

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт математики и информационных систем

Факультет автоматики и вычислительной техники

Кафедра автоматики и телемеханики

Расчетная графическая работа №9  
по теме  
«Расчет линейных схем на операционных усилителях»  
Вариант 6

Выполнил:  
студент гр. ИТб-3303-02-20  
Перевозчиков И.А.  
Проверил:  
Вахрушев В.Ю.

## Цель работы

Целью работы является:

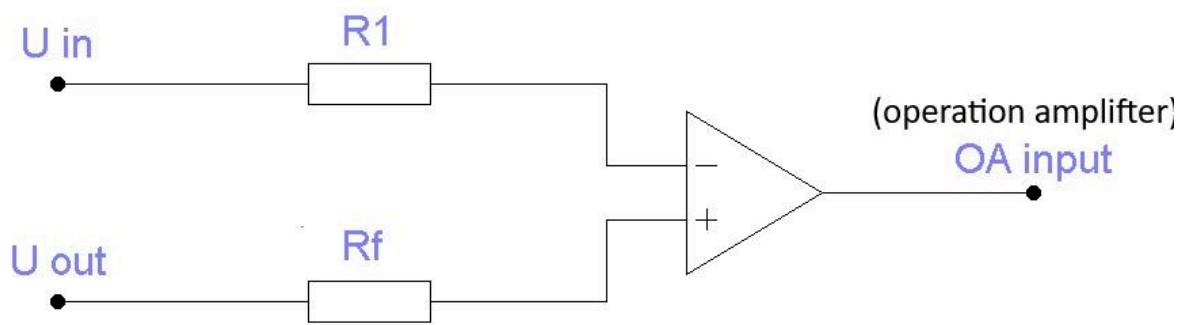
- Расчет инвертирующего усилителя низкой частоты (УНЧ) на операционном усилителе 154УД1 с учетом конечного коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений ОУ.
- Определение передаточной функции  $K_u(p)$ , амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик, переходной функции  $h(t)$  и амплитудной характеристики  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ .
- Оценка входного и выходного сопротивлений усилителя, напряжения ошибки, температурного дрейфа и влияния нестабильности источника питания.

## Исходные данные

Параметр	Значение
Тип ОУ	154УД1
Тип схемы	Инвертирующий УНЧ
Коэффициент усиления	$K_u = 60$
Нижняя граничная частота	$f_{\text{Н гр}} = 35 \text{ Гц}$
Полярность питания	Однополярное (-)
Диапазон температур	$-20 \dots +40^\circ\text{C}$
Нестабильность питания	$\pm 2\%$
Поступающий сигнал	Прямоугольный, $U_m = 10 \text{ мВ}$ , $t_i = 10 \text{ мс}$ , скважность $q = 2$

## Схема включения

Инвертирующий усилитель:



- $R_1$  — входной резистор
- $R_f$  — резистор обратной связи

Коэффициент усиления (для идеального ОУ):

$$K_u = -\frac{R_f}{R_1}$$

### Расчет номиналов резисторов

$$|K_u| = \frac{R_f}{R_1} = 60$$

Выбираем стандартные номиналы:

Параметр	Значение
R1	1 кОм
Rf	60 кОм

### Расчет конденсатора для нижней граничной частоты

Для инвертирующего УНЧ с нижней граничной частотой  $f_n$ :

$$f_n = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \Rightarrow C_f = \frac{1}{2\pi R_f f_n}$$

Подставляем:  $R_f = 60$  кОм,  $f_n = 35$  Гц

$$C_f = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 35} \approx 76 \text{ нФ}$$

Параметр	Значение
Cf	76 нФ

### Передаточная функция с учетом инерционности ОУ

ОУ описывается как звено первого порядка:

$$K_{oy}(p) = \frac{K_{oy}}{1 + p\tau_{oy}}$$

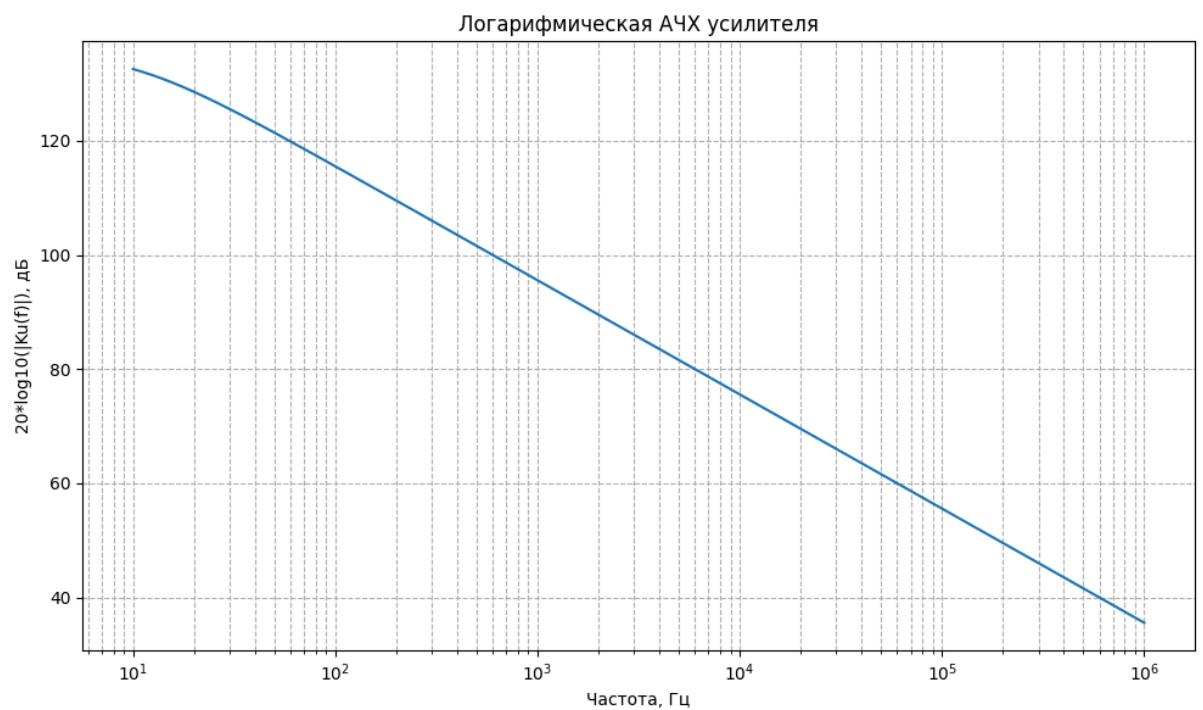
$\tau_{oy} = K_{u oy} / (2\pi * f_1)$ , где  $f_1$  – частота единичного усиления (для 154УД1  $f_1 \approx 1\dots2$  МГц)

Передаточная функция усилителя с обратной связью:

$$K_u(p) = -\frac{R_f}{R_1} \cdot \frac{K_{oy}}{1 + p\tau_{oy}}$$

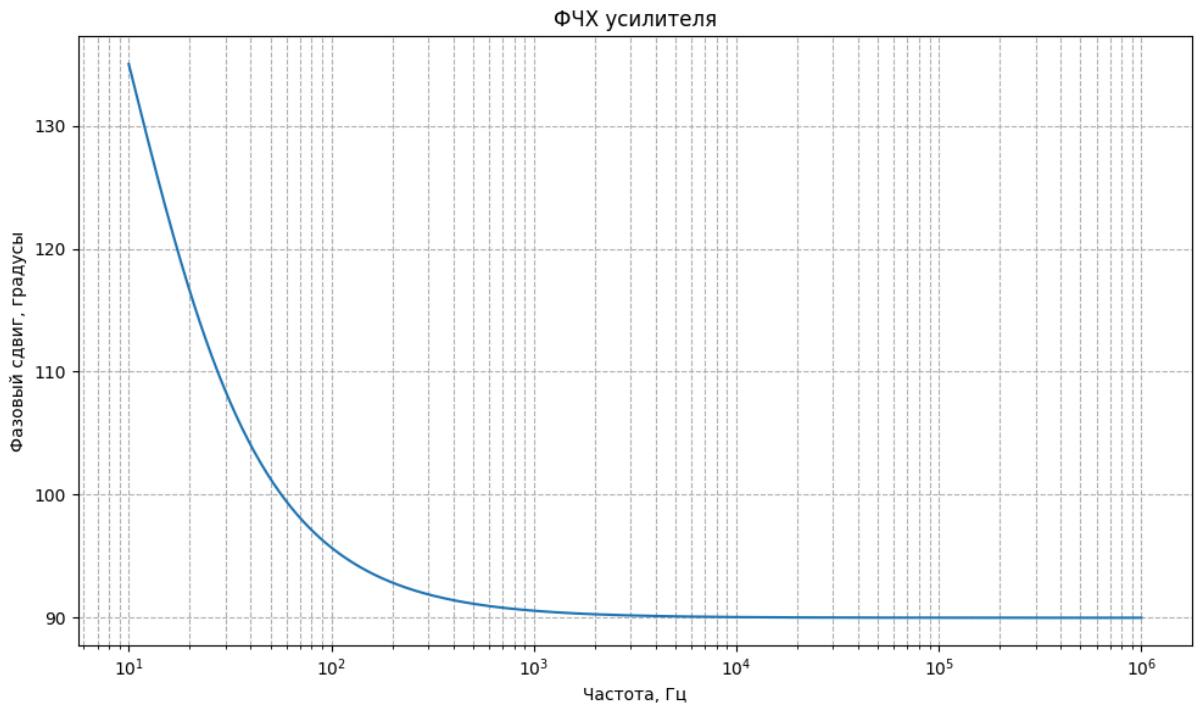
### Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

$$|K_u(j\omega)| = \frac{R_f}{R_1} \cdot \frac{K_{oy}}{\sqrt{1 + (\omega\tau_{oy})^2}}$$



Фазовый сдвиг:

$$\phi(\omega) = -\arctan(\omega\tau_{oy}) + 180^\circ$$



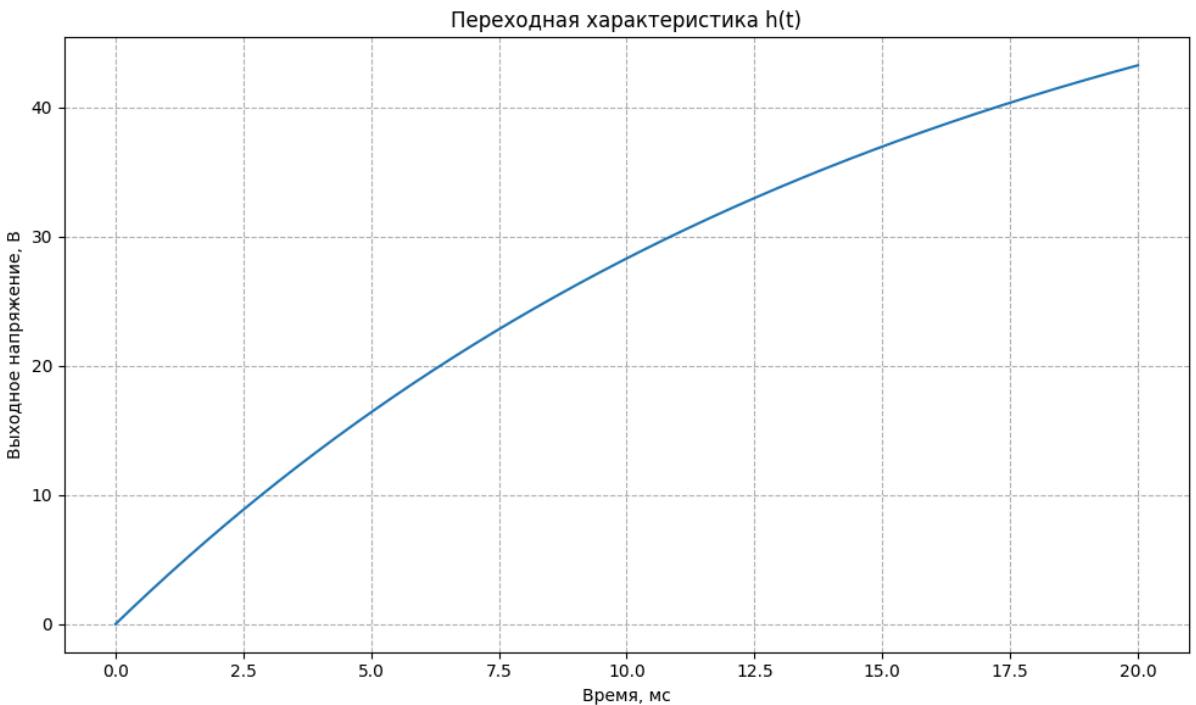
**Примерные значения** (для  $\tau_{oy} \approx 1 \mu\text{s}$ , средние частоты):

Частота (Гц)	$K_u(f)$	$\phi(f) (\circ)$
35	60	0
100	60	-1
1 кГц	60	-10
10 кГц	60	-45
100 кГц	42	-84

### Переходная характеристика $h(t)$

Для первого порядка:

$$h(t) = K_u \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$



- $\tau = \tau_{oy} / (1 + R_1/R_f) \approx \tau_{oy} / 61$
- Для входного прямоугольного сигнала:  $U_m = 10 \text{ мВ}$ ,  $t_i = 10 \text{ мс}$
- $h(t)$  показывает экспоненциальный фронт сигнала на выходе, а для больших  $t$  — “крышу” импульса.

## 9. Входное и выходное сопротивление

Параметр	Значение
$R_{вх}$	$\approx R_1 = 1 \text{ кОм}$
$R_{вых}$	$\approx R_f / (1 + K_{oy}) \approx 1 \text{ кОм}$ (очень мало, почти 0)

## Ошибки и дрейф

<b>Источник ошибки</b>	<b>Оценка</b>
Смещение нуля $U_{см}$	$\pm 1 \dots 5 \text{ мВ} \rightarrow \Delta U_{вых} \approx 60 \dots 300 \text{ мВ}$
Входные токи $I_{вх}$	$50 \dots 200 \text{ нА} \rightarrow \Delta U_{вых} \approx I_{вх} \cdot R_f \approx 3 \dots 12 \text{ мВ}$
Температурный дрейф	$\pm 50 \dots 200 \mu\text{V}/^\circ\text{C} \rightarrow \Delta U_{вых} \approx \pm 2 \dots 8 \text{ мВ при } \Delta T = 40^\circ\text{C}$
Нестабильность питания $\pm 2\%$	$\Delta U_{вых} \approx \pm 1,2 \text{ В}$

### **Амплитудная характеристика $U_{вых} = f(U_{вх})$**

- Линейная зависимость до насыщения:  $|U_{вых}| \leq 0.8 \cdot U_{пит}$
- Максимальная амплитуда выходного сигнала определяется питанием:  $U_{вых \max} \approx 8 \dots 12 \text{ В}$  (для однополярного питания -15 В)

### **Заключение**

- Инвертирующий усилитель на ОУ 154УД1 с  $K_u = 60$  и  $f_n = 35 \text{ Гц}$  рассчитан.
- Определены номиналы пассивных элементов:  $R_1 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_f = 60 \text{ кОм}$ ,  $C_f = 76 \text{ нФ}$ .
- Учтены реальные параметры ОУ ( $K_u_{oy}$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$ ,  $\tau_{oy}$ ) и построены АЧХ, ФЧХ и  $h(t)$ .
- Оценены входное и выходное сопротивления, погрешности из-за смещения нуля, входных токов, температурного дрейфа и нестабильности источника питания.

– Схема готова к сборке и эксплуатации в диапазоне температур -20...+40°C с расчетным коэффициентом усиления и линейной амплитудной характеристикой.