



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

на тему:

«Исследование характеристик эшелонированного крейсерского полета  
транспортного самолета»

Автор квалификационной работы:

студент гр.М1О-403Б-18

Москвитин Андрей Семенович

Руководитель:

к.т.н., доцент кафедры 106

Мальцев Юрий Иванович

# Постановка задачи

## Задачи:

### Общеспециальная часть

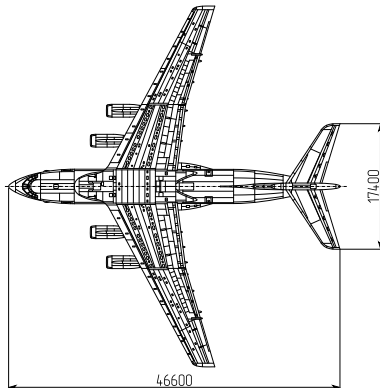
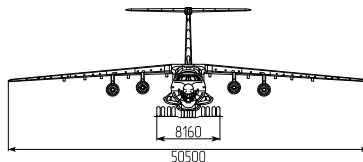
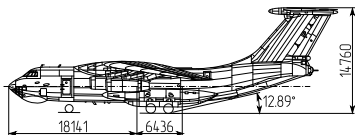
- Расчет основных летно-технических характеристик, взлетно-посадочных характеристик, транспортные возможности, характеристики маневренности, характеристик продольной устойчивости и управляемости
- Синтезировать систему автоматической стабилизации высоты

### Специальная часть

- Исследовать характеристики самолета при выполнении эшелонированного полета

# Объект исследования

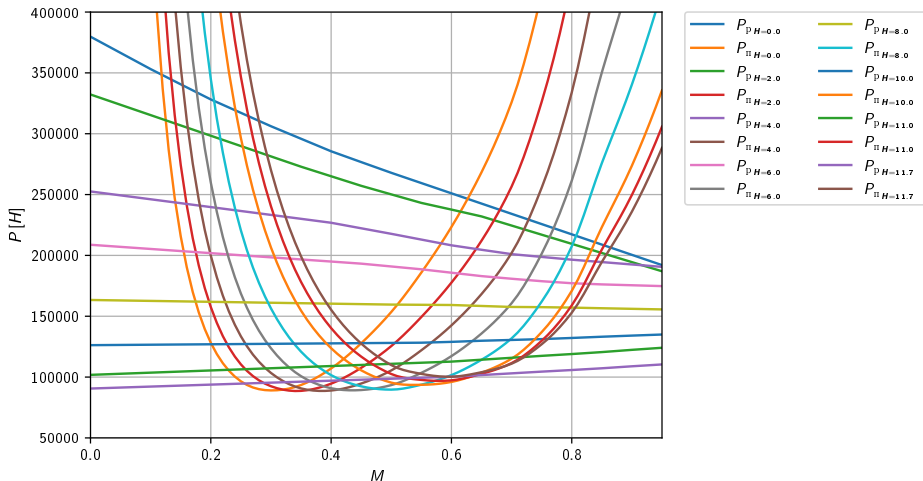
## Прототип транспортного самолета Ил-76



Параметры	Величина
$m$	140000 кг
$S$	300 м <sup>2</sup>
$b_a$	6.436 м

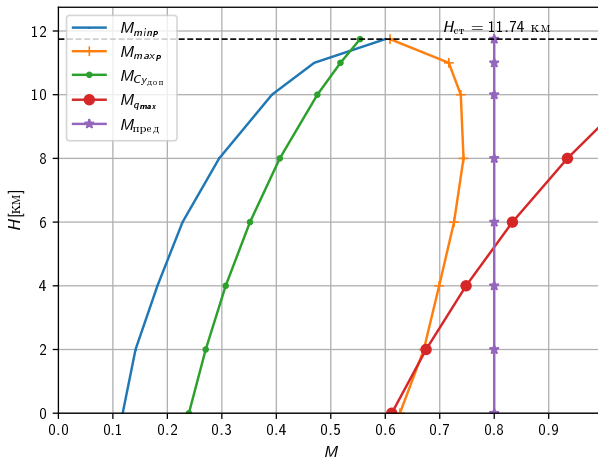
# Расчет летно-технических характеристик

## Кривые потребных и располагаемых тяг



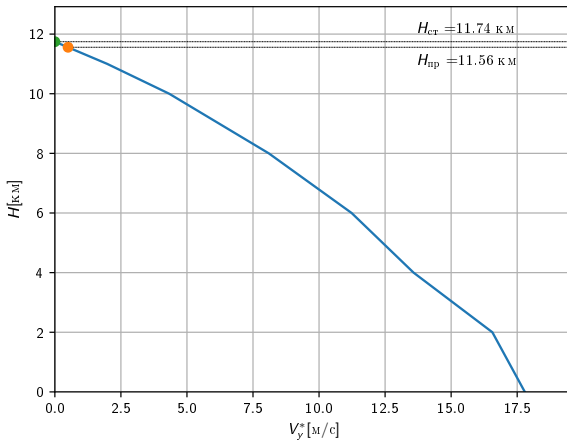
# Расчет летно-технических характеристик

## Диапазон высот и скоростей полета



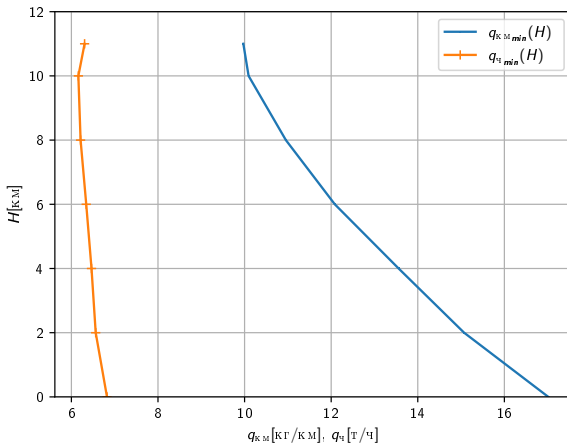
# Расчет летно-технических характеристик

## Значения статического и практического потолка



# Расчет летно-технических характеристик

Значения километрового и часового расхода для массы 140 т.



# Расчет траектории полета

Параметры в наборе высоты:

$m_{T_{\text{наб}}}$	$L_{\text{наб}}$	$t_{\text{наб}}$
кг	км	мин
4702.5	252.9	25.1

Параметры крейсерского полета:

$T_{\text{кр}}$	$L_{\text{кр}}$	$\rho_{H_{\text{кр}}}$	$H_{0 \text{ кр}}$	$H_{\text{к кр}}$
мин	км	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	км	км
297.78	3059.0	0.2786	11	12.7

Параметры при снижении высоты:

$m_{T_{\text{сн}}}$	$L_{\text{сн}}$	$t_{\text{сн}}$
кг	км	мин
531.2	210.9	27.1



# Расчет траектории полета

Профиль полета:

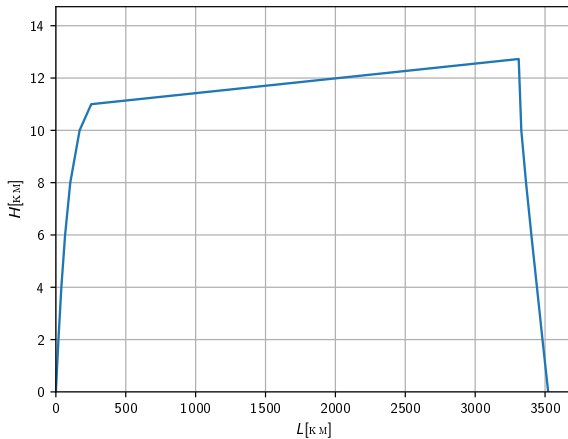
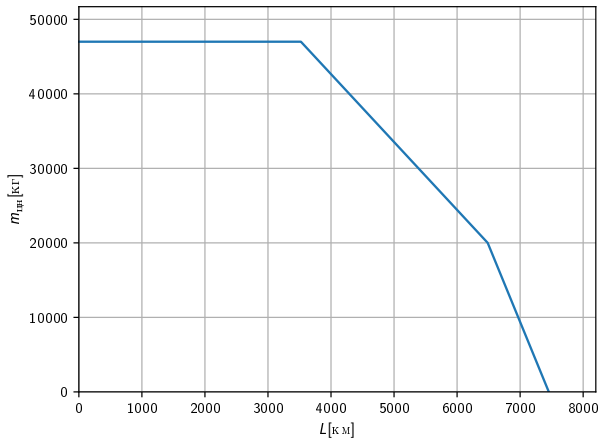


Диаграмма транспортных возможностей

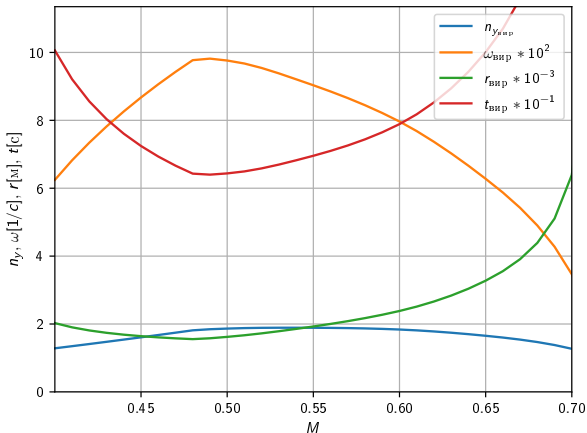


# Взлетно-посадочные характеристики

Основные параметры взлета и посадки:

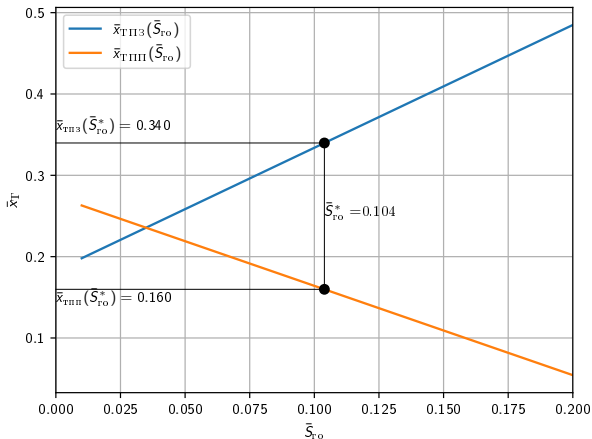
$V_{отр}$	$L_p$	$L_{вд}$	$V_{кас}$	$L_{проб}$	$L_{пд}$
$\frac{м}{с}$	м	м	$\frac{м}{с}$	м	м
90.0	1830.0	2289.0	64.0	790.0	1384.0

## Зависимость различных параметров виража



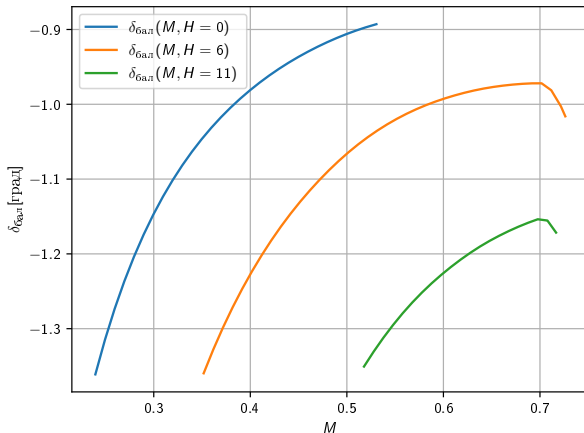
# Характеристики продольной статической устойчивости и управляемости

## Определение $\bar{S}_{ro}^*$



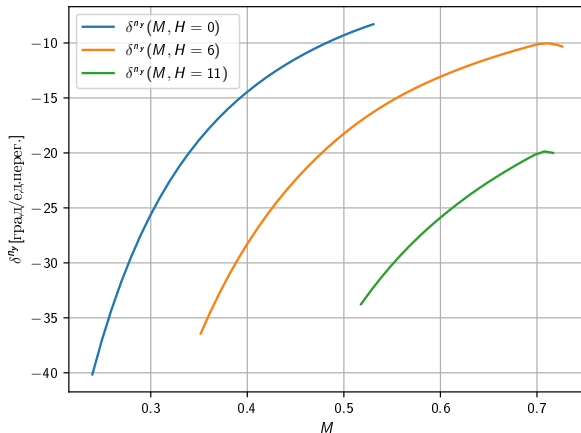
# Характеристики продольной статической устойчивости и управляемости

## Балансировочная диаграмма в полетной конфигурации



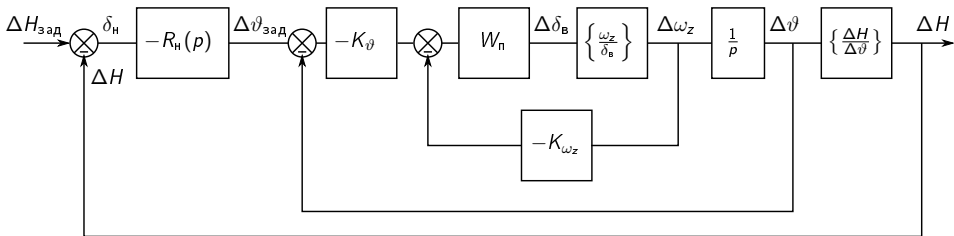
# Характеристики продольной статической устойчивости и управляемости

$\delta_B^{ny}$  при  $\bar{x} = 0.25$



# Синтез системы автоматической стабилизации высоты

Структурная схема стабилизации высоты в тангажном варианте:

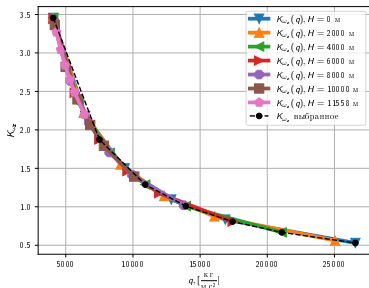




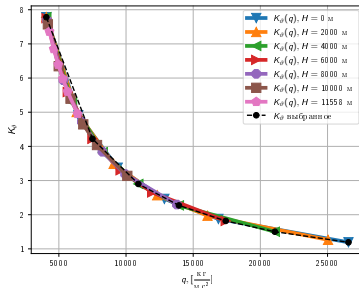
# Синтез системы автоматической стабилизации высоты

Выбранные коэффициенты обратных связей для контура стабилизации тангажа:

Для регулятора  $K_{\omega_z}$



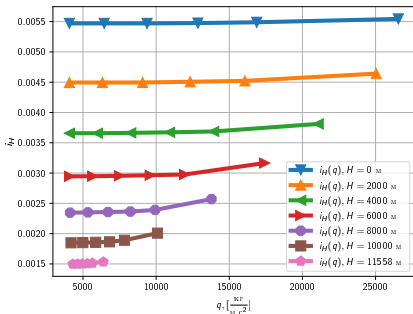
Для регулятора  $K_{\vartheta}$



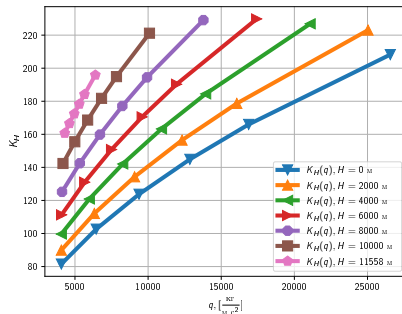
# Синтез системы автоматической стабилизации высоты

Выбранные коэффициенты обратных связей для контура стабилизации высоты:

Для регулятора  $i_H$



Для регулятора  $K_H$

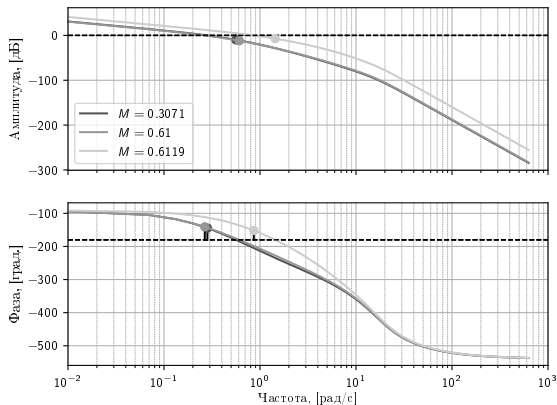


# Синтез системы автоматической стабилизации высоты

## Частотный анализ

ЛАФЧХ для разомкнутого контура стабилизации высоты при:

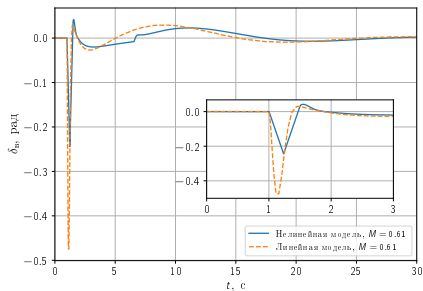
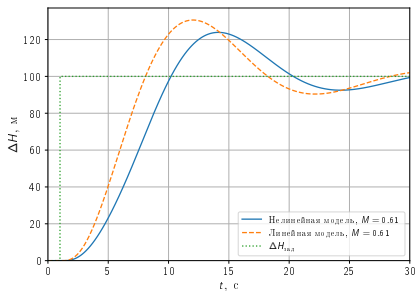
$$q_{min} \Rightarrow M = 0.3071, \quad q_{max} \Rightarrow M = 0.6119, \quad q_{кр} \Rightarrow M = 0.61.$$



$M$	0.3071	0.61	0.6119
$\omega_{ср}$ , рад/с	0.284	0.267	0.862
$\Delta Q$ , дБ	9.813	11.866	7.198
$\Delta L$ , град.	35.362	39.075	28.364

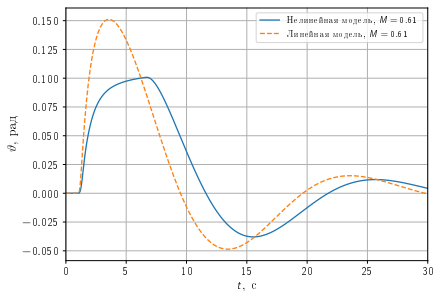
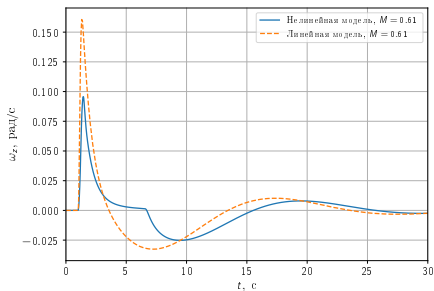
# Нелинейное, линейное моделирование системы

Сравнение переходных процессов линейной и нелинейной модели.



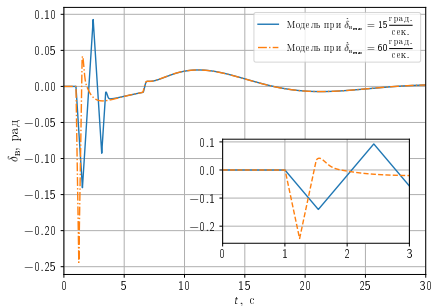
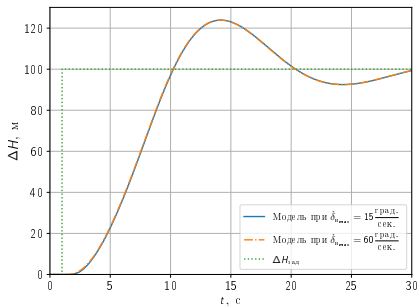
# Нелинейное, линейное моделирование системы

Сравнение переходных процессов линейной и нелинейной модели.



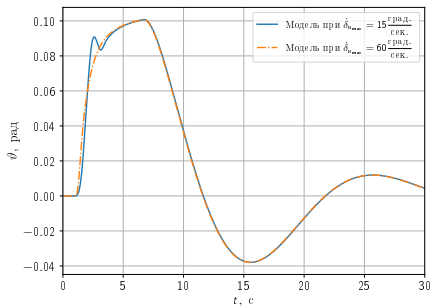
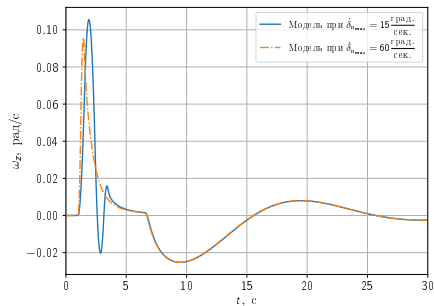
# Нелинейное, линейное моделирование системы

Сравнение переходных процессов при различных скоростях отклонения привода.



# Нелинейное, линейное моделирование системы

Сравнение переходных процессов при различных скоростях отклонения привода.



# Исследования характеристик при выполнении эшелонирования

Рассмотрим такие варианты полета:

- 1 При постоянной высоте и оптимальной скорости полета
- 2 При оптимальном изменении высоты и скорости полета
- 3 Эшелонированный полет с изменением высоты с шагом 300 м.



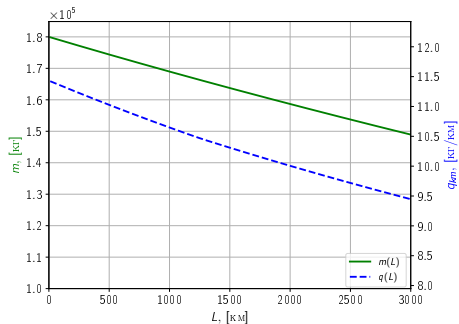
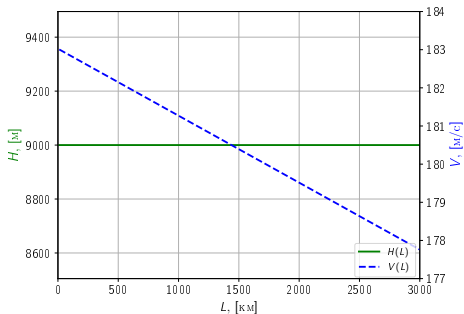
# Исследования характеристик при выполнении эшелонирования

Таблица параметров крейсерского полета:

m, тонн		H, м								
		8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500
190.0	M	0.602	0.607	-	-	-	-	-	-	-
	q <sub>km</sub>	12.098	12.146	-	-	-	-	-	-	-
	V	184.086	184.564	-	-	-	-	-	-	-
180.0	M	0.597	0.602	0.609	-	-	-	-	-	-
	q <sub>km</sub>	11.437	11.382	11.509	-	-	-	-	-	-
	V	182.568	183.003	183.598	-	-	-	-	-	-
170.0	M	0.591	0.597	0.603	0.61	-	-	-	-	-
	q <sub>km</sub>	10.82	10.705	10.714	10.871	-	-	-	-	-
	V	180.96	181.43	181.934	182.577	-	-	-	-	-
160.0	M	0.586	0.592	0.598	0.604	0.61	-	-	-	-
	q <sub>km</sub>	10.243	10.081	10.017	10.059	10.215	-	-	-	-
	V	179.208	179.745	180.265	180.822	181.47	-	-	-	-
150.0	M	0.58	0.586	0.592	0.598	0.604	0.61	-	-	-
	q <sub>km</sub>	9.703	9.506	9.39	9.352	9.391	9.501	-	-	-
	V	177.414	177.992	178.518	179.032	179.575	180.185	-	-	-
140.0	M	0.574	0.58	0.586	0.591	0.597	0.603	0.61	-	-
	q <sub>km</sub>	9.215	8.975	8.808	8.706	8.661	8.663	8.705	-	-
	V	175.54	176.07	176.56	177.079	177.695	178.476	179.491	-	-
130.0	M	0.567	0.573	0.579	0.585	0.591	0.597	0.603	0.61	-
	q <sub>km</sub>	8.801	8.5	8.263	8.088	7.977	7.93	7.945	8.023	-
	V	173.73	174.161	174.533	174.969	175.592	176.525	177.892	179.815	-
120.0	M	0.561	0.567	0.572	0.578	0.583	0.589	0.596	0.603	0.61
	q <sub>km</sub>	8.444	8.092	7.787	7.538	7.353	7.241	7.209	7.266	7.42
	V	171.738	172.178	172.523	172.912	173.481	174.366	175.705	177.634	180.29
110.0	M	0.553	0.56	0.565	0.571	0.576	0.582	0.588	0.594	0.602
	q <sub>km</sub>	8.11	7.737	7.4	7.104	6.856	6.664	6.534	6.473	6.488
	V	169.436	169.962	170.357	170.762	171.316	172.157	173.424	175.257	177.794
100.0	M	0.544	0.551	0.557	0.563	0.568	0.574	0.58	0.586	0.593
	q <sub>km</sub>	7.781	7.399	7.048	6.73	6.446	6.198	5.987	5.816	5.685
	V	166.669	167.322	167.86	168.397	169.046	169.921	171.135	172.802	175.035

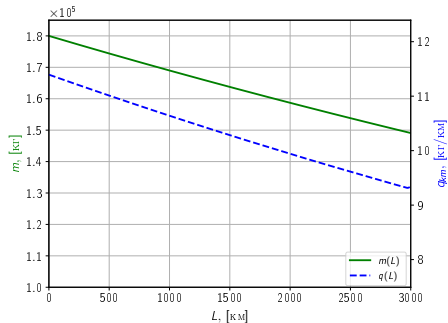
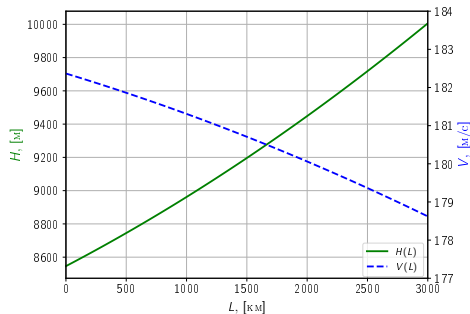
# Исследования характеристик при выполнении эшелонирования

Изменения характеристик при постоянной высоте и оптимальной скорости полета:



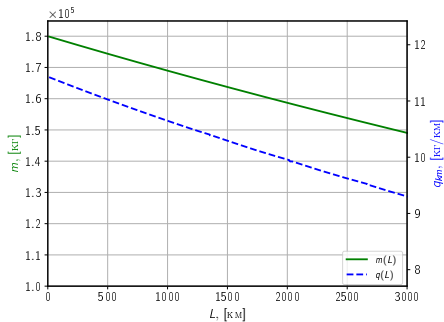
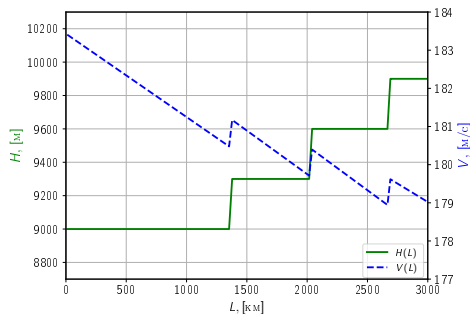
# Исследования характеристик при выполнении эшелонирования

Изменения характеристик при оптимальном изменении высоты и оптимальной скорости полета:



# Исследования характеристик при выполнении эшелонирования

Изменения характеристик при эшелонированном полете:



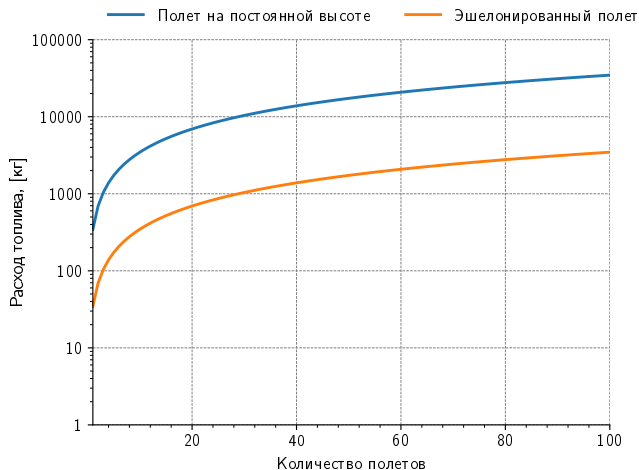
# Исследования характеристик при выполнении эшелонирования

Сравнение израсходованного топлива по сравнению с оптимальной траекторией

Режим	$m_{\text{изр}}, \%$
Полет по оптимальной траектории	100
Полет на $H = 9000 \text{ м}$	100.71
Эшелонированный полет $\Delta H = 300 \text{ м}$	100.11

# Исследования характеристик при выполнении эшелонирования

## Зависимость расхода топлива от количества полетов



# Заключение

- В данной работе были определены основные летно-технические характеристики, область располагаемых высот и скоростей полета, практический и статические потолок, взлетно-посадочные характеристики, параметры правильного виража, характеристики продольной устойчивости и управляемости.
- Синтезирована система стабилизации высоты в тангажном варианте. Подобраны такие коэффициенты обратной связи, которые обеспечивают устойчивость на всем диапазоне полетов.
- Также проведено исследование характеристик эшелонированного полета из которого следует, экономически целесообразно проводить эшелонированный полет. Выигрыш в топливе по сравнению с полетом на постоянной высоте в нашем случае составляет порядка 0.71 %.