



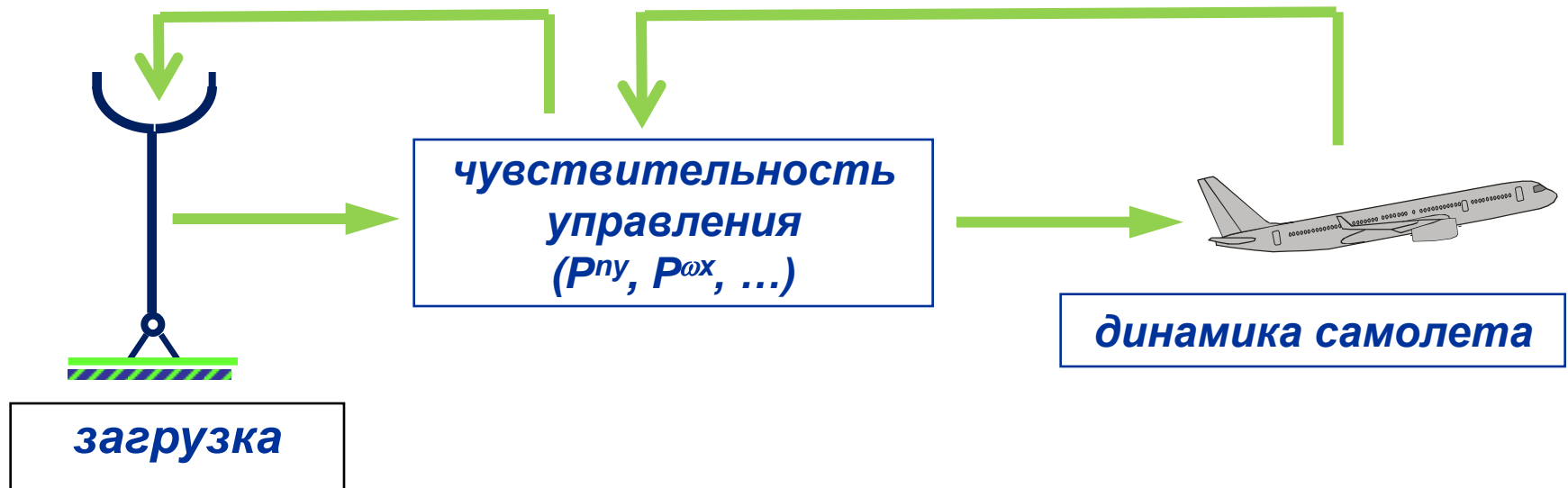
Семинар «Роль моделей летчика в решении практических задач динамики полета и управляемости самолета»  
ЦАГИ, 14.04.2017

## ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГРУЗКИ РЫЧАГА УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ЛЕТЧИКА

*Зайчик Л.Е., Гринев К.Н., Яшин Ю.П., Сорокин С.А.*



## Постановка задачи

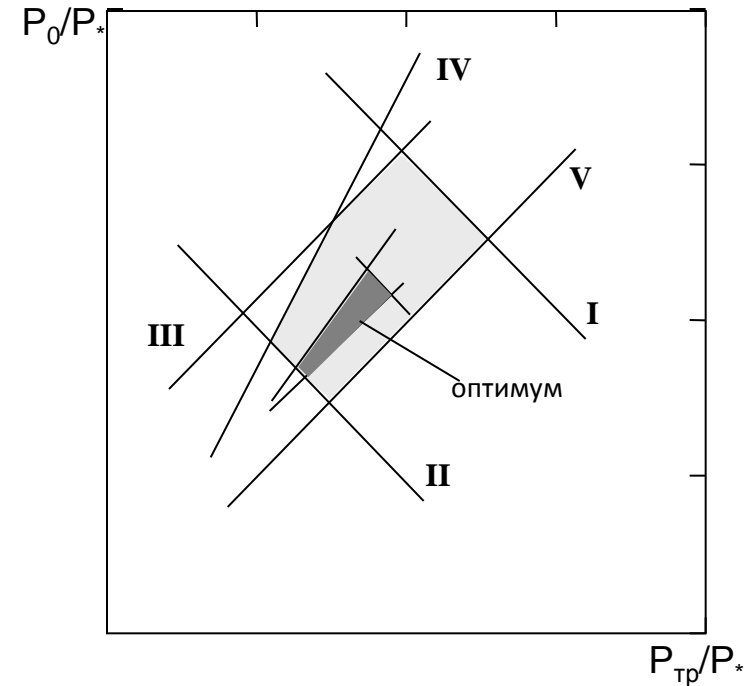
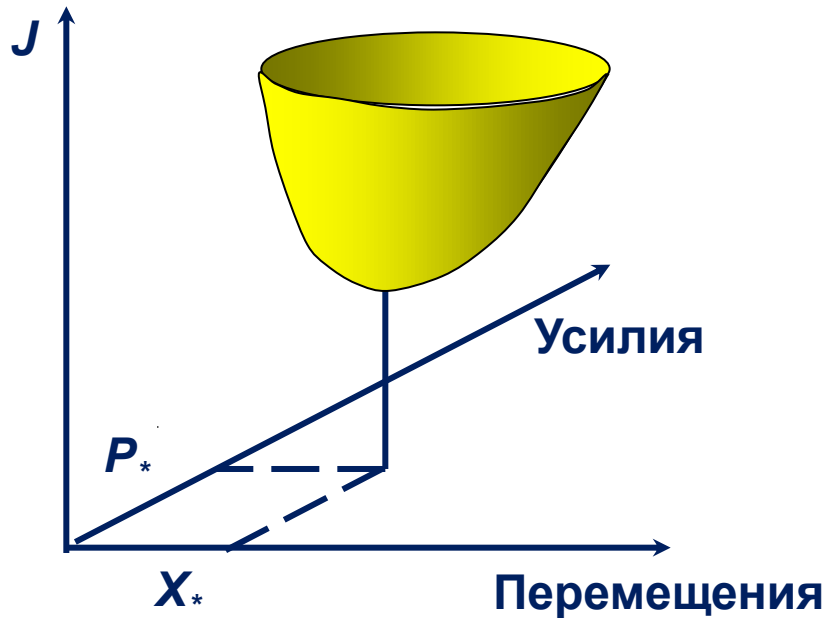


“...the proper setting of controlled element gain has become a non-trivial development aspect on every new aircraft that introduces a new inceptor. In the absence of an extensive background of data for these there is no basis other than experiment to determine the optimum gains.”

*D.McRuer*

## Теоретический подход к выбору оптимальных характеристик чувствительности и загрузки рычагов управления \*)

$$\min_{P^x, P^{ny} \dots} J(\bar{P} - P_*, \bar{X} - X_*, \Delta - \Delta_*, t_r - t_{r*})$$



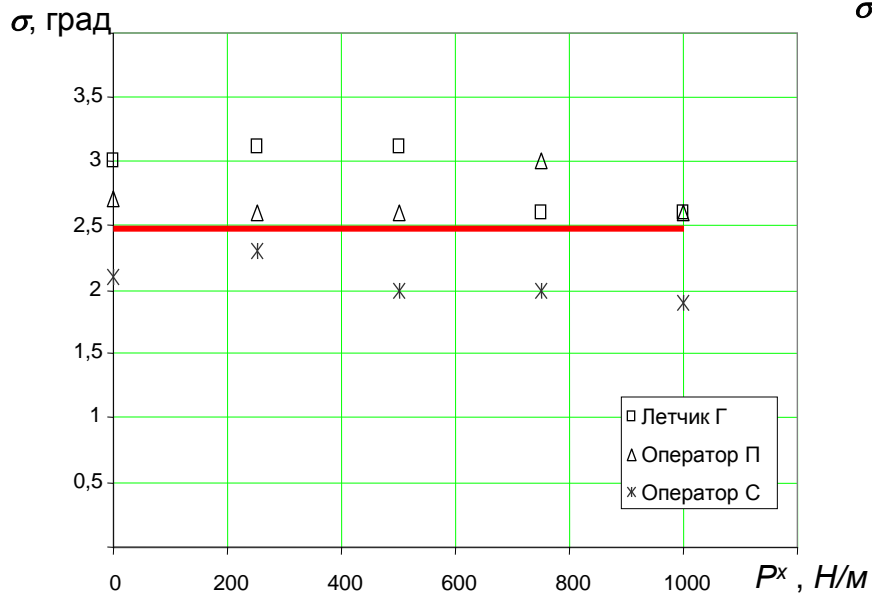
\*) Зайчик Л.Е., Родченко В.В., "Оценка оптимальных характеристик загрузки рычагов управления самолетом", *Ученые записки ЦАГИ*, том XXI, №2, 1990 г.

Rodchenko, V.V., Zaichik, L.E., and Yashin Y.P. "Similarity criteria for manipulator loading and control sensitivity characteristics", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 21, No 2, 1998, pp. 307-314.

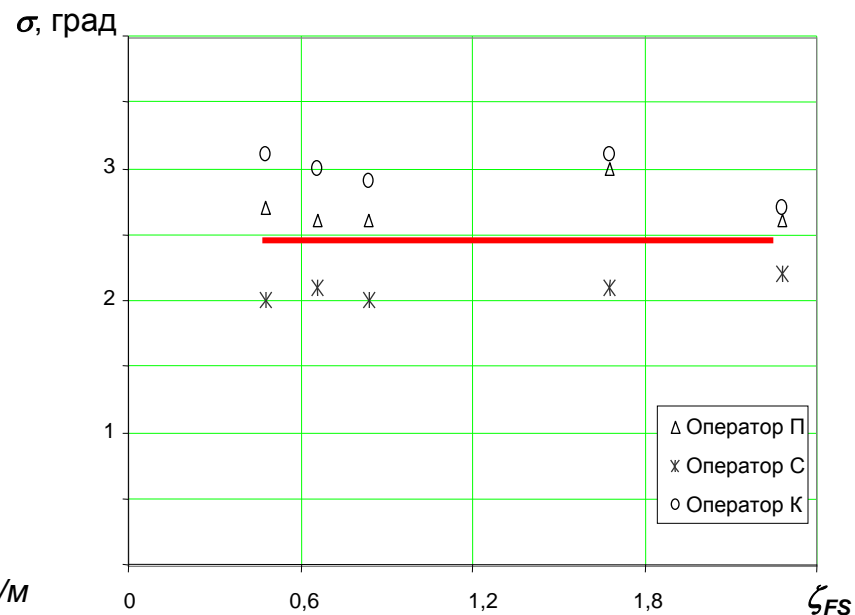
## Объективные параметры оптимальности:

- Точность пилотирования
- Модели летчика

### Влияние $P^x$



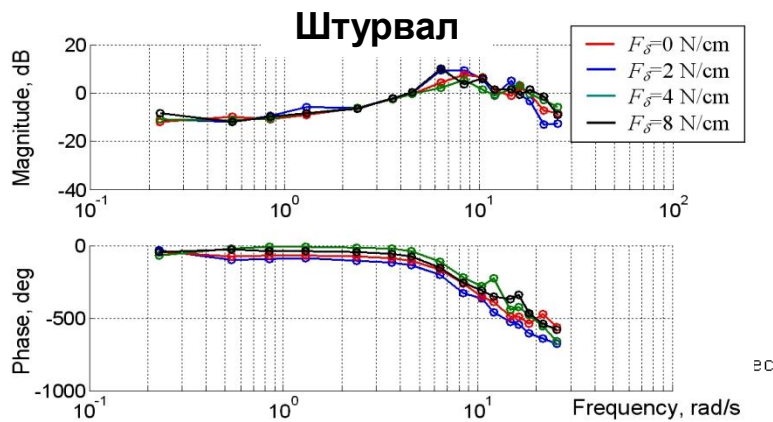
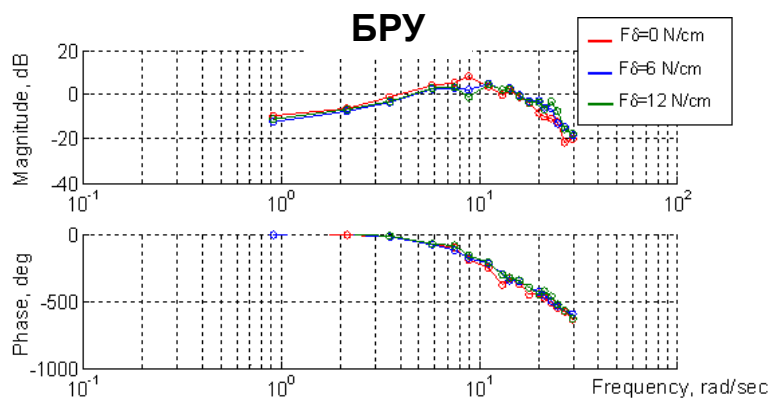
### Влияние $P^{\dot{x}}$



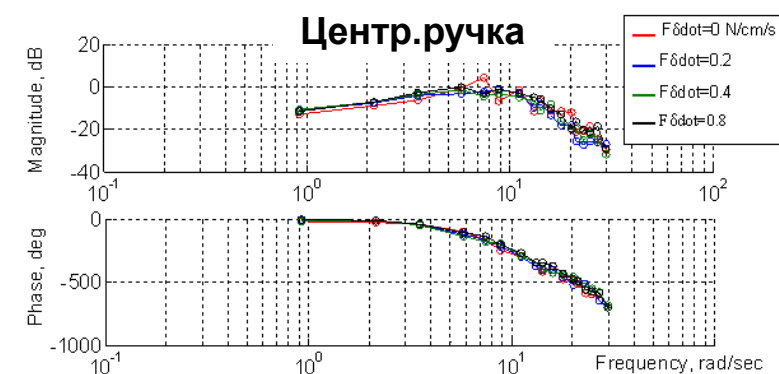
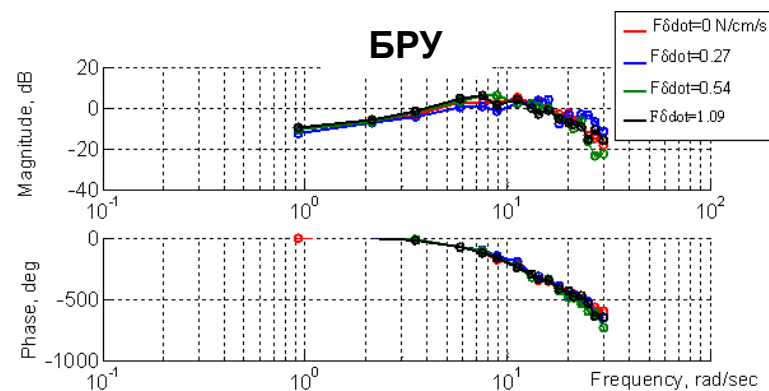
# Объективные параметры оптимальности

- Точность пилотирования
- Модели летчика

## Влияние $P_x$



## Влияние $P_{\dot{x}}$



# Постановка эксперимента



Пилотажный стенд ПСПК-102

Типы рычагов управления:

- БРУ
- штурвал

Участвовали:

- 2 летчика
- 3 оператора

Динамика объекта управления:

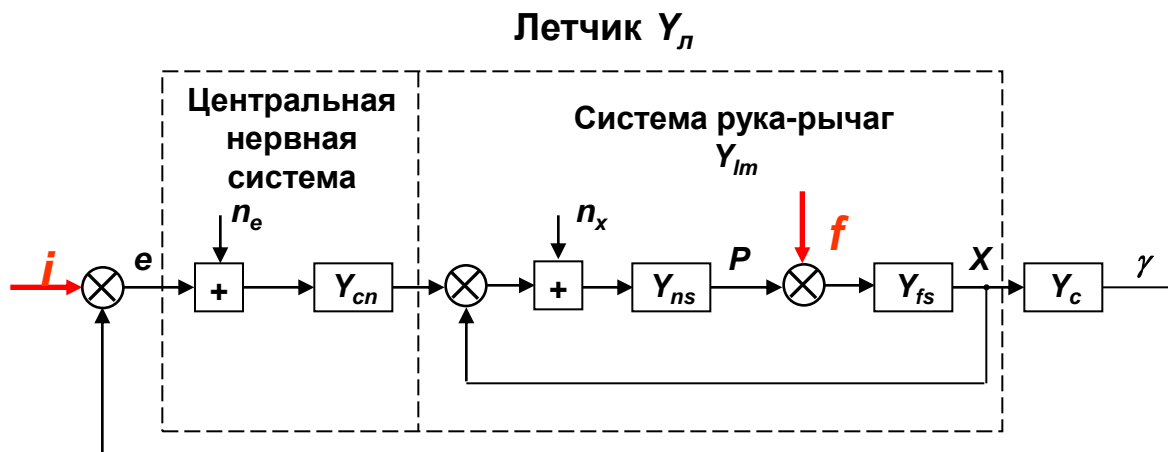
$$Y_c = \frac{K}{p(Tp + 1)} \quad T = 0.7c$$

Усилия на рычагах управления:

$$m\ddot{X} + P^{\dot{x}}\dot{X} + P^x X + P_0 \operatorname{sgn} X + P_{mp} \operatorname{sgn} \dot{X} = P_l$$



# Идентификация параметров модели летчика



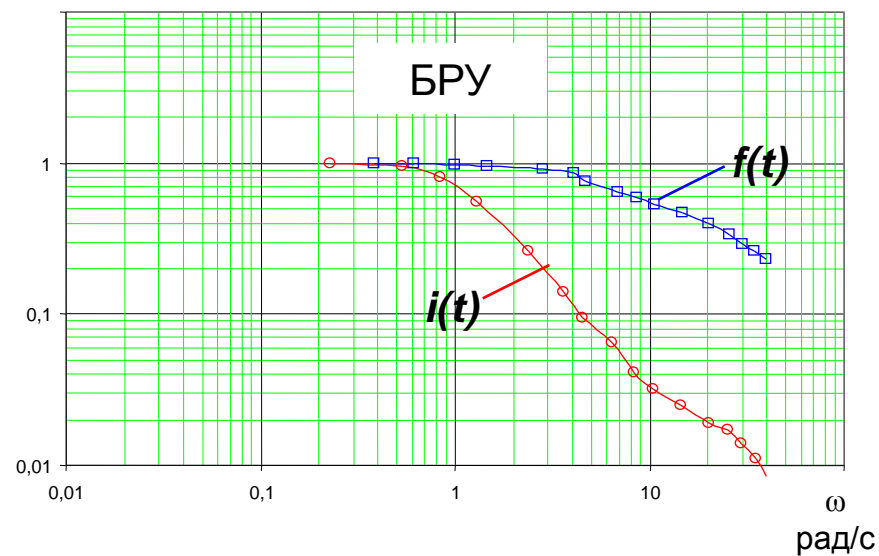
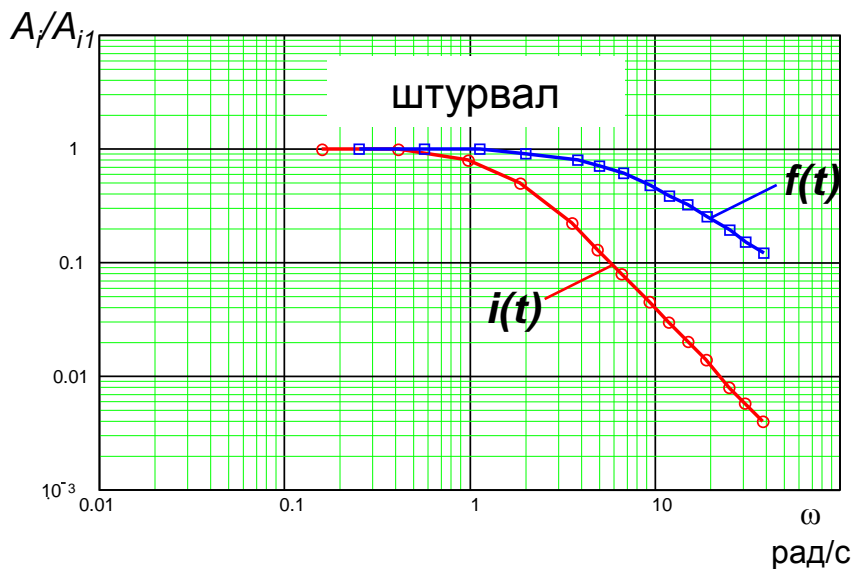
$$i(t) = \sum_{i=1}^m A_i \sin \omega_i t$$

$$f(t) = \sum_{f=1}^m A_f \sin \omega_f t$$

$$Y_p(j\omega) = \frac{S_{xi}(j\omega)}{S_{ei}(j\omega)}$$

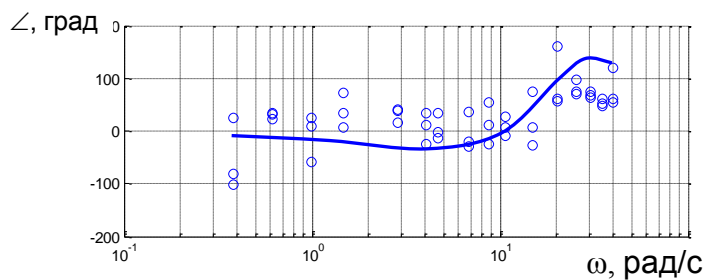
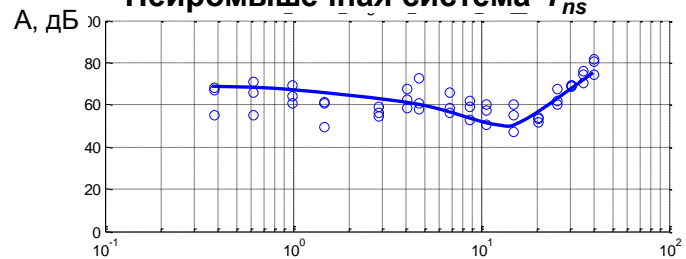
$$Y_{lm}(j\omega) = \frac{S_{xi}S_{ei}S_{ff} - S_{xf}S_{ii}S_{\delta i}}{S_{xi}S_{ei}S_{ff}}$$

## Спектры входных сигналов

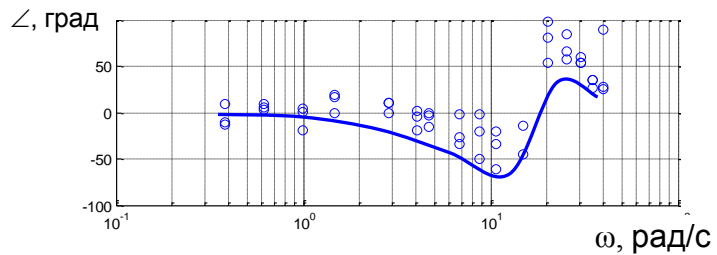
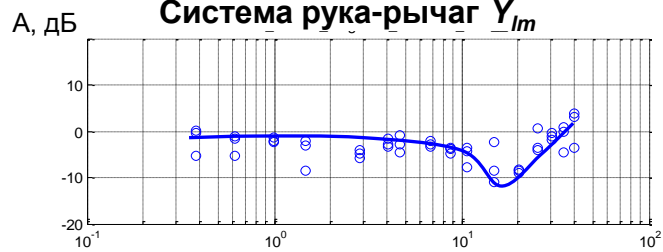


# Результаты эксперимента

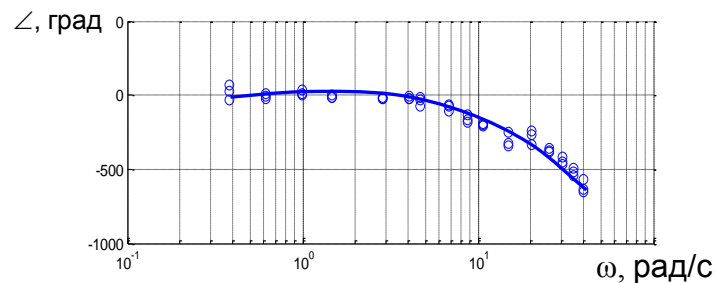
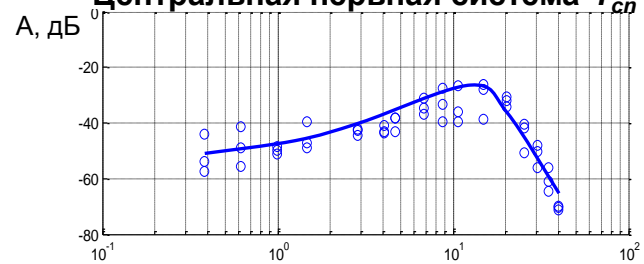
## Нейромышечная система $Y_{ns}$



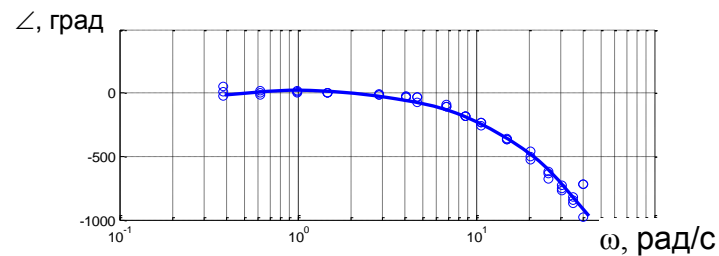
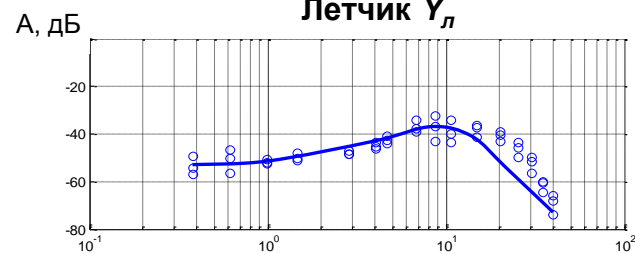
## Система рука-рычаг $Y_{lr}$



## Центральная нервная система $Y_{cn}$



## Летчик $Y_l$





# Анализ экспериментальных данных

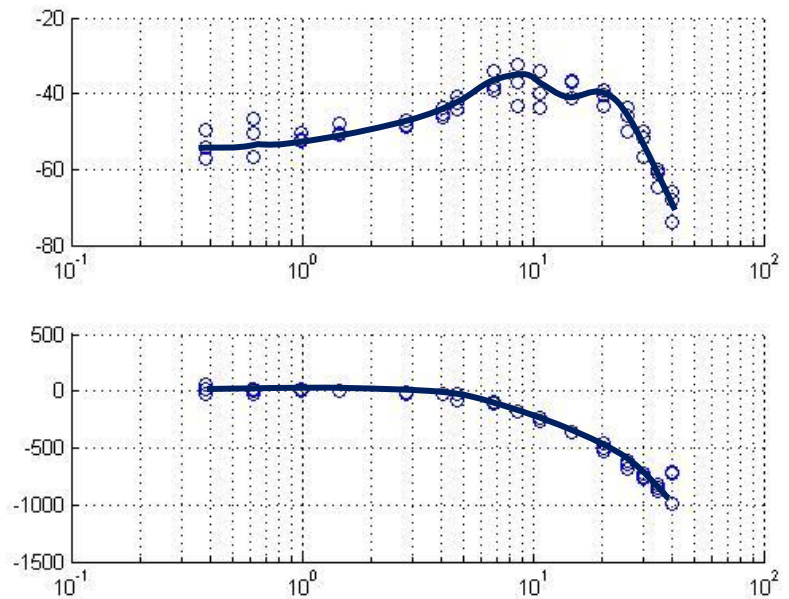
## 1. Модель летчика в целом

$$Y_p(s) = Ke^{-s\tau} \frac{T_L s + 1}{T_I s + 1} \cdot \frac{1}{T_1^2 s^2 + 2\zeta_1 T_1 s + 1} \cdot \frac{1}{T_2^2 s^2 + 2\zeta_2 T_2 s + 1}$$

$$\tau = 0.2 \text{ с}, T_L = 1.0 \text{ с}, T_I = 0.05 \text{ с}$$

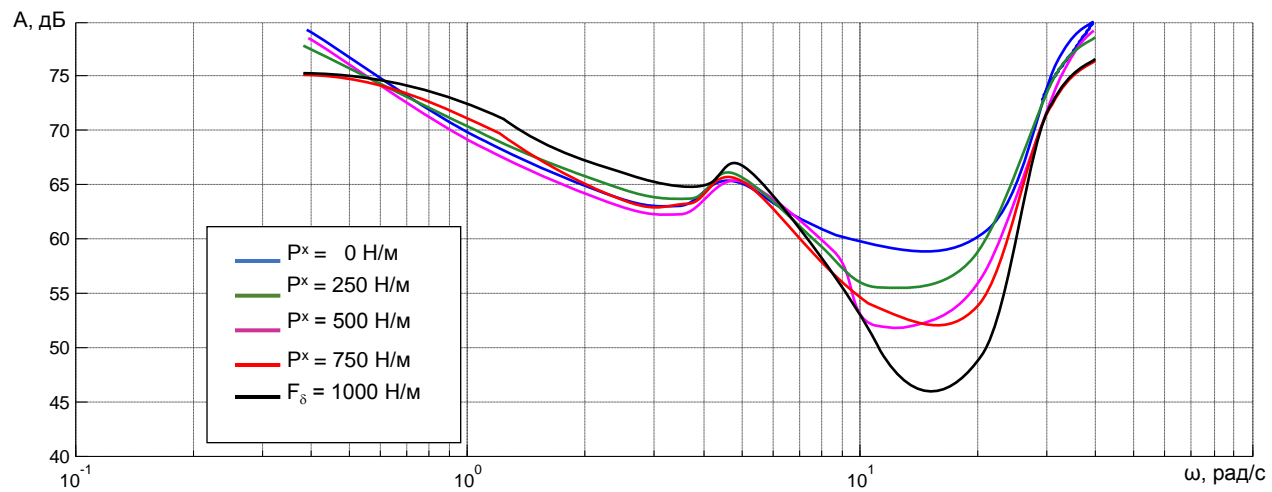
для штурвала:  $T_3 = 0.143 \text{ с}, T_4 = 0.055 \text{ с},$   
 $\zeta_3 = 0.5, \zeta_4 = 0.3;$

для БРУ:  $T_3 = 0.114 \text{ с}, T_4 = 0.065 \text{ с},$   
 $\zeta_3 = 0.45, \zeta_4 = 0.2.$



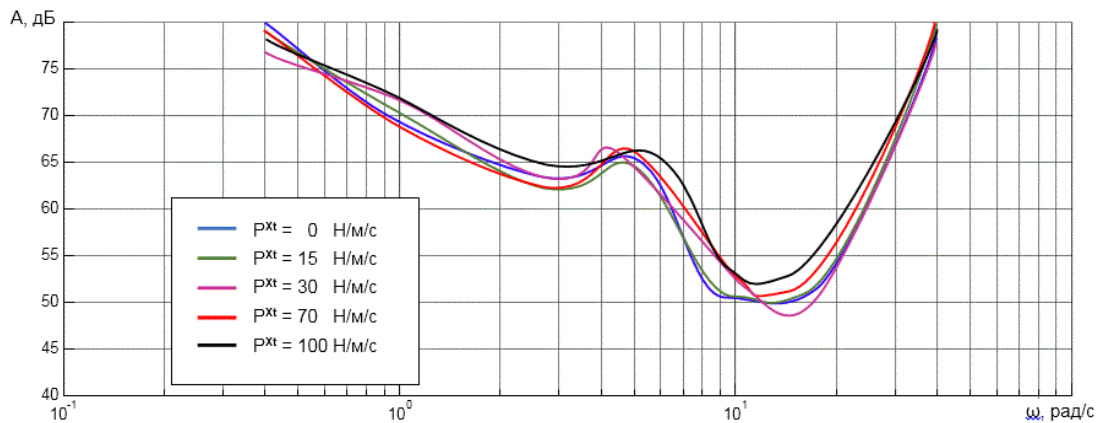
## 2. Нейромышечная система

- Влияние градиента загрузки
- Влияние демпфирования

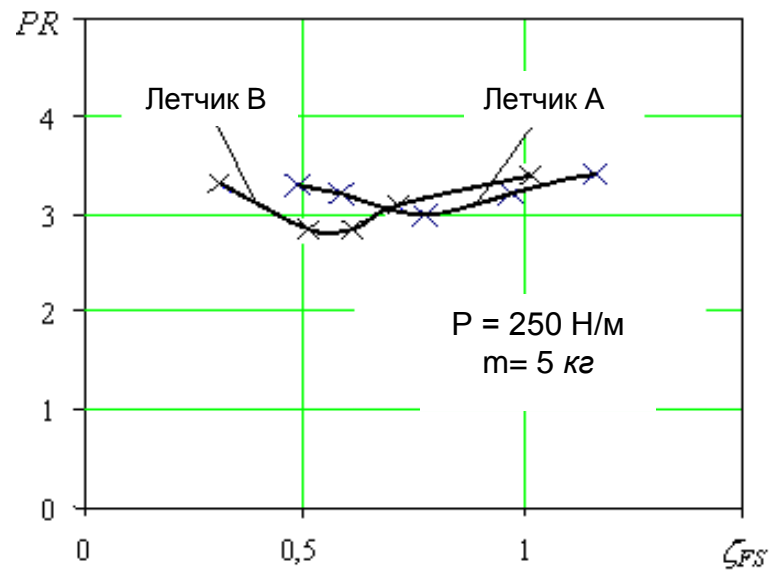
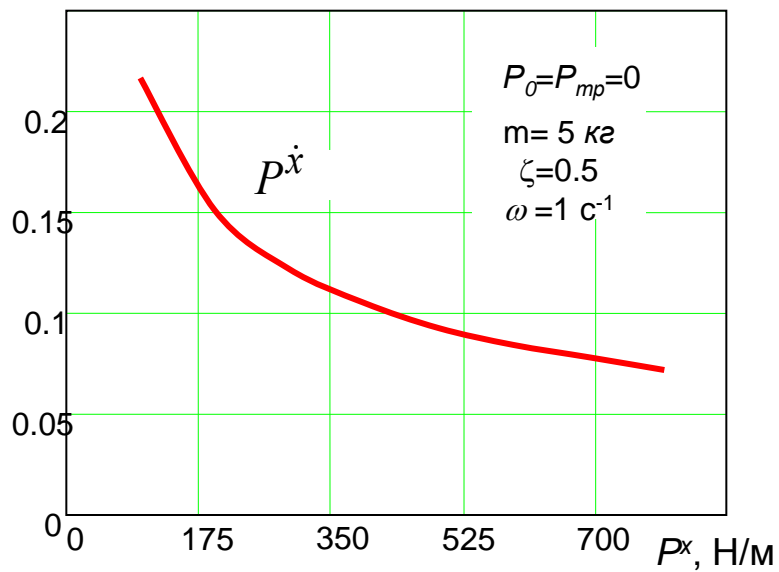


## 2. Нейромышечная система

- Влияние градиента загрузки
- Влияние демпфирования

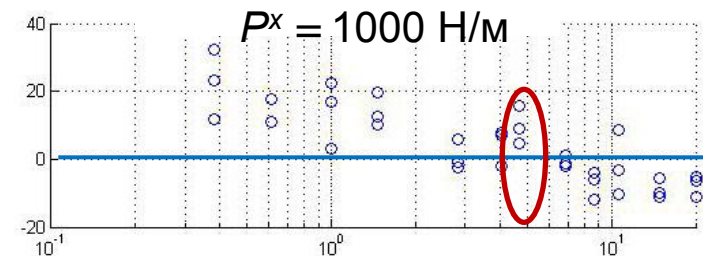
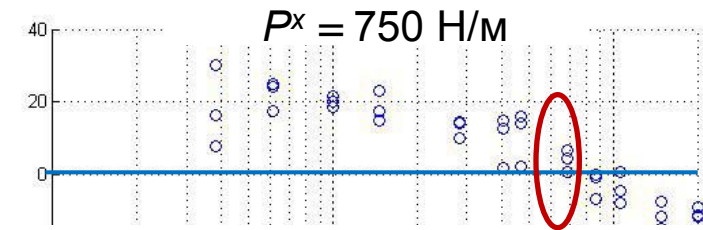
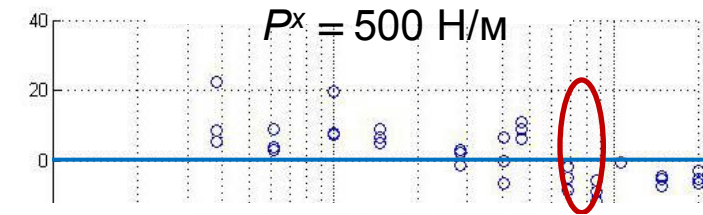
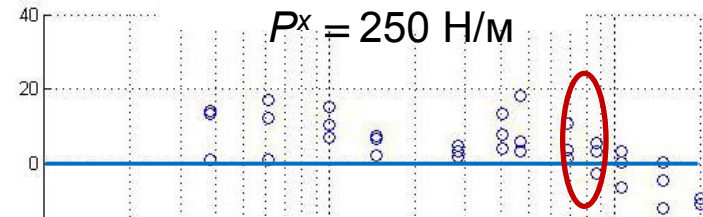
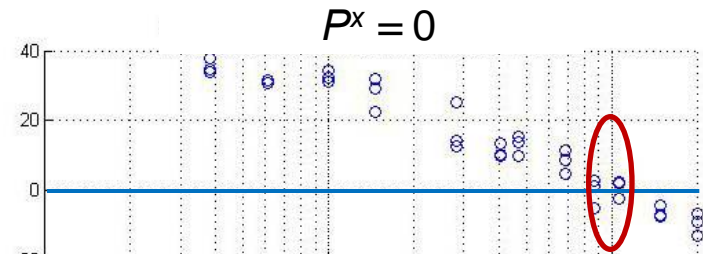
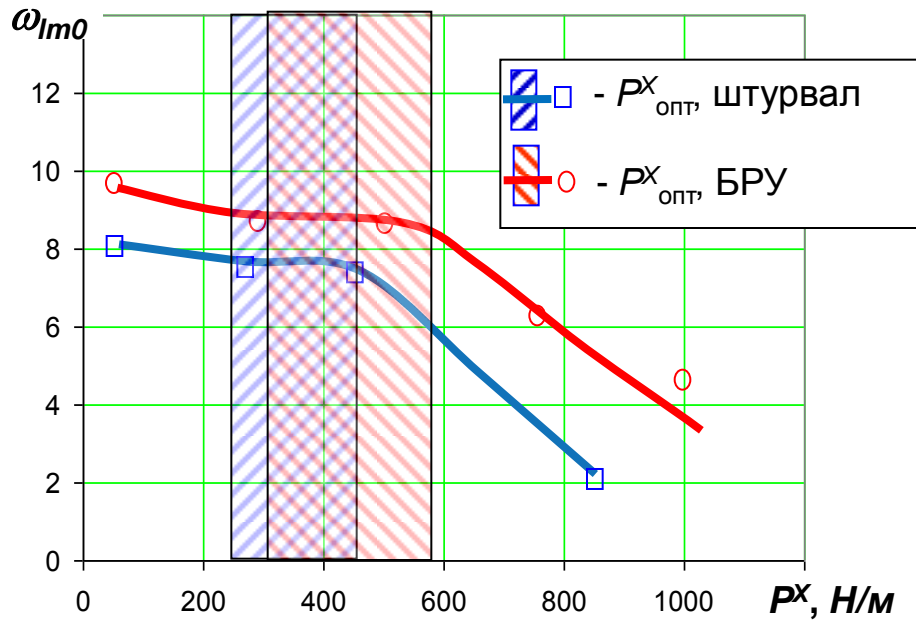


$$\frac{P_{\dot{x}}}{P_x \cdot X}$$



### 3. Разомкнутая система рука-рычаг

#### ➤ Влияние градиента загрузки



# Заключение

- закономерности влияния характеристик загрузки на параметры модели летчика в качественном отношении одинаковы для различных рычагов управления (штурвал и БРУ);
- характеристики загрузки рычага управления не оказывают влияния на модель летчика в целом;
- из рассмотренных характеристик загрузки рычагов управления (градиент загрузки, демпфирование) только градиент загрузки оказывает определенное влияние на параметры системы рука-рычаг; демпфирование загрузки в широком диапазоне ее изменения не оказывает какого-либо заметного влияния на параметры нейромышечной системы и других систем модели летчика;
- влияние градиента загрузки характеризуется изменением частоты среза системы рука-рычаг;
- в диапазоне градиентов загрузки, соответствующем наилучшим оценкам летчика, частота среза системы рука-рычаг остается постоянной, что может являться объективным критерием оптимальности градиента загрузки рычага управления;
- полученные результаты имеют регулярный характер и расширяют знания в теории и практике применения моделей летчика для оценки управляемости самолетов.

**Спасибо за внимание!**

**ВОПРОСЫ ?**