

# Улучшение робастности динамической системы в продольном канале управления с применением обратной динамики

Полное название

Выполнил: Пащенко Алексей Евгеньевич,  
студент группы: М10-403Б-18

Руководитель: Иргалеев Ильяс Хусвинович, канд. техн. наук, доц.  
каф. 106

Московский авиационный институт



**Министерство науки и высшего образования  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
"МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)"  
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
БАКАЛАВРА**

На тему: "Улучшение робастности динамической системы  
в продольном канале управления с применением обратной динамики"

Выполнил: Пащенко Алексей Евгеньевич,  
Студент группы М1О-403Б-18

Руководитель: Иргалеев Ильяс Хусаинович,  
канд. техн. наук, доц. каф. 106

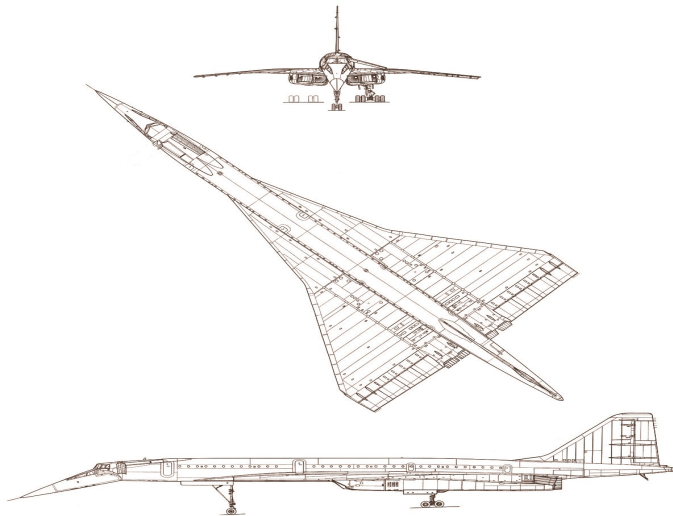


## Задачи

- Расчет ЛТХ, ВПХ, а также характеристик манёвренности
- Синтез системы автоматического управления
- Рассмотреть один из основных способов улучшения робастности динамической системы с применением обратной динамики при помощи PI-контроллера.



# Объект исследования



## В расчёт ЛТХ входит

- 1 Расчёт области установившихся горизонтальных полётов
- 2 Расчёт траектории полёта
- 3 Расчёт транспортных возможностей самолёта



# Расчёт ЛТХ

Расчёт области возможных полётов

## Основные ограничения

- Ограничение по  $M_{min} P$
- Ограничение по  $M_{max} P$

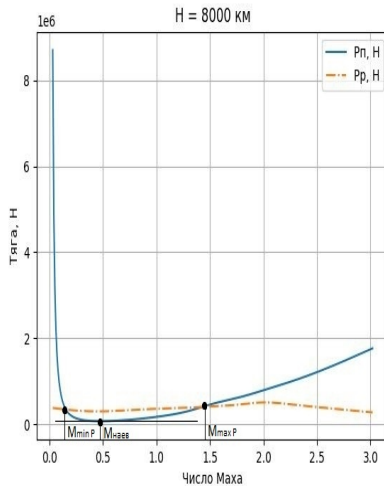
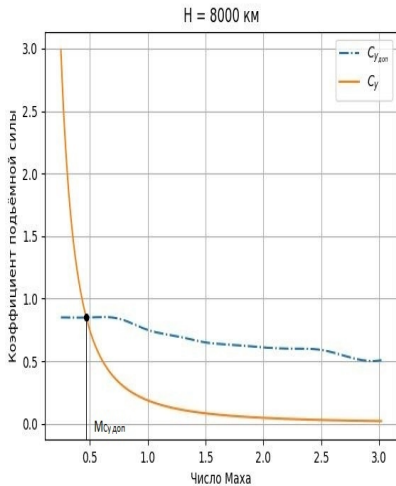
## Дополнительные ограничения

- Ограничение по  $C_y$  доп
- Ограничение по  $M_{пред}$
- Ограничение по  $q_{max}$



# Расчёт ЛТХ

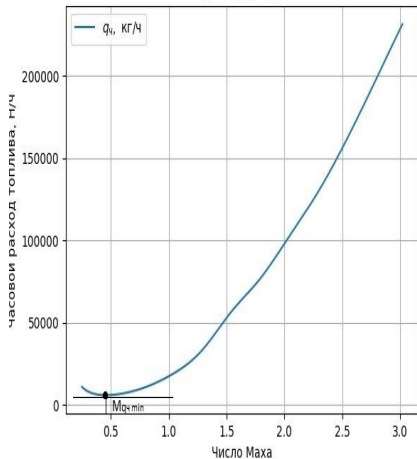
Результаты расчётов  $M_{C_y \text{ доп}}$  и  $M_{\min P}$ ,  $M_{\max P}$ ,  $M_{\text{наев}}$



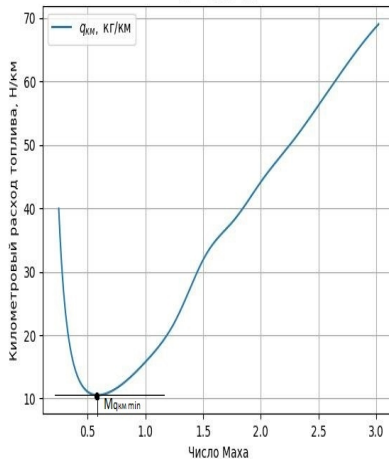
# Расчёт ЛТХ

Результаты расчётов  $q_{\text{ч min}}$  и  $q_{\text{км min}}$

$H = 8000 \text{ км}$



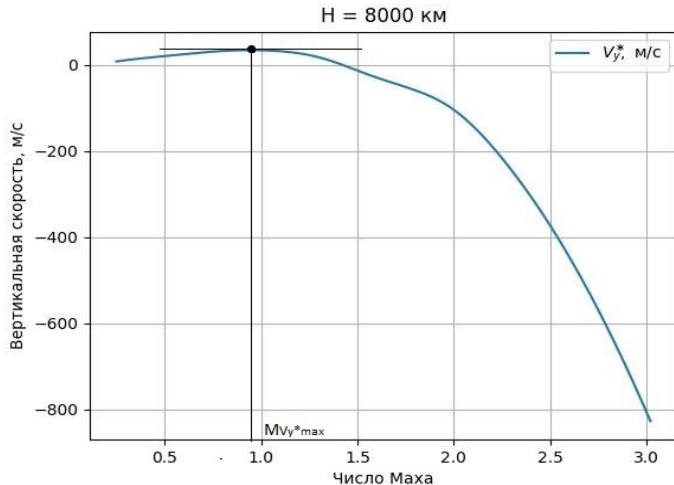
$H = 8000 \text{ км}$





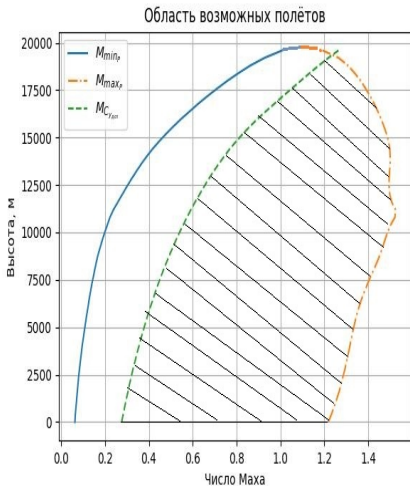
# Расчёт ЛТХ

Результаты расчётов  $M_{V_y \max}$



# Расчёт ЛТХ

## Расчёт области возможных полётов



### Определение области

- $M_{min} = \max\{M_{min \text{ } p}, M_{C_{y \text{ доп}}}\}$
- $M_{max} = \min\{M_{max \text{ } p}, M_{пред}, M_{q_{max}}\}$



# Расчёт ЛТХ

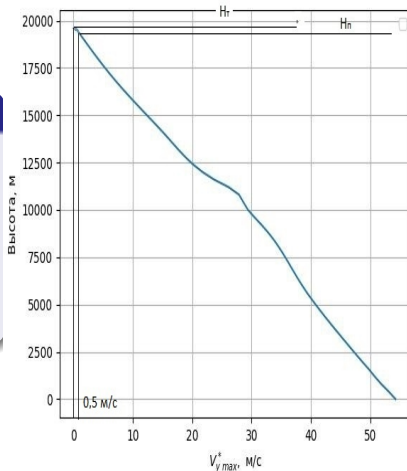
Определение теоретического и практического потолка

## Потолки

Расчёт теоретического и практического потолка производится по  $V_{y\max}^*$

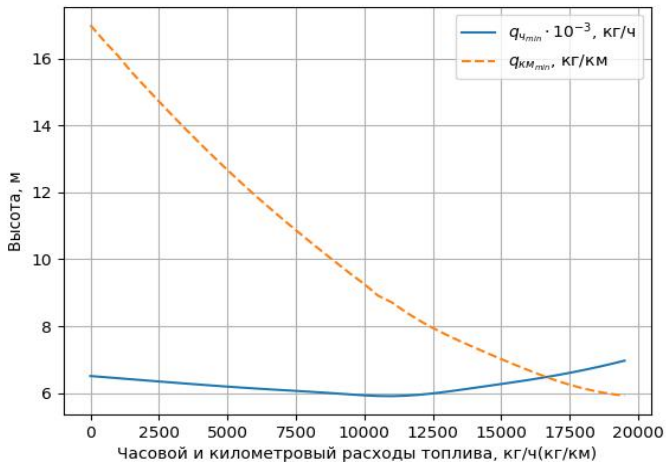
$$H_T = 19,8 \text{ км}$$

$$H_{\text{пр}} = 19,5 \text{ км}$$



# Расчёт ЛТХ

Максимальные значения часового и километрового расходов



### Траектория

Траекторию полёта принято разделять на три этапа

- Набор высоты
- Крейсерский полёт
- Снижение



# Расчёт ЛТХ

## Расчёт траектории полёта

### Результаты расчётов

$$L = L_{\text{наб}} + L_{\text{кр}} + L_{\text{спуск}} = 278,04 \text{ км} + 7610 \text{ км} + 314,16 \text{ км} = 8202,2 \text{ км}$$

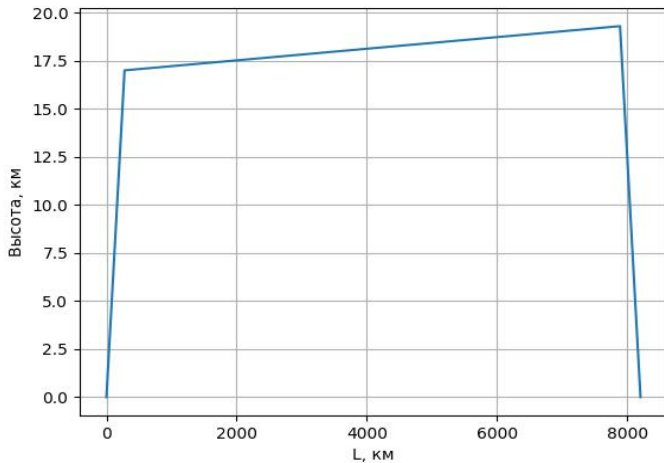
$$T = T_{\text{наб}} + T_{\text{кр}} + T_{\text{спуск}} = 20,06 \text{ мин} + 403 \text{ мин} + 42 \text{ мин} = 465,4 \text{ мин}$$

$$m_T = m_{T_{\text{наб}}} + m_{T_{\text{кр}}} + m_{T_{\text{спуск}}} = 7225 \text{ кг} + 50234 \text{ кг} + 757 \text{ кг} = 58216 \text{ кг}$$



# Расчёт ЛТХ

## Расчёт траектории полёта



### Основные положения

Расчёт ведётся для трёх режимов

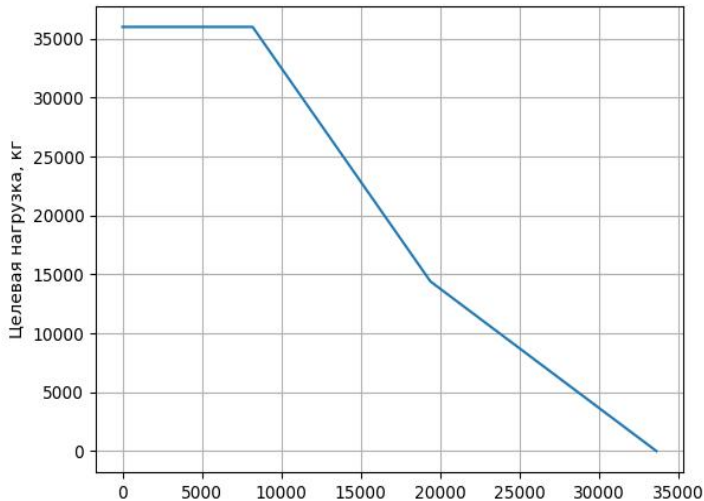
- Полет с максимальной коммерческой нагрузкой
- Полёт с максимальным запасом топлива
- Полёт без коммерческой нагрузки ( $m_{\text{цн}} = 0$ ) с максимальным запасом топлива





# Расчёт ЛТХ

Диаграмма транспортных возможностей самолёта



# Расчет взлетно-посадочных характеристик самолета

## Результаты расчётов

$V_{отр}, \text{ м/с}$	$L_p, \text{ м}$	$L_{вд}, \text{ м}$	$V_{кас}, \text{ м/с}$	$L_{проб}, \text{ м}$	$L_{пд}, \text{ м}$
88,85	1125,37	1392	64,58	576	1200,78



# Расчёт характеристик монёвренности

## Задачи раздела

### Задачи

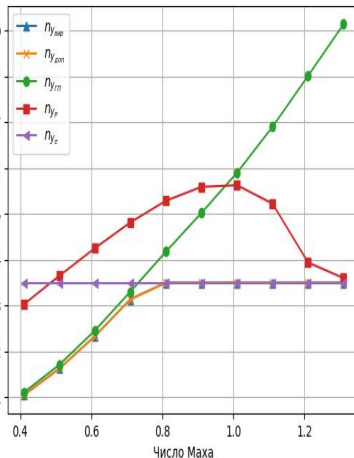
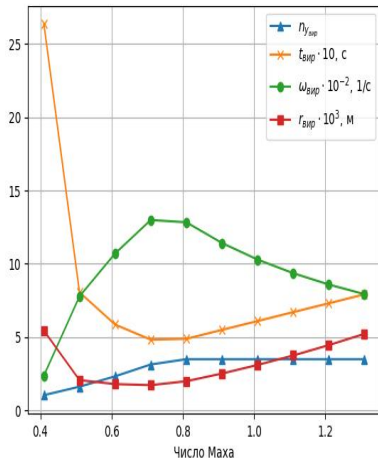
#### Расчёт:

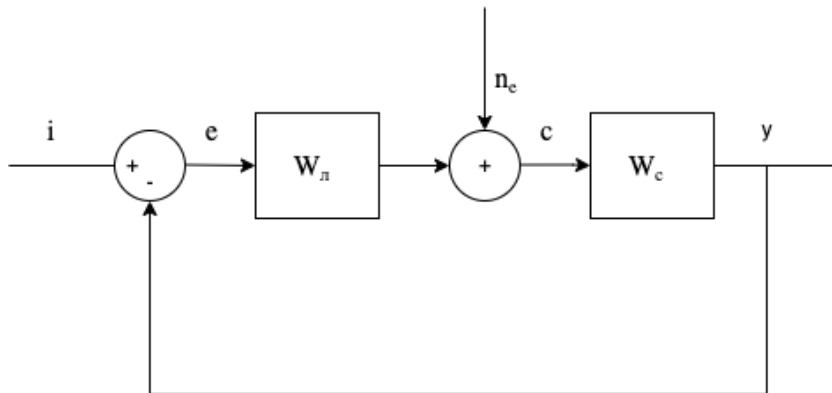
- Нормальной перегрузки на вираже  $n_{у\text{вир}}$
- Угловой скорости на вираже  $\omega_{\text{вир}}$
- Времени выполнения виража  $t_{\text{вир}}$
- Радиуса на вираже  $r_{\text{вир}}$



# Расчёт характеристик манёвренности

## Графики





# Специальная часть

## Линеаризованная модель объекта управления

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}\tag{1}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{\omega}_z \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, u = \delta_\alpha$$

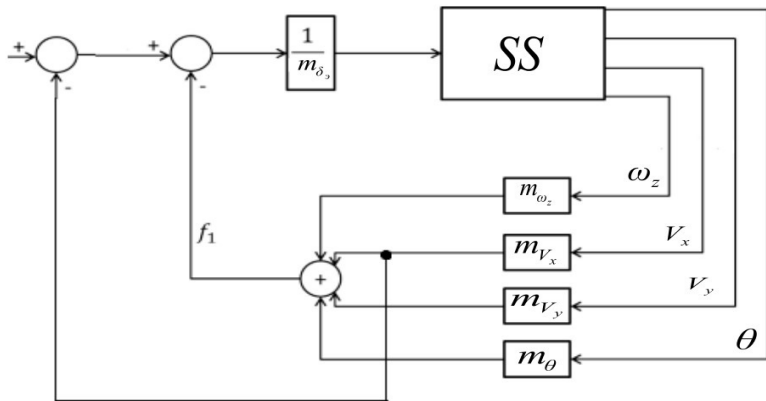
$$A = \begin{bmatrix} -0.0110 & 0.0433 & 1.7295 & -7.1876 \\ -0.0691 & -0.6975 & -7.0678 & -54.8976 \\ 0.00011 & 0.00116 & -0.35407 & 0.0911 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0.4412 \\ -12.388 \\ -0.58446 \\ 0 \end{bmatrix}$$



# Специальная часть

## Робастность системы

### Схема



### Коэффициенты

$$m_{\theta} = 0.0911$$

$$m_{V_x} = 0.00011$$

$$m_{V_y} = 0.0016$$

$$m_{\omega_z} = -0.35407$$

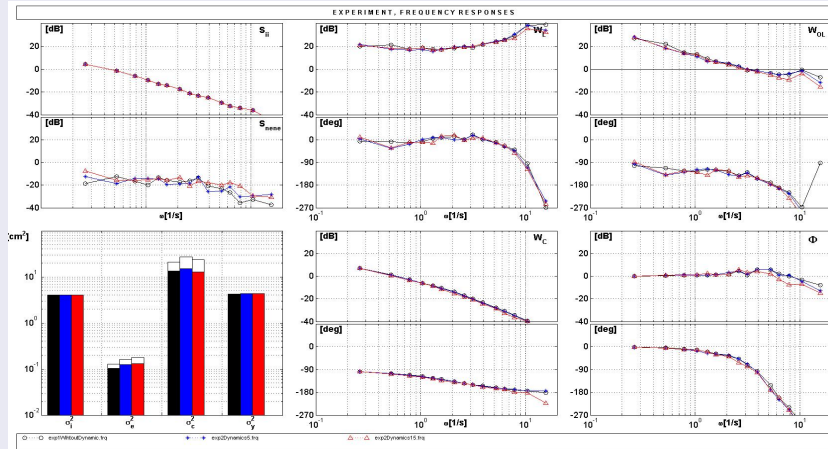
$$m_{\delta_{\theta}} = -0.58446$$

$$\delta_{\theta} = -\frac{1}{m_{\delta_{\theta}}}(m_{\omega_z}\omega_z + m_{V_y}V_y + m_{V_x}V_x - \dot{\omega}_z)$$





### Результаты экспериментов



# Специальная часть

## Робастность системы

№ э.	$\sigma_e^2, \text{см}^2$	$\sigma_c^2, \text{см}^2$	$n_e, \text{см}^2$
1	0.103	13.54	0.0254
2	0.125	15.14	0.037
3	0.131	12.74	0.047



# Специальная часть

## Робастность системы

№ э.	Нули	Полюса	$\xi$	$\omega_c, 1/c$
1	-2	-	1.0	0.5
2	-1.9392	-0.7537	1.0	$1.59 \cdot 10^{-4}$
	-0.7473	-0.0161		$1.64 \cdot 10^{-2}$
	-0.0164	0		$7.47 \cdot 10^{-1}$
	0			1.94
3	-1.8207	0.8255	1.0	0
	-0.8033	-0.0177		$1.85 \cdot 10^{-2}$
	-0.0185	0		$8.03 \cdot 10^{-1}$
	0			1.82



### Задача PI-контроллера

PI-котроллер в теории должен уменьшать

### PI-короллер

$$y(t) = K_p + \frac{1}{p}K_i,$$

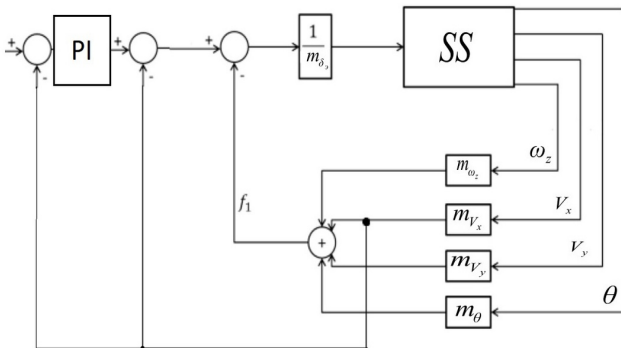
где  $K_p = 2$ ,  $K_i = 5$ . Коэффициенты PI-котроллера были выбраны с условием того, что система должна оставаться устойчива.



# Специальная часть

Улучшение робастности с применением PI-контроллера

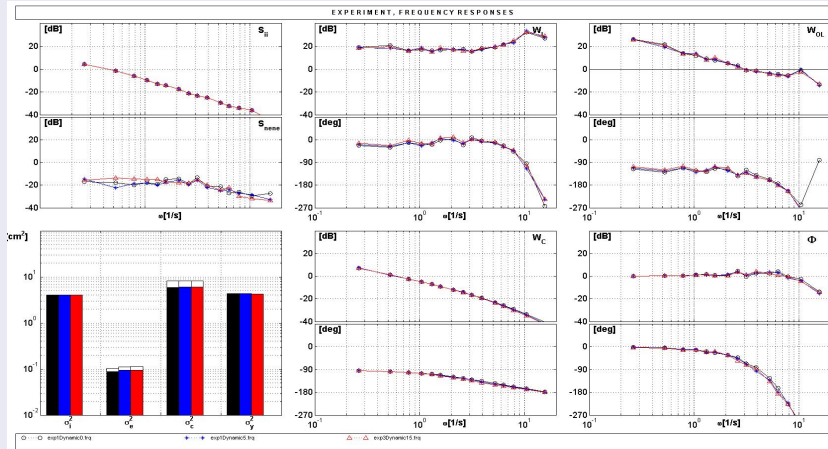
## Схема



# Специальная часть

Улучшение робастности с применением PI-контроллера

## Результаты экспериментов



# Специальная часть

## Робастность системы

№ э.	$\sigma_e^2, \text{см}^2$	$\sigma_c^2 \text{см}^2$	$n_e \text{см}^2$
1	0.0886	5.913	0.01611
2	0.0952	6.01	0.01591
3	0.0943	6.004	0.01712



# Специальная часть

## Робастность системы

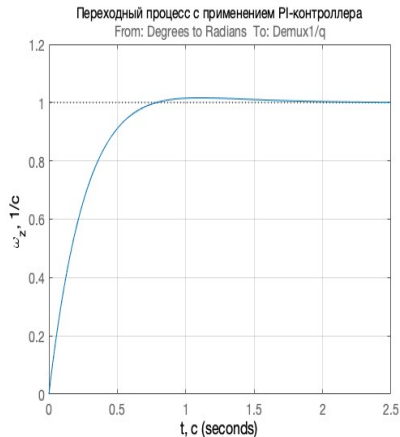
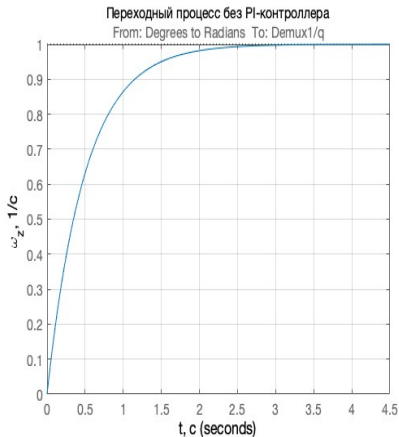
№ э.	Полюса	Нули	$\xi$	$\omega_c, 1/c$
1	$-3.0000 + 1.0000i$ $-3.0000 - 1.0000i$	-2.5	0.95	3.16
2	$-2.8660 + 1.1287i$ $-2.8660 - 1.1287i$ $-0.7547 + 0.0000i$ 0 $-0.0161 + 0.0000i$	-0.0161 -0.7537 -2.5000 0.0000	1.0 1.0 1.0 0.93 0.93	0 $1.61 \cdot 10^{-2}$ $7.51 \cdot 10^{-2}$ 3.08
3	$-2.5975 + 1.3096i$ $-2.5975 - 1.3096i$ $-0.8292 + 0.0000i$ 0 $-0.0177 + 0.0000i$	-0.0177 -0.8255 -2.5000 0	1 1 1 0.893	0 $1.77 \cdot 10^{-2}$ $8.29 \cdot 10^{-1}$ 2.91





# Специальная часть

## Переходные процессы



Спасибо за внимание

