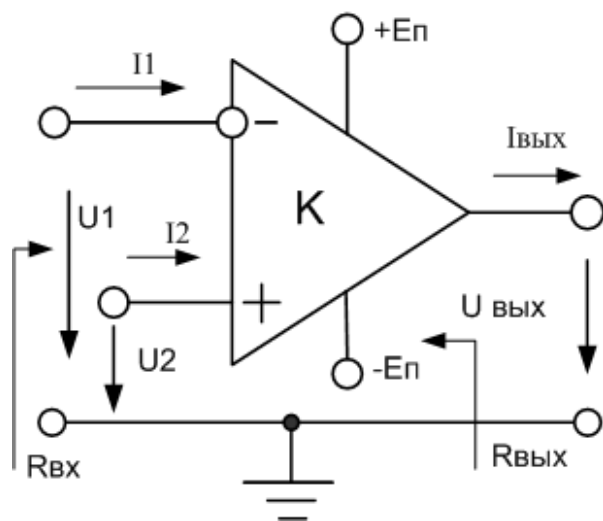


Лекция 6

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционными усилителями (ОУ) называют интегральные микросхемы, которые имеют в полосе частот от 0 до сотен кГц (мегагерц) собственный коэффициент усиления K'_U не менее нескольких тысяч (раньше ОУ называли УПТ – усилители постоянного тока).



Вход 1, обозначенный знаком (-), называют **инвертирующим**.

Вход 2, обозначенный знаком (+), называют **неинвертирующим**.

Входы питания +Еп и -Еп на схемах электрических цепей часто не обозначают.

Выходное напряжение $\underline{U}_{вых} = K'_U (\underline{U}_2 - \underline{U}_1)$.

Так как $K'_U \gg$ весьма велик, а $\underline{U}_{вых}$ огра-

ничено ($|U_{\text{вых}}| < |E_{\text{П}}| - 2B$), то разность $U_2 - U_1 = U_{\gamma} \rightarrow 0$ и называется **виртуальный нуль**.

Свойства идеального ОУ:

1. Дифференциальный коэффициент усиления равен бесконечности $K'_U = \infty$ и разность входных напряжений равна нулю $U_2 - U_1 = 0$.
2. Входные токи ОУ равны нулю: $I_{\text{ex1}} = 0, I_{\text{ex2}} = 0$.
3. Входное сопротивление ОУ бесконечно большое: $R'_{\text{ex}} = \infty$;
4. Выходное сопротивление ОУ равно нулю: $R'_{\text{вых}} = 0$.

Технические характеристики реальных ОУ:

Дифференциальный коэффициент усиления:

$$K'_U = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta(U_2 - U_1)} \approx 10^3 - 10^5.$$

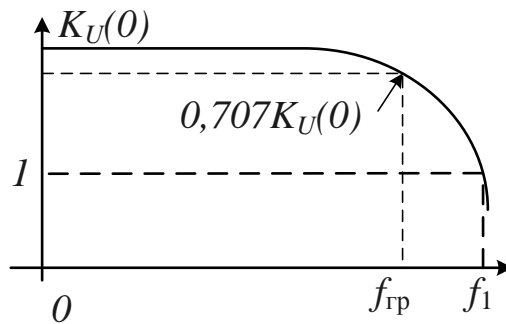
Входное сопротивление $R'_{\text{вх}} \approx 10 \text{ кОм} - 1000 \text{ МОм}$.

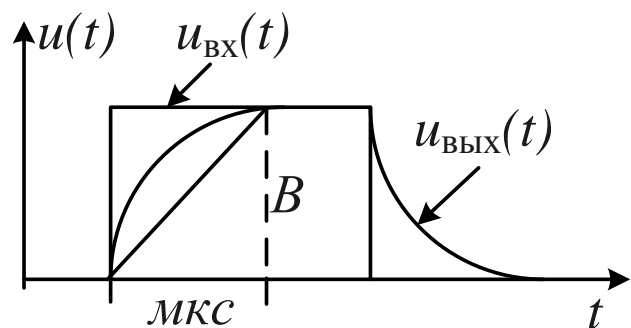
Выходное сопротивление $R'_{\text{вых}} \approx 10 \text{ Ом} - n \cdot 100 \text{ Ом}$.

Частота единичного усиления от сотен ки-

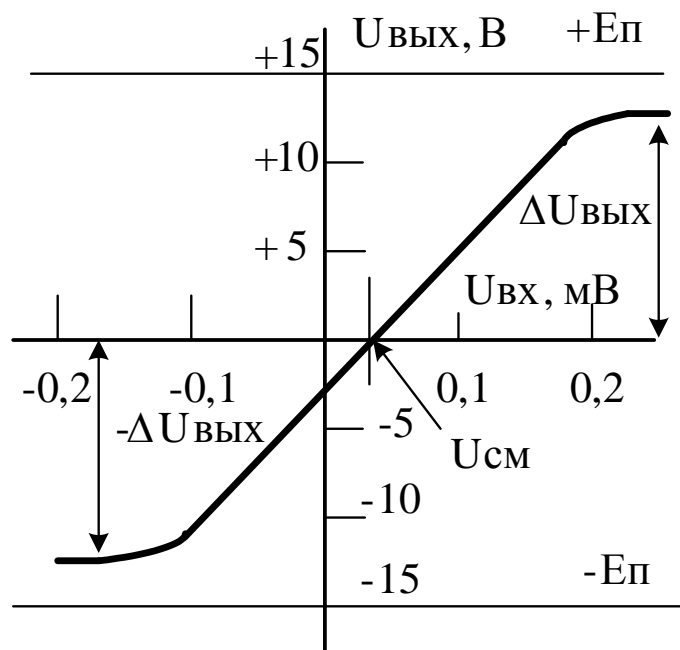
логгерц до сотен мегагерц.

Граничная частота по уровню -3дБ от максимального усиления: $K_U(f_{\text{гр}}) = 0,707 K_U(0)$ достигает сотен мегагерц.





Скорость нарастания напряжения (В/мкс), определяющая переходные характеристики ОУ, может составлять от десятков мВ/мкс до сотен В/мкс.



Статическая передаточная характеристика показывает зависимость выходного напряжения ОУ от напряжения на входе. При входном напряжении порядка 0,2 мВ выходное напряжение достигает предельного значения

$$|\Delta U_{вых}| \approx |E_{П}| - 2B.$$

Для стандартных напряжений питания $E_{П} = \pm 15\text{ В}$ диапазон выходного напряжения

$$\Delta U_{вых} \approx \pm 12 \div 13\text{ В}.$$

Свойства каскада с ОУ определяют *внешние обратные связи* (ОС).

Каскады с ОУ могут выполнять *сложение, вычитание, дифференцирование, интегрирование сигналов, создавать различные функциональные зависимости* и называются *операционные усилители (решающие усилители)*.

Дифференциальный усилитель

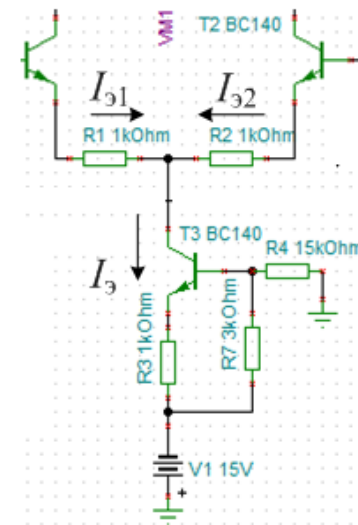
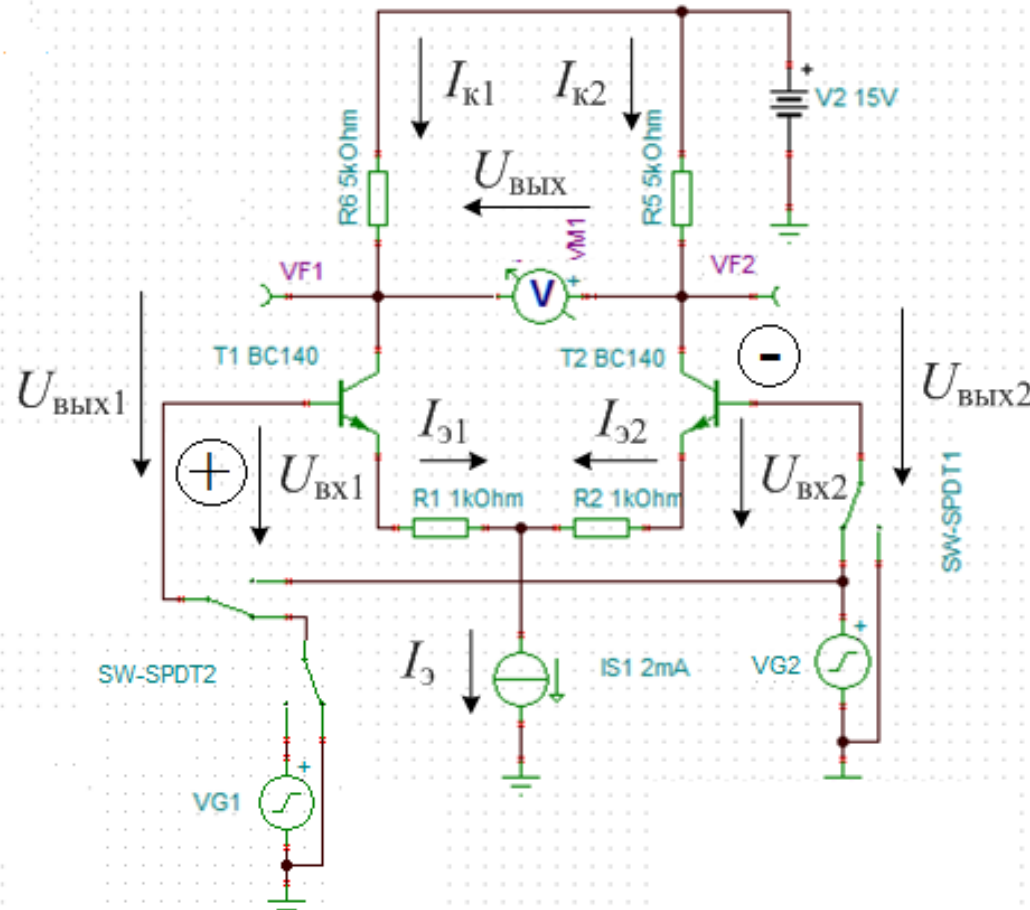
Применяется на входе ОУ.

Неинвертирующий вход $U_{вх1}$;

Инвертирующий вход $U_{вх2}$;

$$I_{\vartheta} = I_{\vartheta1} + I_{\vartheta2} = const;$$

$$U_{вых} = U_{вых2} - U_{вых1}.$$



Источник
тока

Рис.6.1

На входы могут действовать два вида сигналов:

Синфазные и противофазные (дифференциальные).

Появляется выходное напряжение:

$$U_{вых} = U_{вых2} - U_{вых1} = -K_2 U_{вх2} - (-K_1 U_{вх1}),$$

где: K_1, K_2 - коэффициенты усиления каскадов на первом и втором транзисторе.

Рассмотрим случай:

А) Если $K_1 = K_2 = K$, $U_{вых} = K(U_{вх1} - U_{вх2})$.

Сигналы дифференциальные: $U_{вх1} = -U_{вх2}$.

Дифференциальный сигнал: $U_{диф} = \frac{U_{вх1} - U_{вх2}}{2}$.

Сигнальные эмиттерные токи $I_{э1}$ и $I_{э2}$ противофазные и компенсируют друг друга. Источник тока $I_э$ не влияет на усиление.

Усиление находим как в резистивном усилителе:

$$K_1 = K_2 = K_{\text{диф}} = \frac{R_K}{R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}}.$$

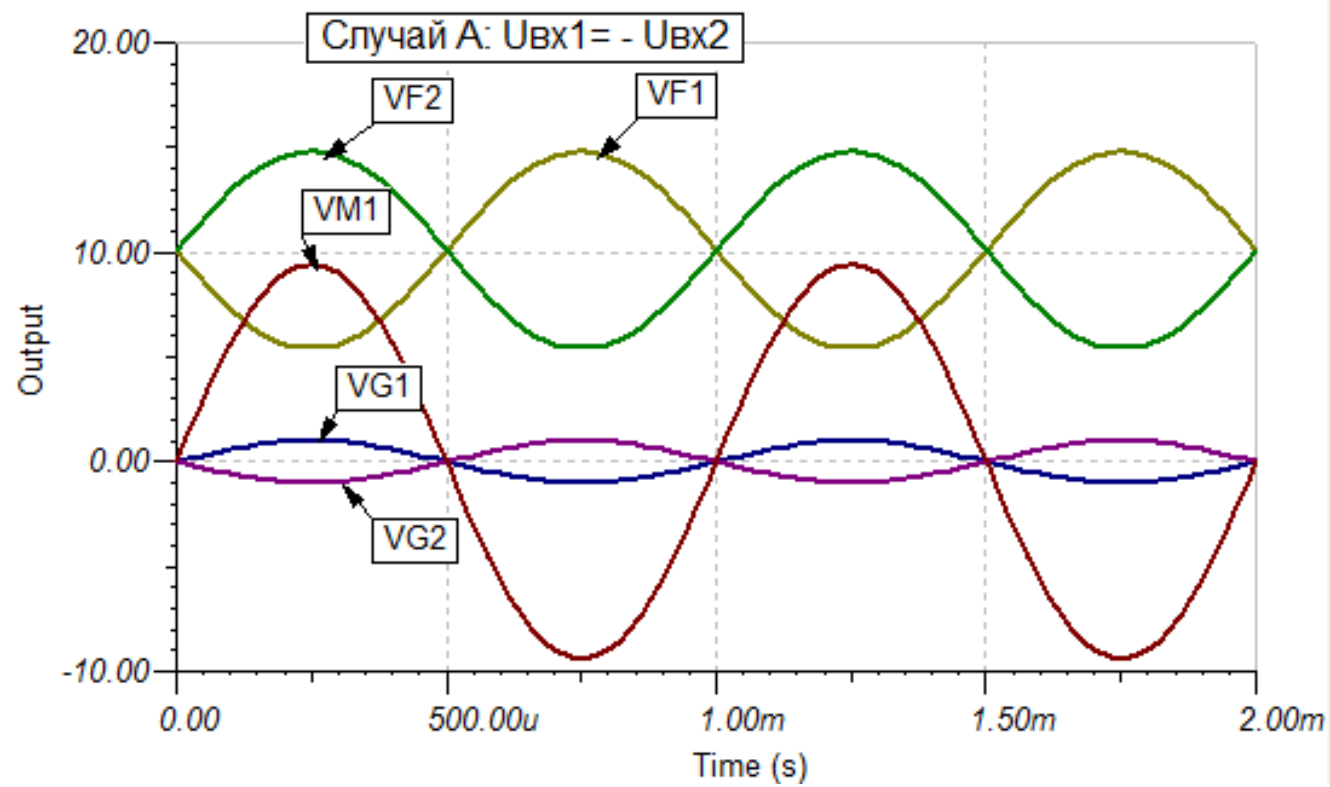
$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_K}{R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}} (U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}) = 2U_{\text{диф}} \frac{R_K}{R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}}.$$

$$U_{\text{вх}} = 1\text{В}, R_K = 5\text{кОм}, R_{\text{Э}} = 1\text{кОм}, r_{\text{Э}} \approx \frac{25\text{мВ}}{I_{\text{Э}}}.$$

$$U_{\text{вых}} = 2 \cdot 5 = 10\text{В}$$

На несимметричном выходе $VF2$ усиление меньше в два раза:

$$K_{\text{нс}} = \frac{K_{\text{диф}}}{2}.$$

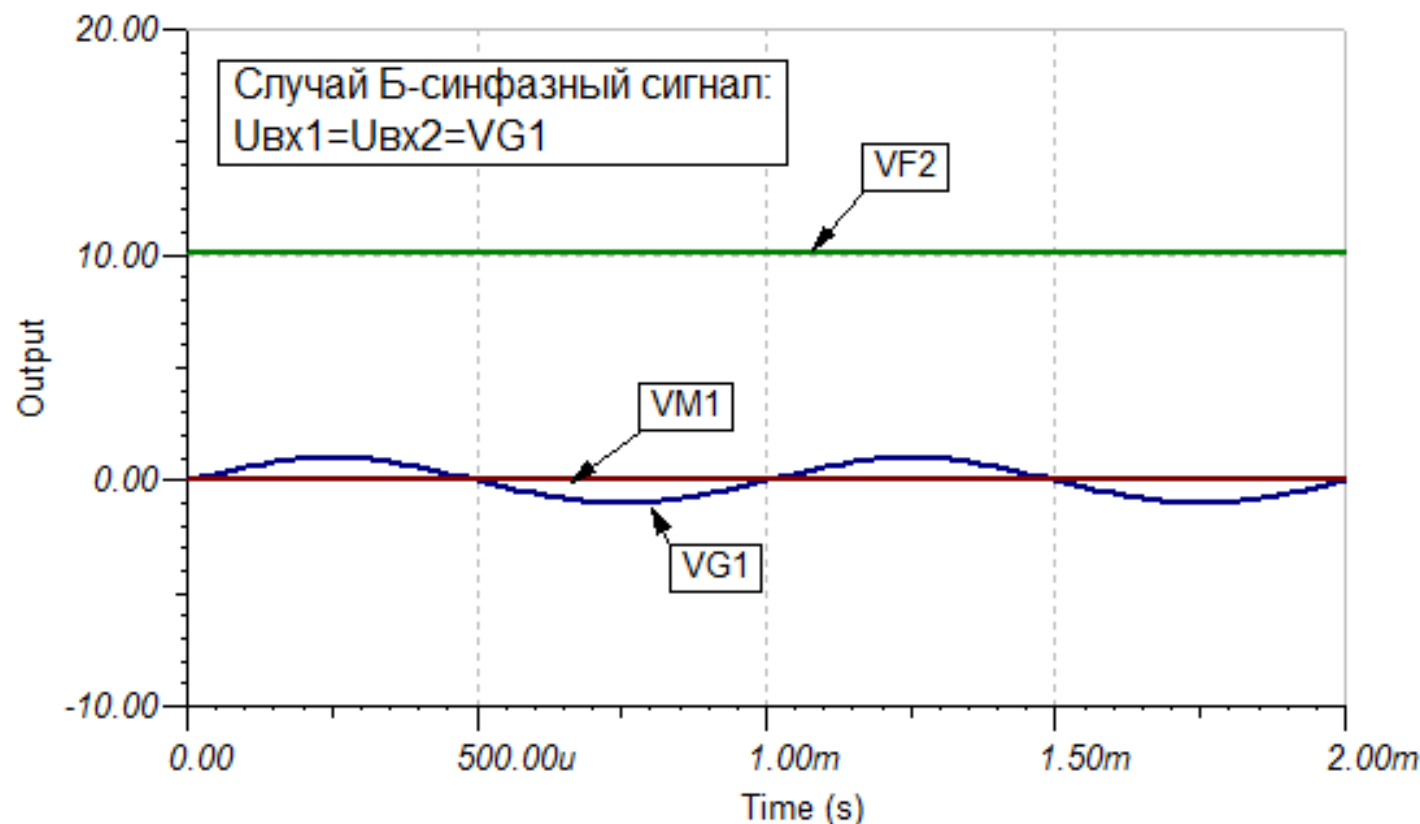


Б) Если $U_{вх1} = U_{вх2}$ - *синфазный сигнал*, $U_{вых} = 0$.

Источник тока создает сильную отрицательную обратную связь.

$$U_{вых1} = U_{вых2} = -\frac{R_{\kappa}}{R_{\mathcal{E}} + r_{\mathcal{E}} + R_{ит}} U_{сф}; \quad R_{ит} \rightarrow \infty.$$

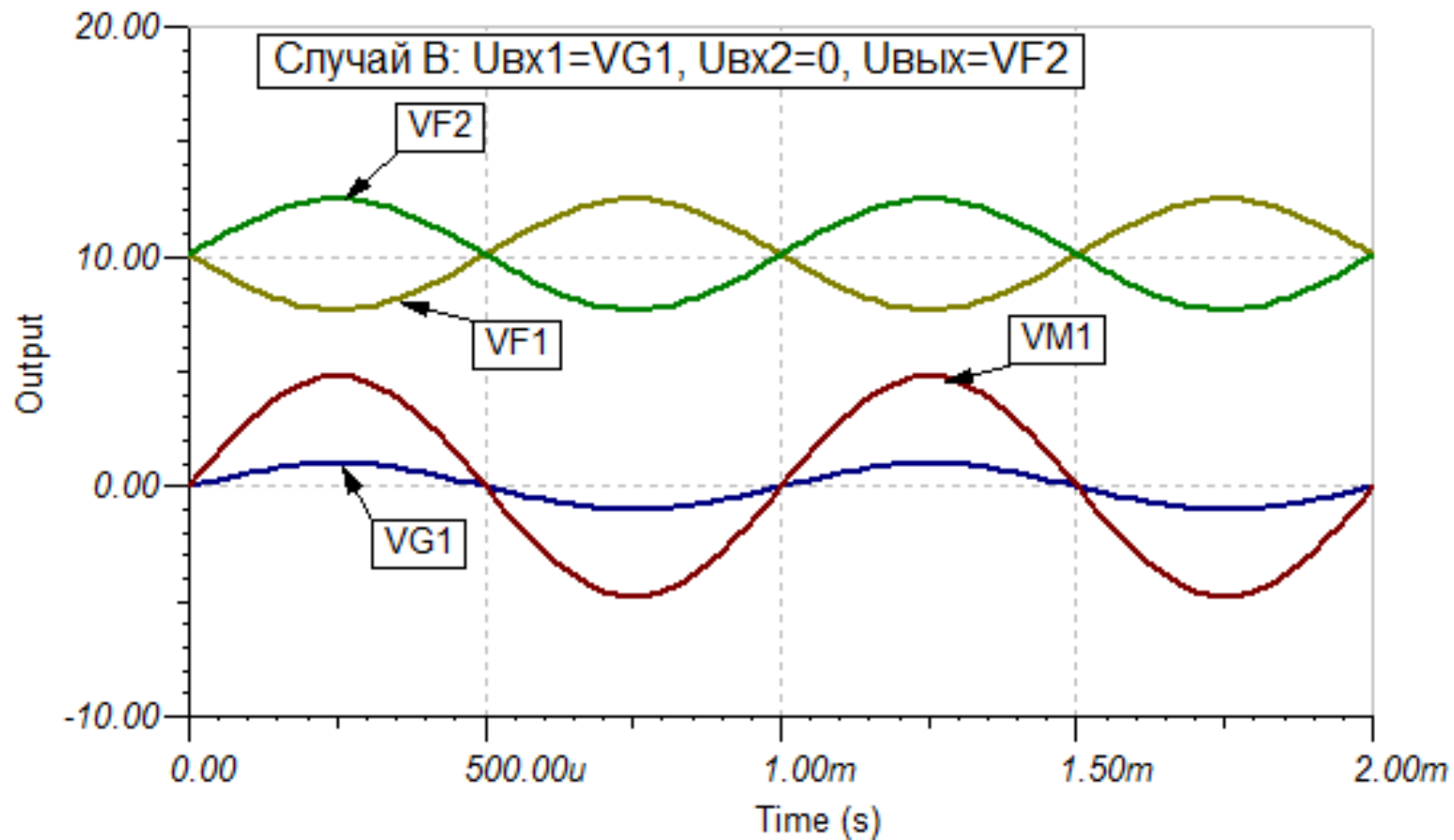
$$U_{выхсф} = U_{вых2} - U_{вых1} = 0.$$



На кабели и двухпроводные линии передачи сигналов наводятся помехи от внешних электромагнитных полей. Эти помехи являются синфазными и ослабляются в дифференциальном усилителе. Подавляя внешние синфазные помехи, дифференциальный усилитель на приемном конце восстанавливает полезный сигнал.

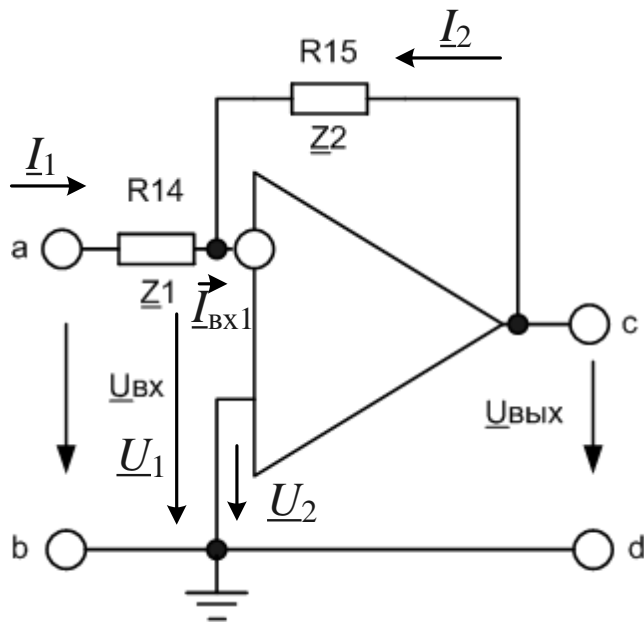
В) Если $U_{ex2} = 0$,

$$U_{ex1} = VG1, U_{вых2} = VF2 = \frac{K_{диф}}{4} U_{ex1} = \frac{K_{диф}}{4} \cdot VG1.$$



Частотно-зависимые звенья с операционными усилителями

Инвертирующий ОУ



Вывод формулы:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{I}_{\text{вх}1} = 0,$$

$\underline{U}_2 = 0, \underline{U}_1 = 0$ - виртуальный нуль.

$$\frac{\underline{U}_{\text{вх}}}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{U}_{\text{вых}}}{\underline{Z}_2} = 0,$$

$$\underline{U}_{\text{вых}} = -\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} \underline{U}_{\text{вх}}.$$

Комплексный коэффициент передачи:

$$\underline{K}_U(j\omega) = \frac{\underline{U}_{вых}}{\underline{U}_{вх}} = -\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}.$$

Операторная передаточная функция:

$$K(p) = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}.$$

Пример: $R_1 = R_2 = 10\text{кОм}$.

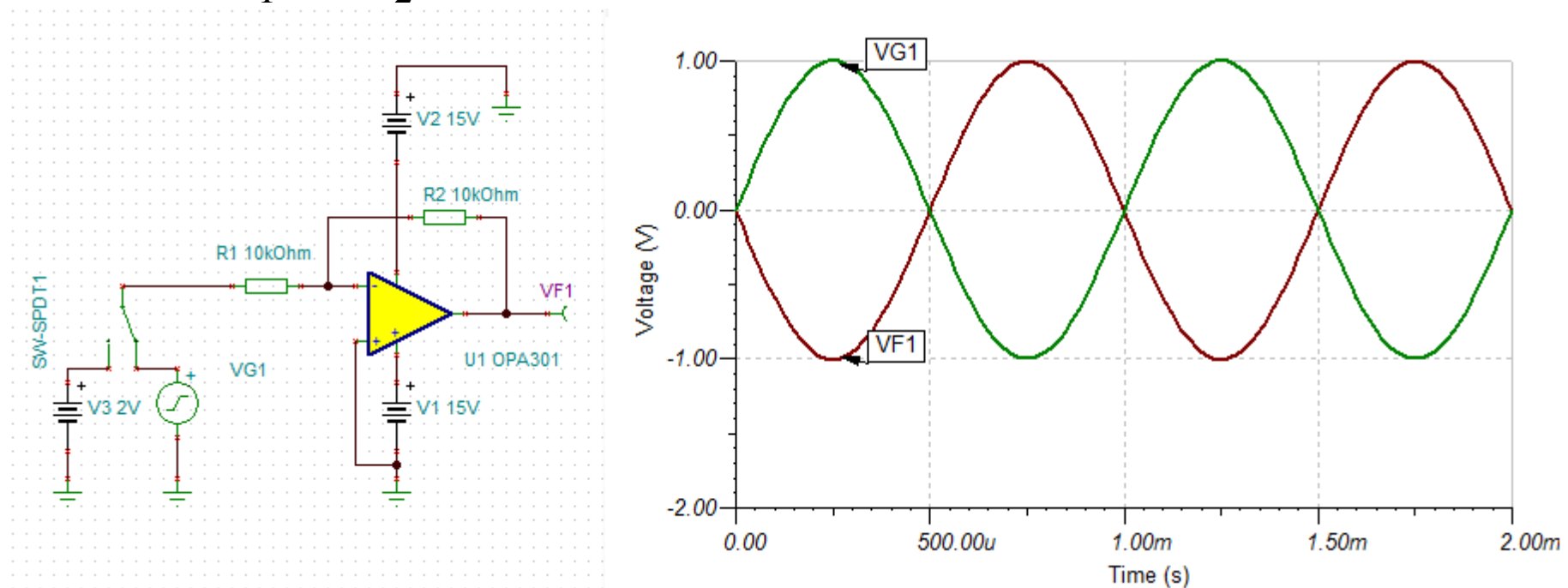
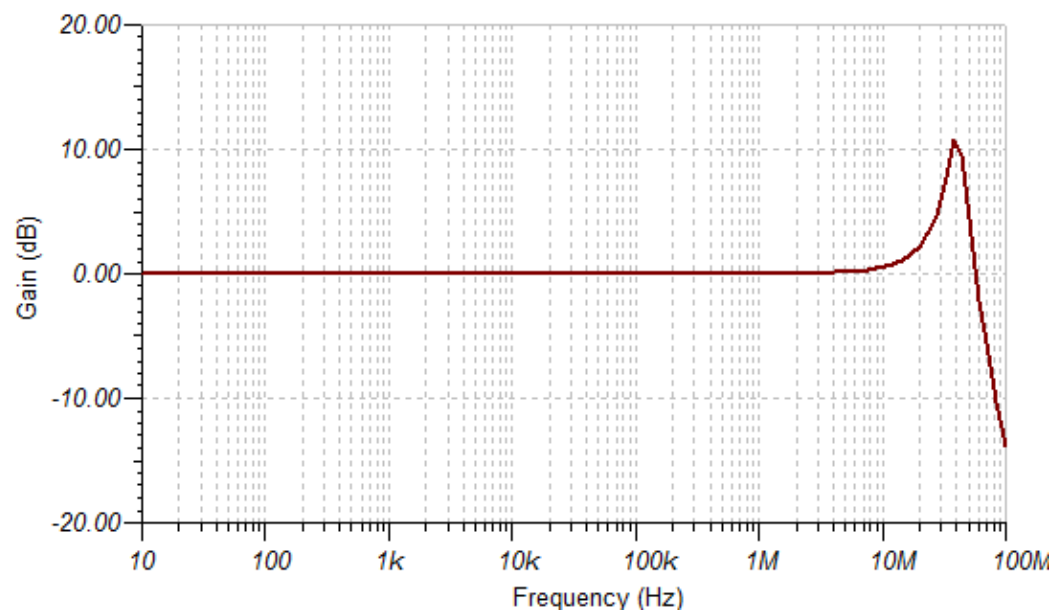
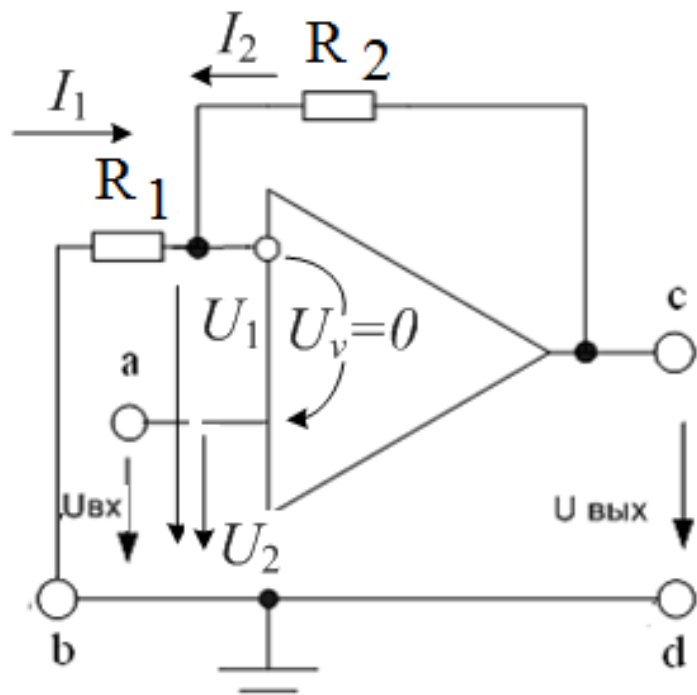


Рис.6.2



Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

Неинвертирующий ОУ



$$U_1 \approx U_2 = U_{\text{вх}};$$

$$I_1 = \frac{0 - U_{\text{вх}}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}}}{R_2}.$$

$$I_1 + I_2 = 0;$$

$$\frac{U_{\text{вых}}}{R_2} - \frac{U_{\text{вх}}}{R_2} - \frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = 0;$$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{R_1 + R_2}{R_1}.$$

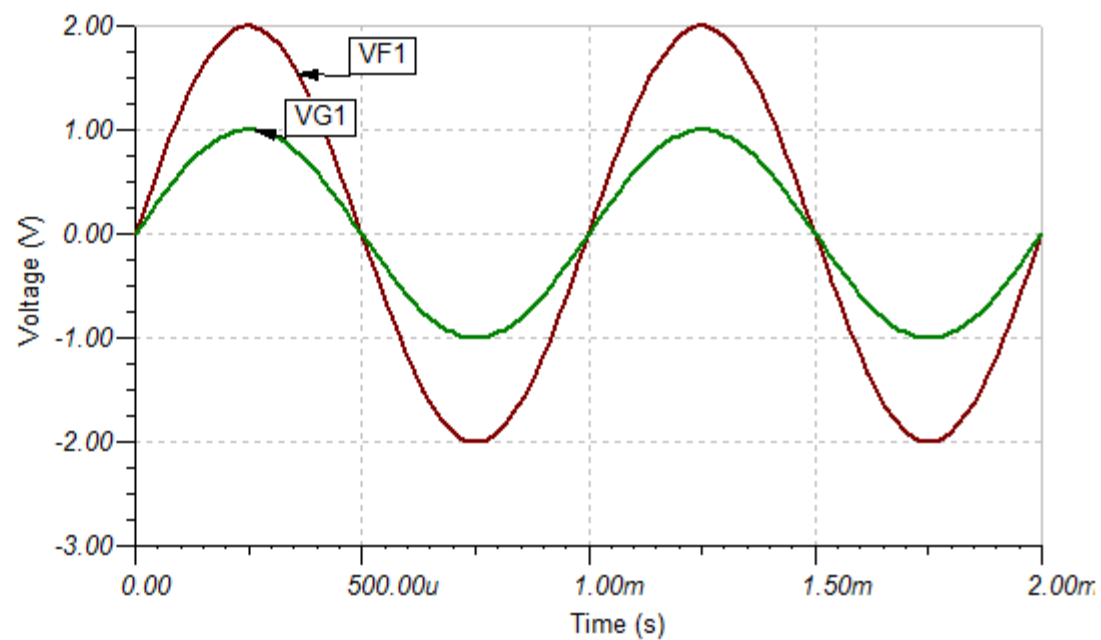
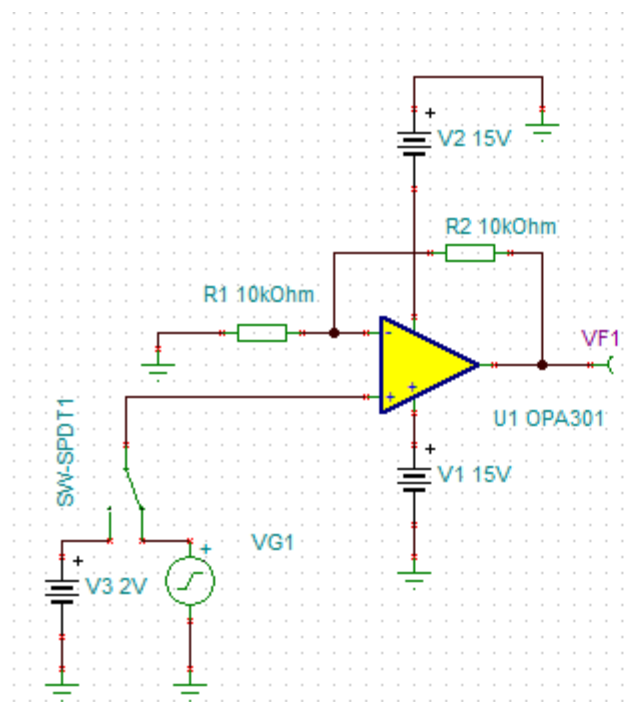
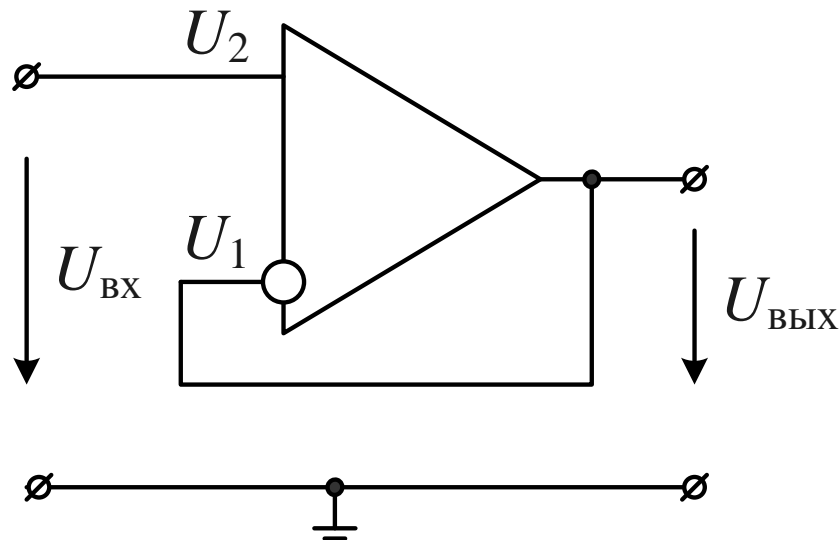


Рис.6.3

Повторитель напряжения



В неинвертирующем ОУ сделаем:

$$R_1 = \infty, R_2 = 0$$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{R_1 + R_2}{R_1} =$$

$$= U_{\text{вх}} \frac{1 + \frac{0}{\infty}}{1} = U_{\text{вх}}.$$

В повторителе напряжения $R_{\text{вх}} = \infty, R_{\text{вых}} = 0$, коэффициент передачи равен 1.

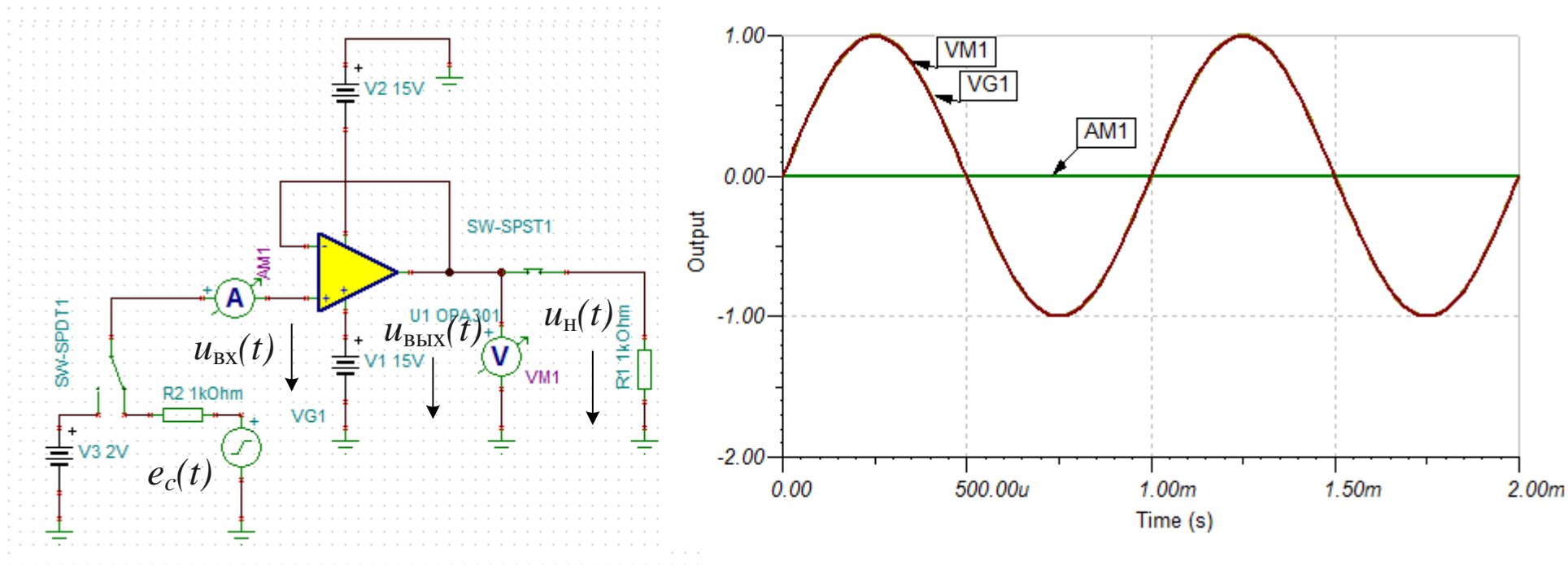


Рис.6.4

Дано: $e_c(t) = 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 10^3 t) \text{ В}$, $R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}$.

Определить напряжение на нагрузке и мощность в нагрузке.

Как измениться мощность, если нагрузку подключить непосредственно к источнику сигнала?

Решение

В повторителе входной ток равен нулю, коэффициент передачи равен единице: $u_{вх}(t) = e_c(t) = u_{вых}(t)$.

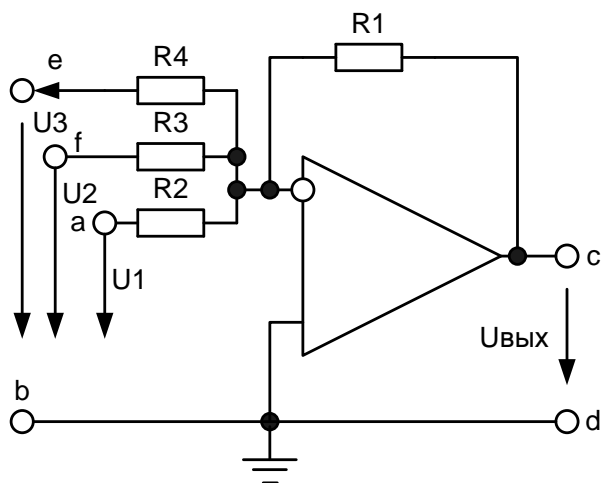
Мощность в нагрузке: $P_n = \frac{U_{вых}^2}{2R_n} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$.

Если нагрузку подключить к генератору, то:

$$u_n(t) = e_c(t) \frac{R_n}{R_n + R_{ген}} = 0,5 \cdot \sin(2\pi \cdot 10^3 t) \text{ В};$$

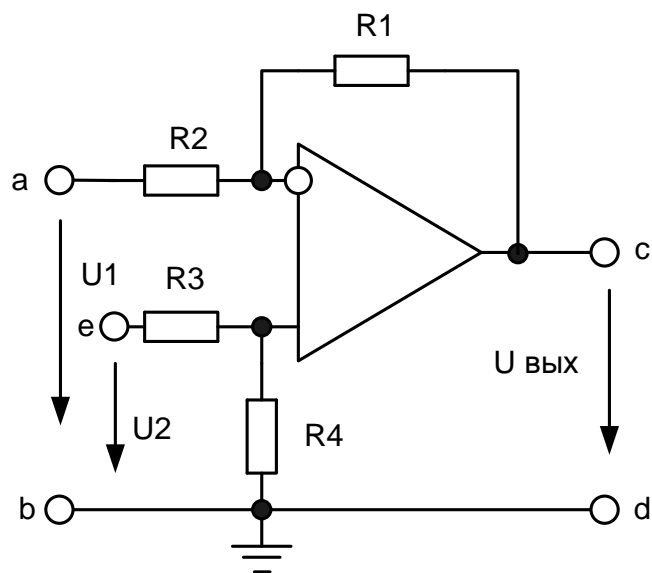
$$P'_n = \frac{0,5^2}{2R_n} = 0,125 \cdot \text{мВт}.$$

Инвертирующий сумматор



$$U_{вых} = - \left(\frac{R_1}{R_2} U_1 + \frac{R_1}{R_3} U_2 + \frac{R_1}{R_4} U_3 \right)$$

Вычитающий ОУ

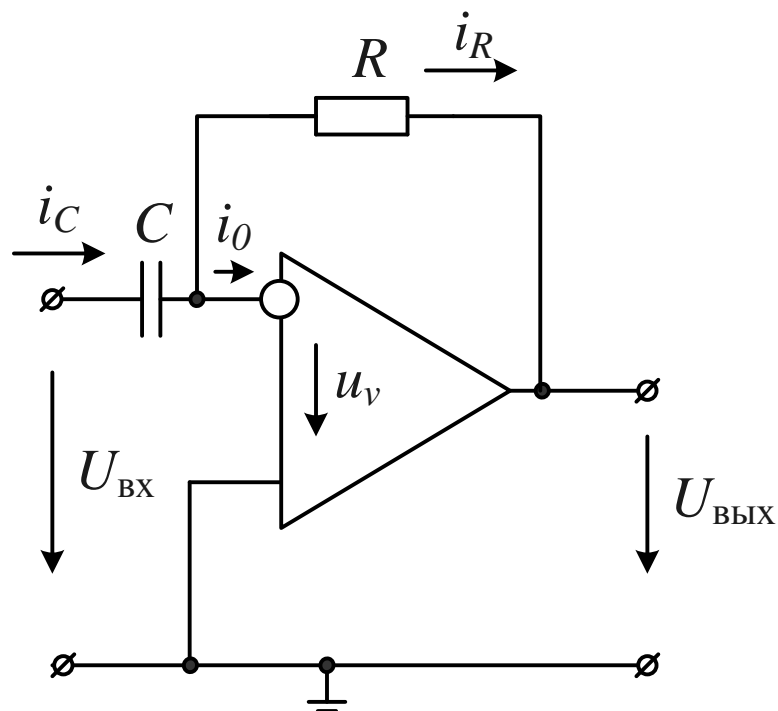


$$U_{вых} = \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) / \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \right] \cdot \frac{R_4}{R_3} U_2 - \frac{R_1}{R_2} U_1.$$

Если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, $U_{вых} = U_2 - U_1$

Дифференцирующее звено

Вывод формул:



$$i_C = i_R + i_0.$$

Входной ток $i_0 = 0$.

Напряжение между входами (виртуальный нуль): $u_v = 0$.

$$i_C = C \frac{du_{\text{вх}}}{dt} = i_R = -\frac{u_{\text{вых}}}{R}.$$

Получим: $u_{\text{вых}} = -RC \frac{du_{\text{вх}}}{dt} = -\tau \frac{du_{\text{вх}}}{dt},$

$\tau = RC$ - постоянная времени цепи.

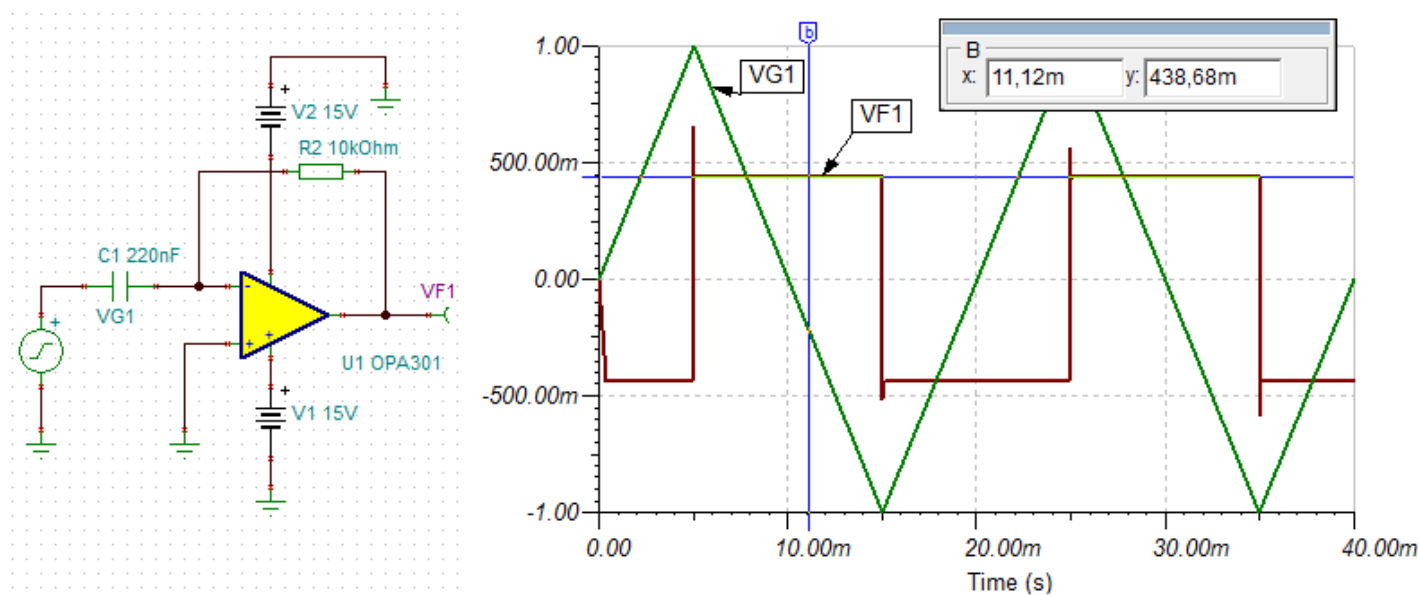


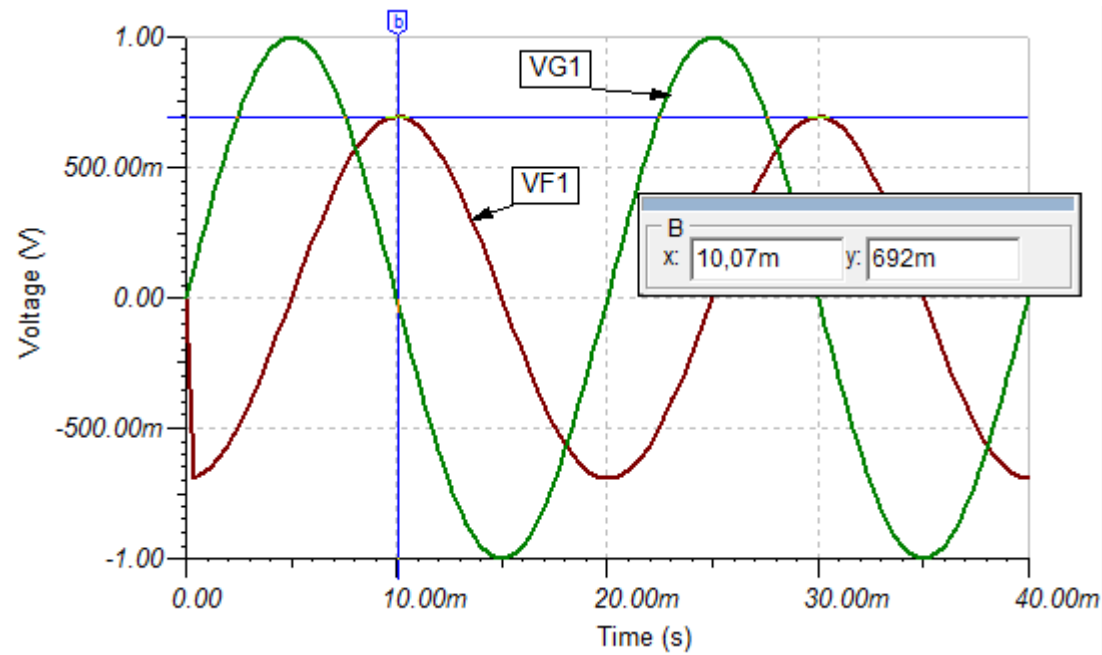
Рис.6.5

$$\frac{du_{ex}}{dt} = \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{1B}{5мс} = 200B/c,$$

$$\tau = RC = 10^4 \cdot 220 \cdot 10^{-9} = 2,2 \cdot 10^{-3}c,$$

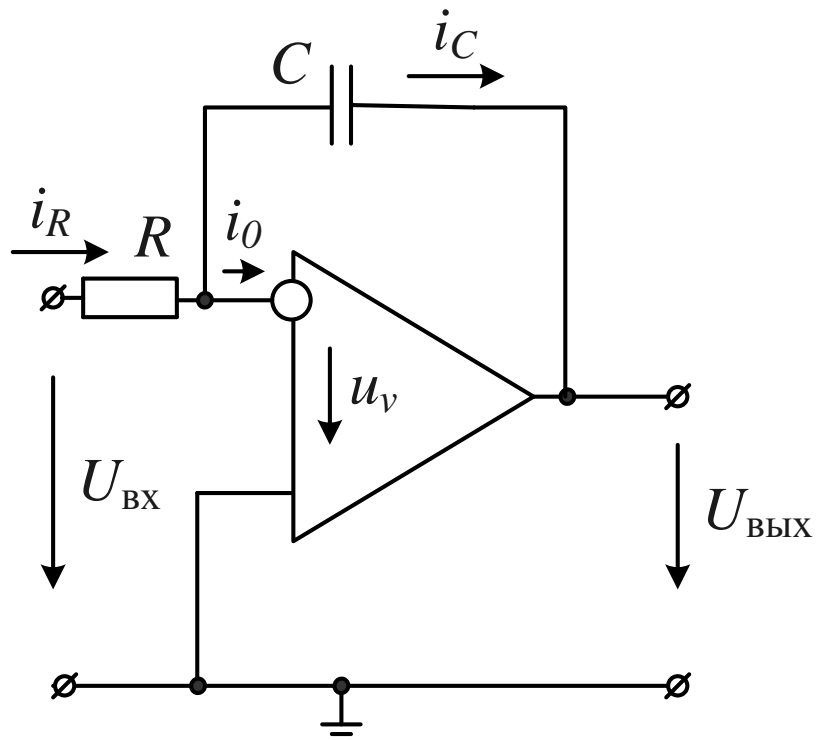
$$u_{вых} = -RC \frac{du_{ex}}{dt} = -2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 200 = -440mB.$$

Синусоидальный сигнал



$$\begin{aligned}
 u_{\text{вых}} &= -RC \frac{d}{dt} (1 \cdot \sin 2\pi \cdot 50t) = \\
 &= -RC \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot \cos(2\pi \cdot 50t) = \\
 &= -2,2 \cdot 10^{-3} 2\pi \cdot 50 \cdot \cos(2\pi \cdot 50t) = -0,690 \cdot \cos(2\pi \cdot 50t) \text{ B.}
 \end{aligned}$$

Интегратор



$$\begin{aligned}
 i_R &= \frac{u_{\text{вх}}}{R} = i_C = C \frac{d(0 - u_{\text{вых}})}{dt} = \\
 &= -C \frac{du_{\text{вых}}}{dt} ; \\
 \frac{du_{\text{вых}}}{dt} &= -\frac{1}{RC} u_{\text{вх}} ; \\
 u_{\text{вых}} &= -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}} dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_{\text{вх}} dt .
 \end{aligned}$$

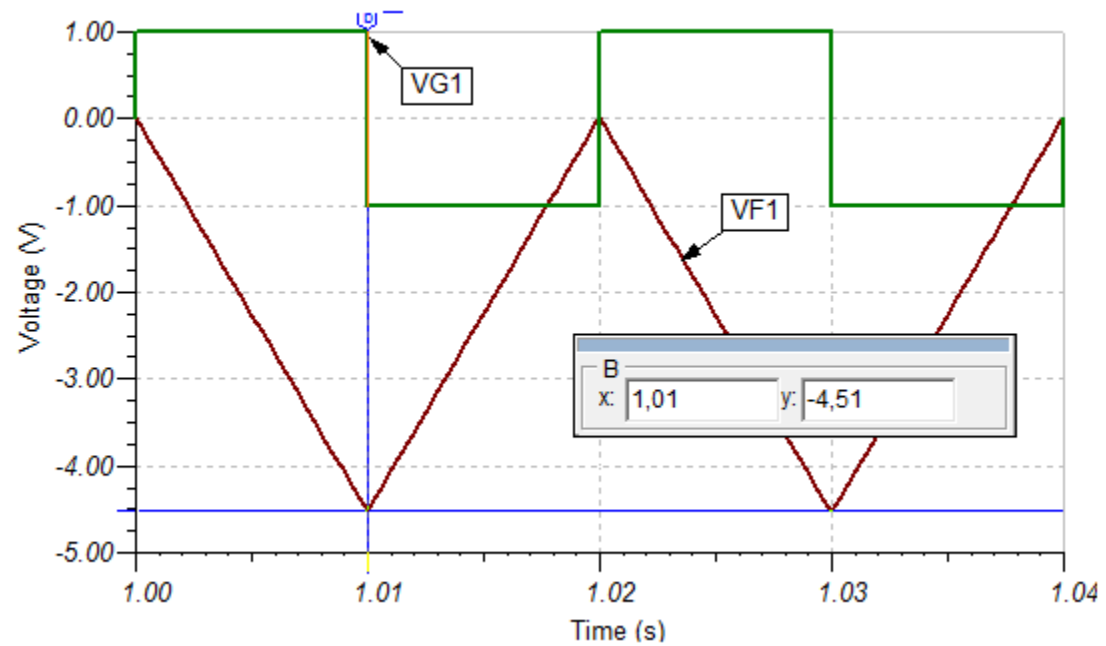
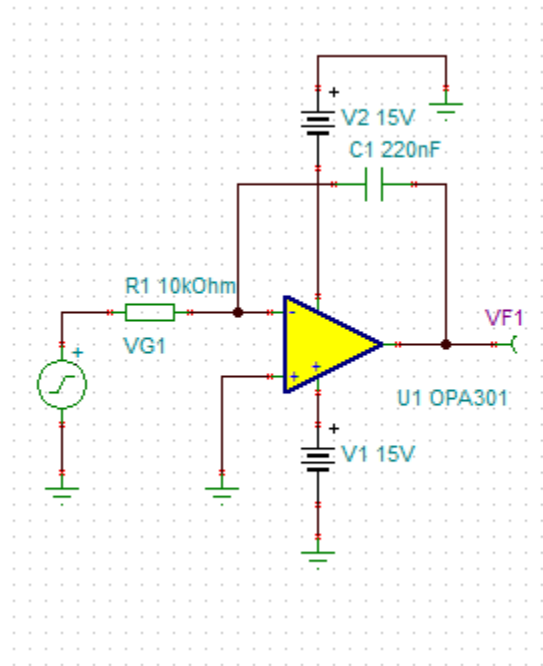


Рис.6.6

$$u_{\text{выхмин}} = -\frac{1}{RC} \int_0^{10^{-2}} 1 \cdot dt - \frac{1}{2,2 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 \cdot 10^{-2} = -\frac{10}{2,2} = -4,54 \text{ В.}$$

Управляемые источники напряжения и тока

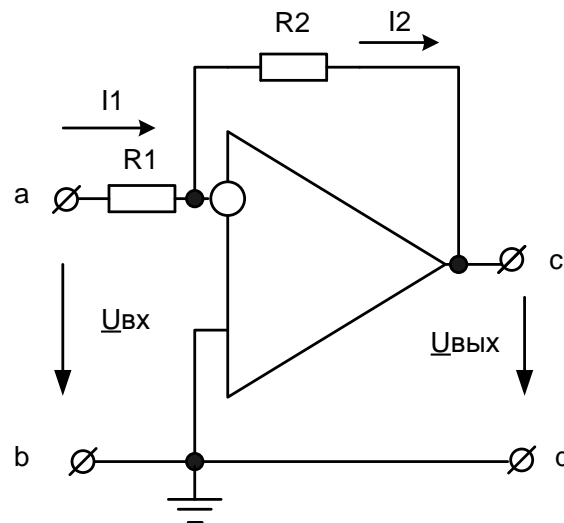


Рис.4.25. ИТУН ($U_{\text{вых}} = -\frac{R_2}{R_1} U_{\text{вх}} = KU_{\text{вх}}$)
и ИТУН ($I_2 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}$)

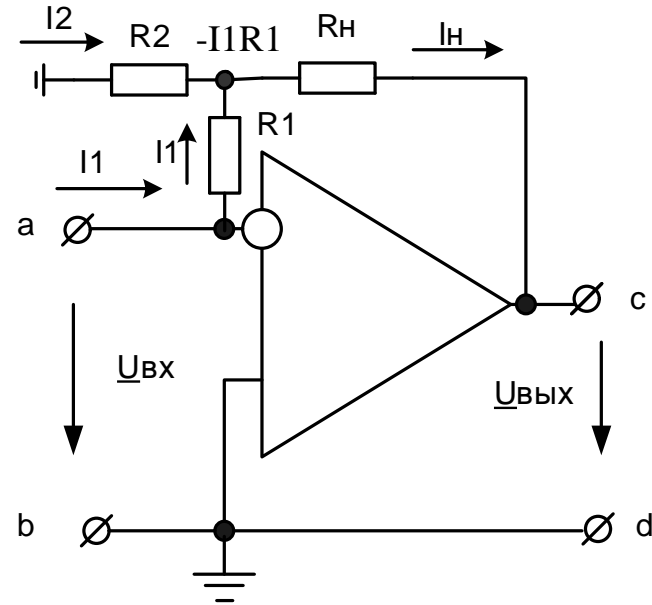
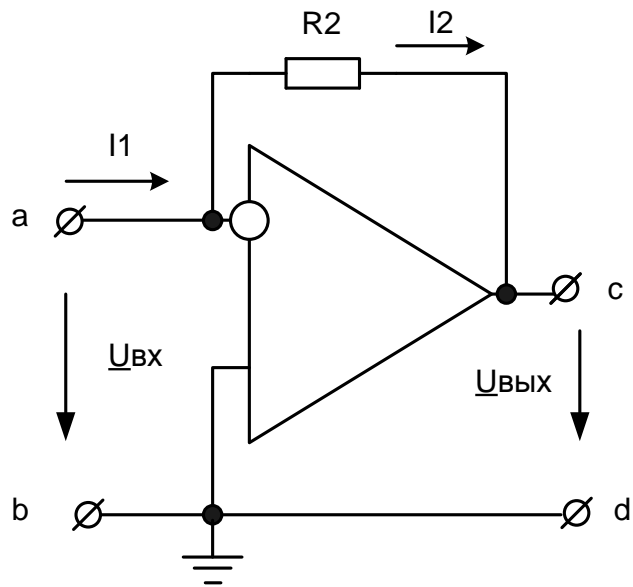
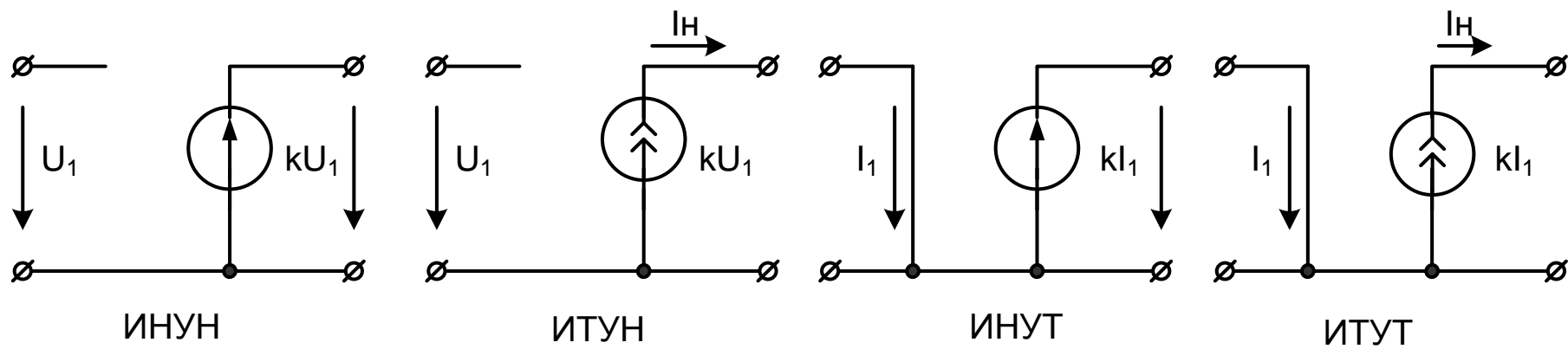


Рис.4.26.ИНУТ ($U_{вых} = -I_1 R_2$) 4.27. ИТУТ ($I_H = (1 + \frac{R_1}{R_2}) I_1$)

$$I_H = I_1 + I_2 = I_1 + \frac{I_1 R_1}{R_2} = (1 + \frac{R_1}{R_2}) I_1 = k I_1$$



Активные фильтры

Активный ФНЧ первого порядка

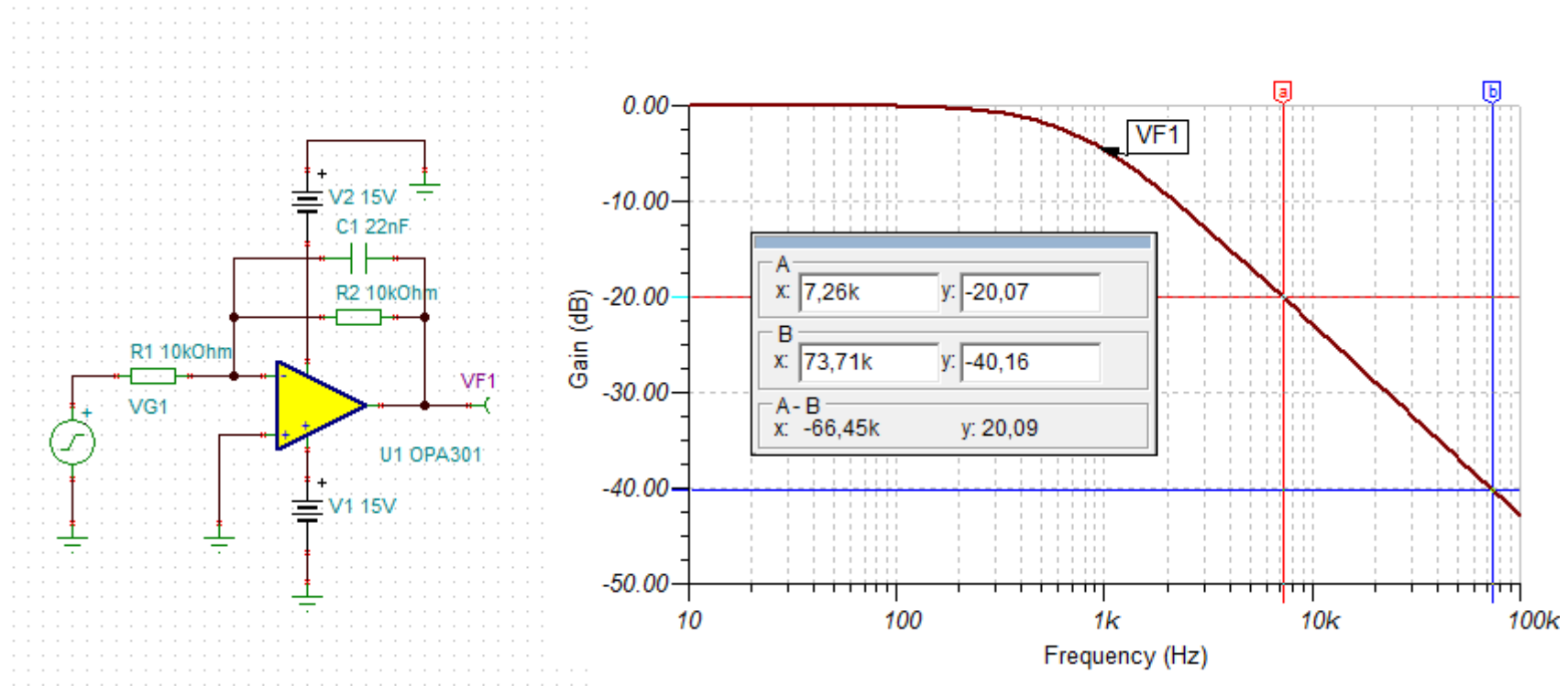


Рис.6.7

Полоса пропускания по уровню -3дб составляет 725 Гц. В полосе задерживания для ФНЧ первого порядка логарифмическая АЧХ (ЛАЧХ) имеет наклон -20дб/дек.

$$\underline{K}(j\omega) = -\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} = -\frac{R_2 \frac{1}{j\omega C_1}}{(R_2 + \frac{1}{j\omega C_1})R_1} = -\frac{R_2}{(1 + j\omega C_1 R_2)R_1}.$$

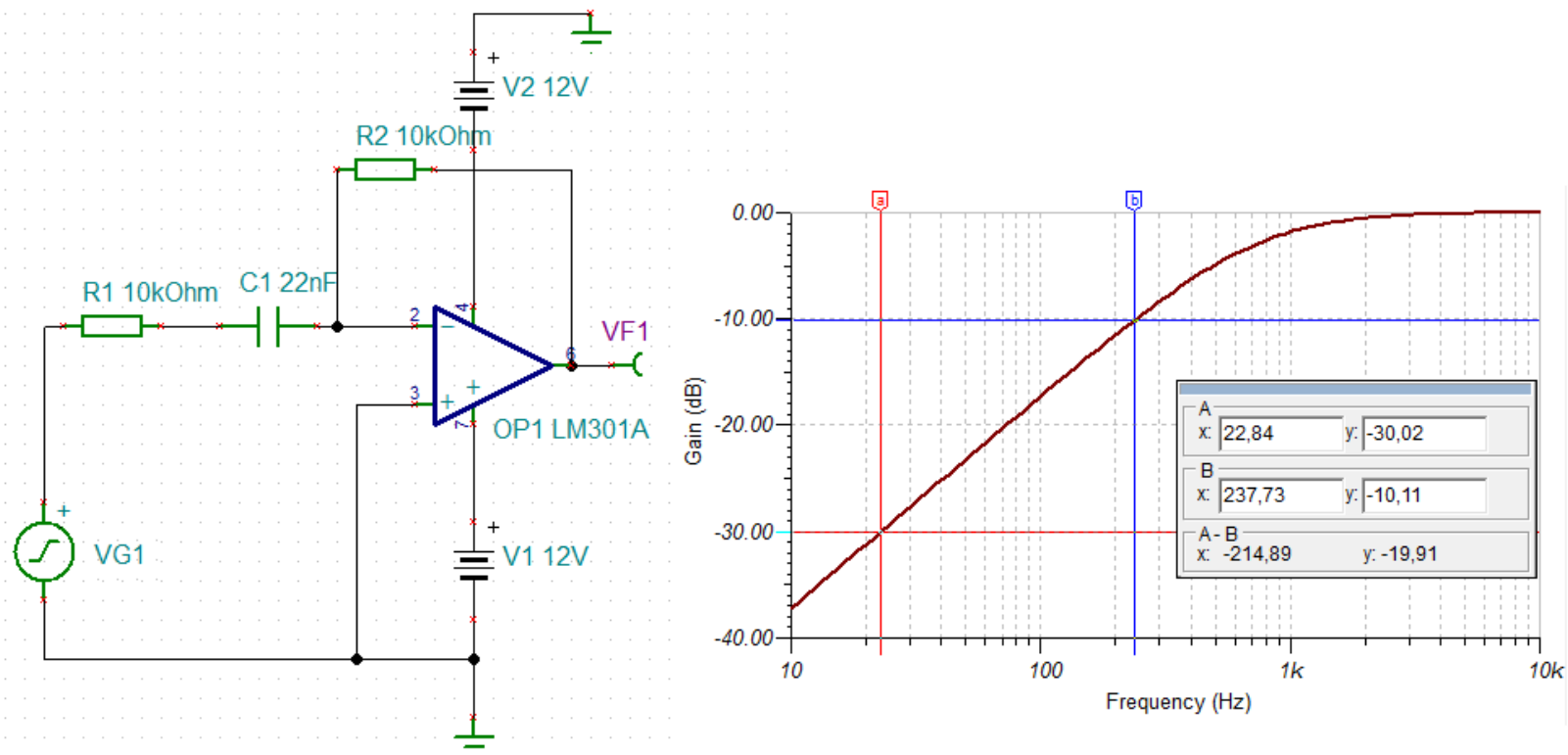
$$K(\omega) = -\frac{R_2 / R_1}{\sqrt{1 + (\omega C_1 R_2)^2}}.$$

Передаточная функция

Заменяем $j\omega \rightarrow p$:

$$K(p) = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} = -\frac{R_2 \frac{1}{pC_1}}{(R_2 + \frac{1}{pC_1})R_1} = -\frac{R_2}{(1 + pC_1 R_2)R_1}.$$

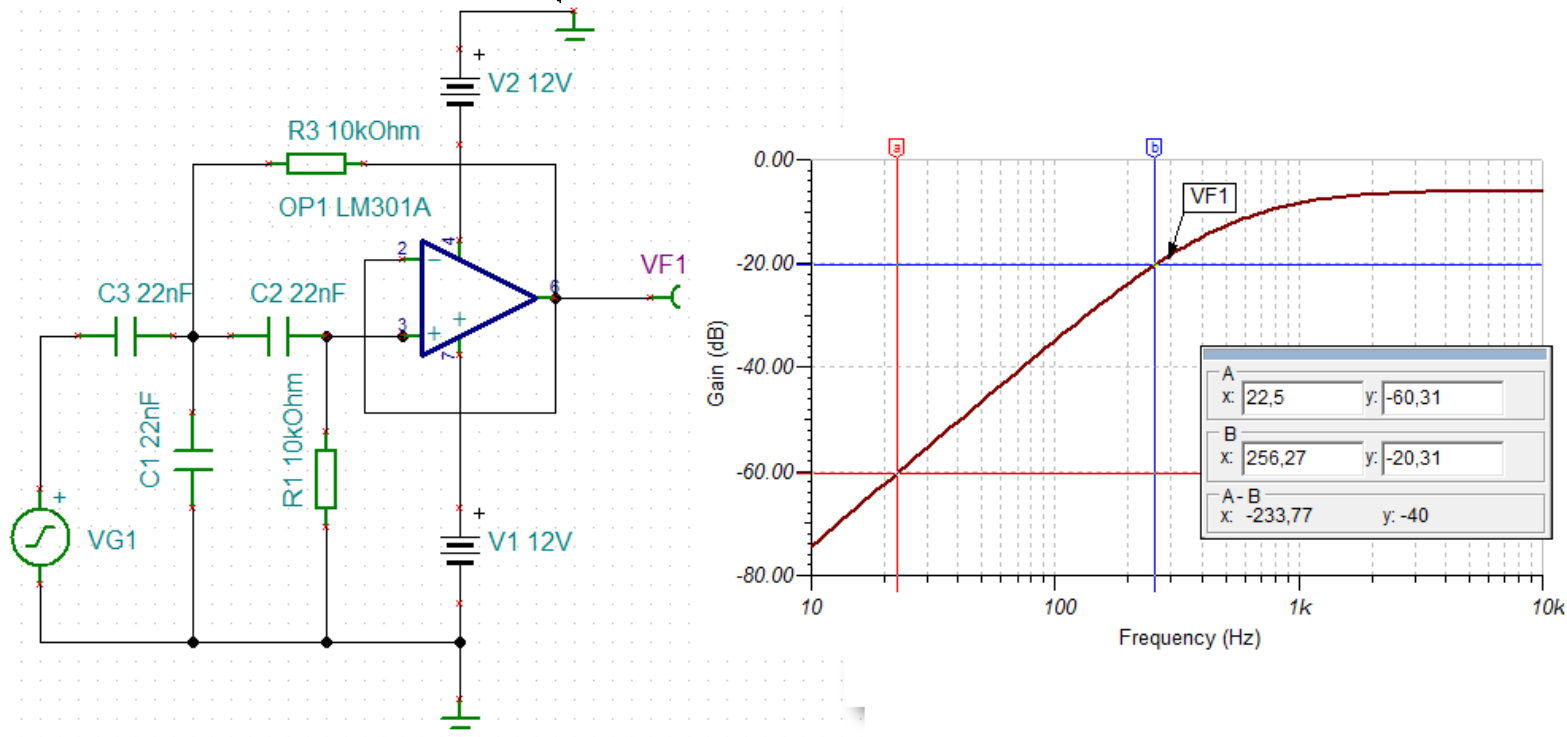
Активный фильтр высоких частот первого порядка



Частота среза по уровню -3дб равна 725Гц. Наклон ЛАЧХ в полосе задерживания -20дб/дек.

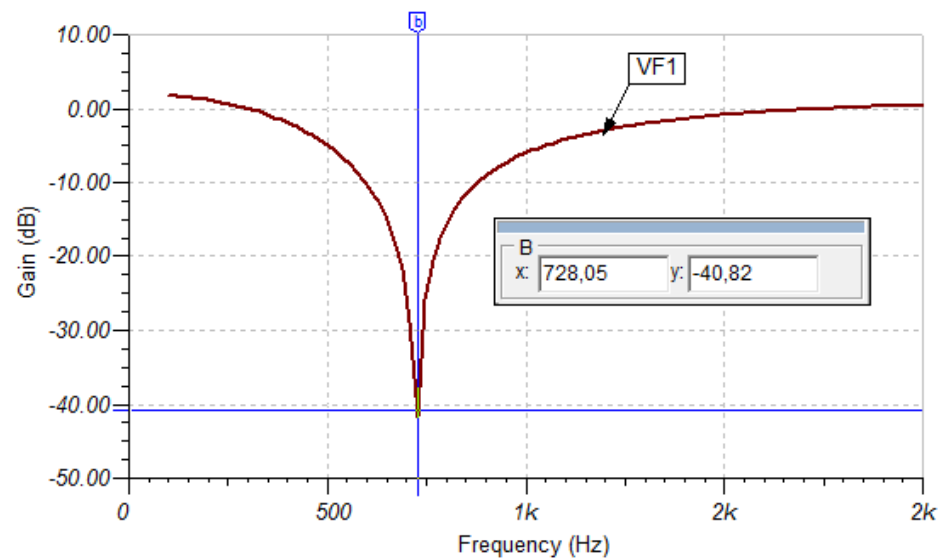
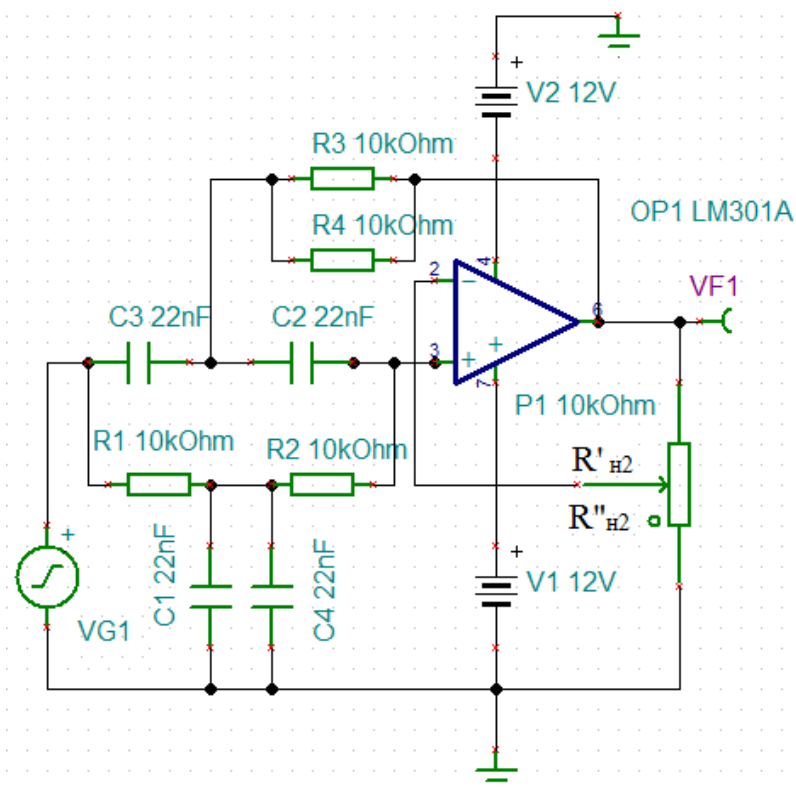
Активный ФВЧ второго порядка

$$K(\omega) = \frac{K\omega^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2(\frac{\omega_0}{q})^2}}$$



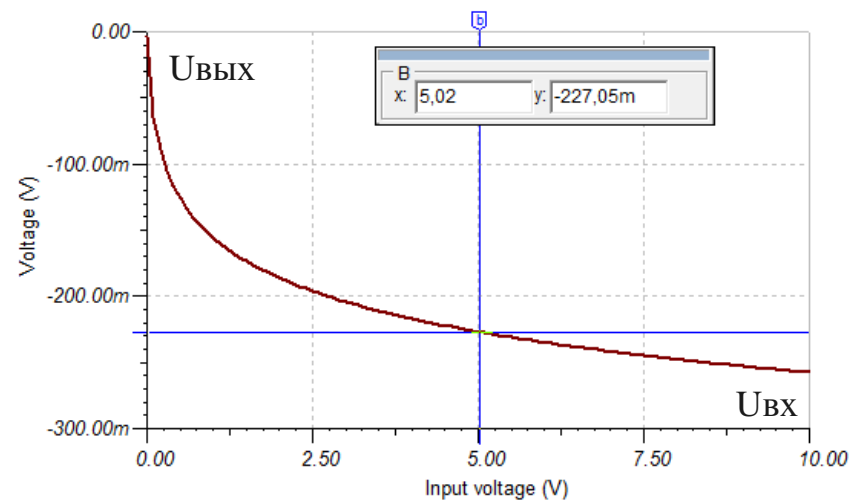
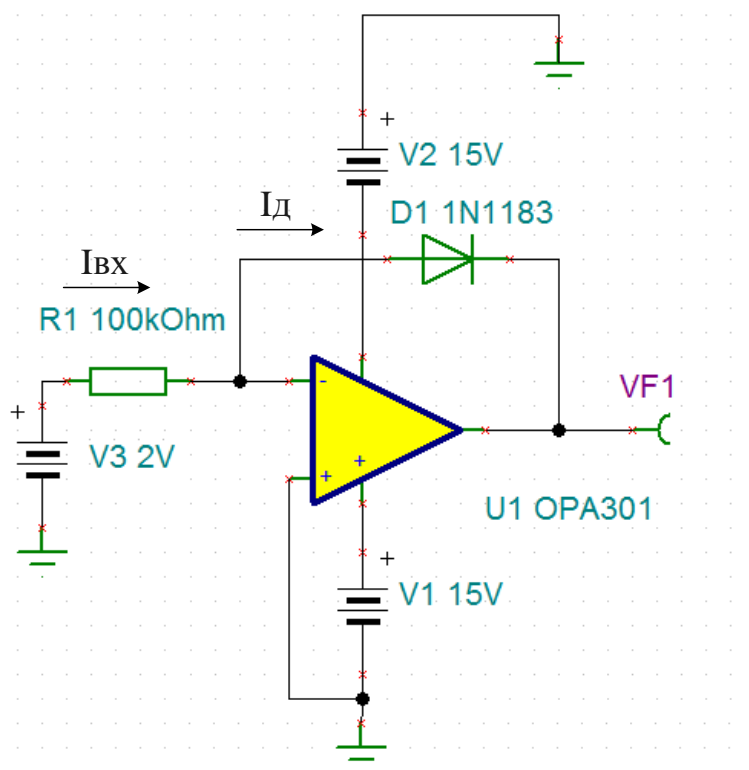
Частота среза составляет 826Гц. Наклон ЛАЧХ -40дб/дек.

Заграждающий фильтр второго порядка



На частоте 728Гц происходит ослабление входного сигнала до -40дб.

Логарифмический усилитель



$$I_{вх} = \frac{U_{вх}}{R_1} = I_D = I_s (e^{-U_{вых}/\varphi_T} - 1)$$

$$U_{вых} = -\varphi_T \left(\ln \frac{U_{вх}}{R_1} - \ln I_s \right)$$