpha$ , но желательно, чтобы обе координаты были малы.

Для отскакивания  $\alpha(t)$ ,  $\beta(t)$  нужно знать изображение возмущения  $M_x(s)$ ,  $M_{y1}(s)$ .

### Установившиеся ошибки

Машинаты остаются постоянными.

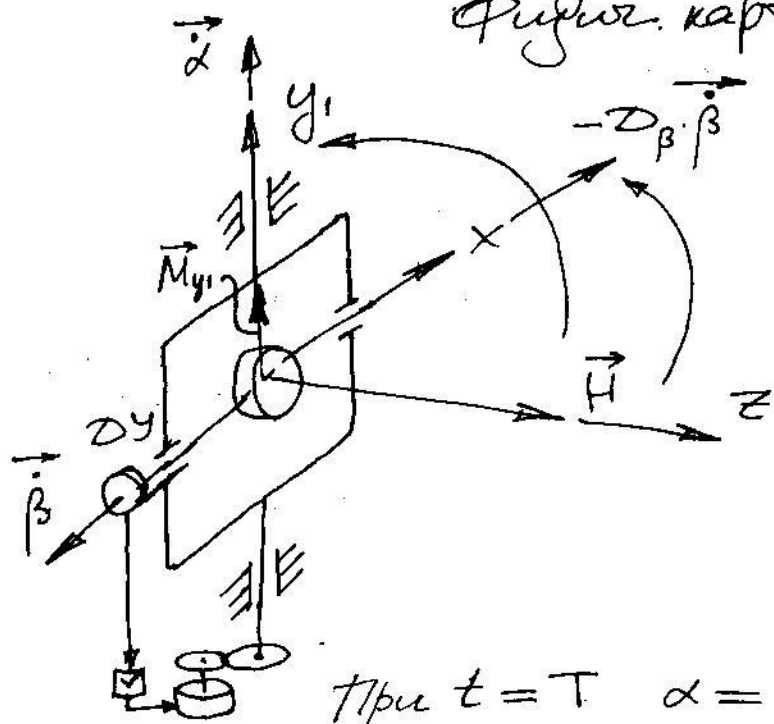
①  $M_x = 0; \quad M_{y1} = \text{const}$

$$\alpha_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \frac{M_{y1} D_\beta}{H K_p}$$

Поскольку  $D_\beta$  очень мало, то  $\alpha_{уст} \approx 0$ , что явл. преимуществом типового стабилизатора, следующим из его недостатка - малой устойчивости.

И то и другое вытекает из канонического интегратора в обр. связи.  
 Общее правило: с увеличением  $K_p$  ошибка  $\alpha_{уст}$  уменьшается, уг. ухудшаются.

Физик. картина Габова: скорость



$$\dot{\beta} = \frac{M_{y1}}{H}$$

вызывает демпфирование

$$-D_{\beta} \dot{\beta}$$

и прецессию со скоростью

$$\dot{\alpha} = \frac{D_{\beta} \dot{\beta}}{H} = \frac{M_{y1} D_{\beta}}{H^2}$$

При  $t = T$   $\alpha = \alpha_{уст} \approx \dot{\alpha} T = \dot{\alpha} \frac{H}{K_p} = \frac{M_{y1} D_{\beta}}{H K_p}$

$$\beta_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \beta(s) = \frac{M_{y1}}{K_p}$$

②  $M_x = const$ ;  $M_{y1} = 0$ ;

$$\alpha_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \infty$$

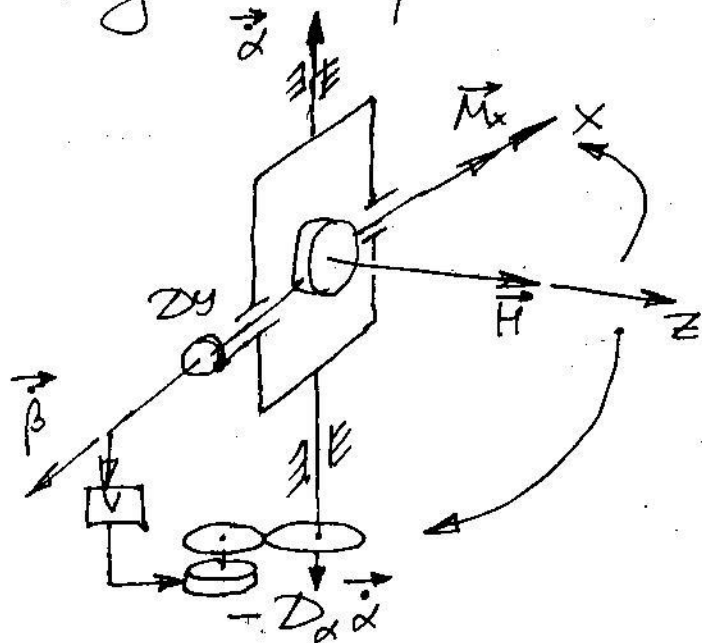
От моментов по оси,  $\perp$ -й оси стабилизируем, стабилизатор совсем не задвижен.

$$\dot{\alpha}_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} s \alpha(s) = \frac{M_x}{H} - \text{собств. скорость прецессии.}$$

$$\beta_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \beta(s) = - \frac{M_x D_{\alpha}}{H K_p}$$

Ошибка очень мала

Физич. картина такова: скорость



$$\dot{\alpha} = \frac{M_x}{H}$$

вызывает демпфирование

$$-D_\alpha \dot{\alpha}$$

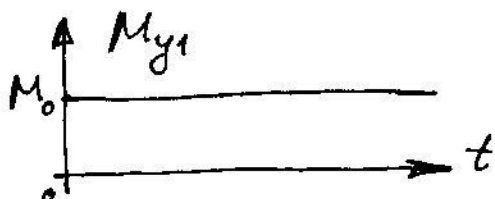
и прецессию со скоростью

$$\dot{\beta} = -\frac{D_\alpha \dot{\alpha}}{H} = -\frac{M_x D_\alpha}{H^2}$$

При  $t = T$   $\beta = \beta_{уст} \approx \dot{\beta} T = \dot{\beta} \frac{H}{K_p} = -\frac{M_x D_\alpha}{H K_p}$

### Реакция на ступенчатое воздействие

Положим  $M_{y1} = M_0 \cdot 1(t)$ ;  $M_x = 0$ ;



Из выражения для  $\alpha(s)$  следует, что

$$I_0 A_0 \ddot{\alpha} + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) \dot{\alpha} + (H^2 + D_\alpha D_\beta) \alpha + H K_p \alpha = \dot{M}_{y1} D_\beta + \ddot{M}_{y1} A_0$$

Решение этого ур-я имеет вид

$$\alpha = \sum_i C_i e^{\lambda_i t}, \text{ где}$$

$$\lambda_1 = 0; \quad \lambda_2 = -\frac{K_p}{H}; \quad \lambda_{3,4} = \sigma \pm j\omega$$

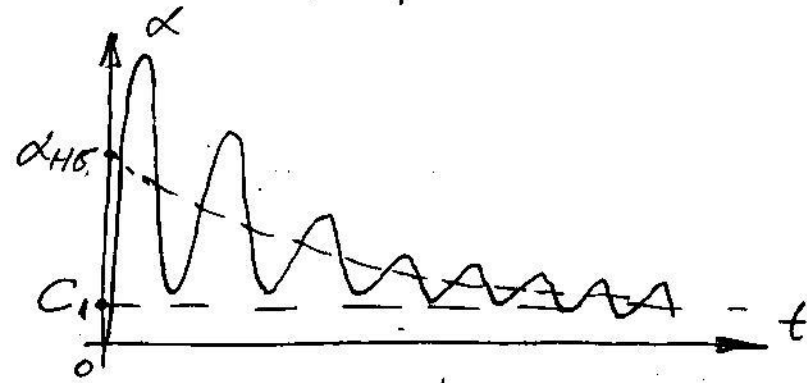
Таким образом,

$$\alpha = C_1 + C_2 e^{-\frac{K_p}{H} t} + A e^{-\frac{t}{T}} \sin\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} t + \varphi\right)$$

Величины  $\sigma, \omega, T, \xi, A, \varphi, C_2$  искать не будем. Из сказанного

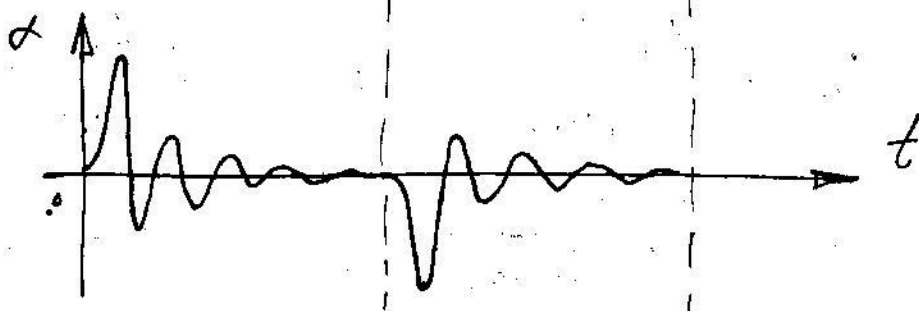
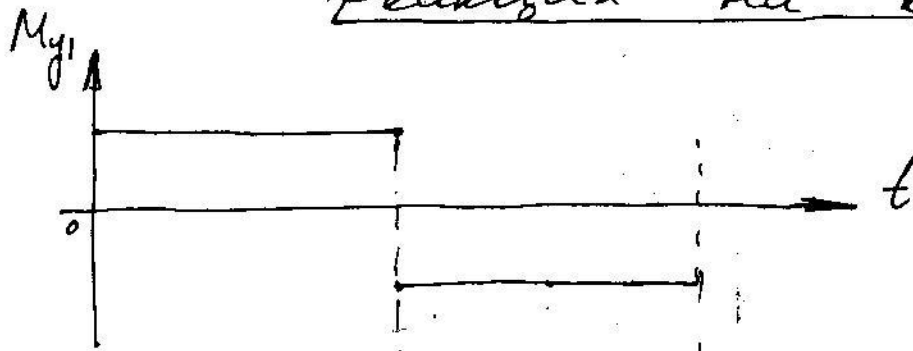
о статич. ошибках следует, что

$$C_1 = \frac{M_0 D_{\beta}}{HK_p} \approx 0.$$



Качество регулирования плохое\*, но действие интегральной обр. связи уменьшает статич. ошибку с  $\alpha_{HB} = C_1 + C_2$  (какой она была бы без обр. связи) до  $C_1$ .

### Реакция на скачку



\* перерегулирование достигает почти 100%.

# Реакция на гармонич. воздействие

Положим  $M_{y1} = M_0 \sin \omega t$ ;  $M_x = 0$ ;  $D_\beta = 0$ .

Тогда

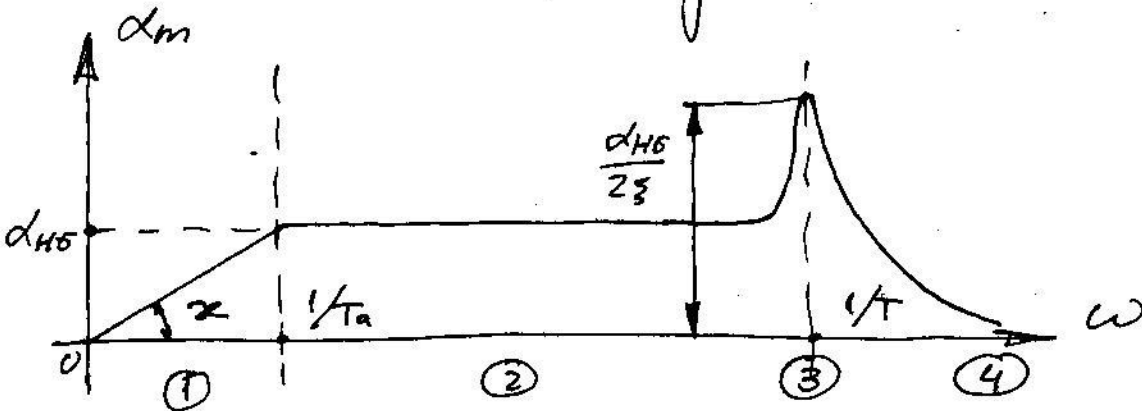
$$\Phi(s) = \frac{\alpha(s)}{M_{y1}(s)} = \frac{A_0 s}{I_0 A_0 s^3 + A_0 D_\alpha s^2 + H^2 s + H K_p} =$$

$$= \frac{A_0 s}{H K_p (1 + T_a s)(1 + 2\zeta T s + T^2 s^2)}, \text{ где}$$

$$T_a = -H/K_p; T = \frac{\sqrt{I_0 A_0}}{H}; \zeta = \frac{1}{2} \frac{D_\alpha \sqrt{A_0}}{H I_0};$$

$$|\Phi_{M_{y1} \rightarrow \alpha}(j\omega)| = \frac{A_0 \omega}{H K_p \sqrt{1 + T_a^2 \omega^2} \cdot \sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2\zeta T \omega)^2}}$$

$$\alpha_m = M_0 \cdot |\Phi_{M_{y1} \rightarrow \alpha}(j\omega)|$$



$$\textcircled{1} \quad 0 < \omega < \frac{1}{T_a}; \quad \alpha_m \approx \frac{M_0 A_0 \omega}{H K_p}; \quad \text{tg } \alpha = \frac{M_0 A_0}{H K_p};$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{1}{T_a} < \omega < \frac{1}{T}; \quad \alpha_m \approx \frac{M_0 A_0 \omega}{H K_p T_a \omega} = \frac{M_0}{H^2/A} = \alpha_{HB};$$

$$\textcircled{3} \quad \omega = \frac{1}{T}; \quad \alpha_m = \frac{M_0}{H^2/A} \cdot \frac{1}{2\zeta} = \frac{\alpha_{HB}}{2\zeta}$$

$$\textcircled{4} \quad \omega > \frac{1}{T}; \quad \alpha_m \approx \frac{M_0 A_0}{H^2 T^2 \omega^2} = \frac{M_0 A_0}{H^2 \frac{I_0 A_0}{H^2} \omega^2} = \frac{M_0}{I_0 \omega^2}$$

Угасток ① - единственный угасток, на к-ром работает с-ма разгрузки (без неё уже при  $\omega=0$  было бы  $\Delta m \approx \alpha n_b$ ).

На угастке ② работает шпр. момент,  $\Delta m \approx \alpha n_b$ .

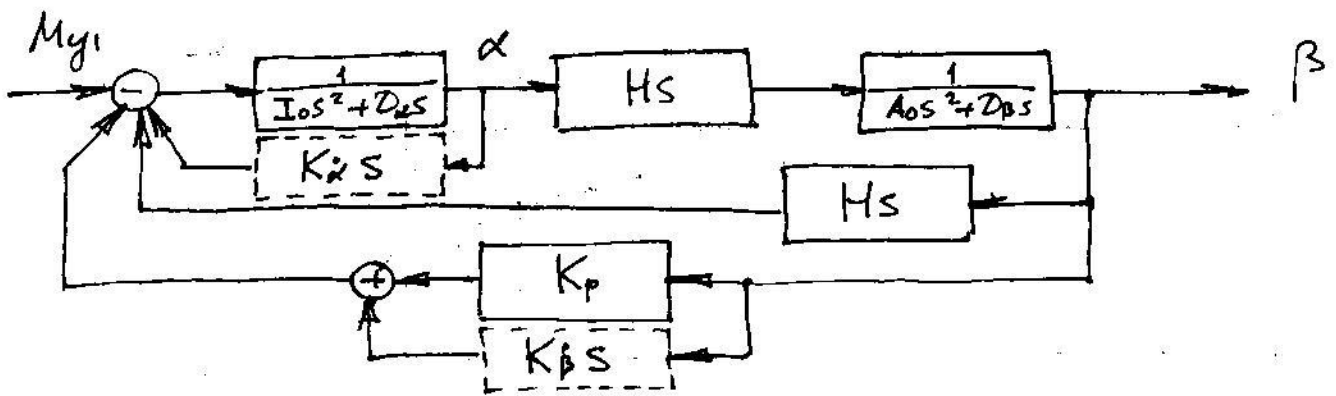
Угасток ③ - область резонанса;  $\Delta m$  резко возрастает; есть опасность поломки.

На угастке ④ шпр. момент не действует.

На других частотах, т.о., шловой шпростабилизатор меньше шведи каторного (уменьшается амплитуда ошибки  $\Delta m$ ), но это шре-шущество несущественно, т.к. в реальных условиях частоты уменьшения моментов малы и частота высока.

## Формирование структуры канала разгрузки

1) Форсирующая коррекция

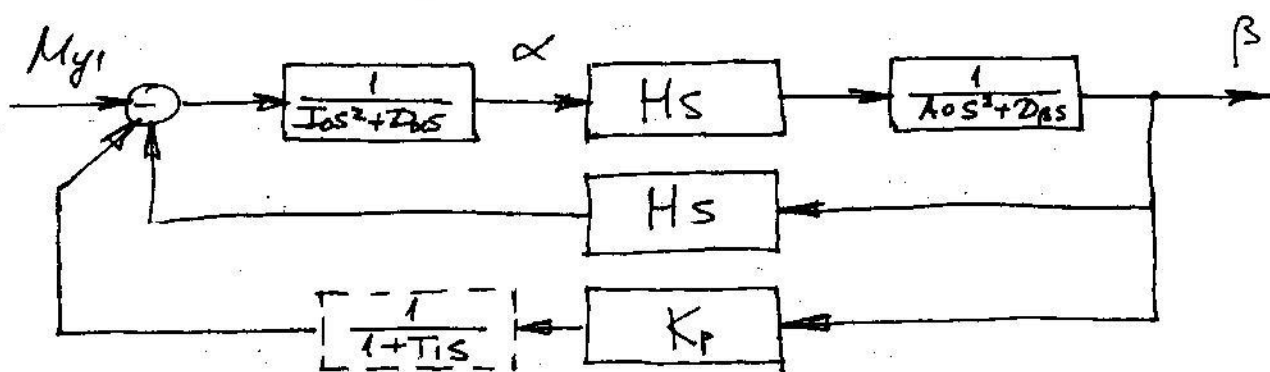


Самостоятельно написать передачу  
 $f$ -ции разомкнутой с-мы и,  
 применяя критерий Гурвица,  
 оценить влияние  $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$ .

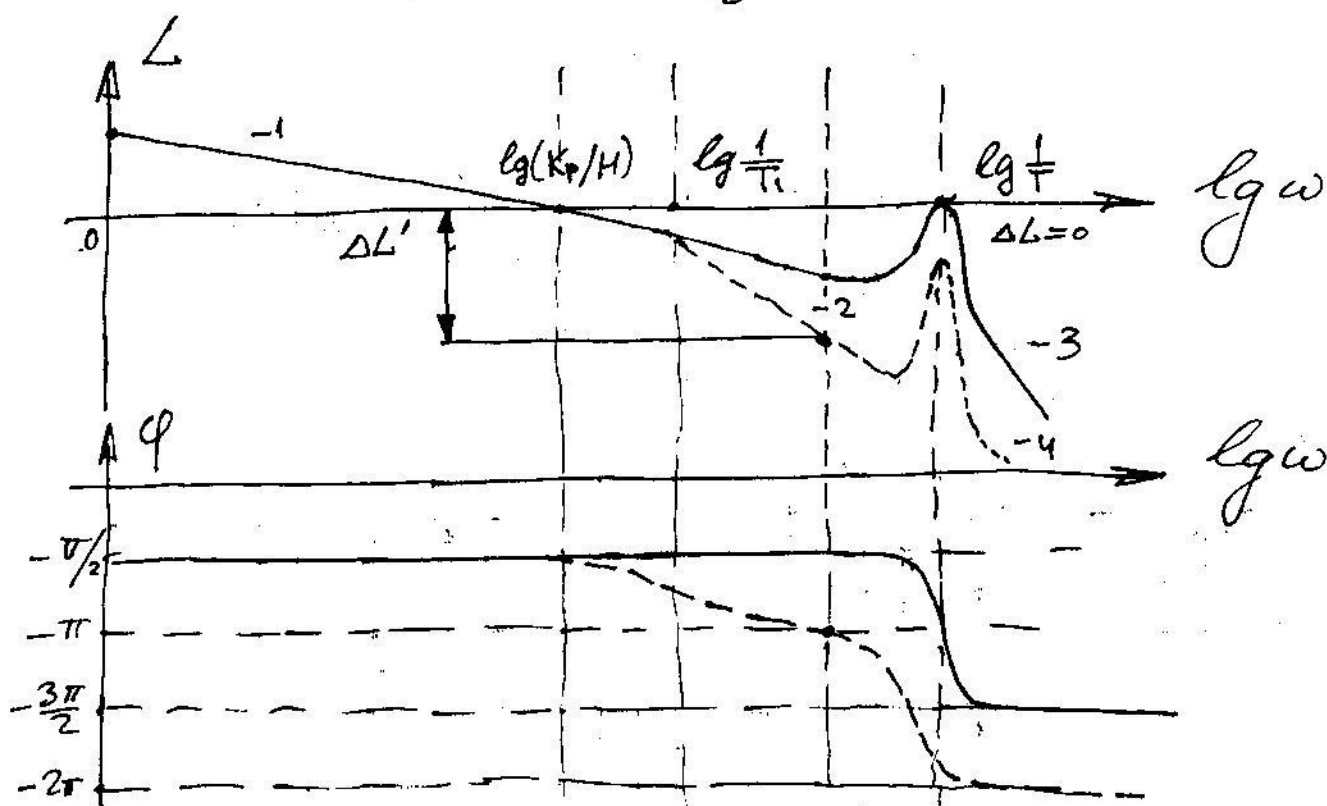
Метод исп. редко, т.к. предполагает  
 увеличение быстродействия с-мы  
 разгрузки, что делает её сложнее.

2). Введение апериодич. звена

$$W_p(s) = \frac{1}{1+T_1s} ; T_1 = (1.5 \div 2)T$$

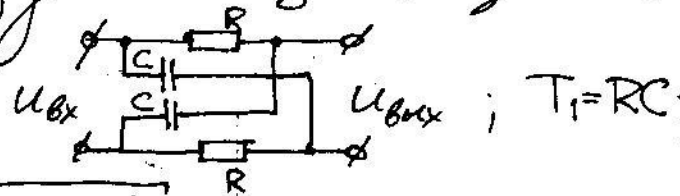


$$W(s) = \frac{K_p}{Hs} \cdot \frac{1}{T^2 s^2 + 2\zeta T s + 1} \cdot \frac{1}{1+T_1 s}$$



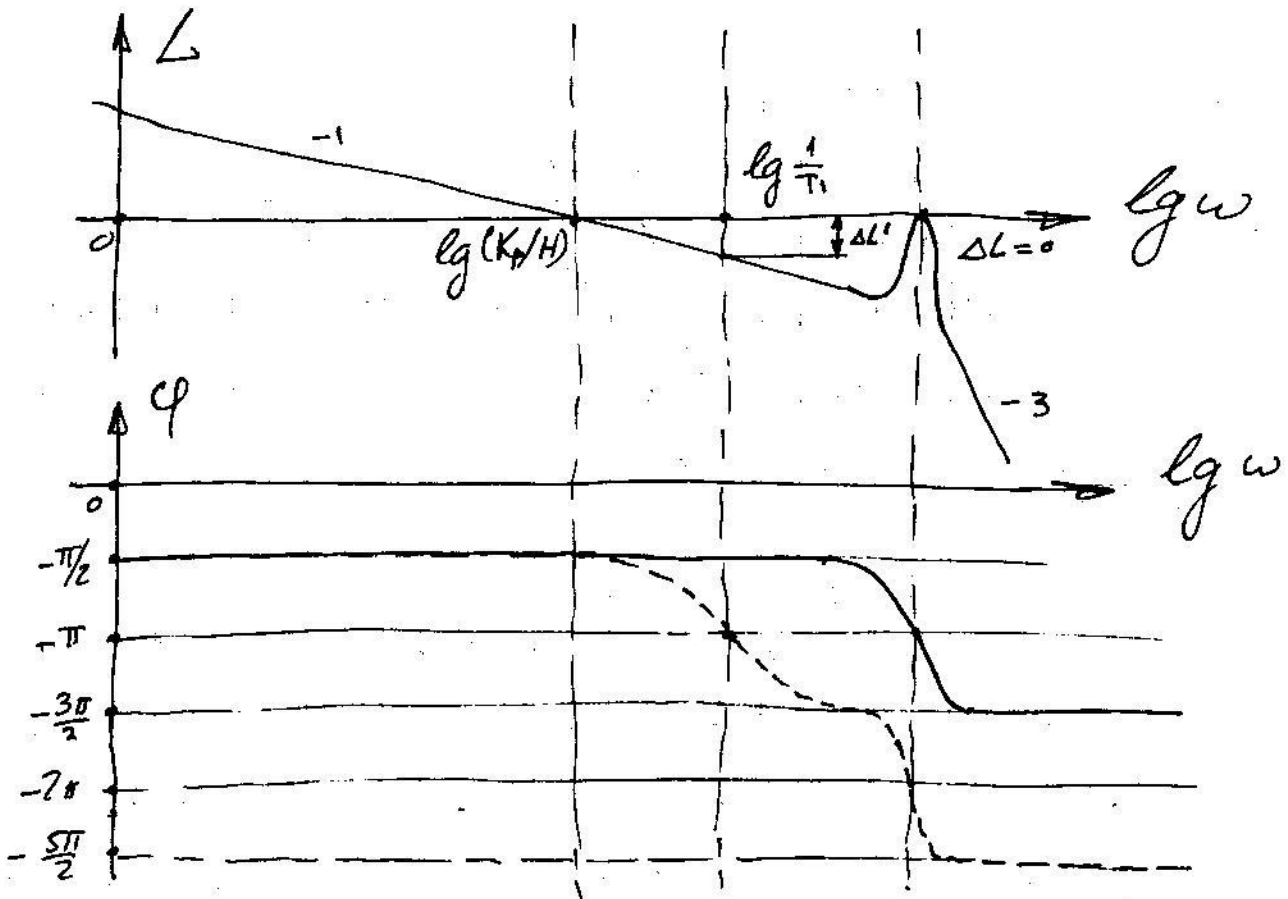
3) Введение фазонаддувающего звена

$$W_p(s) = \frac{1 - T_1 s}{1 + T_1 s}$$



$$|W_p(s)| = \sqrt{\frac{(1 - T_1 j\omega)(1 + T_1 j\omega)}{(1 + T_1 j\omega)(1 - T_1 j\omega)}} = 1;$$

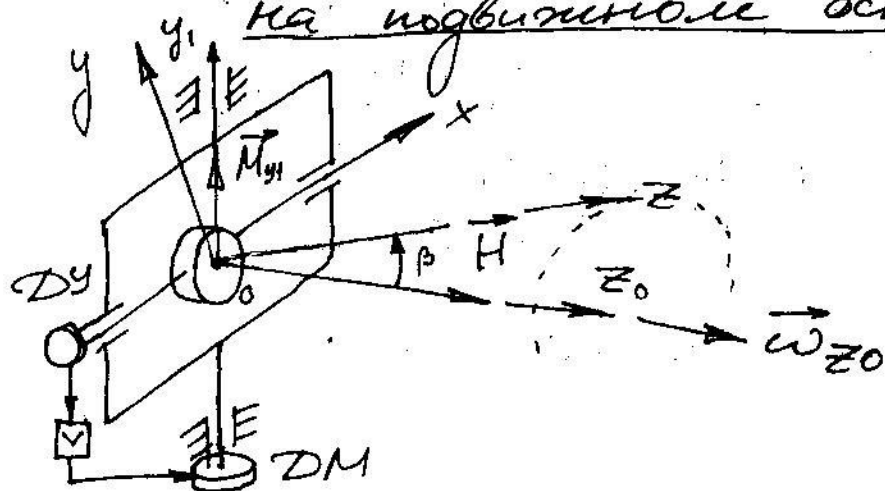
$$\varphi(\omega) = -\arctg T_1 \omega - \arctg T_1 \omega = -2\arctg T_1 \omega$$



Если бы мы изначально пересекали ось частот, ситуация с коррекцией качественно не изменилась.



# Поведение силового гиросtabilизатора на подвижном основании



①  $\omega_{y1} > 0$ ;  $\omega_x = \omega_{z0} = 0$ .  
 Скорость  $\omega_{y1}$  носителя вызывает моменты гироскопа  $M_{y1}^{TP}$  и  $M_{y1}^{об}$  по оси стабилизации. Этот случай уже изучен: возникают ошибки  $\beta = \beta_{уст}$  и  $\alpha \approx 0$ .

②  $\omega_x > 0$ ;  $\omega_{y1} = \omega_{z0} = 0$ .  
 При вращении носителя вокруг шпроскона возникает ложный сигнал рассогласования на  $Dy$ , который вызывает момент "разгрузки" в отсутствие возмущения. Этот момент вынуждает гироскоп прецессировать с абс. скоростью

$$\dot{\beta}_{абс} = \frac{M^P}{H} = \frac{K_p \beta_{уст}}{H}$$

так, что гироскоп (по самому сигналу канала разгрузки) следуют за рамой и носителем:

$\beta_{\text{аос}} = \omega_x$ ; откуда статич. ошшибка

$$\beta_{\text{уст}} = \frac{H\omega_x}{K_p}$$

Она велика, и это большой недостаток.  
С другой точки зрения, скорость  $\omega_x$  порождает шпр. момент  $M_{y1} = H\omega_x$ , который нужно уравновешивать вместе с внешним возмущающим моментом, что требует более точного ДМ.

③  $\omega_{z0} > 0$ ;  $\omega_{y1} = \omega_x = 0$ ;

$M_{y1} \neq 0$  без уменьшения облучности.  
Этот момент поворачивается вместе с носителем. Вместе с ним поворачивается и плоскость  $Z_0Z$ , и вектор инерт. момента  $\vec{H}$  описывает в адс. прве конус, что приводит к возникновению шпр. момента

$$\vec{M}^{\Gamma} = \vec{H} \times \vec{\omega}_{z0}; \quad M_x^{\Gamma} = H\omega_{z0} \sin\beta$$

и скорости прецессии

$$\dot{\alpha}_{\text{аос}} = \frac{M_x^{\Gamma}}{H_z} = \frac{H\omega_{z0} \sin\beta}{H \cos\beta} = \omega_{z0} \tan\beta.$$

В отличие от предыдущего случая, движение происходит по оси стабилизации со скоростью не только высокой, но и зависящей от скорости носителя.

Это уже не недостаток. Это трагедия.  
 Вывод: на высокоподвижном основа-  
 нии такие гиросtabilизаторы не  
 применяются.

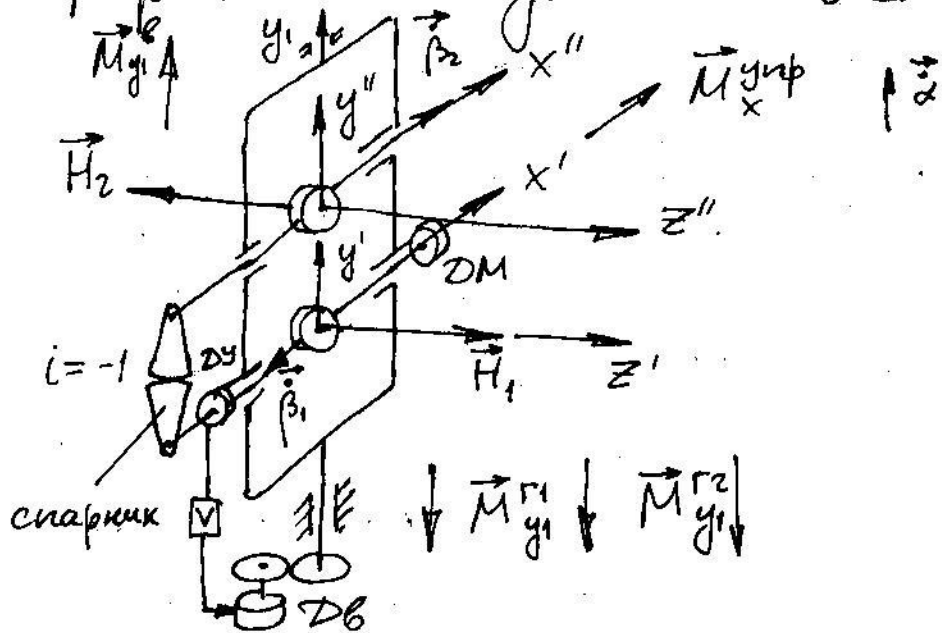
С др. точки зрения, по принципу Да-  
 ламбера для оси  $Ox$  имеем:

$$H\omega_{z0} \sin\beta - H\dot{\alpha}_{abc} \cos\beta = 0;$$

$$\dot{\alpha}_{abc} = \omega_{z0} \operatorname{tg}\beta.$$

### Одноосный двухротовый гиросtabilизатор

содержит матрицу с 2 2-сте-  
 пенными гироскопами с ося-  
 ми чувствит.-ти, // -ными оси  
 стабилизации матрицы, и  
 равными и противоположно на-  
 правленными момента-  
 ми, а также с-му разгрузки.  
 Гироскопы соединены с шарником.



## Принцип действия

Под действием момента  $\vec{M}_{y_1}^p$  шпиндели прецессируют со скоростями  $\vec{\beta}_1$  и  $\vec{\beta}_2$  ( $\vec{\beta}_2 = -\vec{\beta}_1$ ). Такое движение допускается шарником. Возникают шпр. моменты

$$\vec{M}_{y_1}^{\Gamma 1} = \vec{H}_1 \times \vec{\beta}_1; \quad \vec{M}_{y_1}^{\Gamma 2} = \vec{H}_2 \times \vec{\beta}_2 = \vec{M}_{y_1}^{\Gamma 1}.$$

Положим  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ;  $H_1 = H_2 = H$ , получим:

- 1)  $t=0$ ;  $M_{y_1}^e = M_{y_1}^{\Gamma 1} + M_{y_1}^{\Gamma 2} = 2H\beta$ ;
- 2)  $t>0$ ;  $M_{y_1} = M_{y_1}^{\Gamma 1} + M_{y_1}^{\Gamma 2} + M^p = 2H\beta + M^p$ .

То, принцип действия в общем не отличается от принципа действия однороторного шпростабилизатора (с заданной  $H$  на  $2H$ ).

Управление осущ. ДМ. В случае принципа Даламбера момент  $M_{x'}^{уп}$  уравновешивается шпр.

моментами  $M_{x'}^{\Gamma 1} = H_1 \dot{\alpha}$  и  $M_{x'}^{\Gamma 2} = H_2 \dot{\alpha}$ .

$$M_{x'}^{уп} = H_1 \dot{\alpha} + H_2 \dot{\alpha} = 2H \dot{\alpha};$$

$$\dot{\alpha} = \frac{M_{x'}^{уп}}{2H}.$$

## Ур. и движения

$$\sigma_{x'}: A_0 \ddot{\beta}_1 - A_0 \ddot{\beta}_2 i + D_\beta \dot{\beta}_1 - D_\beta \dot{\beta}_2 i - H_1 \ddot{\alpha} + H_2 \ddot{\alpha} i + M_{x'}^\beta + M_{x''}^\beta i = 0.$$

Если  $M_{x'}^\beta + M_{x''}^\beta i = M_x^\beta$ , то

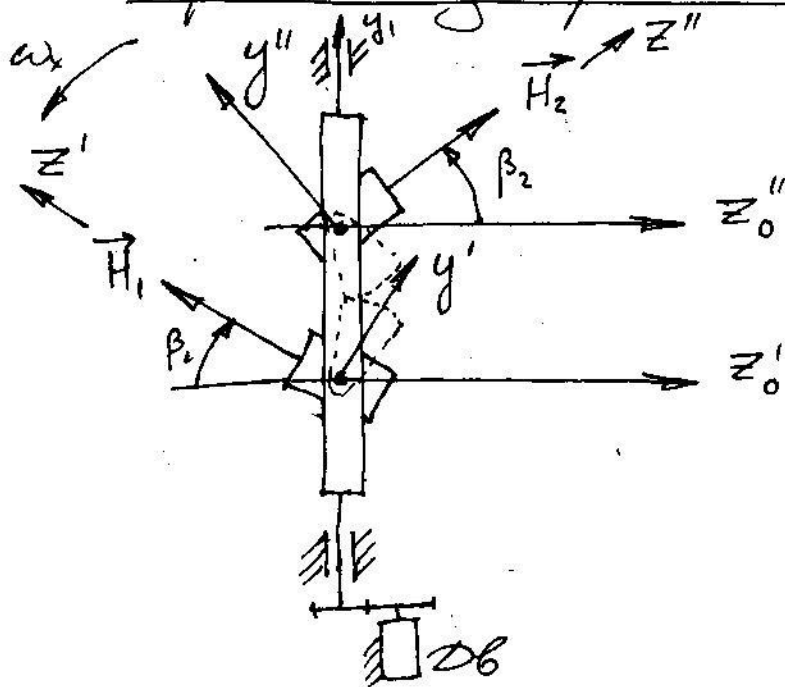
$$A_0 \ddot{\beta} + D_\beta \dot{\beta} - H \ddot{\alpha} = -M_x;$$

$$\sigma_{y'}: -I_0 \ddot{\alpha} - D_\alpha \dot{\alpha} - H_1 \dot{\beta}_1 - H_2 \dot{\beta}_2 - K_p \beta + M_{y'}^\beta = 0;$$

$$I_0 \ddot{\alpha} + D_\alpha \dot{\alpha} + 2H \dot{\beta} + K_p \beta = M_{y'}^\beta$$

Самостоятельно опр. крутильную частоту.

Поведение двухторного сферического гироскопостабильзатора на подвижном основании



①  $\omega_{y'} > 0$ ;  $\omega_x = \omega_{z_0} = 0$ .

Существо отличий от одноторного стабилизатора нет, лишь трение выше из-за наличия шарнира

②  $\omega_x > 0$ ;  $\omega_{y'} = \omega_{z_0} = 0$ .

По принципу Галамбера для оси  $Oy_1$  имеем сумму моментов

$$-H_2 \omega_x \cos \beta_2 + H_1 \omega_x \cos \beta_1.$$

Поскольку  $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ,  $H_1 = H_2 = H$ , то эта сумма обращается в ноль, quod erat faciendum.

### Физика движения

Из-за наличия сферика оба гироскопа не могут быть неподвижны в инерциальной системе при повороте вокруг наруж. рамы по оси  $Ox$ .

В действительности при наличии  $\omega_x$  к гироскопам приложатся однонаправленные ускоряющие моменты\* по оси  $Ox$ , вызывающие разнонаправленные скорости прецессии по оси  $Oy_1$ , что невозможно, так что эти моменты будут действовать на гироскопы как на несферическое тело. Вся конструкция поворачивается как целое по оси  $Ox$ .

③  $\omega_{z0} > 0$ ,  $\omega_x = \omega_{y1} = 0$ .

Раньше движение икнетых моментов при  $\beta \neq 0$  по конусу вызывало прецессию по оси  $Oy_1$ .

\* действующие м/у гироскопами и/з сферик.

Теперь угл. момент также возникает но прецессии не порождает.

$$\vec{M}_{x'}^{\Gamma_1} = \vec{H}_1 \times \vec{\omega}_{z_0} ; \quad M_{x'}^{\Gamma_1} = H_1 \omega_{z_0} \sin \beta ;$$

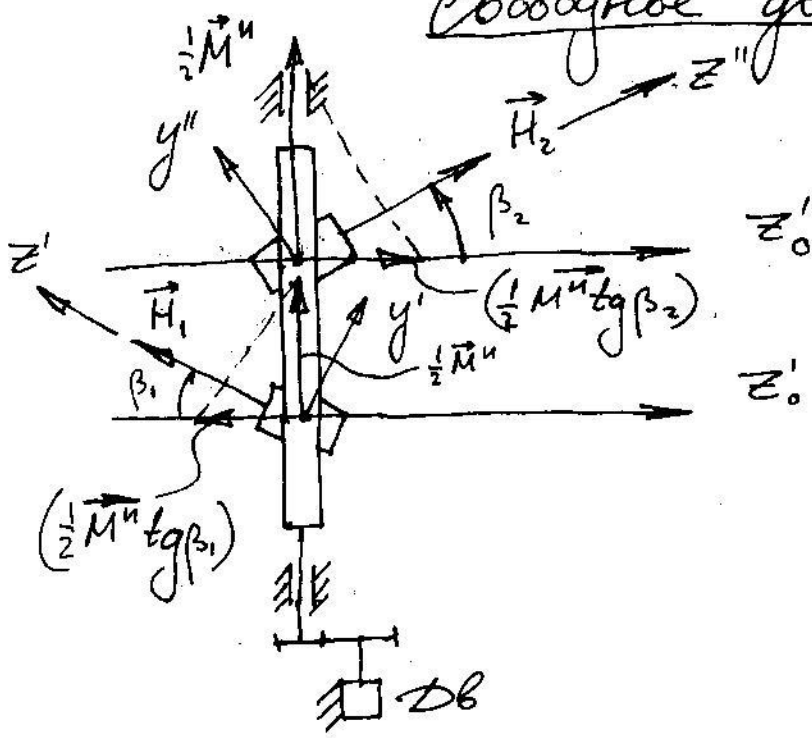
$$\vec{M}_{x''}^{\Gamma_2} = \vec{H}_2 \times \vec{\omega}_{z_0} ; \quad M_{x''}^{\Gamma_2} = H_2 \omega_{z_0} \sin \beta .$$

Моменты однонаправленные, поэтому  $M_{x'}^{\Gamma_1} + M_{x''}^{\Gamma_2} \cdot i = 0$ . Прецессии нет. Траекции изобетали.

Преимущество — малые отклонения на подвижном основании.

Недостаток — большая собственная скорость прецессии из-за трения в шарнире, много превышающего трение в опорах.

### Свободное движение

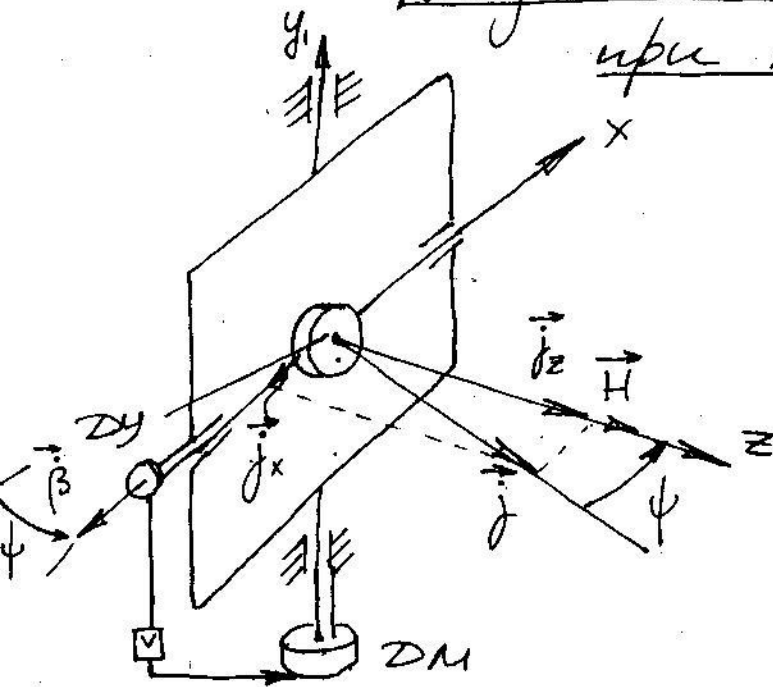




При угловых колебаниях угловое ускорение  $\ddot{\alpha}$  порождает момент инерции. Сила  $M^u = A_2 \ddot{\alpha}$  внешне равна, к-рой распределяется м/у гироскопами повороту. Его проекции на  $Oz_0'$  и  $Oz_0''$  равны по величине и противоположны. Ухода Магшур нест.

### Поведение силового стабилизатора

при качке



Здесь изображён гироскопический стабилизатор, но его конструкция такая же, что и у силового стабилизатора. Пусть есть качка  $\vec{j}$  по продольной оси носителя.

Определим угол отн. среднего положения оси  $Oz_0'$ , т.е. ось  $Oz$

$$j = j_0 \sin \omega t, \quad \dot{j} = j_0 \omega \cos \omega t.$$

Разложим на оси Резале.

$$\dot{j}_z = \dot{j} \cos \psi, \quad \dot{j}_x = \dot{j} \sin \psi.$$

Скорость  $\dot{j}_x$  порождает лотный сигнал на датчике угла; датчик момента создает момент по оси  $Oy$ , и прецессию  $\beta_{\text{авт}}$  по оси  $Ox$ , что не мешает ватно, т.к.  $Ox$  не явл. осью стабилизации. Однако ось



$Ox$  при качке, вообще говоря, не горизонтальна, и  $\beta_{a\delta c}$  имеет проекцию  $u_z$  на вертикаль  $Oz$ . Плохо то, что эта проекция во все моменты времени имеет одинаковое направление, т.к.  $j_z$  и  $\beta_{a\delta c}$  меняют знаки одновременно, и потому сум. ее ненулевое среднее значение  $\rightarrow$  ошибка.

Ур-е движения по оси  $Oy_1$ :

$$-H\dot{\beta}_{a\delta c} - K_p\beta = 0 \quad \text{или} \quad \dot{\beta}_{a\delta c} + \varepsilon\beta = 0,$$

где  $\varepsilon = \frac{K_p}{H}$ ,  $\beta_{a\delta c} = j_x + \beta$ . Отсюда

$$\dot{\beta}_{a\delta c} + \varepsilon(\beta_{a\delta c} - j_x) = 0;$$

$$\dot{\beta}_{a\delta c} + \varepsilon\beta_{a\delta c} = \varepsilon j_x = \varepsilon \sin\psi j_0 \omega \cos\omega t;$$

$$\dot{\beta}_{a\delta c}^{\text{уст}} = \frac{\varepsilon \sin\psi \cdot j_0 \omega}{\sqrt{\omega^2 + \varepsilon^2}} \cos(\omega t - \chi), \quad \chi = \arctg \frac{\omega}{\varepsilon}.$$

Далее,

$$u_z = -\dot{\beta}_{a\delta c}^{\text{уст}} \sin\psi \approx -\dot{\beta}_{a\delta c}^{\text{уст}} \psi;$$

$$j_z = j \cos\psi.$$

Остаток  $\psi$  медленно меняющийся, ищем:

$$j_z = j \cos\psi;$$

$$u_z = -\dot{\beta}_{a\delta c}^{\text{уст}} \cdot j \cos\psi =$$

$$= -\frac{\varepsilon \sin\psi \cdot j_0 \omega}{\sqrt{\omega^2 + \varepsilon^2}} j_0 \sin\omega t \cdot \cos\psi \cdot \cos(\omega t - \chi)$$

$$= -\frac{\varepsilon j_0^2 \omega \sin 2\psi}{2\sqrt{\omega^2 + \varepsilon^2}} \cos(\omega t - \chi) \cdot \sin\omega t.$$

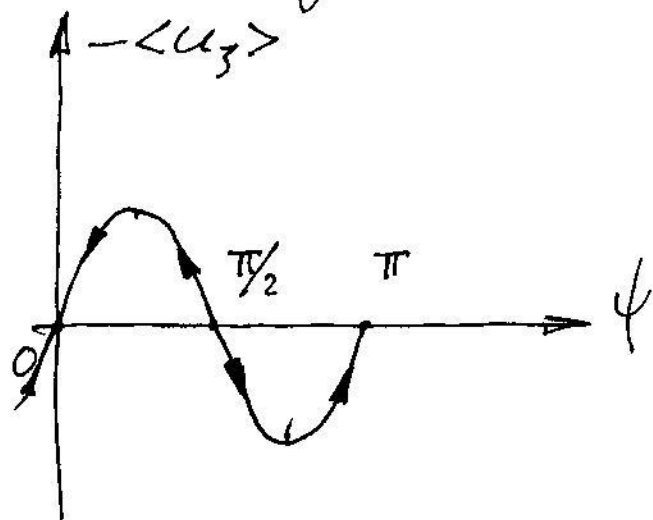
Заметим, что

$$\begin{aligned} \sin \omega t \cos(\omega t - \chi) &= \cos \omega t \cos \chi \sin \omega t + \\ + \sin \omega t \sin \chi \sin \omega t &= \frac{\sin 2\omega t}{2} \cdot \cos \chi + \\ + \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \cdot \sin \chi. \end{aligned}$$

Нам интересуют постоянная составляющая узора

$$\begin{aligned} \langle u_z \rangle &= - \frac{\epsilon j_0^2 \omega \sin 2\psi}{4 \cdot \sqrt{\omega^2 + \epsilon^2}} \cdot \sin \chi = \\ &= - \frac{\epsilon j_0^2 \omega \sin 2\psi}{4 \cdot \sqrt{\omega^2 + \epsilon^2}} \cdot \frac{\omega/\epsilon}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\epsilon^2}}} = \\ &= - \frac{\epsilon j_0^2 \omega \sin 2\psi}{4 \sqrt{\omega^2 + \epsilon^2}} \cdot \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \epsilon^2}} = \\ &= - \frac{\epsilon j_0^2 \sin 2\psi \cdot \omega^2}{4(\omega^2 + \epsilon^2)} \end{aligned}$$

Т.о., при каких условиях, кроме движения с удвоенной частотой качки, есть постоянный уход, что явл. серьезным недостатком. Этот уход по оси стабилизации происходит от отсутствия моментов.

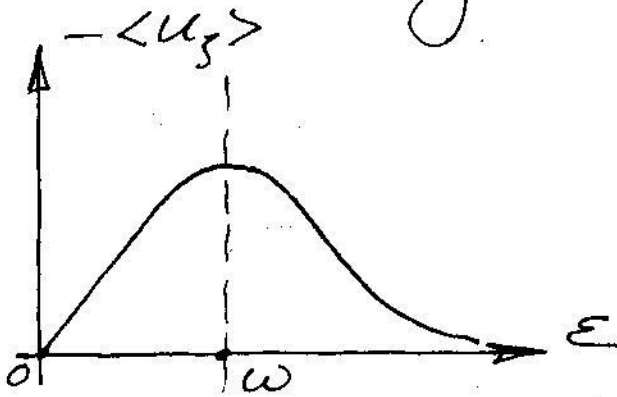


При движении вдоль инерциального элемента ( $\psi = 0; \pi$ ) нет составляющей  $j_x$ ; при движении  $\perp$ -но ему ( $\psi = \frac{\pi}{2}$ ) ось  $Oy_1$  не качается.

В этих углах ухода нет. Положения  $\psi = 0, \pi$  явл. устойчивыми;  $\psi = \pi/2$  - неустойчивым ("проклон ефемитса совместится с направлением катки").

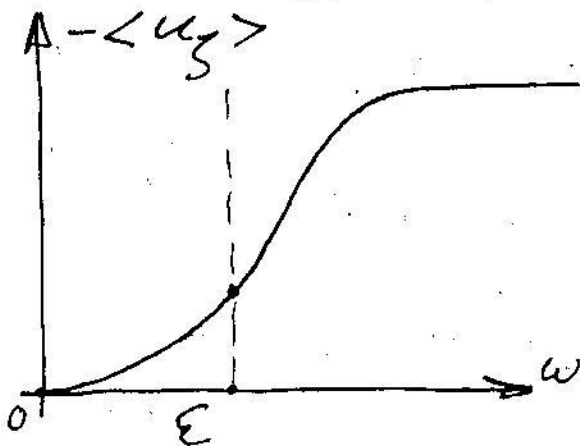
Способы уменьшения ухода:

- выбор параметров;
- установка на горизонтированную платформу.



Уход минимален для отдельно взятого гироскопа (без разгрузки,  $\epsilon = 0$ ) и хорошего стабилизатора ( $\epsilon \rightarrow \infty$ ),

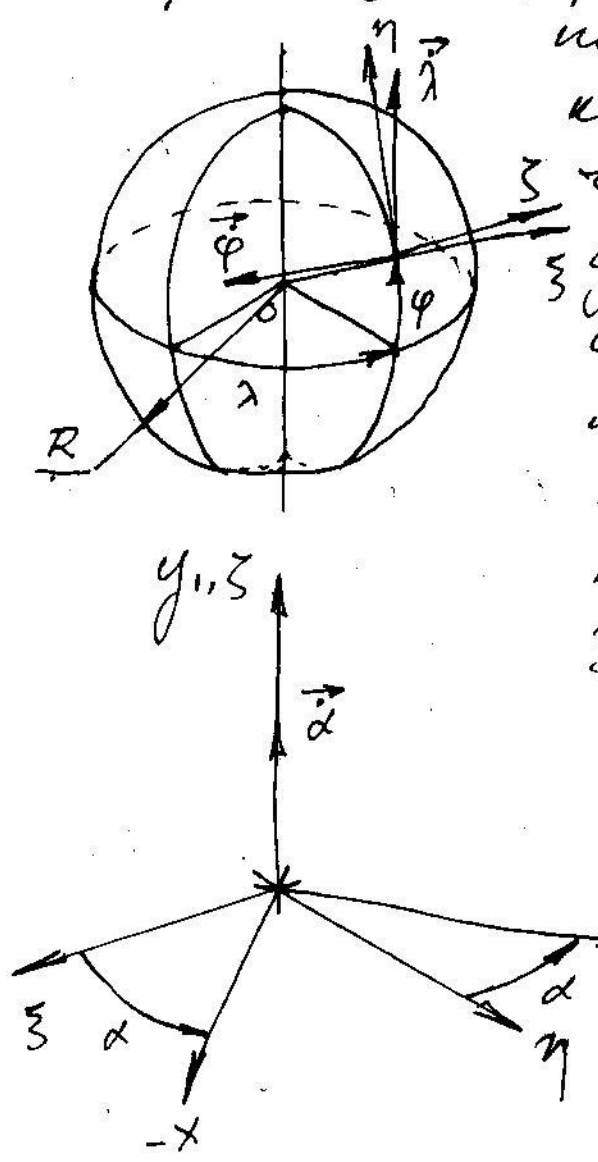
максимален для плохого стабилизатора и для микрополуканнаса (где с-ма разгрузки обязана быть слабой).



Поведении шлового стабилизатора

ури конит. движением  $Oax Oy_1$   
(кинематич. Th)

Выберем за опорный трёхгранник  $O\xi\eta\zeta$ , подобный географическому, но с тем отличием, что  $u=0$ . Введём, кроме того, абс. систему отсчёта  $Oa_1za_2za_3$ . Примем, что гиростабилизатор абсолютно жёсткий, т.е.  $K_p = \infty$ ;  $\beta_{уст} = 0$ . Запишем прецессионное ур-е по оси  $Ox$ :



-  $H\dot{\alpha}_{acc} = 0$ ;  
откуда  $\dot{\alpha}_{acc} = 0$ . Абсолютная скорость складывается из переносной  $\dot{\lambda} \sin \varphi$  и относительной  $\dot{\alpha}$  составляющих.

Отсюда получим:  $\dot{\lambda} \sin \varphi + \dot{\alpha} = 0$

и далее  $\dot{\alpha} = -\dot{\lambda} \sin \varphi$ ;

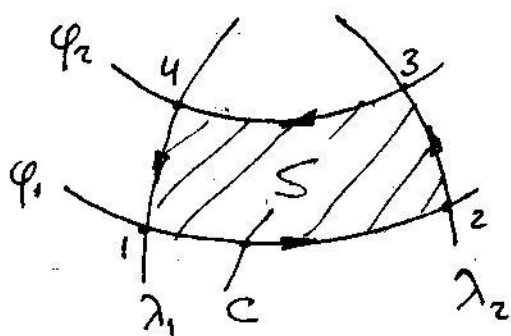
$d\alpha = -\sin \varphi \cdot d\lambda$ ;

$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\alpha = - \int_{\varphi_1, \lambda_1}^{\varphi_2, \lambda_2} \sin \varphi d\lambda$ ;

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = - \int_{\varphi_1, \lambda_1}^{\varphi_2, \lambda_2} \sin\varphi d\lambda$$

Пусть  $\tau, 0$  описывает на пов. сф. сферы замкнутый контур  $\tau$ , т.е.  $\lambda_1 = \lambda_2$ ;  $\varphi_1 = \varphi_2$ ; тогда для угла поворота  $\Delta\alpha$  будет равен абсолютноному и

$$\Delta\alpha_{\text{abs}} = \Delta\alpha = - \oint_C \sin\varphi d\lambda$$



Выберем контур  $C$ , состоящий из кусков меридианов и параллелей, как показано на рис. Тогда

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{\text{abs}} &= -\sin\varphi_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda + 0 - \sin\varphi_2 \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} d\lambda + 0 = \\ &= -\sin\varphi_1 (\lambda_2 - \lambda_1) - \sin\varphi_2 (\lambda_1 - \lambda_2) = \\ &= (\lambda_2 - \lambda_1) (\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1) = \frac{S}{R^2} = \chi \end{aligned}$$

где  $\chi$  — телесный угол, ограниченный контуром  $C$ . С помощью предельного перехода можно показать, что ф-ла

$$\Delta\alpha_{\text{abs}} = \chi$$

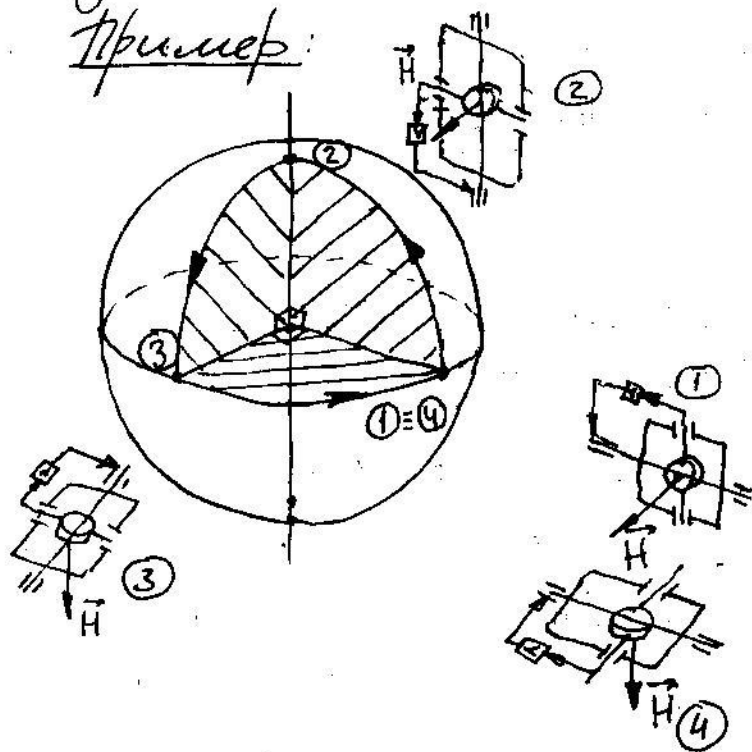
справедлива для всех возможных контуров.

Если  $T$  — время движения по контуру  $C$ , то средняя скорость

$$\text{ухода } \dot{\alpha}_{abc} = \frac{\Delta \alpha_{abc}}{T}$$

Это явление наз. "кинематизм  $T_H$ ".  
 В действительности оно обусловлено не кинематизм, а динамизм. при-  
 тинами (прецессией под дей-  
 ствием магнетта разгрузки,  
 существование к-рому обязательно  
 для выполнения условия  $\beta_{3\sigma} = 0$ ).

Пример:



1 → 2

Происходит враще-  
 ние вокруг  $\vec{H}$ . Ни-  
 каких др. явлений  
 нет.

2 → 3

Происходит враще-  
 ние вокруг  $Ox$ ;  
 работает с-ла  
 разгрузки.  $\vec{H}$  оста-  
 ется  $\perp$ -ным внеш.

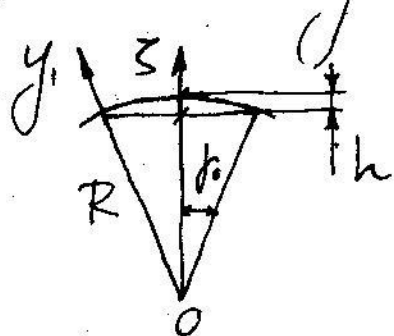
рамке, т.е. поворачивается в abs. пр-ве  
 на  $\frac{\pi}{2}$ .

3 → 4

Происходит вращение вокруг  $\vec{H}$ . Никаких  
 др. явлений нет.

∴ в переходе  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$  накоплен-  
 ный угол поворота  $\vec{H}$  в abs. пр-ве  
 равен  $\frac{\pi}{2}$ . Сравним:  $\Delta \alpha_{abc} = \frac{4\pi}{8} = \frac{\pi}{2}$ .

Пример: круговая вибрация;  $Oy_1$  описывает конус с осью  $Oz$ .



$$S = 2\pi R h;$$

$$h = R(1 - \cos \varphi_0);$$

$$\cos \varphi_0 \approx 1 - \frac{\varphi_0^2}{2};$$

$$h \approx \frac{R \varphi_0^2}{2};$$

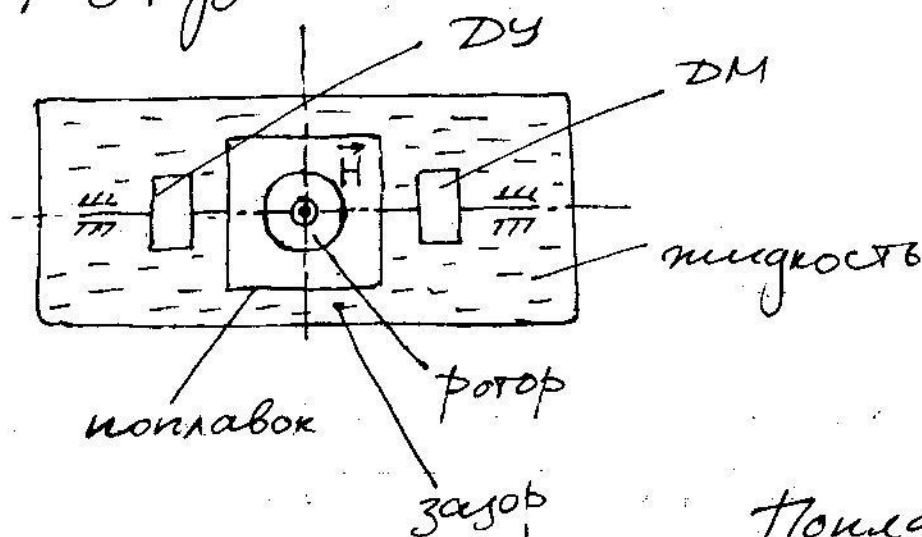
$$S \approx 2\pi R^2 \frac{\varphi_0^2}{2} = \pi R^2 \varphi_0^2;$$

$$\Delta \alpha_{\text{абс}} \approx \frac{S}{R^2} = \pi \varphi_0^2.$$

Этот уход за период может оказаться неприемлемо большим.

Одноосный индикаторно-щелевой гиросtabilизатор с интгр. гироскопом (ИГ) —

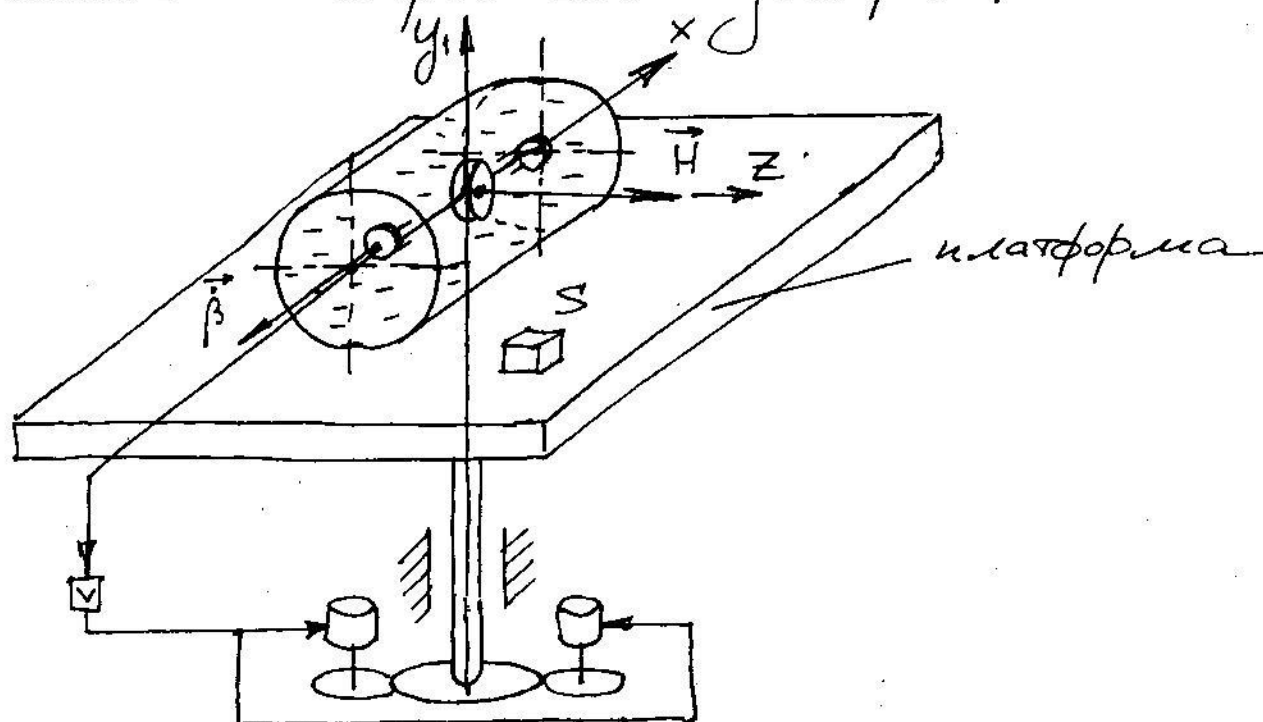
платформа с 1 осью стабилизирующей, установленным на ней ИГ так, что его ось чувствит-ти // на оси стабилизирующей, и с-мой разгрузки.



Поплавковый ИГ



Кинематич. схема та же, что и у  
силового гиросtabilизатора.



Силовая роль гироскопа снижена либо  
отсутствует; требования к с-ме раз-  
грузки так же велики как у ин-  
дикаторного стабилизатора

### Приближенно действительное

при малом  $D_\beta$  тот же, что у  
силового стабилизатора; однако дви-  
жение отмогает из-за наличия  
демпфирующего момента

$M_x^D = +D_\beta \dot{\beta}$ ,  
вызывающего процесс по оси ста-  
билизации

$$\dot{\alpha} = \frac{M_x^D}{H}$$

Чтобы уменьшить возникающую  
ошибку, увеличивают роль ка-



нала разгрузки, так что становится  
 меньше величины  $\beta$ ,  $\dot{\beta}$ ,  $H\dot{\beta}$ , т.е. сильная роль гироскопа.  
 При большом  $D_\beta$  принцип тот  
 же, что у индикаторного стабилизатора:  
 в ответ на момент возмущения  $M_{y_1}^6$  возникает крен  
 левой уае  $\alpha$ ; он измеряется гироскопом;  
 так что  $\beta \sim \alpha$ ; с-мой разгрузки  
 создается момент  $M_{y_1}^p = K_p \beta$ ,  
 уравновешивающий  $M_{y_1}^6$ .

### Ур-я движения

$$\begin{cases} A_0 \ddot{\beta} + D_\beta \dot{\beta} - H \ddot{\alpha} = -M_x; \\ I_0 \ddot{\alpha} + D_\alpha \dot{\alpha} + H \dot{\beta} + K_p \beta = M_{y_1}^6. \end{cases}$$

Количественно ур-я отличаются от ур-й  
 силового стабилизатора большим  
 $D_\beta$  и малым  $H\dot{\beta}$ .

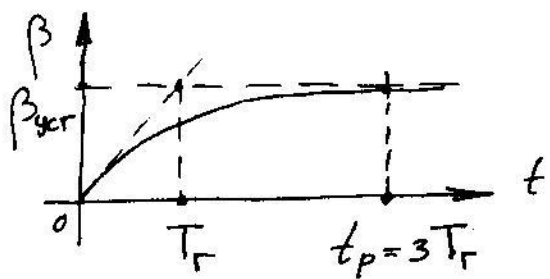
Пусть  $M_x = 0$ . Тогда 1-е ур-е (ур-е  
 креноскопа) принимает вид

$$\begin{aligned} A_0 \ddot{\beta} + D_\beta \dot{\beta} &= H \ddot{\alpha}; \\ T_1 \dot{\beta} + \beta &= h \dot{\alpha}, \end{aligned}$$

где  $T_1 = \frac{A_0}{D_\beta}$ ;  $h = \frac{H}{D_\beta}$ .

Интегрируем:

$$\begin{aligned} T_1 \dot{\beta} + \beta &= h \dot{\alpha}; \\ \beta &= h \alpha (1 - e^{-t/T_1}). \end{aligned}$$



Величина  $T_r$  имеет порядок 1 мс, переходный процесс быстрый, и можно пренебречь и считать, что

$$\beta = \beta_{уст} = h\alpha$$

Тогда

$$I_0 \ddot{\alpha} + D_\alpha \dot{\alpha} + Hh\dot{\alpha} + K_p h\alpha = M_{y1}^e$$

или

$$I_0 \ddot{\alpha} + (D_\alpha + Hh)\dot{\alpha} + K_p h\alpha = M_{y1}^e$$

### Устойчивость

опр. х-м ур-ем, аналогичным ур-ю силового стабилизатора:

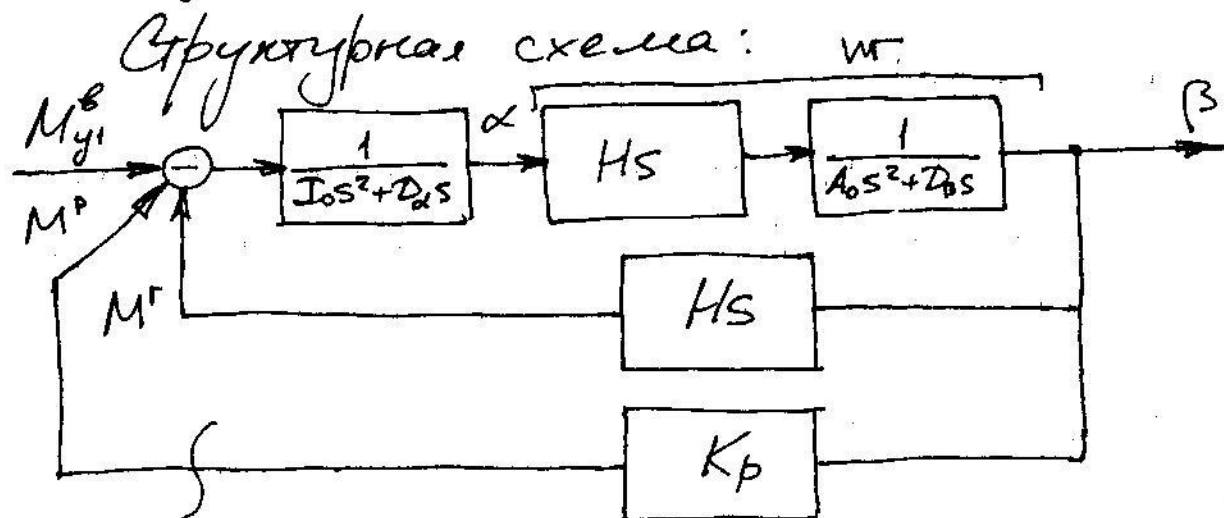
$$I_0 A_0 s^3 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s^2 + (H^2 + D_\alpha D_\beta) s + H K_p = 0$$

По критерию Гурвица для устойчивости требуется выполнение условия

$$K_p < \frac{(I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha)(H^2 + D_\alpha D_\beta)}{I_0 A_0 H}$$

Теперь  $D_\beta$  пренебречь нельзя, ибо эта величина на неск. порядков выше, чем в силовом стабилизаторе. Требования к  $K_p$  из-за этого ниже, этот коэфф. можно сделать меньше,

оформить тем самым внешние  
вредные моменты по оси X.



$$W(s) = \frac{1}{I_0 s^2 + D_\alpha s} \cdot Hs \cdot \frac{1}{A_0 s^2 + D_\beta s} \cdot Kp =$$

$$1 + \frac{Hs \cdot Hs}{(I_0 s^2 + D_\alpha s)(A_0 s^2 + D_\beta s)}$$

$$= \frac{HKp}{s} \cdot \frac{1}{I_0 A_0 s^2 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s + (D_\alpha D_\beta + H^2)}$$

$$= \frac{HKp}{s(H^2 + D_\alpha D_\beta)} \cdot \frac{1}{\frac{I_0 A_0}{H^2 + D_\alpha D_\beta} s^2 + \frac{I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha}{H^2 + D_\alpha D_\beta} s + 1}$$

Положим, что из-за высокого  $D_\beta$   
корни звена второго порядка дей-  
ствительные. Тогда можно на-  
писать:

$$W(s) = \frac{K}{s} \cdot \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad \text{где}$$

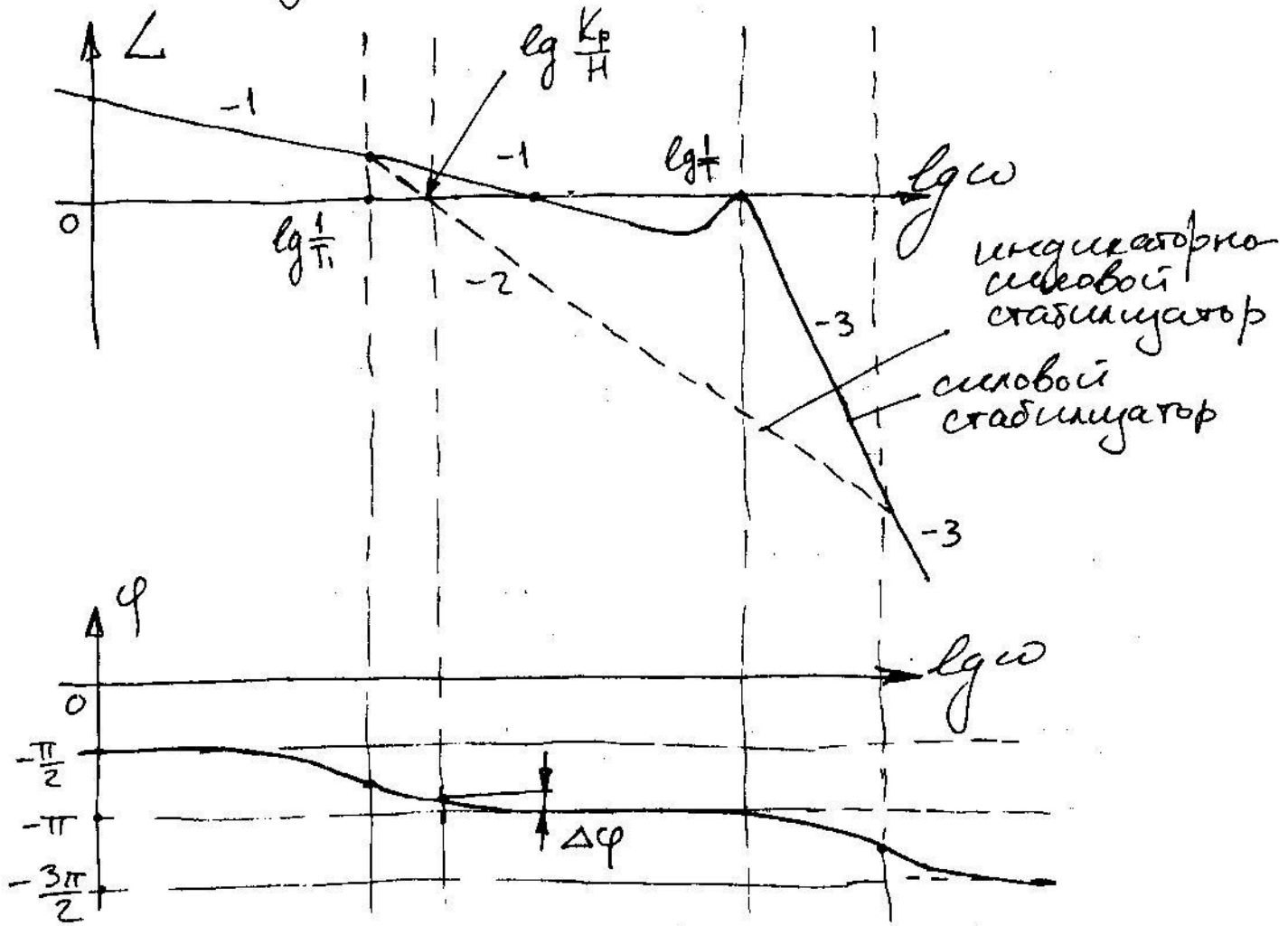
$$K = \frac{HKp}{H^2 + D_\alpha D_\beta}; \quad T_1 T_2 = \frac{I_0 A_0}{H^2 + D_\alpha D_\beta}.$$

Будем также считать, что привод безредукторный и поэтому  $D_2 = 0$ .  
Тогда

$$T_1 T_2 = \frac{I_0 A_0}{H^2} = T^2, \text{ где}$$

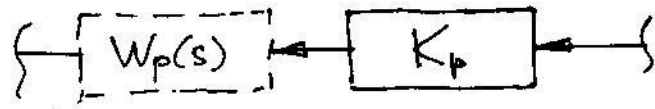
$T$  - коэф. вр. инерции.

Без уменьшения обзности  $T_1 > T, T_2 < T$ .



При необходимом для точности повыше-  
нии  $K_p$  запас по фазе умень-  
шается, но с.м.а. остаётся устой-  
чивой, подобно некorr. силовому  
стабилизатору

Случай большого демпфирования рас-  
смотрим отдельно при условии ис-  
пользования корректирующего зве-  
на в цепи канала разгрузки:



Пренебрежим каналом пер. момента.  
Получим (при  $W_p(s) \equiv 1$ ):

$$W(s) = \frac{1}{I_0 s^2 + D_\alpha s} \cdot Hs \cdot \frac{K_p}{A_0 s^2 + D_\beta s} =$$

$$= \frac{HK_p}{SD_\alpha D_\beta} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1} \cdot \frac{1}{T_\Gamma s + 1}$$

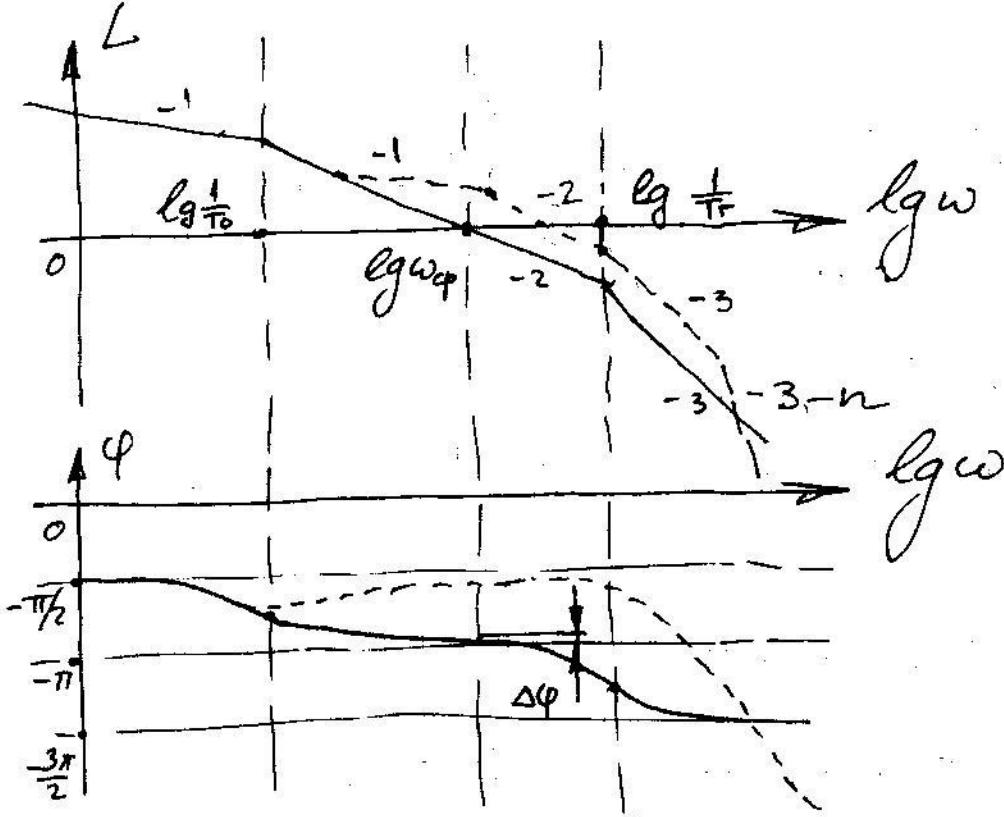
Заметим, что

$$\frac{HK_p}{D_\alpha D_\beta} = \frac{H}{D_\beta} \cdot \frac{K_p}{D_\alpha} = h \frac{K_p}{D_\alpha} = \frac{K}{D_\alpha} -$$

добротность по скорости;

$$T_0 = \frac{I_0}{D_\alpha}; \quad T_\Gamma = \frac{A_0}{D_\beta} -$$

постоянные времени платформы  
и гироскопа.



В области частоты среза ЛАЧХ та же, что и для индикаторного стабилизатора, потому и коррекция аналогична — введением фазоинвертирующих звеньев:

$$W_p(s) = \frac{1+T_1 s}{1+T_2 s} \cdot \frac{1}{(1+T_3 s)^n}$$

### Точность

Так же, как и для символического стабилизатора

$$\alpha(s) = \frac{M_x^0 (Hs + K_p) + M_{y1}^0 (A_0 s^2 + D_\beta s)}{I_0 A_0 s^4 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s^3 + (H^2 + D_\alpha D_\beta) s^2 + H K_p s}$$

①  $M_{y1}^0 = const$ ;  $M_x = 0$ ;

$$\alpha_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \frac{M_{y1}^0 D_\beta}{H K_p} = \frac{M_{y1}^0}{H K_p} = \frac{M_{y1}^0}{K}$$

Как видно, из-за большого  $D_\beta$  стат. ошибка вовсе не равна 0.

Трпе  $K_p = 0$

$$\alpha_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{M_{y1}^b D_\beta}{(H^2 + D_\alpha D_\beta) s} = \infty;$$

$$\dot{\alpha}_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} s \alpha(s) = \frac{M_{y1}^b D_\beta}{H^2 + D_\alpha D_\beta}$$

Сущ. постоянный уход. Т.о., без разгрузки стабилизатор работать не может.

б)  $M_{y1}^b = 0$ ;  $M_x^b = const$ ;

$$\alpha_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{M_x^b}{H s} = \infty;$$

$$\dot{\alpha}_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} s \alpha(s) = \frac{M_x^b}{H}$$

Как и в словом стабилизаторе, есть дрейф  $\dot{\alpha}_{уст}$ , но он мал.

②  $M_{y1}^b = M_0 \sin \omega t$ ;  $M_x^b = 0$ .

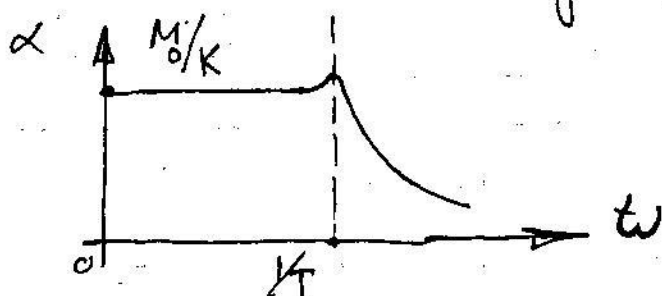
Пусть  $A_0 \approx 0$ .

$$\Phi(s) = \frac{\alpha(s)}{M_{y1}^b(s)} = \frac{D_\beta}{I_0 D_\beta s^2 + (H^2 + D_\alpha D_\beta) s + H K_p}$$

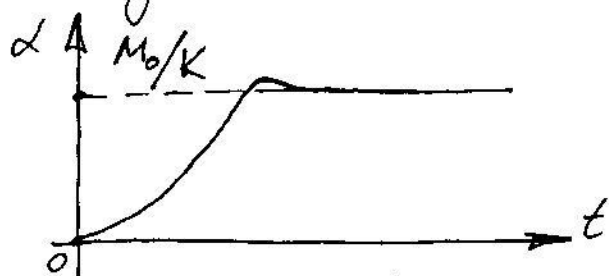
Приведем к стандартному виду:

$$\Phi(s) = \frac{D_\beta}{H K_p} \frac{1}{T^2 s^2 + 2 \zeta T s + 1}$$

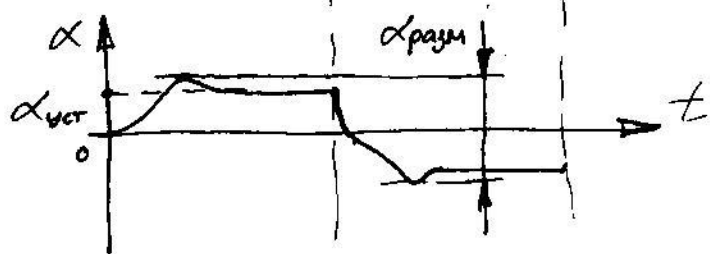
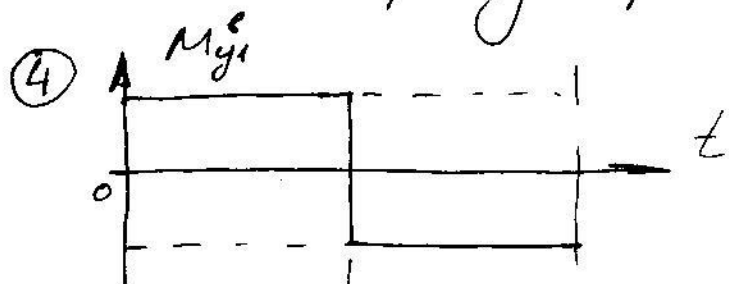
$$\alpha(t) = M_0 \cdot |\Phi(j\omega)| \cdot \sin(\omega t + \arg \Phi(j\omega))$$



③  $M_{y1}^e = M_0 \cdot l(t)$ ;  $M_x^e = 0$ ;



Качество регулирования хорошее.



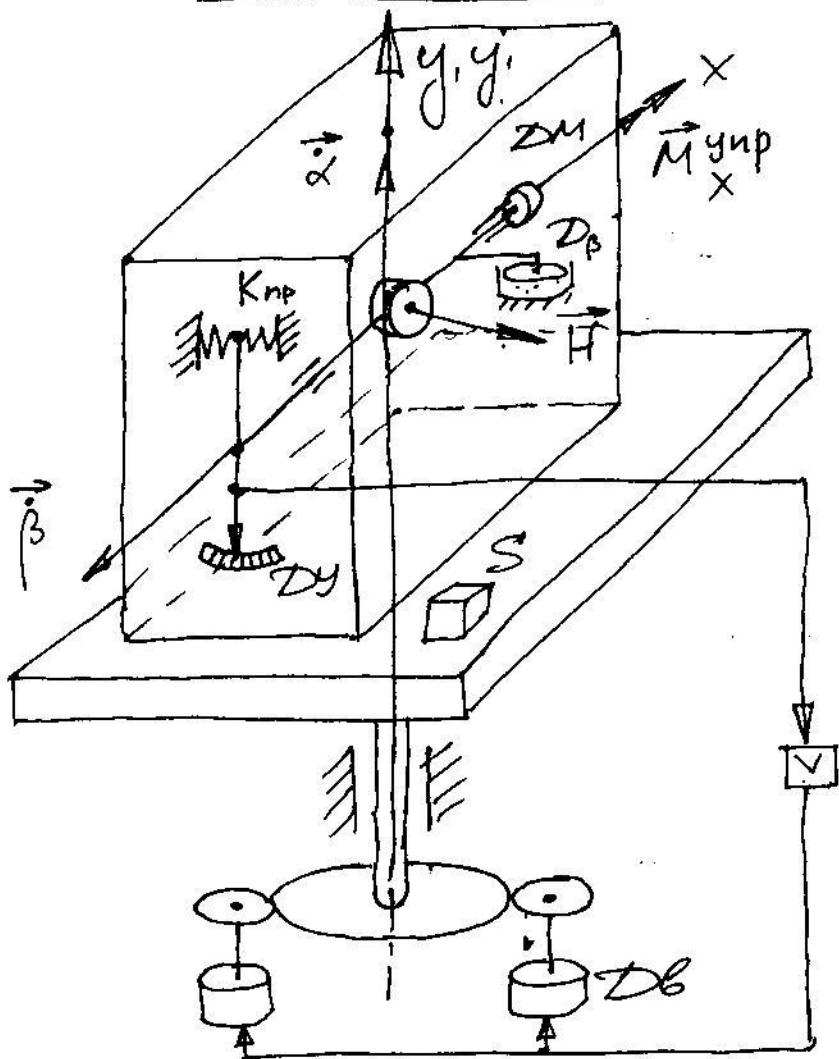
$\alpha_{разм} \approx 2\alpha_{уст}$  так же, как и для индикаторного стабилизатора.

Одноосный индикаторно-силовой  
перестабилизатор с ДУС -

матрица с 1 осью стабилизации,  
на к-рой расположено ДУС так, что  
ось чувствит-ти // на оси стаби-  
лизации, и с-ма разгрузки.



# Кинематич. схема



В схеме сущ. 2 связи по оси прецессии — уз \$D\_\beta\$ и \$K\_{np}\$.

## Принцип действия

- 1) При появлении момента  $M_{y1}^B$  возникает прецессия со скоростью  $\beta$ , пр. момент  $\vec{M}^\Gamma = \vec{H} \times \vec{\beta}$ ; угол  $\beta$ , момент разгрузки  $M_{y1}^P = -K_p \beta$ , так что

$$M_{y1}^B = M_{y1}^\Gamma + M_{y1}^P$$

Моменты сил упругости  $M_x^{np} = -K_{np} \beta$  и демпфирования  $M_x^D = -D_\beta \beta$  нужно считать

приближенной погрешностей.

2) Как идеальный ДУС, прибор измеряет угл. скорость  $\dot{\alpha}$ , т.е. возникает угол  $\beta = \frac{H}{K_{np}} \cdot \dot{\alpha} = K_D \dot{\alpha}$  и момент стабилизации  $M_{y1}^P = -K_p \beta$ .

Ур-е движения

$$\begin{cases} A_0 \ddot{\beta} + D_\beta \dot{\beta} + K_{np} \beta - H \dot{\alpha} = -M_x^e; \\ I_0 \ddot{\alpha} + D_\alpha \dot{\alpha} + H \dot{\beta} + K_p \beta = M_{y1}^e. \end{cases}$$

Если ДУС идеален, т.е. мгновенно реагирует на угл. скорость  $\dot{\alpha}$ , то

$$I_0 \ddot{\alpha} + D_\alpha \dot{\alpha} + H K_D \ddot{\alpha} + K_p K_D \dot{\alpha} = M_{y1}^e;$$

$$(I_0 + H K_D) \ddot{\alpha} + (D_\alpha + K_p K_D) \dot{\alpha} = M_{y1}^e.$$

Т.о., ур-е имеет 1-й порядок. Из этого следует, что при  $t \rightarrow \infty$  ступ. вход  $\dot{\alpha} \neq 0$ . Уменьшить его можно, повышая  $K_p$ .

При неидеальном ДУС нужно решить иск. с-му.

$$\Delta = \begin{vmatrix} -HS & (A_0 S^2 + D_\beta S + K_{np}) \\ (I_0 S^2 + D_\alpha S) & (HS + K_p) \end{vmatrix};$$

$$\Delta_\alpha = \begin{vmatrix} -M_x^b & (A_0 s^2 + D_\beta s + K_{np}) \\ M_{y1}^b & Hs + K_p \end{vmatrix}$$

$$\alpha(s) = \frac{-\Delta_\alpha}{-\Delta} = \frac{M_x^b (Hs + K_p) + M_{y1}^b (A_0 s^2 + D_\beta s + K_{np})}{(I_0 A_0 s^4 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s^3 + (D_\alpha D_\beta + H^2 + I_0 K_{np}) s^2 + (K_{np} D_\alpha + H K_p) s)}$$

X-е ур-е ноль генерируе на s:

$$I_0 A_0 s^3 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s^2 + (D_\alpha D_\beta + H^2 + I_0 K_{np}) s + (K_{np} D_\alpha + H K_p) = 0$$

По Гурвицу, для устойчивости, необходимо положит-ти всех коэфф, требуется

$$(I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) (H^2 + D_\alpha D_\beta + I_0 K_{np}) > > I_0 A_0 (H K_p + K_{np} D_\alpha)$$

Считаем, что ДУС внебран. Тогда можно регулировать только  $K_p$ :

$$K_p < \frac{(I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) \cdot (H^2 + D_\alpha D_\beta + I_0 K_{np}) - I_0 A_0 K_{np} D_\alpha}{H I_0 A_0}$$

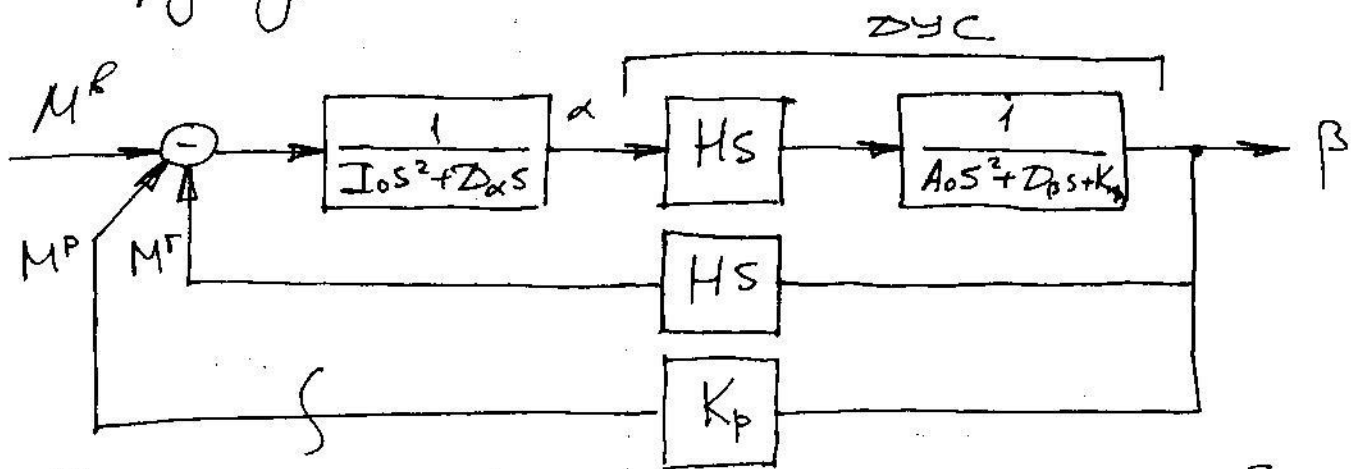
или

$$K_p < \frac{I_0 D_\beta (H^2 + D_\alpha D_\beta + I_0 K_{np}) + A_0 D_\alpha (H^2 + D_\alpha D_\beta)}{H I_0 A_0}$$

Сравнительно с условием стабильности, правая часть возросла, и это позволяет компенсировать

недостаток перемещения. Связи увеличением  $K_p$  без потери устойчивости.

Структурная схема:



[Самостоятельно написать  $W(s)$ ]

Если  $K_{np}$  и/или  $D_\beta$  велико, то каналом пер. момента можно пренебречь и

$$W(s) = \frac{1}{I_0 s^2 + D_\alpha s} \cdot Hs \cdot \frac{K_p}{A_0 s^2 + D_\beta s + K_{np}} =$$

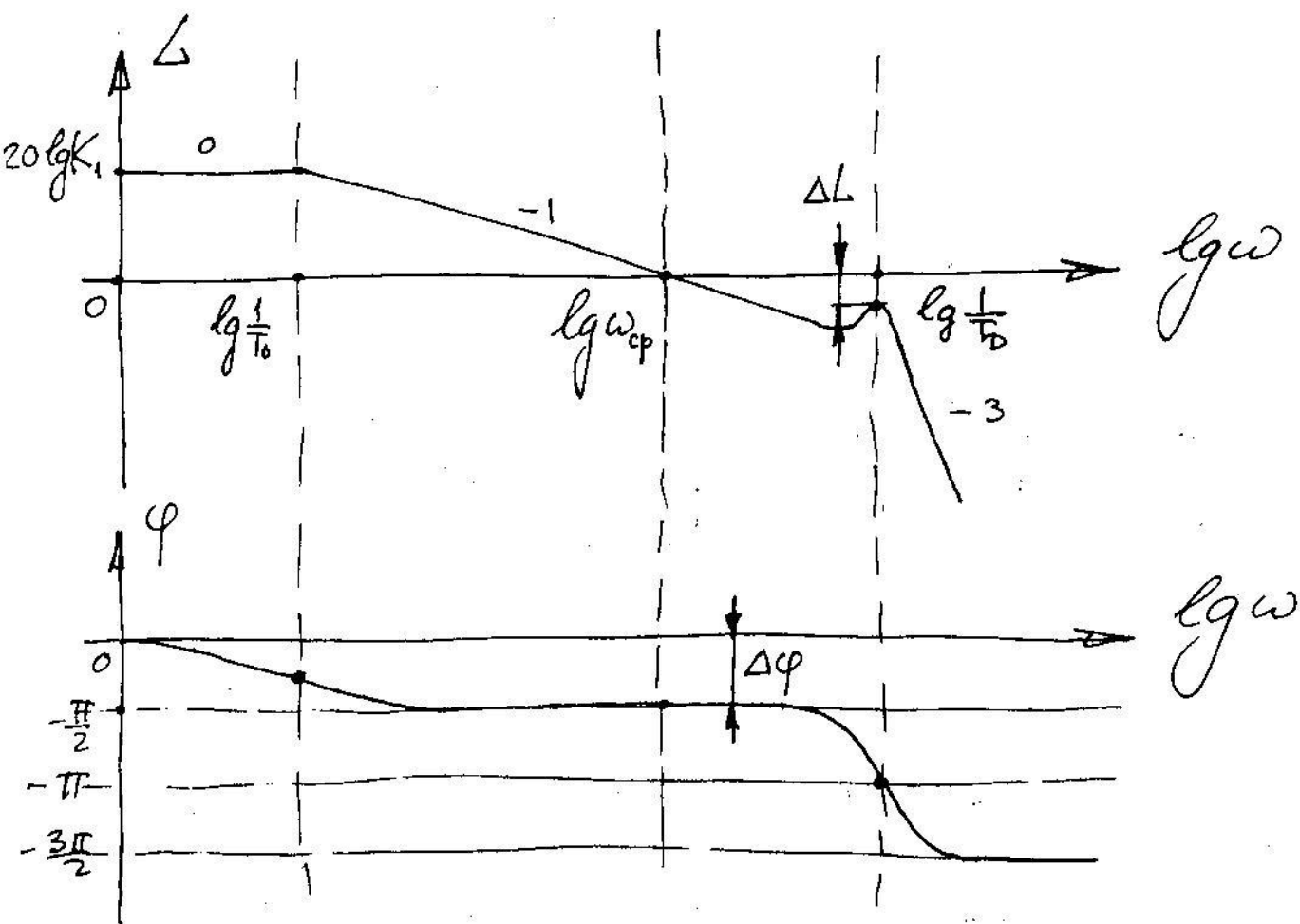
$$= \frac{HK_p}{D_\alpha K_{np}} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1} \cdot \frac{1}{T_D^2 s^2 + 2\zeta T_D s + 1}$$

Здесь

$$K_1 = \frac{HK_p}{D_\alpha K_{np}} = \frac{K_b K_p}{D_\alpha} \quad \text{— "жесткость";}$$

$T_0$  — постоянная времени инерционности;  
 $T_D, \zeta$  — постоянная времени и коэфф. демпфирования ДУС.

Платформа тяжелая, и  $T_0 \gg T_D$ .



Если шир. невысокий, то  $\Delta L$  достаточно; проблем с устойчивостью нет и при  $\omega = \omega_{ср}$ , ибо  $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ .

При аномально высоком  $K_p$  ЛАЧХ пересекает ось частот под наклоном  $-3$ . Такой стабилизатор можно сделать устойчивым, введя 2 дифф. звена, но этого вразу не потянем.

На лазерном шир. можно сделать аналогичный стабилизатор, но он окажется чисто индукторным. У волоконно-опт. и вибр. шир. суц. проблема полосы пропускания.

## Точность

$$\textcircled{1} \quad M_{y1}^b = \text{const}; \quad M_x^b = 0;$$

$$\dot{\alpha}_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{M_{y1}^b K_{np}}{(HK_p + K_{np} D_d) s} = \infty;$$

$$\ddot{\alpha}_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} s \alpha(s) = \frac{M_{y1}^b K_{np}}{HK_p + K_{np} D_d} \neq 0.$$

Мы установили важнейший недостаток стабилизатора с ДУС — наличие ухода  $\dot{\alpha}_{уст}$ . Поэтому ДУС обычно уст. на управляемых стабилизаторах. Величина ухода может достигать неск. °/мин.

Пусть канал разгрузки отключен:  $K_p = 0$

$$\dot{\alpha}_{уст} = \frac{M_{y1}^b K_{np}}{K_{np} D_d}$$

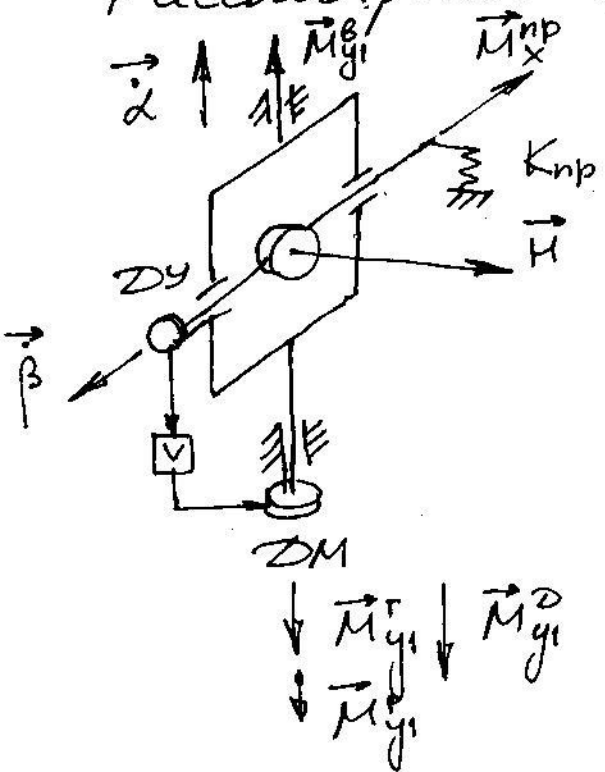
Если  $D_d = 0$ , то  $\dot{\alpha}_{уст} = \infty$ ;

$$\ddot{\alpha}_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 \alpha(s) = \frac{M_{y1}^b K_{np}}{H^2 + I_0 K_{np}} =$$

$$= \frac{M_{y1}^b}{\frac{H^2}{K_{np}} + I_0}.$$

Т.о., стабилизатор движется почти как невращающееся тело (для  $\kappa$ -рого  $\ddot{\alpha}_{уст} = \frac{M_{y1}^b}{I_0}$ ) при малом  $H$  и как трехстепенной гироскоп (для  $\kappa$ -рого  $\ddot{\alpha}_{уст} = 0$ ) при большом  $H$ .

Рассмотрим физику движения



по классической теории:  
 под действием  $\vec{M}_{y1}^b$  возникает скорость прецессии  $\vec{\beta}$ , инерц. момент  $\vec{M}_{y1}^r = \vec{H} \times \vec{\beta}$ , затем момент разгрузки  $\vec{M}_{y1}^p$ , так что прецессия происходит под действием

разности  $M_{y1}^b - M_{y1}^p$ .  
 Из-за  $\beta \neq 0$  возникает момент упругости  $\vec{M}_x^{np}$ ; под его действием происходит прецессия  $\vec{\alpha}$ , вызывающая демпф. момент  $\vec{M}^D = -D_{\alpha} \vec{\alpha}$ . Следовательно,

$$\vec{\beta} = \frac{M_{y1}^b - M_{y1}^p - D_{\alpha} \dot{\alpha}}{H}$$

Прецессия прекращается, когда

$$M_{y1}^b = M_{y1}^p + D_{\alpha} \dot{\alpha}_{уст} = K_p \beta_{уст} + D_{\alpha} \dot{\alpha}_{уст}$$

Для оси  $x$  можем записать:

$$K_{np} \beta_{уст} = H \dot{\alpha}_{уст}; \quad \beta_{уст} = \frac{H}{K_{np}} \dot{\alpha}_{уст} = K_D \dot{\alpha}_{уст}$$

Тогда

$$M_{y1}^b = K_p K_D \dot{\alpha}_{уст} + D_{\alpha} \dot{\alpha}_{уст} = (K_p K_D + D_{\alpha}) \dot{\alpha}_{уст}$$

$$\dot{\alpha}_{уст} = \frac{M_{y1}^b}{K_p K_D + D_{\alpha}} = \frac{M_{y1}^b}{K_p \frac{H}{K_{np}} + D_{\alpha}} = \frac{M_{y1}^b K_{np}}{H K_p + K_{np} D_{\alpha}}$$



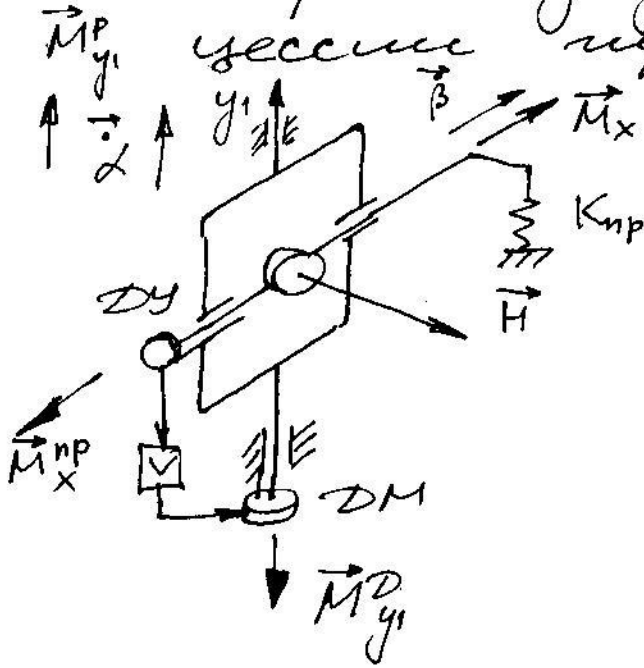
②  $M_{y1}^e = 0; M_x^e = \text{const.}$

$\alpha_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \infty;$

$\dot{\alpha}_{уст} = \frac{M_x^e K_p}{HK_p + D_\alpha K_{np}} \neq 0$

При  $D_\alpha = 0$   $\dot{\alpha}_{уст} = \frac{M_x^e}{H}$ , т.е.

скорость ухода есть скорость прецессии нераскона.



Рассмотрим функцию движения. Возникает прецессия

$\dot{\alpha} = \frac{M_x^e}{H}$

демпф. момент

$\vec{M}_{y1}^D = -D_\alpha \dot{\alpha};$

прецессия

$\beta = \frac{M_{y1}^D}{H};$

по накоплению угла  $\beta$  — момент разгрузки  $M_{y1}^p$  и момент упругости  $M_x^{np}$ , так что скорость прецессии становится — а равной.

$\dot{\alpha}_{уст} = \frac{M_x^e - M_x^{np}}{H}$

Отсюда

$M_x^e = H \dot{\alpha}_{уст} + M_x^{np} = H \dot{\alpha}_{уст} + K_{np} \beta_{уст}$

Для оси  $y_1$  можем записать:

$D_\alpha \dot{\alpha}_{уст} = M_{y1}^p = K_p \beta_{уст};$



$$\beta_{уст} = \frac{D_\alpha}{K_p} \cdot \dot{\alpha}_{уст}$$

Тогда

$$M_x^e = H \ddot{\alpha}_{уст} + K_{пр} \frac{D_\alpha}{K_p} \dot{\alpha}_{уст} =$$

$$= \left( H + \frac{K_{пр} D_\alpha}{K_p} \right) \dot{\alpha}_{уст};$$

$$\dot{\alpha}_{уст} = \frac{M_x^e}{H + \frac{K_{пр} D_\alpha}{K_p}} = \frac{M_x^e K_p}{H K_p + D_\alpha K_{пр}}$$

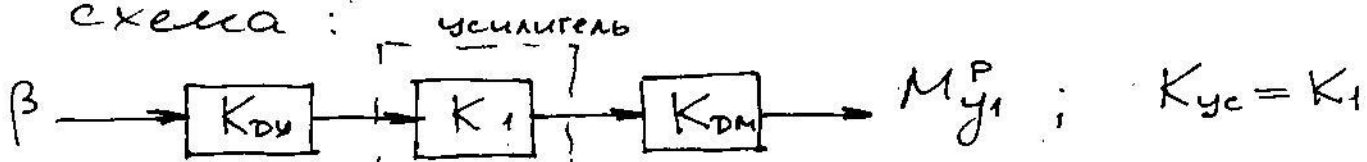
Есть опасность попадания в зону нечувствительности  $\beta_{уст}$ , т.е. может возникнуть вредный момент по той же оси, угол  $\beta = 0$ , канал разгрузки не замыкается, стабилизируем нет.

Обратный эффект возникает при малом "нулевого сигнала"  $\beta_{уст}$ , когда канал разгрузки замыкается в отсутствие возмущающего момента. Этот эффект также приводит к уходу гиросtabilизатора.

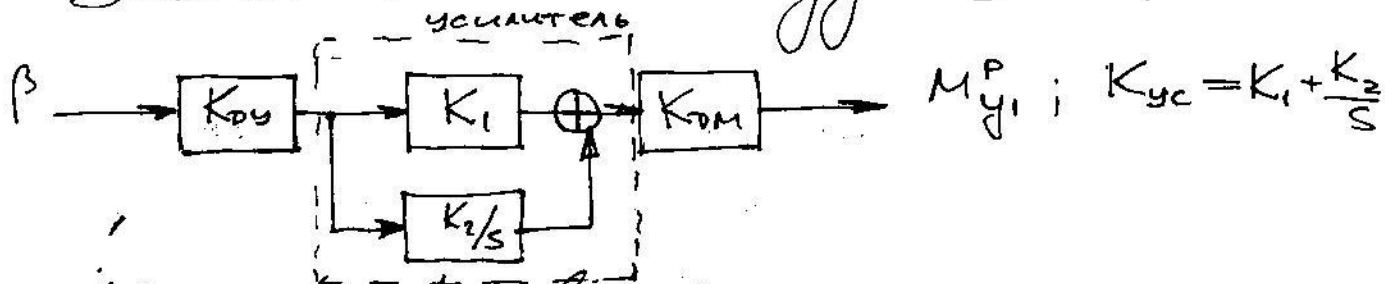
# Гиростабилизатор с ДУС с интегратором в канале разгрузки

До сих пор рассматривалась

схема:



Заменяй её следующей:



Интегратор в прямой цепи, включенный послед-но, был бы источником проблем с устойчивостью.

$$W_1(s) = K_{DY} \cdot \left( K_1 + \frac{K_2}{s} \right) \cdot K_{DM} =$$

$$= \frac{K_{DY} K_{DM} K_2}{s} \left( \frac{K_1 s + 1}{K_2} \right) =$$

$$= \frac{K_{DY} K_1 K_{DM} K_2}{K_1 s} \left( \frac{K_1 s + 1}{K_2} \right)$$

Обозначим  $T = \frac{K_1}{K_2}$ . Тогда

$$W_1(s) = \frac{K_p (Ts + 1)}{Ts}$$

Пусть  $M_x^0 = 0$ . Тогда

$$\alpha(s) = \frac{M_{y_1}^0 (A_0 s^2 + D_\beta s + K_{np})}{\left( I_0 A_0 s^4 + (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) s^3 + (H^2 + D_\alpha D_\beta + I_0 K_{np}) s^2 + \left( H K_p \frac{Ts + 1}{Ts} + D_\alpha K_{np} \right) s \right)}$$

Преобразуем:

$$\left( HK_p \frac{Ts+1}{Ts} + D_\alpha K_{np} \right) s =$$

$$= (HK_p + D_\alpha K_{np}) s + \frac{HK_p}{T}$$

Получим:

$$\alpha_{уст} = \lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \frac{M_{y1} K_{np}}{HK_p} T \neq \infty$$

Так ошибка по скорости мы пере-  
вели в ошибку по положению.  
В большинстве случаев это пре-  
имущество.

Если всё же мы включим  
интегратор послед-но, то вместо

$$\left( HK_p \frac{Ts+1}{Ts} + D_\alpha K_{np} \right) s \text{ имеем:}$$

$$\left( HK_p \cdot \frac{1}{Ts} + D_\alpha K_{np} \right) s =$$

$$= D_\alpha K_{np} s + \frac{HK_p}{T}$$

Точность опр. свободными членами  
и т.о., остаётся прежней. Од-  
нако демпфирование уменьшается.  
Посмотрим, на что это ко-  
влияет, записав х-е ур-е:

$$\frac{I_0 A_0}{a_0} s^4 + \frac{(I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha)}{a_1} s^3 + \frac{(H^2 + D_\alpha D_\beta + I_0 K_{np})}{a_2} s^2 + \frac{(D_\alpha K_{np} + H K_p)}{a_3} s + \frac{H K_p}{a_4} = 0.$$

Пусть ДУС идеален:  $A_0 = 0$ ;  $D_\beta = 0$ .

Тогда получим ур-е 2-го порядка

$$(H^2 + I_0 K_{np}) s^2 + (D_\alpha K_{np} + H K_p) s + \frac{H K_p}{T} = 0.$$

или

$$s^2 + 2\zeta \omega_0 s + \omega_0^2 = 0, \quad \text{где}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{H K_p}{T(H^2 + I_0 K_{np})}};$$

$$\zeta = \frac{(D_\alpha K_{np} + H K_p) \sqrt{T(H^2 + I_0 K_{np})}}{(H^2 + I_0 K_{np}) \cdot 2\sqrt{H K_p}}.$$

Если  $K_2$  увеличивается, то  $T = \frac{K_1}{K_2}$  и  $\zeta$  уменьшаются, качество регулирования падает. Если оставить только интегратор, то, как показано выше, слагаемое  $H K_p$  исчезает, и качество регулирования оказывается ещё хуже.

Пусть ДУС неидеален:  $A_0 \neq 0$ ;  $D_\beta \neq 0$ . Тогда для устойчивости требуется:

$$a_i > 0; \quad i = \overline{0, 4};$$

$$a_1(a_2 a_3 - a_1 a_4) > a_3^2 a_0.$$

Второе условие перепишем в виде

$$(I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) \cdot \left[ (H^2 + D_\alpha D_\beta + I_0 K_{np}) \right.$$

$$\left. \cdot (D_\alpha K_{np} + H K_p) - (I_0 D_\beta + A_0 D_\alpha) \cdot \frac{H K_p}{T} \right] >$$

$$> (D_\alpha K_{np} + H K_p)^2 \cdot I_0 A_0.$$

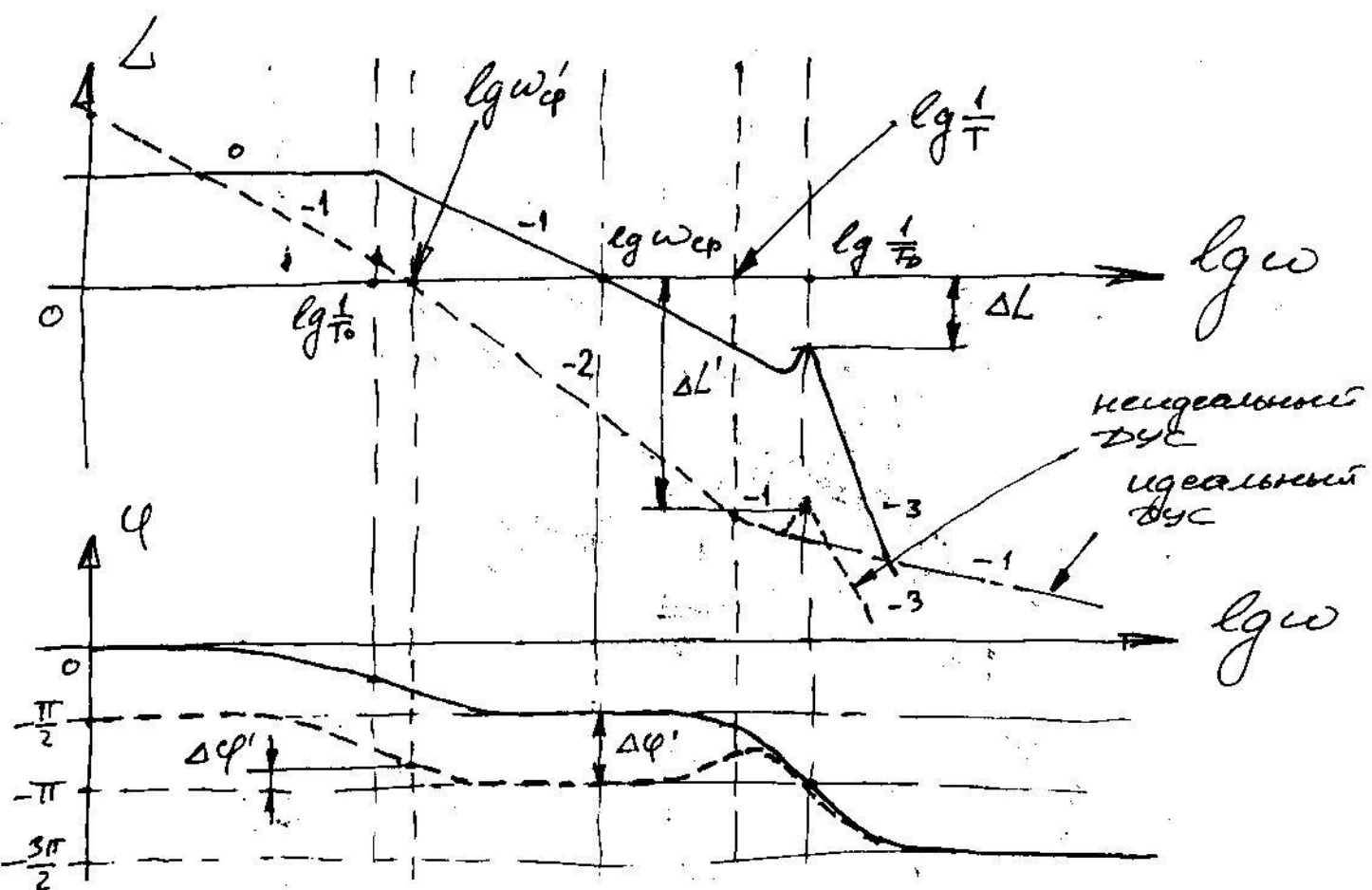
Величина  $T$  входит только в выражение с  $\frac{H K_p}{T}$ , перед  $K_p$  стоит знак "-", Если  $K_p$  увеличивать, то  $T$  уменьшается; это выражение становится больше по модулю, левая часть пер-ва уменьшается, устойчивость ухудшается.

Пусть исп. только интегратор. Тогда прежняя передат. f-ция

$$W(s) = \frac{H K_p}{D_\alpha K_{np}} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1} \cdot \frac{1}{T_D^2 s^2 + 2\zeta T_D s + 1}$$

а новая

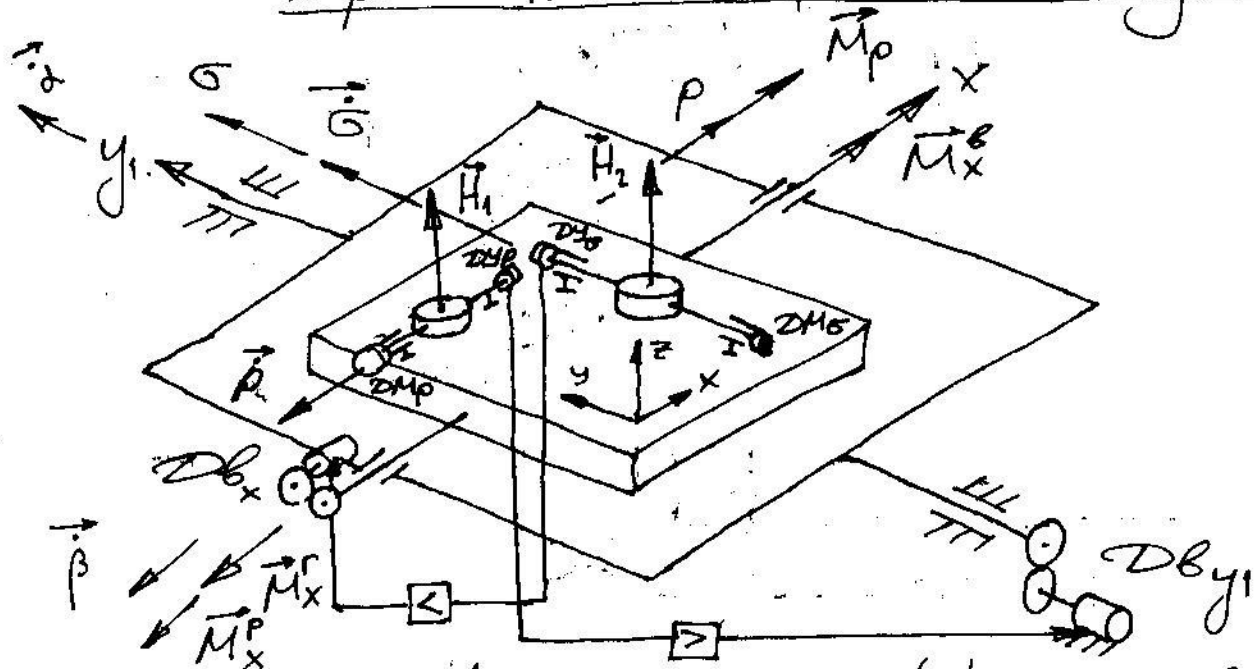
$$W'(s) = \frac{H K_p}{D_\alpha K_{np}} \cdot \frac{T s + 1}{T s} \cdot \frac{1}{T_0 s + 1} \cdot \frac{1}{T_D^2 s^2 + 2\zeta T_D s + 1}$$



$\Delta L' > \Delta L$ , т.е. запас по амплитуде нет, однако  $\Delta \varphi' \ll \Delta \varphi$ .  
 Чтобы запас по фазе увеличить, увеличивают  $K_p$ , сдвигая всю ЛАЧХ вверх, либо вводят коррекцию, увеличивая  $\omega_{ср}$ .

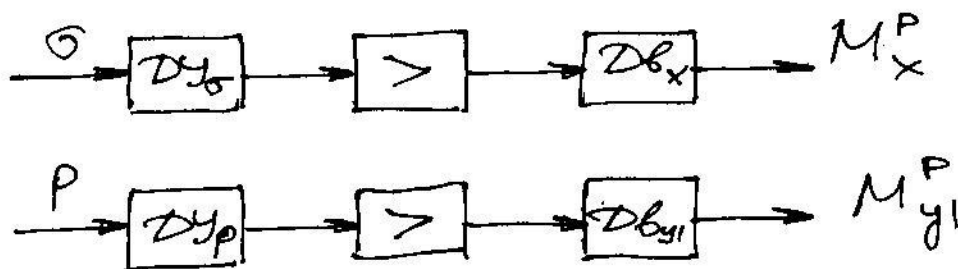
Двухосные простабильзаторы  
 имеют 2 оси стабилизации и 1 стабилизируемую ось, 1-ю ось стабилизации. Стабилизируемая ось

Двухосный шлюбовый гиросtabilизатор  
с гироскопами, оси прецессии  
к-рых // -ые оси стабилизации.



Стабилизатор есть платформа в кардановом подвесе с установленными на ней 2 гироскопами, уст. так, что оси прецессии // -ые оси стабилизации, и 2 с-ми разгрузки.

$Ox, Oy_1$  - оси стабилизации;  
 $Oz$  - стабилизируемая ось



## Принцип действия

- 1) Пусть действует возмущ. момент  $M_x^e$ . Возникает прецессия

$$\dot{\sigma} = \frac{M_x^e}{H_z}$$

и фр. момент

$$M_x^r = H_z \dot{\sigma} = M_x^e,$$

уравновешивающий в первое возникновение возмущ. момент.

- 2) После возникновения угла  $\sigma > 0$  создается момент разгрузки

$$M_x^p = K_p \sigma.$$

Прецессия происходит со скоростью

$$\dot{\sigma} = \frac{M_x^e - M_x^p}{H_z \cos \sigma}$$

Гир. момент окажется равным

$$M_x^r = H_z \cos \sigma \cdot \dot{\sigma}$$

он вместе с моментом разгрузки уравновешивает возмущ. момент.

- 3) При нек-ром  $\sigma = \sigma^*$  момент разгрузки

$$M_x^p = K_p \sigma^*$$

целиком уравновешивает возмущ. момент. Прецессии и фр. момента нет



Уравнение осцил. поворотел момента (мапр.,  $\vec{M}_p$ ) на  $\Delta M$  нероскона, к-рый будет прецессировать, увлекая за собой платформу.

Самостоятельно рассмотрим канал  $\rho$ . Составим ур-я двигателя по принципу Даламбера:

$$\begin{cases} y_1: & -I_{y_1} \ddot{\alpha} - D_{\alpha} \dot{\alpha} - H_1 (\dot{\rho} + \dot{\beta}) - K_p \rho + M_{y_1}^e = 0; \\ \rho: & A_{01} (\ddot{\rho} + \ddot{\beta}) + D_{\rho} \dot{\rho} - H_1 \dot{\alpha} + M_{\rho}^e = 0; \\ x: & I_x \ddot{\beta} + D_{\beta} \dot{\beta} - H_2 (\dot{\sigma} + \dot{\alpha}) - K_p \sigma + M_x^e = 0; \\ \sigma: & -A_{02} (\ddot{\sigma} + \ddot{\alpha}) - D_{\sigma} \dot{\sigma} - H_2 \dot{\beta} + M_{\sigma}^e = 0 \end{cases}$$

Обычно  $\rho, \sigma > \alpha, \beta$ ;  $\dot{\rho}, \dot{\sigma} > \dot{\alpha}, \dot{\beta}$ .

Поэтому ур-я можно упростить:

$$\begin{cases} I_{y_1} \ddot{\alpha} + D_{\alpha} \dot{\alpha} + H_1 \dot{\rho} + K_p \rho = M_{y_1}^e; \\ A_{01} \ddot{\rho} + D_{\rho} \dot{\rho} - H_1 \dot{\alpha} = -M_{\rho}^e; \\ I_x \ddot{\beta} + D_{\beta} \dot{\beta} - H_2 \dot{\sigma} - K_p \sigma = -M_x^e; \\ A_{02} \ddot{\sigma} + D_{\sigma} \dot{\sigma} + H_2 \dot{\beta} = M_{\sigma}^e. \end{cases}$$

С-ма распалась на две: первая содержит неизвестные  $\alpha, \rho$ ; вторая — неизвестные  $\beta, \sigma$ . Т.о.; синтез каналов разгрузки можно вести независимо, а затем при необходимости учесть связь каналов в соотв с точными ур-ями.

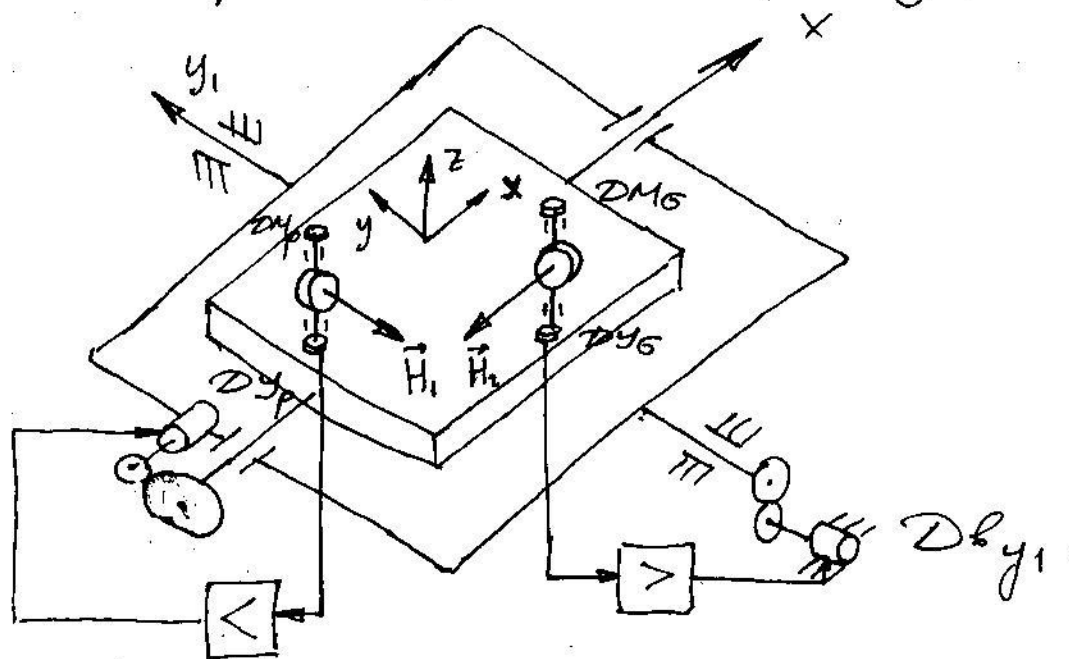
## Точность

Оси  $Ox$  и  $Oy$ , явл. осями стабилиза-  
ции. Вращение основания  $OM$ .  
этих осей ни к каким существен-  
ным погрешностям, а малыми  
погрешностям одноосного  
стабилизатора при вращении  
вокруг  $Ox$ , не приводит. Одна-  
ко вращение вокруг оси  $Oz$ , как  
и раньше, приводит к фазам:

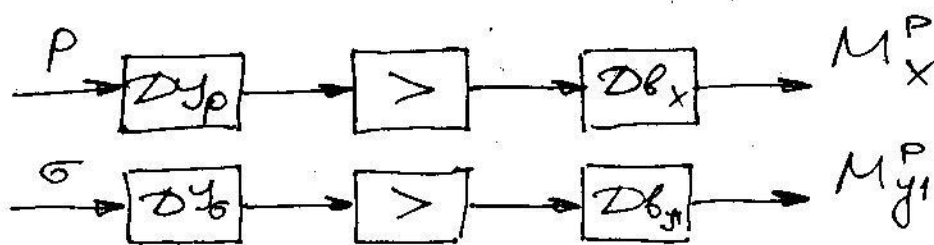
$$\dot{\alpha} = \omega_{z0} \operatorname{tg} \rho; \quad \dot{\beta} = \omega_{z0} \operatorname{tg} \sigma.$$

Можно установить по каждому  
каналу два гироскопа во  
спаривании, но лучше др. спо-  
соб.

Двухосный силовой гиросtabilизатор  
с гироскопами, оси прецессии  
к-рых || -ны стабилизиру. оси



Гиросtabilизатор есть платформа в двухосном кардановом подвесе с угл. на ней 2 2-степенными гироскопами таким образом, что их оси прецессии 1-ные осей стабилизации (11-ные стабилизир. оси), и 2 с-ые разгрузки.



### Принцип действия

Под действием момента  $M_{y1}^в$  возникнет прецессия  $\dot{\sigma}$ , гироскопический момент  $M_{y1}^г$ , уравновешивающий внеш. момент. По закону угла  $\sigma$  возникнет момент разгрузки  $M_{y1}^p = K_p \sigma$ , уравновешивающий внеш. момент, содействуя гироскопическому.

### Точность

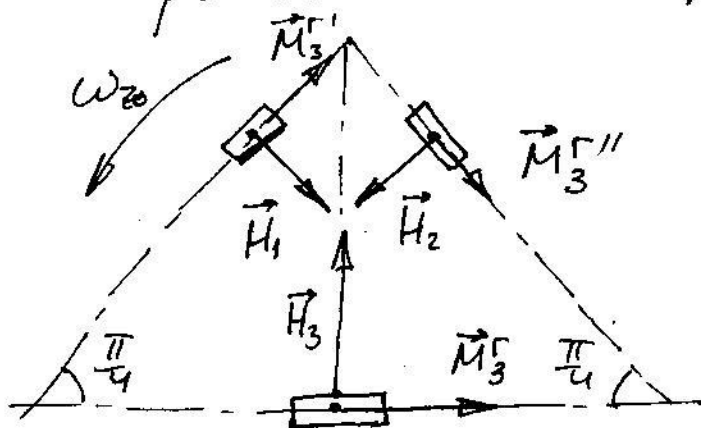
Вращение основания вокруг оси OZ приводит к появлению ленточных сигналов на  $D_{\sigma_\sigma}$  и  $D_{\sigma_p}$ , моментов "раз-

грузки", прецессит под действием этих моментов так, что гироскопы следуют за основанием;

$$K_p \sigma = H \omega_{z0};$$

$$\sigma = \frac{H \omega_{z0}}{K_p}; \quad H_1 = H_2 = H.$$

Как было сказано выше, требуется более мощный двигатель для преодоления гироскопического момента. Убавиться от этого можно установкой на платформе 1-степенного гироскопа с  $H_3 = H \cdot \sqrt{2}$ .



Гироскопический момент  $M_3^{\Gamma} = H_3 \omega_{z0}$  будет передаваться как внешний на гироскопы 1 и 2  $\pi/4$  проекции  $M_3^{\Gamma'}$  и  $M_3^{\Gamma''}$ , вызывая прецессию

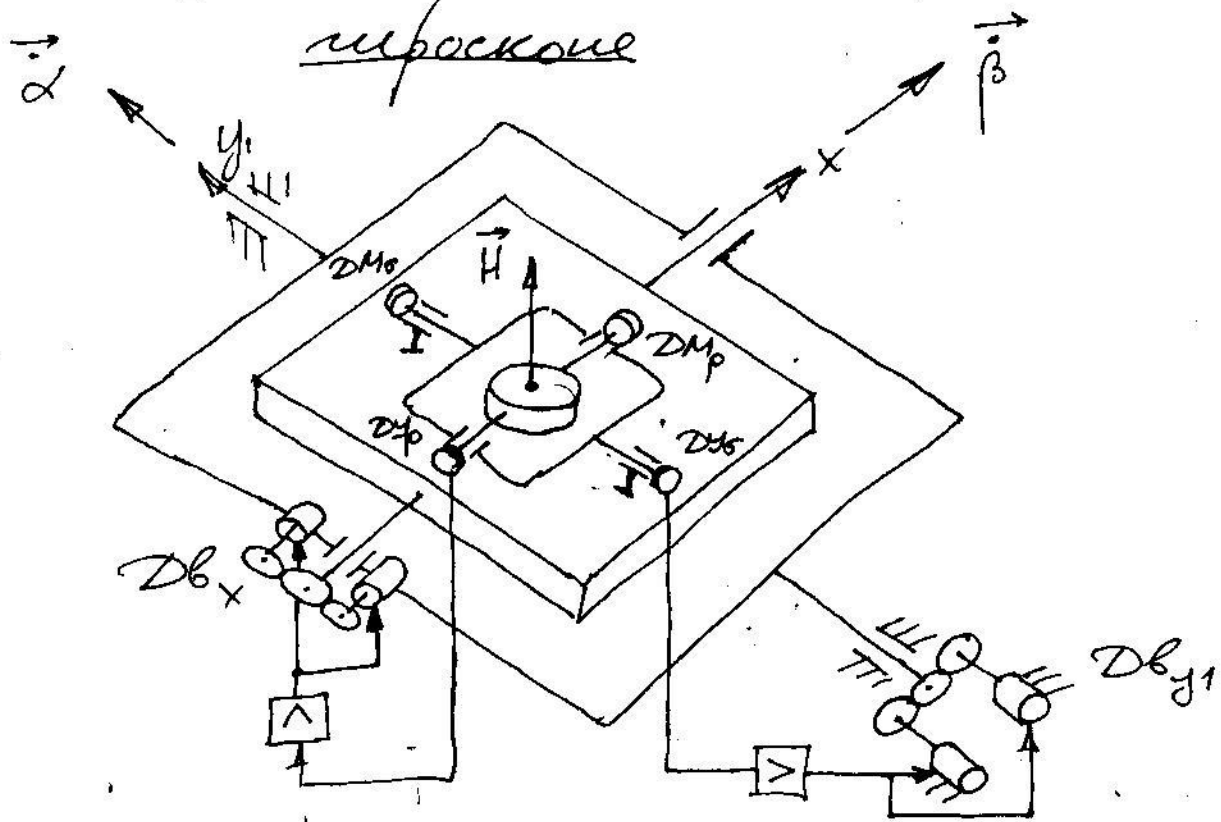
$$\dot{\sigma} = \frac{M_3^{\Gamma''}}{H_2} = \frac{H_3 \omega_{z0} \cos \frac{\pi}{4}}{H_2} = \frac{H \cdot \sqrt{2} \cdot \omega_{z0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}}{H} = \omega_{z0};$$

$$\dot{\rho} = \frac{M_3^{\Gamma'}}{H_1} = \frac{H_3 \omega_{z0} \sin \frac{\pi}{4}}{H_1} = \frac{H \cdot \sqrt{2} \cdot \omega_{z0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}}{H} = \omega_{z0};$$

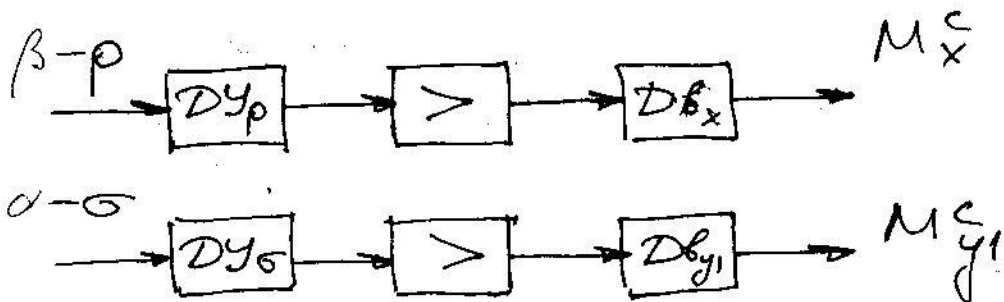
происходят без участия с-ин разгрузки.  
Ур-я движения

получить самостоятельно.

Двухосный индикаторный  
микростабилизатор  
на 3-степенном  
микроскопе



Стабилизатор есть платформа в 2-осном кардановом подвесе с уст. на ней 3-степенным микроскопом так, что оси чувствит-ти // -ные осям стабилизации, и 2-канальная система стабилизации:

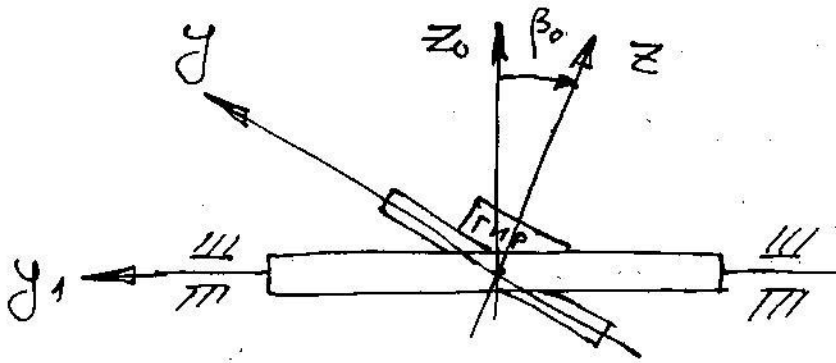


## Ур-е движения

$$\begin{cases} -I_{y_1} \ddot{\alpha} - D_{\alpha} \dot{\alpha} - K_c (\alpha - \sigma) + M_{y_1}^e = 0; \\ -I_{x_1} \ddot{\beta} - D_{\beta} \dot{\beta} - K_c (\beta - \rho) + M_{x_1}^e = 0. \end{cases}$$

Каналы независимы и синтезируются отдельно.

## Взаимное влияние каналов



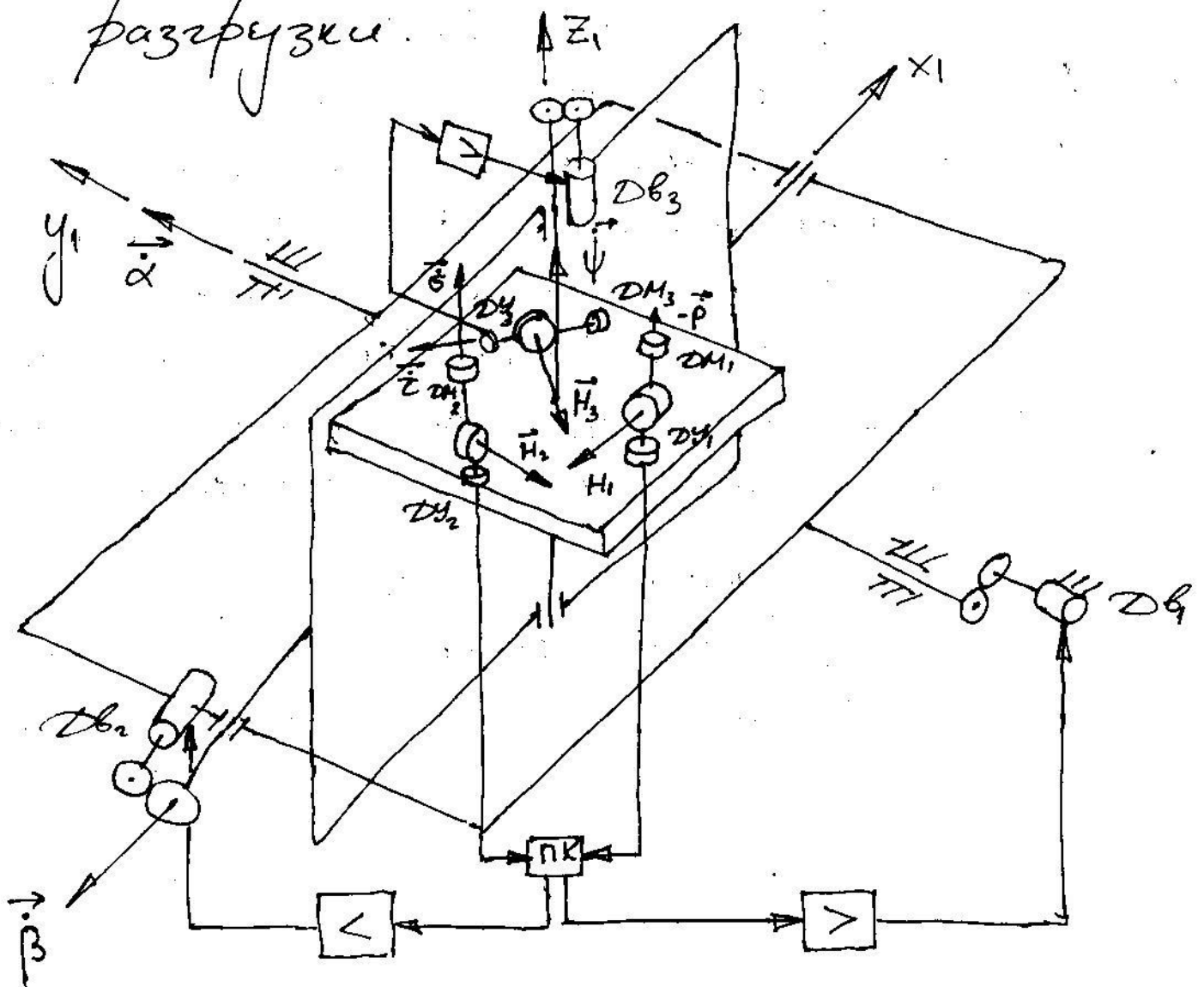
$$\begin{aligned} 1) & I_0 = A_2 + B_1 \cos^2 \beta_0 + C_1 \sin^2 \beta_0. \\ 2) & M_{y_1}^e = K_c \alpha \cos \beta_0 = K_c \cos \beta_0 \alpha = K_c' \alpha. \end{aligned}$$

Жесткость канала стабилизации уменьшилась:  $K_c' < K_c$ . Следовательно, возросла статич. погрешность; ЛАЧХ смещается влево; ситуация с устойчивостью критично не изменилась.

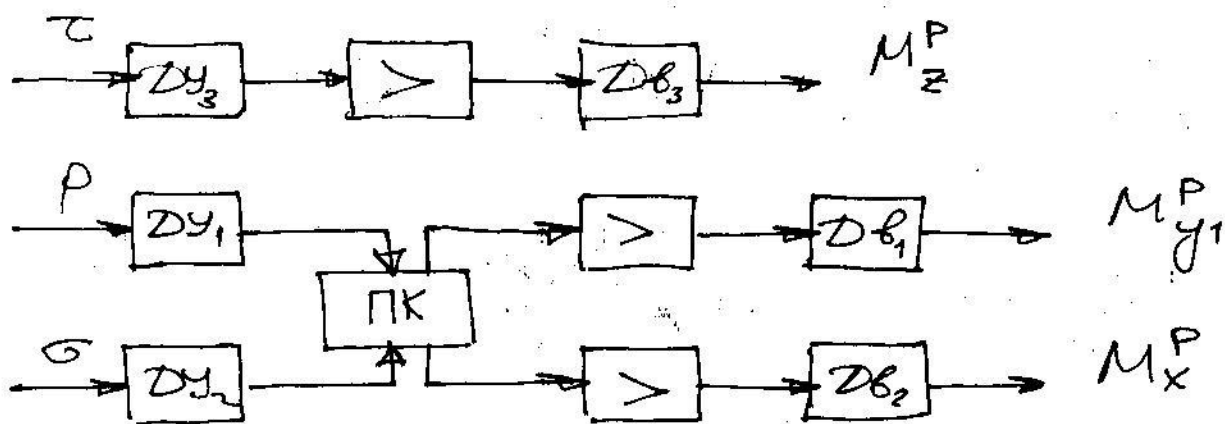
Для устранения этого эффекта можно уст. гироскоп не на матрицу, а на внеш. рамку.

Трёхосный микростабилизатор  
 Связь объекта с основанием отсутствует; точность повышается.  
 Принцип стабилизации и чувствит. Эл-ты прежнее; воздушные конденсаторы прик-  
 шипов.

Трёхосный микростабилизатор  
 есть платформа в 3-степенном кардановом подвесе с 3 2-сте-  
 пенными микроскопами и 3 с-м  
 разгрузки.







$$M_x^P = -K_p (\sigma \cos \psi + \rho \sin \psi) ;$$

$$M_{y1}^P = -K_p (\rho \cos \psi - \sigma \sin \psi) .$$

### Принцип действия

#### Канал 3

Под действием возмущ. момента  $M_{\tau}^{\sigma}$  возникает прецессия

$$\dot{\tau} = \frac{M_{\tau}^{\sigma}}{H_3}$$

и угл. момента  $M_{\tau}^{\tau} = H_3 \dot{\tau} = M_{\tau}^{\sigma}$ .

То накопленный угол  $\tau = \int_0^t \dot{\tau} dt$  будет создан момент разгрузки

$$M_{\tau}^P = -K_{p3} \tau = -K_{p3} \int_0^t \frac{M_{\tau}^{\sigma}}{H_3} dt =$$

$$= - \frac{K_{p3} t}{H_3} \cdot M_{\tau}^{\sigma} ,$$

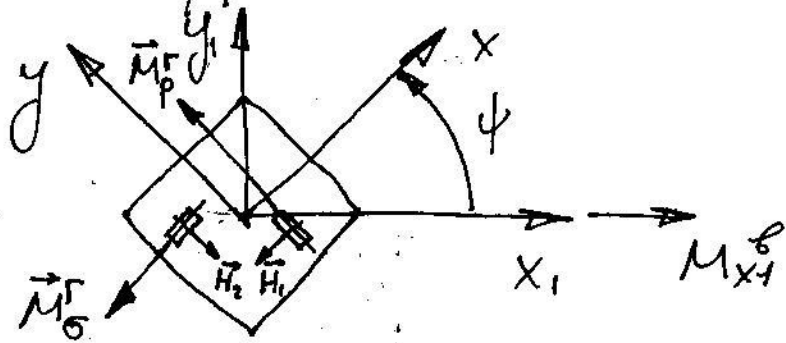
к-рый вместе с угл. моментом будет уравновешивать внеш. момент.



## Канал 2, $\psi \neq 0$

При  $\rho = \sigma = 0$

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \frac{M_{x_1}^{\delta} \sin \psi}{H_1}; \\ \dot{\sigma} = \frac{M_{x_1}^{\delta} \cos \psi}{H_2} \end{cases}$$



Возникает 2 гир. момента

$$\begin{cases} M_{\rho}^{\Gamma} = H_1 \dot{\rho} = M_{x_1}^{\delta} \sin \psi; \\ M_{\sigma}^{\Gamma} = H_2 \dot{\sigma} = M_{x_1}^{\delta} \cos \psi; \end{cases}$$

или, в проекциях на оси  $Ox_1, Oy_1$ :

$$\begin{cases} M_{x_1}^{\Gamma} = M_{x_1}^{\delta} \cos^2 \psi + M_{x_1}^{\delta} \sin^2 \psi = M_{x_1}^{\delta}; \\ M_{y_1}^{\Gamma} = M_{x_1}^{\delta} \cos \psi \sin \psi - M_{x_1}^{\delta} \sin \psi \cos \psi = 0 \end{cases}$$

$\nabla \sigma$ , внеш. моменты уравновешиваются плоскостными моментами независимо от угла  $\psi$ .

При  $\rho = \int_0^{t_1} \dot{\rho} dt \neq 0$ ;  $\sigma = \int_0^{t_1} \dot{\sigma} dt \neq 0$

возникает момент разгрузки

$$M_{x_1}^P = -K_P \left( \int_0^{t_1} \frac{M_{x_1}^{\delta} \cos \psi}{H_2} dt \cdot \cos \psi + \int_0^{t_1} \frac{M_{x_1}^{\delta} \sin \psi}{H_1} dt \cdot \sin \psi \right).$$

При  $\psi = \text{const}$ ,  $M_{x_1}^{\delta} = \text{const}$ ,  $H_1 = H_2 = H$

$$M_{x_1}^P = -K_P \frac{t_1}{H} M_{x_1}^{\delta} (\cos^2 \psi + \sin^2 \psi) = -\frac{K_P t_1}{H} M_{x_1}^{\delta}$$

Момент, т.е. же, как и гир., не зависит от  $\psi$

ЗАНАВЕС