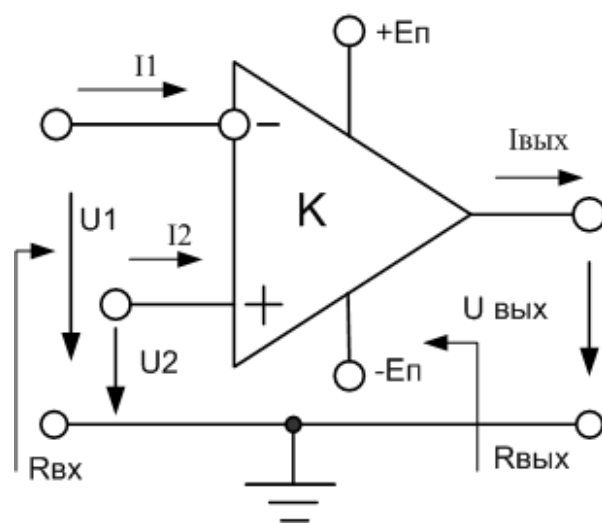


Занятие 6

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

$$K'_U = \infty, U_2 - U_1 = 0,$$

Свойства идеального ОУ: $I_{\text{вх}1} = 0, I_{\text{вх}2} = 0,$

$$R'_{\text{вх}} = \infty, R'_{\text{вых}} = 0$$

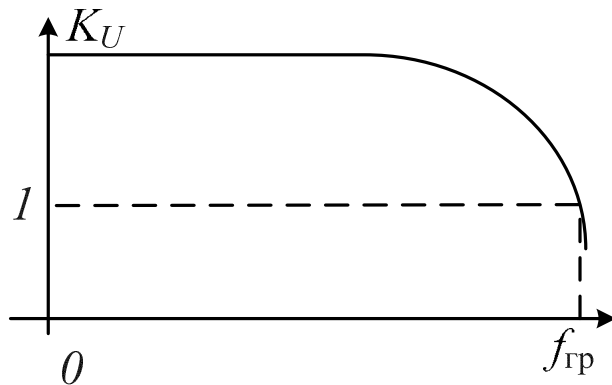
Технические характеристики реальных ОУ:

Дифференциальный коэффициент усиления:

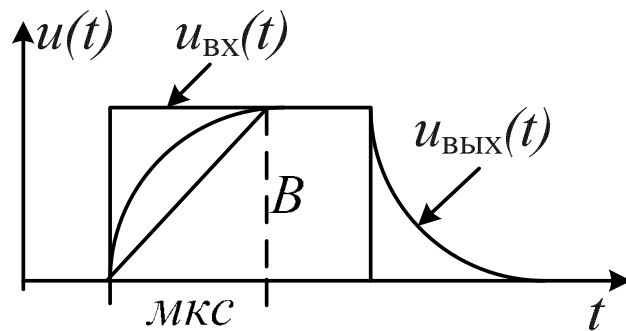
$$K'_U = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta(U_2 - U_1)} \approx 10^3 - 10^5.$$

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 килогерц до сотен мегагерц.



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

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_{ex1} ;

Инвертирующий вход U_{ex2} ;

$$I_{\vartheta} = I_{\vartheta 1} + I_{\vartheta 2} = const;$$

$$U_{вых} = U_{вых2} - U_{вых1}.$$

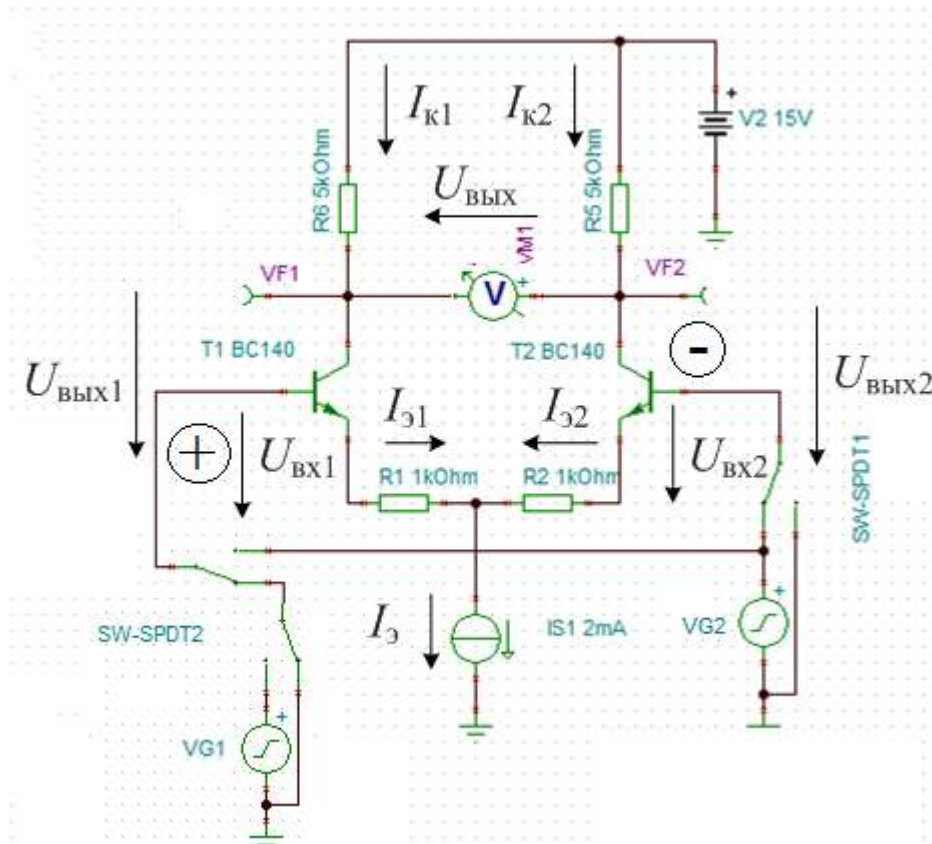


Рис.6.1

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: $U_{вх1} = -U_{вх2}$.

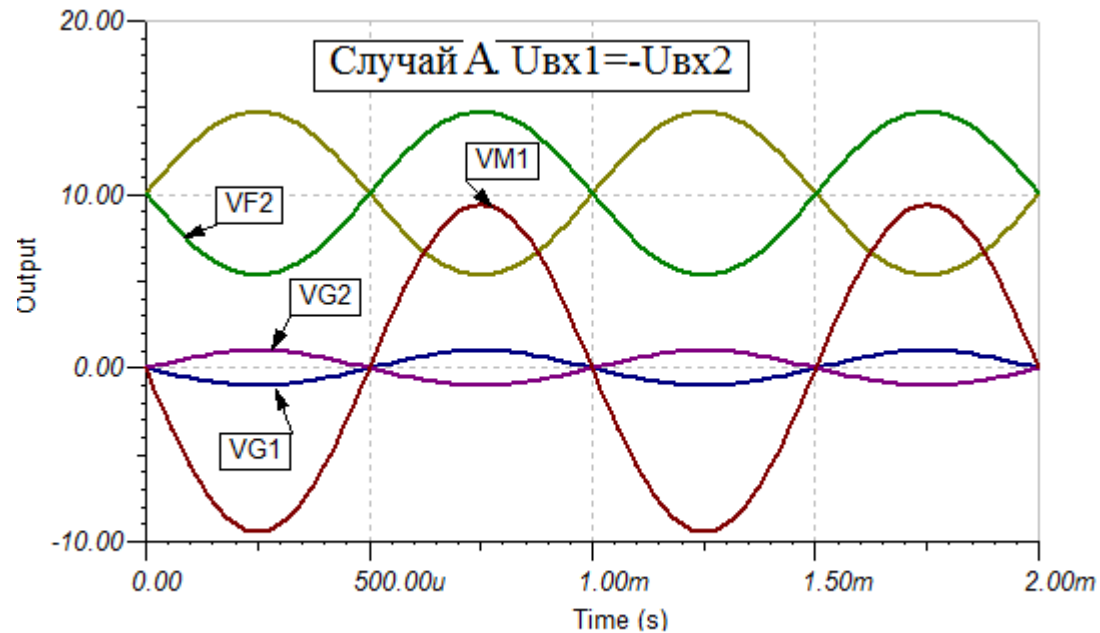
Дифференциальный сигнал: $U_{диф} = \frac{U_{вх1} - U_{вх2}}{2}$.

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:

$$K_1 = K_2 = K_{диф} = \frac{R_{\kappa}}{R_{э} + r_{э}}.$$

$$U_{вых} = -\frac{R_{\kappa}}{R_{\mathfrak{Z}} + r_{\mathfrak{Z}}}(U_{\text{ex}2} - U_{\text{ex}1}) = 2U_{\text{диф}} \frac{R_{\kappa}}{R_{\mathfrak{Z}} + r_{\mathfrak{Z}}}.$$



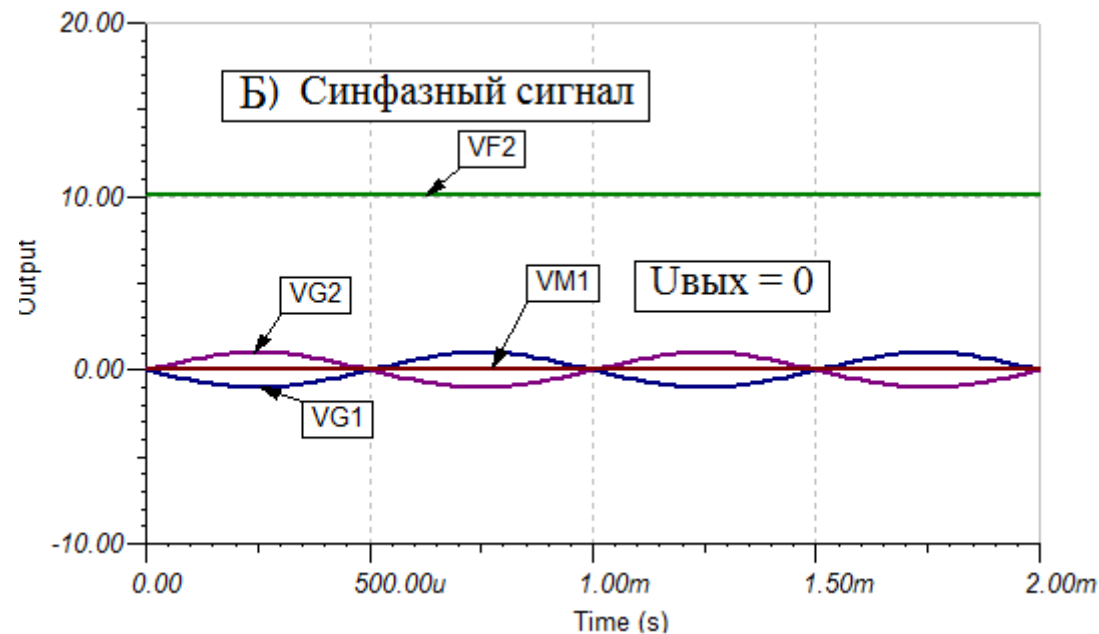
На несимметричном выходе $VF2$ усиление меньше в два раза:

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

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

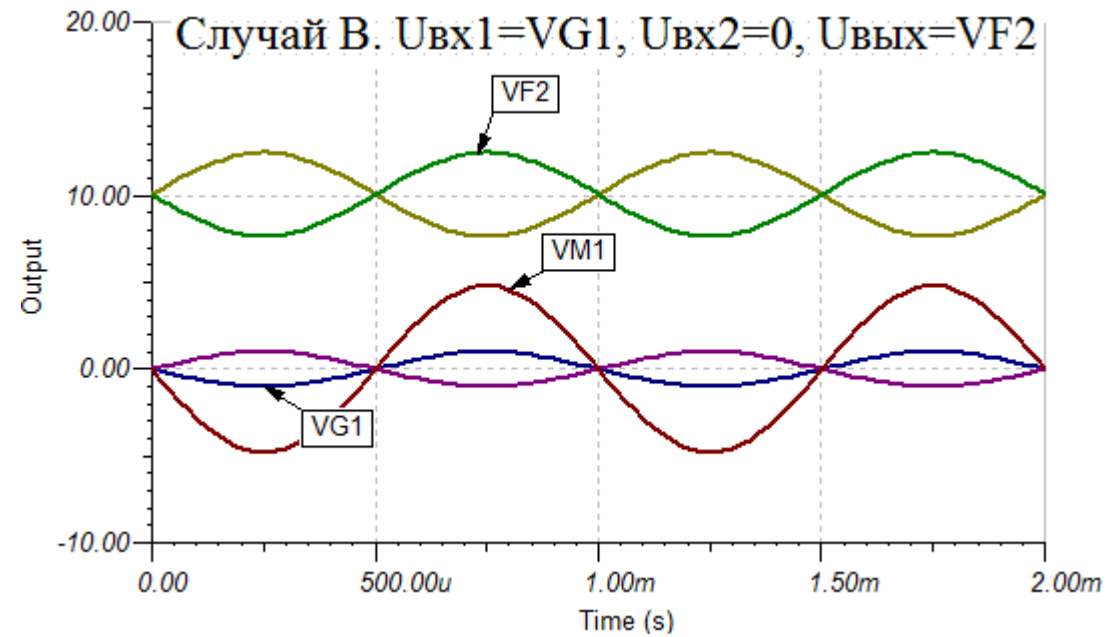
Источник тока создает сильную отрицательную обратную связь.

$$U_{вых1} = U_{вых2} = -\frac{R_k}{R_{\varepsilon} + r_{\varepsilon} + R_{ит}} U_{сф}; \quad R_{ит} \rightarrow \infty.$$
$$U_{выхсф} = U_{вых2} - U_{вых1} = 0.$$



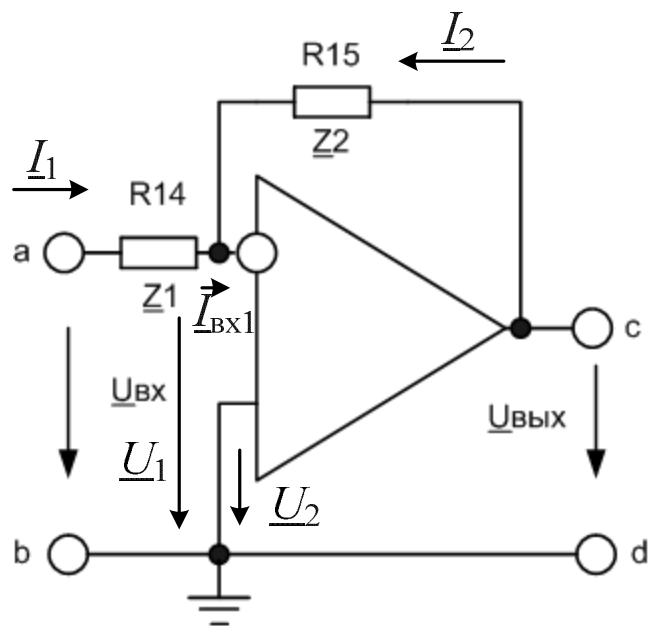
В) Если $U_{вх2} = 0$,

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



Частотно-зависимые звенья с операционными усилителями

Инвертирующий ОУ



Вывод формулы:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{I}_{ex1} = 0,$$

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

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

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

Комплексный коэффициент передачи:

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

Операторная передаточная функция:

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

Пример: $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$.

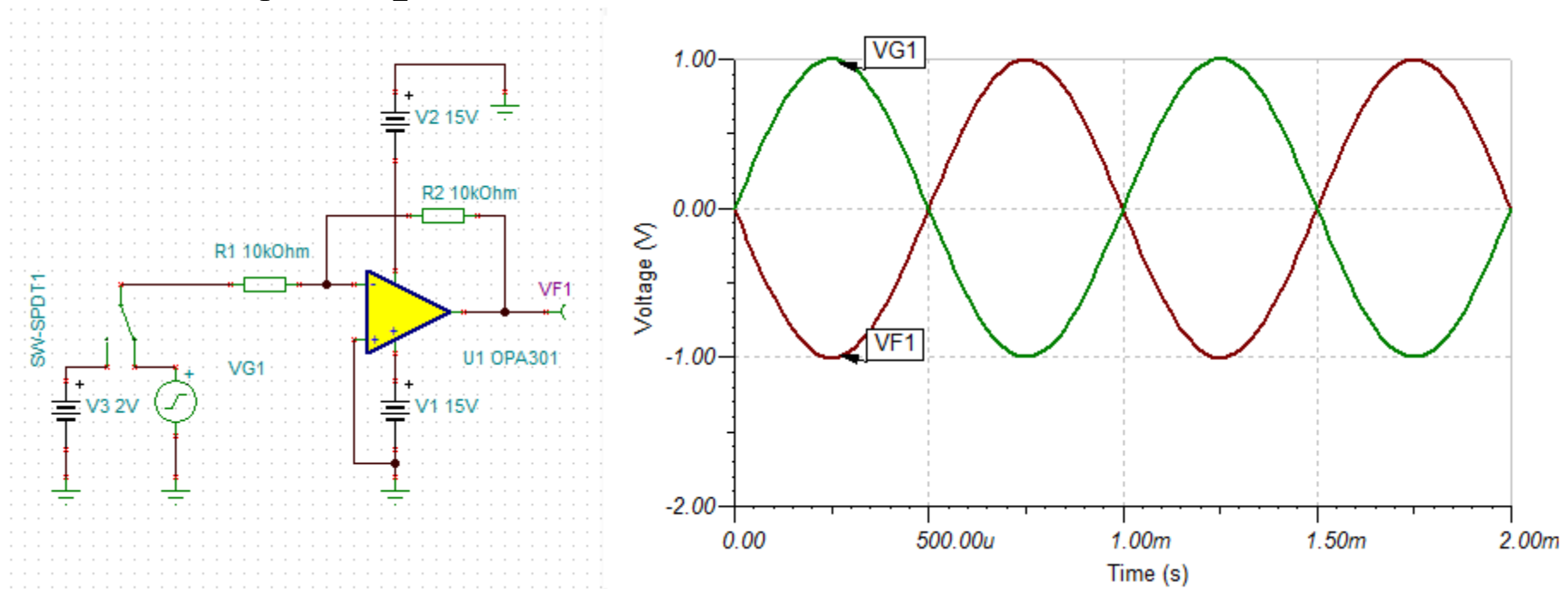
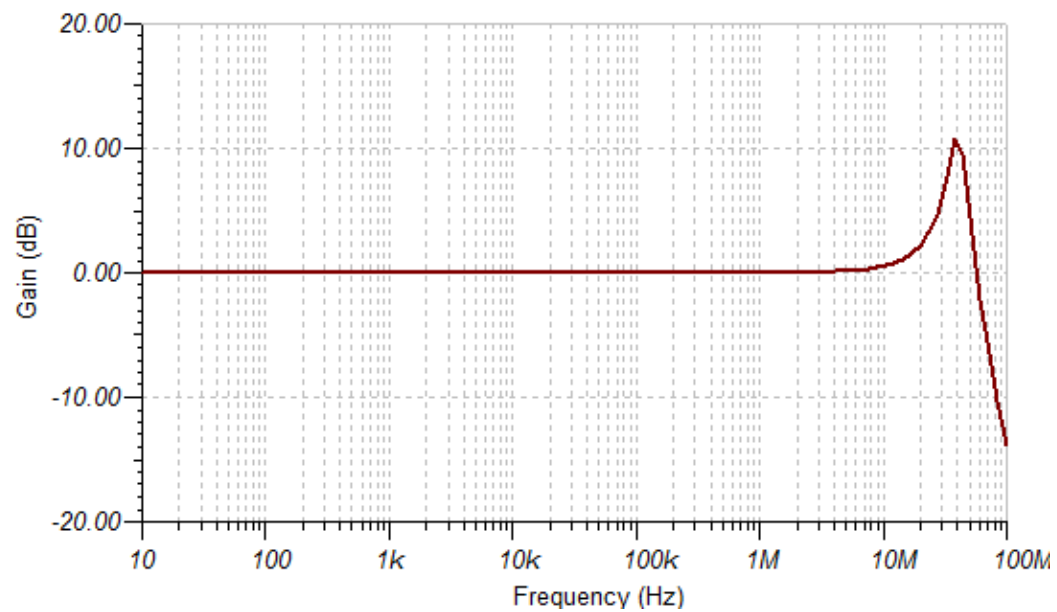
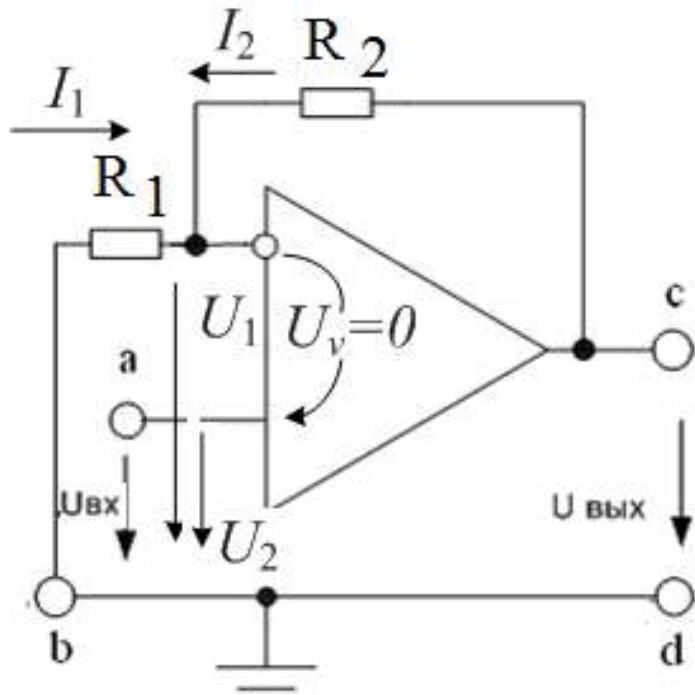


Рис.6.2



Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

Неинвертирующий ОУ



$$U_1 \approx U_2 = U_{\text{вх}};$$

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

$$I_1 + I_2 = 0;$$

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

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

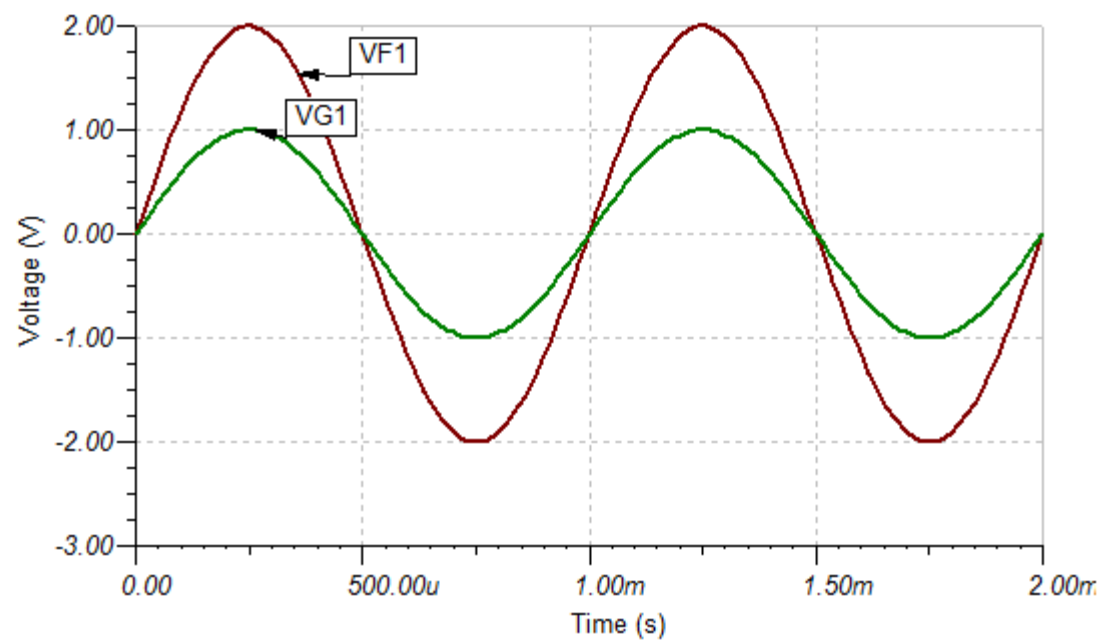
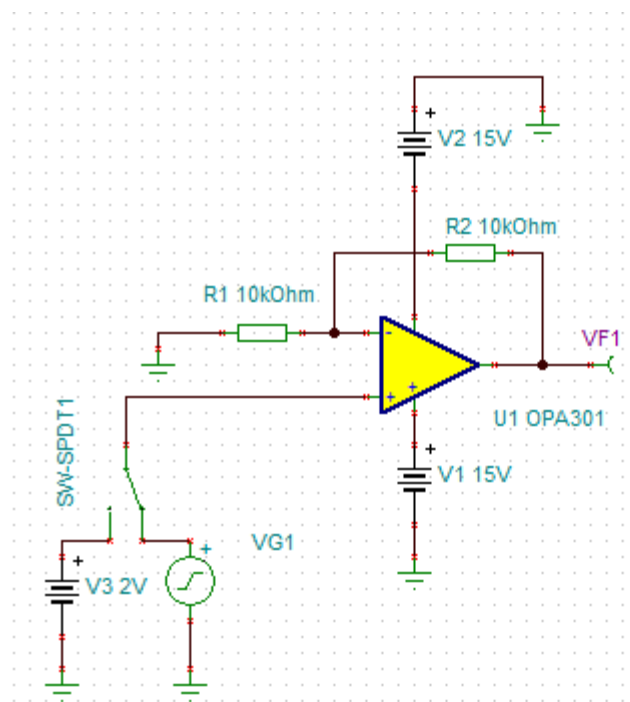
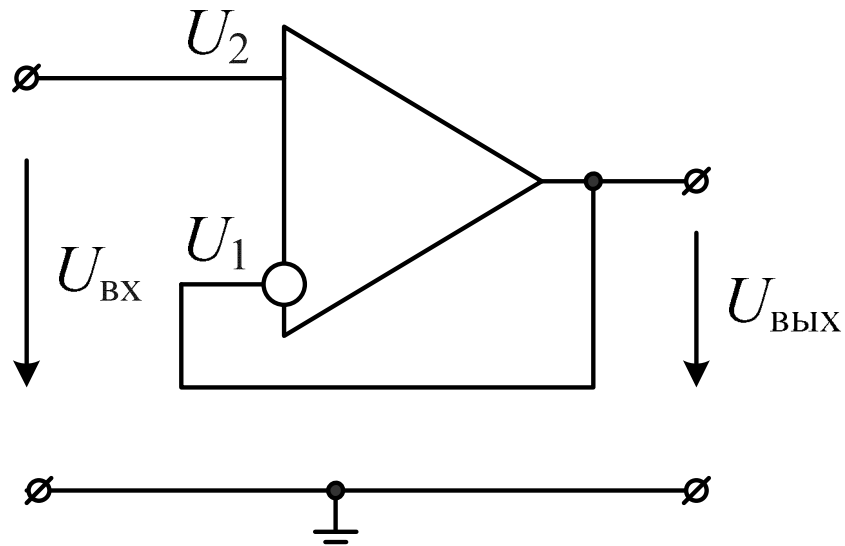


Рис.6.3

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.

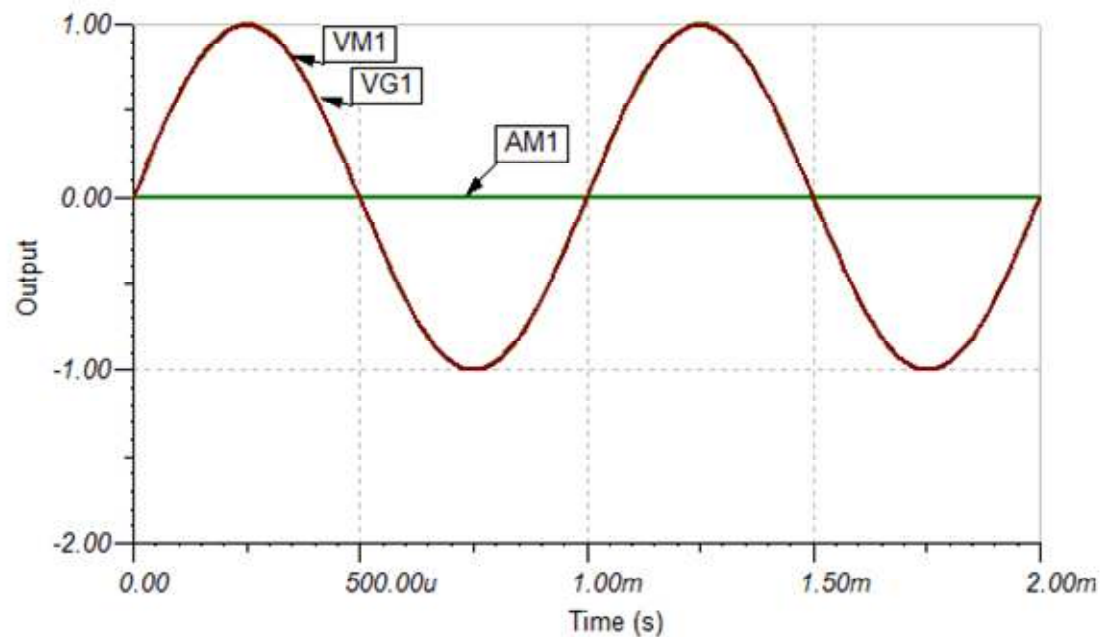
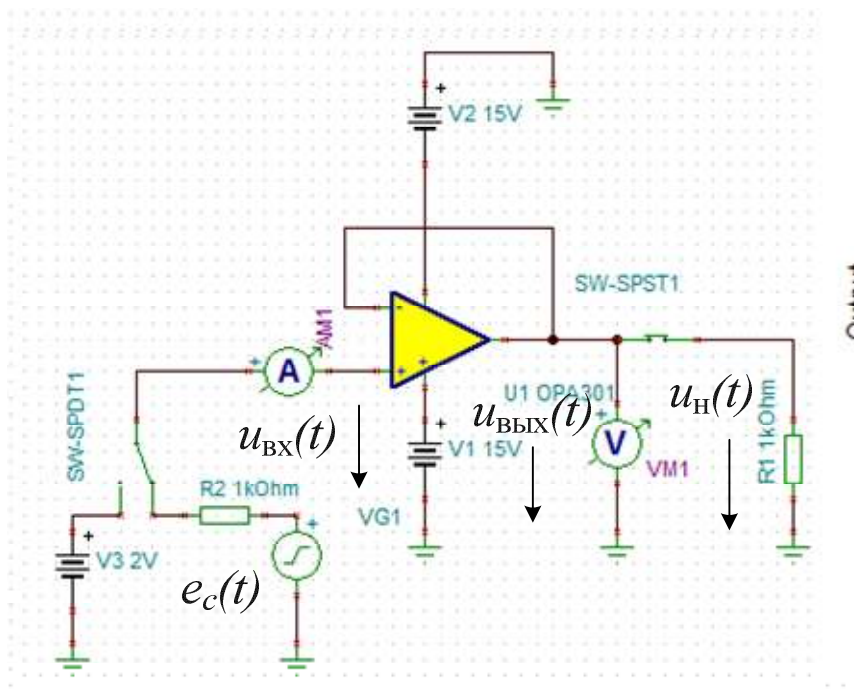


Рис.6.4

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

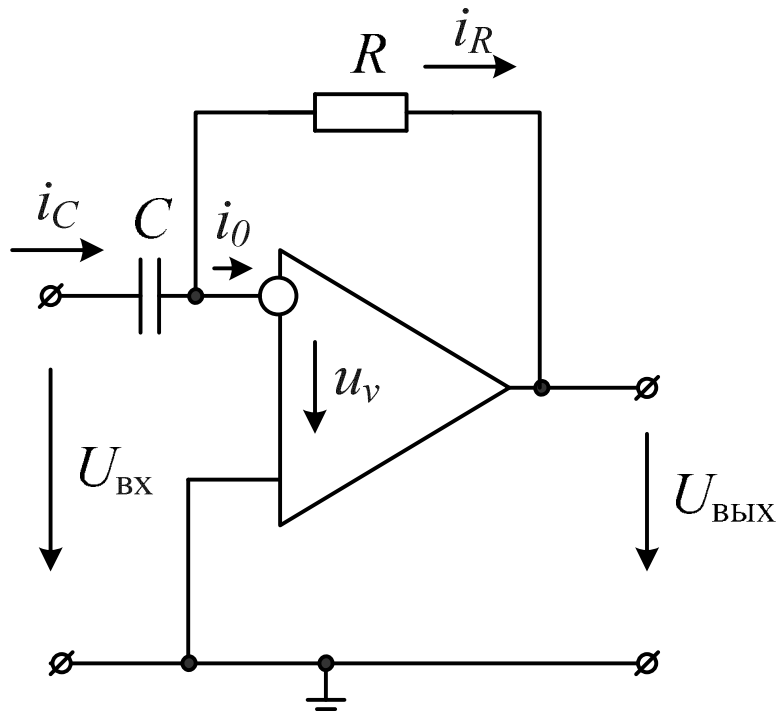
Если нагрузку подключить к генератору, то:

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

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

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.

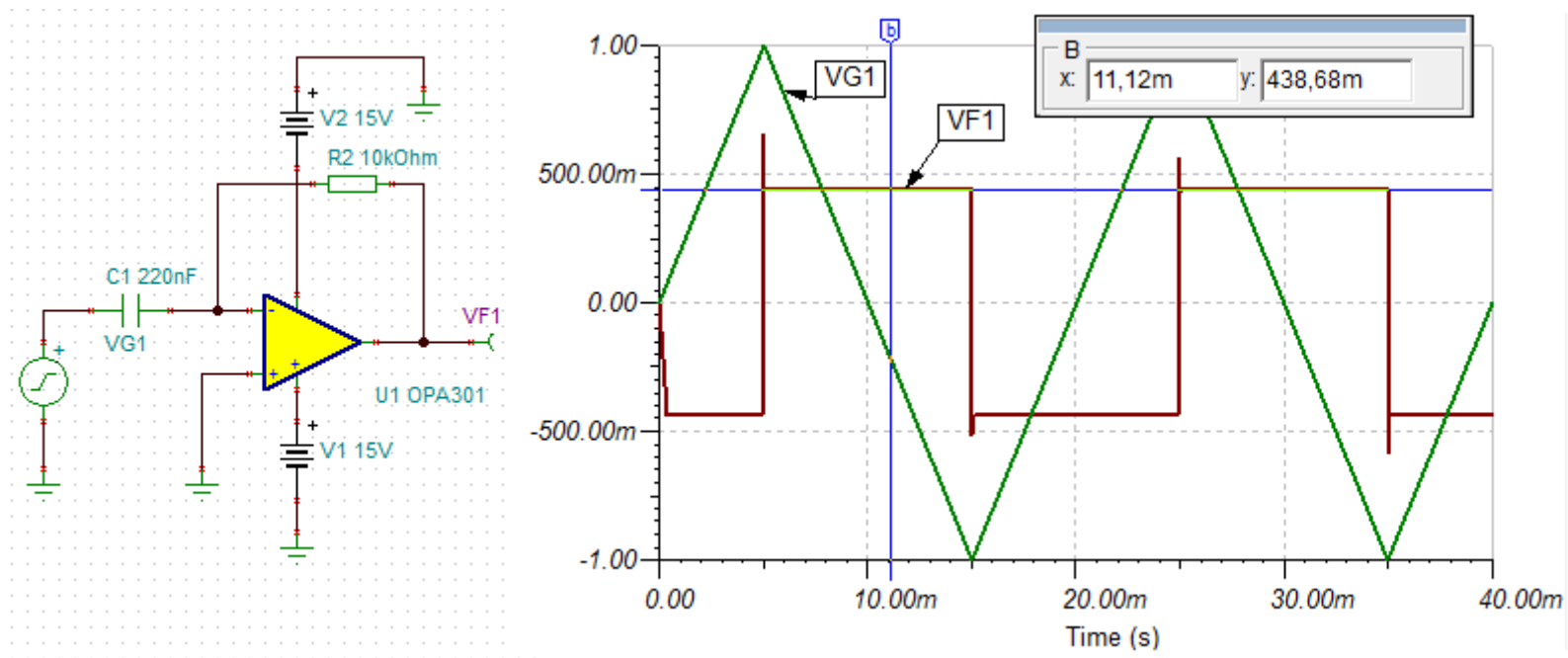


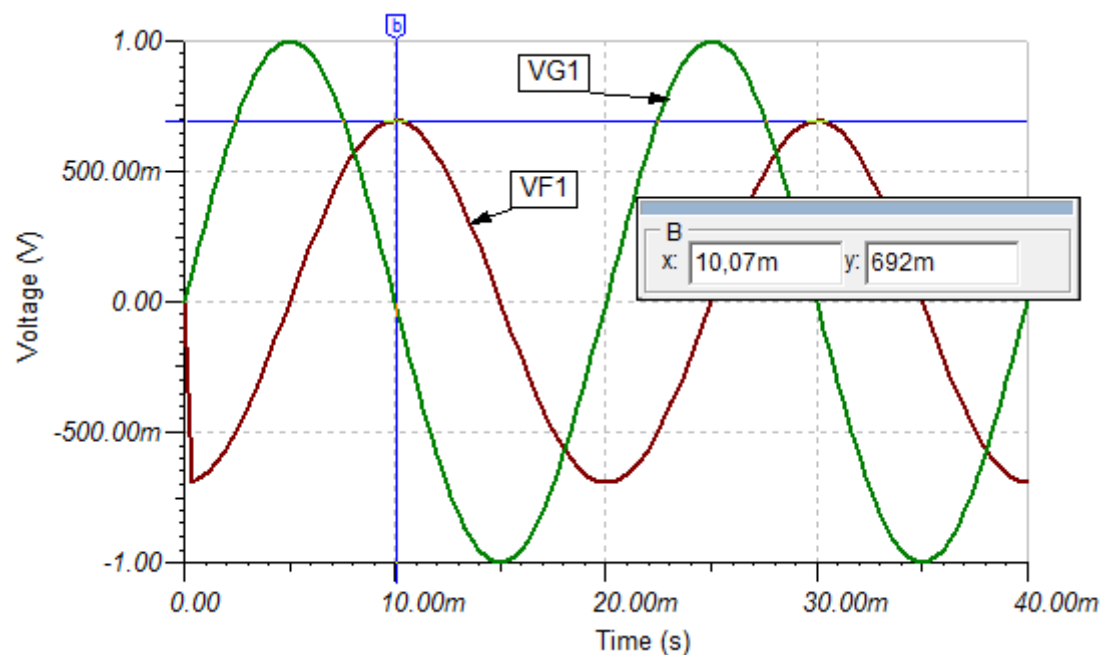
Рис.6.5

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

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

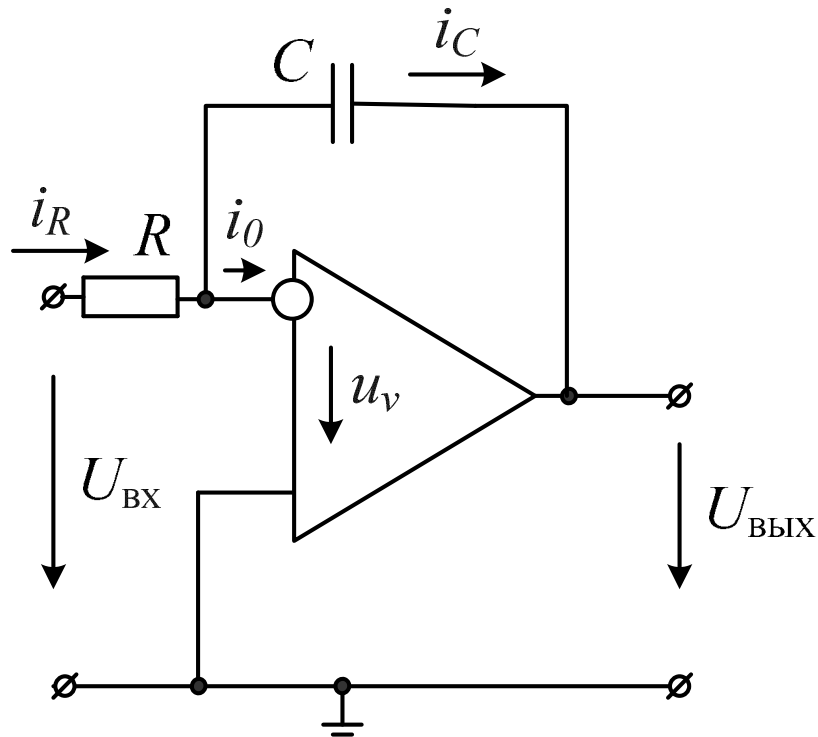
$$u_{вых} = -RC \frac{du_{ex}}{dt} = -2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 200 = -440 мВ.$$

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



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

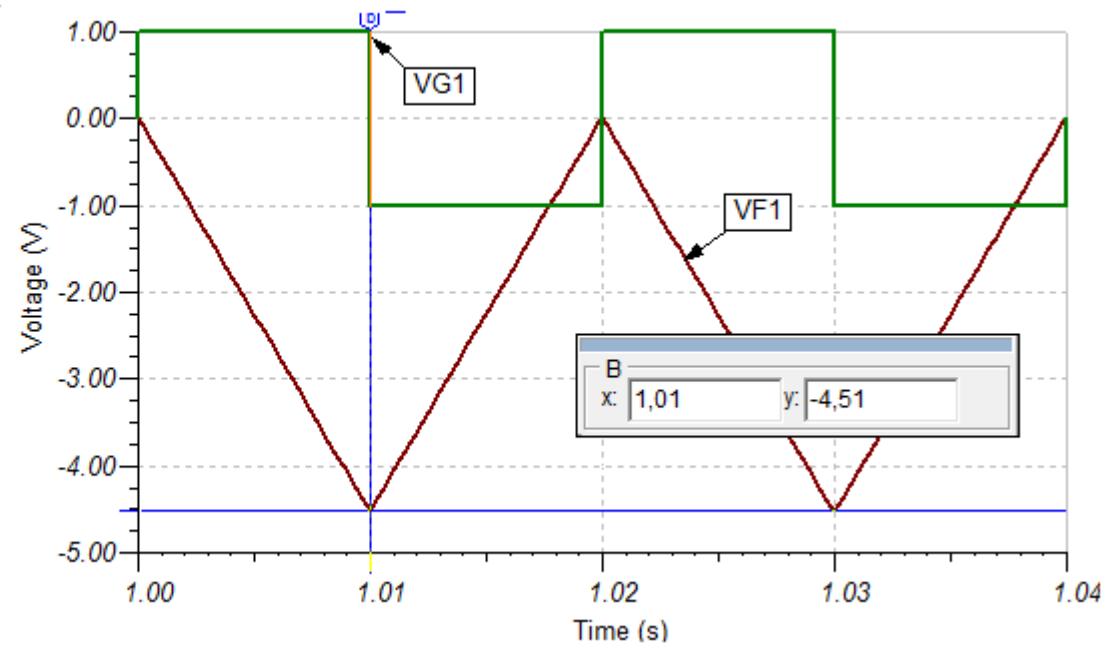
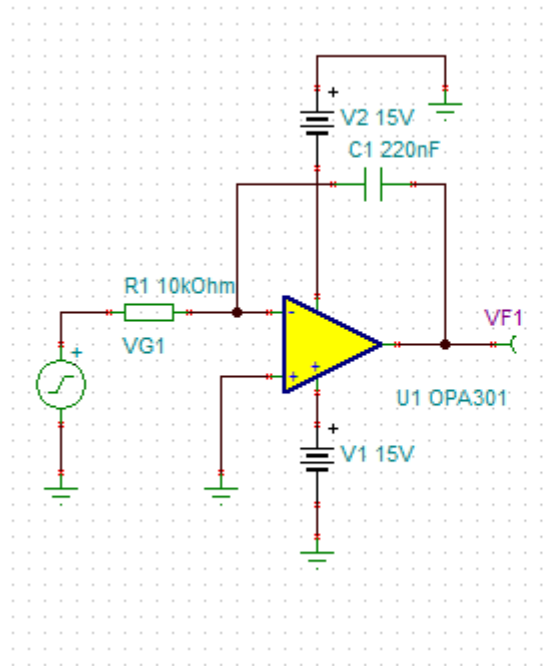


Рис.6.6

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

Активный ФНЧ первого порядка

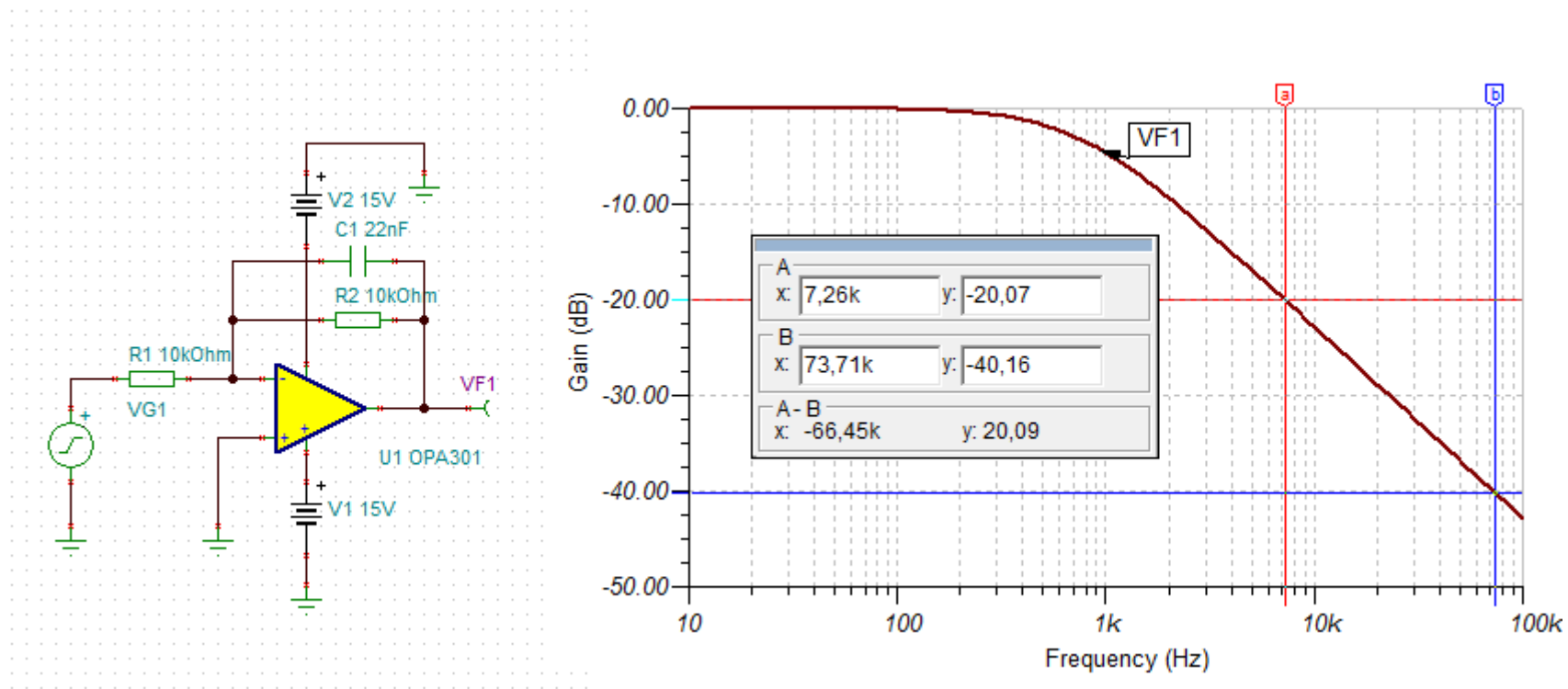


Рис.6.7

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

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

Передаточная функция

Заменяем $j\omega \rightarrow p$:

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