

ЗАДАНИЕ на курсовую работу по курсу «Электротехника» РАСЧЁТ ЧАСТОТНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АРС-ЦЕПЕЙ

1. АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕПИ

1.1. Предполагая, что операционный усилитель (ОУ) идеальный, получить передаточную функцию $H(p)=H(j\omega)$ в виде:

$$H(p) = \frac{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{p^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)p + \omega_0^2} = H(\omega)e^{j\phi(\omega)}.$$

Рассчитать добротность Q , частоту ω_0 и коэффициенты b_0 , b_1 , b_2 . Вывести соотношения для амплитудно-частотной (АЧХ) $H(\omega)$ и фазочастотной (ФЧХ) $\phi(\omega)$ характеристик цепи.

1.2. Построить на графике АЧХ и ФЧХ, выбрать частотный интервал для последующего анализа на ЭВМ.

1.3. Для заданной цепи составить и нарисовать эквивалентную схему, заменив реальный ОУ его низкочастотной схемой замещения с параметрами: $r_{\text{ВХ}} = 50 \text{ кОм}$, $r_{\text{ВЫХ}} = 0,2 \text{ кОм}$, $k = 250$.

1.4. Рассчитать АЧХ и ФЧХ цепи с реальным ОУ на ЭВМ. Построить полученные зависимости на графике п. 1.2.

2. АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕПИ

2.1. Предполагая, что ОУ идеальный, вывести формулы для переходной $h(t)$ характеристики цепи:

а) с использованием уравнений состояния и их решения во временной области;

б) с применением преобразования Лапласа.

2.2. Построить на графике зависимость $h(t)$ и выбрать временной интервал для анализа цепи на ЭВМ.

2.3. Провести расчёт переходной характеристики $h(t)$ исходной цепи (с реальным ОУ) на ЭВМ при заданных параметрах элементов исходной схемы. Построить полученную характеристику на графике п. 2.2.

2.4. Используя полученную в п. 2.1 переходную функцию, рассчитать форму выходного сигнала при воздействии на вход прямоугольного импульса (параметры импульса задаются преподавателем).

$E = 5 - 0,1 \cdot N$, (В) где N — номер по журналу;

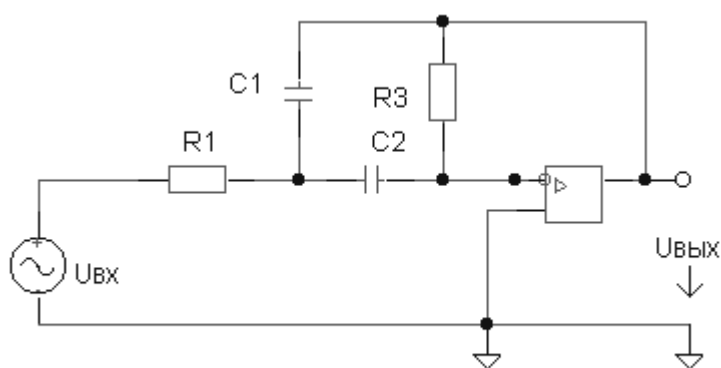
$t_{\text{И}} = 0,8 \cdot T_{\text{кон}}$.

Варианты расчетных схем находятся у преподавателя.

Пример расчета

3. АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕПИ

3.1. Расчёт схемы для случая идеального ОУ



Исходные данные:

$$R_1 = 14,3 \text{ кОм},$$

$$R_3 = 76,5 \text{ кОм},$$

$$C_1 = 2 \text{ нФ},$$

$$C_2 = 1 \text{ нФ},$$

$$U_{\text{вх}}(t) = 1 \sin \omega t, \text{ В.}$$

Рис. 1. Исходная схема

Так как операционный усилитель (ОУ) – идеальный, то его электрофизическая модель предполагает, что $R_{\text{вх ОУ}} = \infty$, $R_{\text{вых ОУ}} = 0$, $k \rightarrow \infty$ и эквивалентная схема для расчета (рис. 2) будет выглядеть следующим образом:

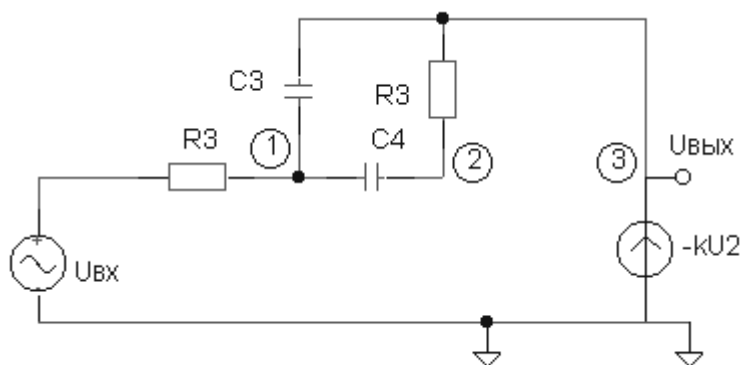


Рис. 2. Расчётная схема для составления уравнений по МУП

$$k = \infty, U_2 = \varphi_2.$$

Составим уравнения по методу узловых потенциалов (МУП) (все расчёты проводятся для параметров в комплексной форме) [1], [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} (g_1 + p(C_1 + C_2))\dot{\varphi}_1 - pC_2\dot{\varphi}_2 - pC_1\dot{\varphi}_3 = \dot{U}_{\text{ВХ}} g_1, \\ -pC_2\dot{\varphi}_1 + (g_3 + pC_2)\dot{\varphi}_2 - g_3\dot{\varphi}_3 = 0, \\ \dot{\varphi}_2 = 0. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}$$

$$(2) \rightarrow \dot{\varphi}_1 = -\frac{g_3}{pC_2}\dot{\varphi}_3,$$

$$(1) \rightarrow -\frac{(g_1 + p(C_1 + C_2))g_3}{pC_2}\dot{\varphi}_3 - pC_1\dot{\varphi}_3 = \dot{U}_{\text{ВХ}} g_1.$$

Решаем (1) относительно потенциала φ_3 и записываем выражение для комплексной передаточной функции:

$$\begin{aligned} H(p) &= \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{\dot{\varphi}_3}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = -\frac{pC_2g_1}{p^2C_1C_2 + pg_3(C_1 + C_2) + g_1g_3} = \\ &= -\frac{p\frac{g_1}{C_1}}{p^2 + p\frac{g_3(C_1 + C_2)}{C_1C_2} + \frac{g_1g_3}{C_1C_2}}. \end{aligned}$$

Получили передаточную функцию (ПФ) в каноническом виде полосно - пропускающего фильтра (ППФ) второго порядка.

Найдём резонансную частоту и добротность фильтра:

$$\omega_0^2 = \frac{g_1g_3}{C_1C_2} = \frac{1}{R_1R_3C_1C_2} = \frac{1}{14,3 \cdot 76,5 \cdot 2 \cdot 10^{-12}} = 4,57 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)^2,$$

$$\omega_0 = \sqrt{4,57 \cdot 10^8} = 2,138 \cdot 10^4 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 3,404 \text{ кГц} — \text{резонансная частота.}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{g_3(C_1 + C_2)}{C_1C_2} \Rightarrow Q = \frac{\omega_0 C_1C_2}{g_3(C_1 + C_2)} = \frac{2,138 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-18} \cdot 76,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^{-9}} = 1,09,$$

$Q = 1,09$ — добротность фильтра.

Величина коэффициентов передаточной функции:

$$a_1 = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{2,138 \cdot 10^4}{1,09} = 1,9615 \cdot 10^4 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$b_1 = -\frac{g_1}{C_1} = -\frac{1}{14,3 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-9}} = -3,496 \cdot 10^4.$$

Таким образом, передаточная функция принимает вид:

$$H(p) = \frac{-b_1 p}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2} = \frac{-3,496 \cdot 10^4 p}{p^2 + 1,9615 \cdot 10^4 p + 4,57 \cdot 10^8}.$$

Запишем выражение для комплексной передаточной функции в явном виде в зависимости от частоты:

$$p = j\omega,$$

$$H(j\omega) = \frac{-b_1 j\omega}{-\omega^2 + j\omega \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}.$$

Получим математические выражения для АЧХ и ФЧХ фильтра в общем виде:

$$H(\omega) = \frac{b_1 \omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\frac{\omega_0}{Q} \omega)^2}} \text{ — АЧХ фильтра.}$$

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -90^\circ - \arctg \frac{\frac{\omega_0}{Q} \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, & \omega < \omega_0 \\ -270^\circ - \arctg \frac{\frac{\omega_0}{Q} \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, & \omega \geq \omega_0 \end{cases} \text{ — ФЧХ фильтра.}$$

Графики АЧХ и ФЧХ удобно строить в системе DESIGN LAB 8.0 [4].
Расчётная схема для идеального ОУ представлена на рис. 3:

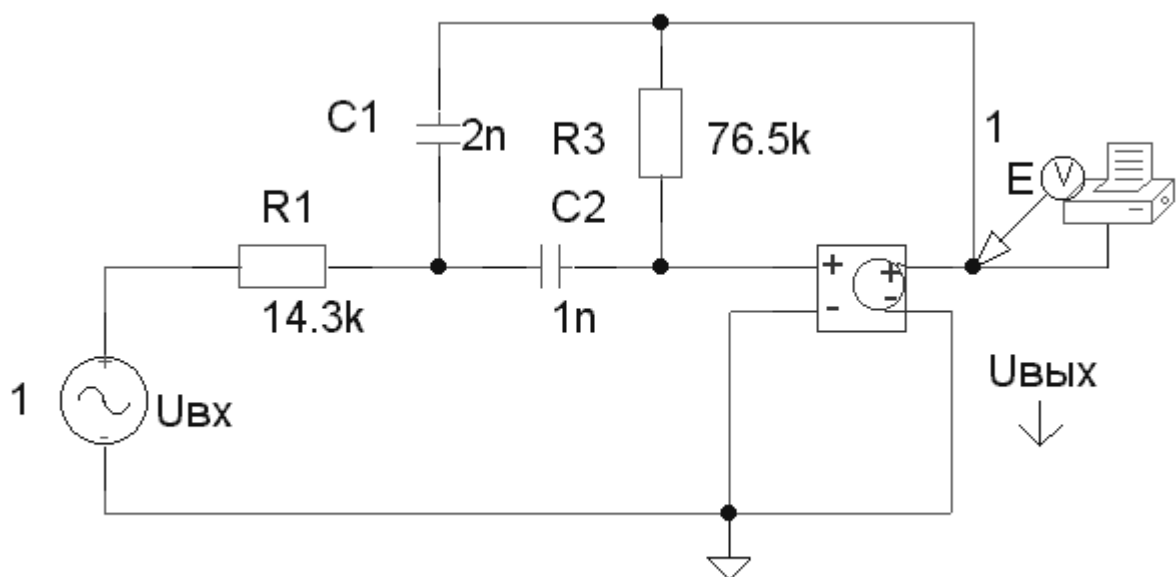


Рис. 3. Изображение, полученное в результате вычерчивания

схемы на экране дисплея

При составлении задания на анализ окно должно выглядеть так:

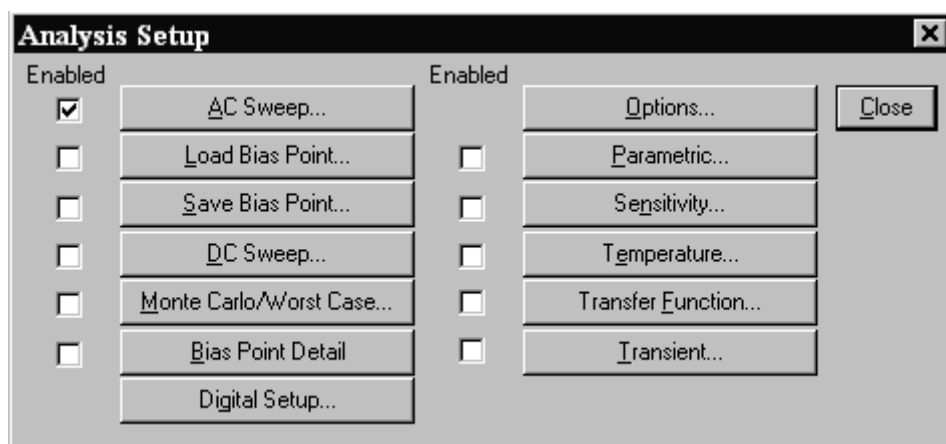


Рис. 4. Окно задания режима частотного анализа

Этим мы задаём режим частотного анализа схемы. Далее необходимо определить частотный диапазон, исходя из рассчитанных значений резонансной частоты и типа фильтра. Диапазон можно менять несколько раз, пока характеристики не достигнут своих установившихся значений.

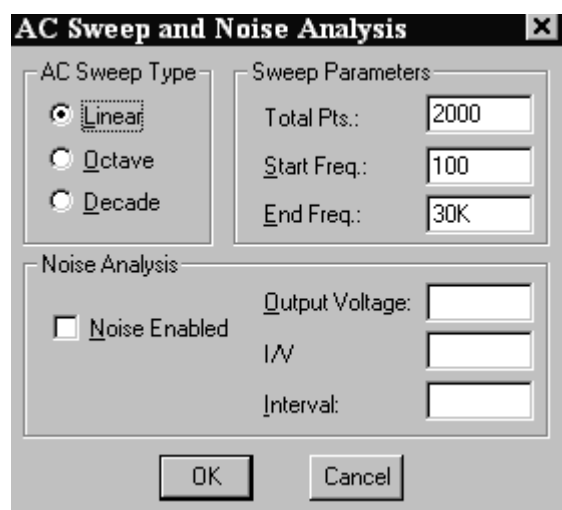


Рис. 5. Окно определения частотного диапазона

После задания расчётного режима нужно нажать на кнопку **F11** и на экране дисплея должен появиться график АЧХ. Если этого не происходит автоматически, то надо проделать следующее: щёлкнуть левой кнопкой мыши по позиции **Plot** горизонтального меню. В появившемся вертикальном меню выделить строку **Add Y Axis**, щелкнув по ней левой кнопкой мыши. После этого на экране появляется вертикальная ось.

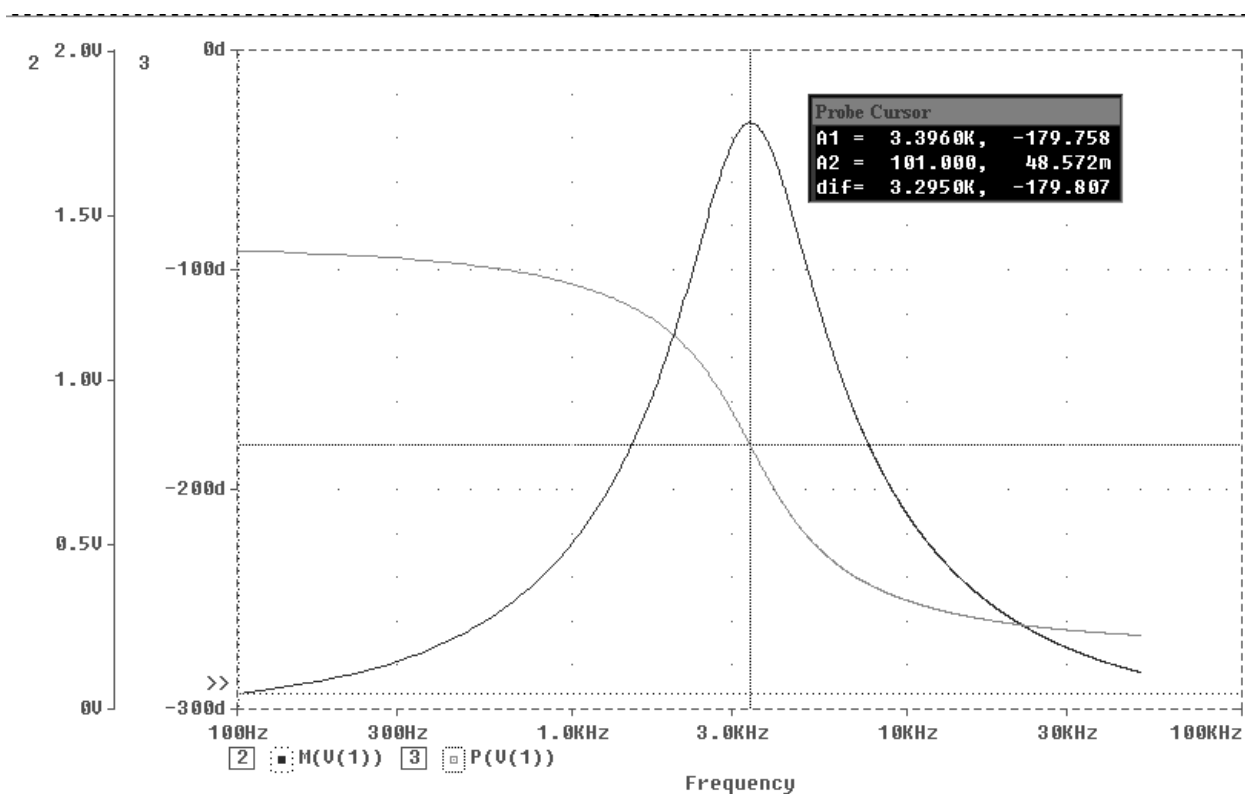


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ исследуемой схемы для случая идеального ОУ

В позиции горизонтального меню **Trace** выбираем в появившемся меню строчку **Add** и в появившемся правом окне **Function or Macros** щелчком левой кнопки мыши выделяем функцию выделения амплитуды $M()$. В нижней части панели в строке **Trace Expression** для указания того, амплитуда какого напряжения должна быть выведена, щёлкаем левой кнопкой мыши по строке $V(I)$ в левом окне **Simulation Output Variables**. В нижней строке оказывается сформированной функция $M(V(I))$. Это соответствует выводу графика АЧХ напряжения $V(I)$. Щёлкаем по кнопке мыши и на экране появляется график. Все эти операции нужно проделать и для получения графика ФЧХ. Только вместо выделения функции $M()$ необходимо выделить функцию фазы $P()$. После этого на экране появляется “картинка” совмещённых графиков АЧХ и ФЧХ напряжения $V(I)$ (рис. 6). Эти графики надо вывести на печать и представить преподавателю в качестве решения для расчёта частотных характеристик для схемы с идеальным ОУ. На данном графике маркером выделена резонансная частота $f_0 = 3,396$ кГц, что практически совпадает с расчётной.

3.2. Расчёт схемы при реальном ОУ

Для реального ОУ расчёт частотных характеристик производится только с помощью ЭВМ. Для этого необходимо внести изменения в расчётную схему, представленную на рис. 7:

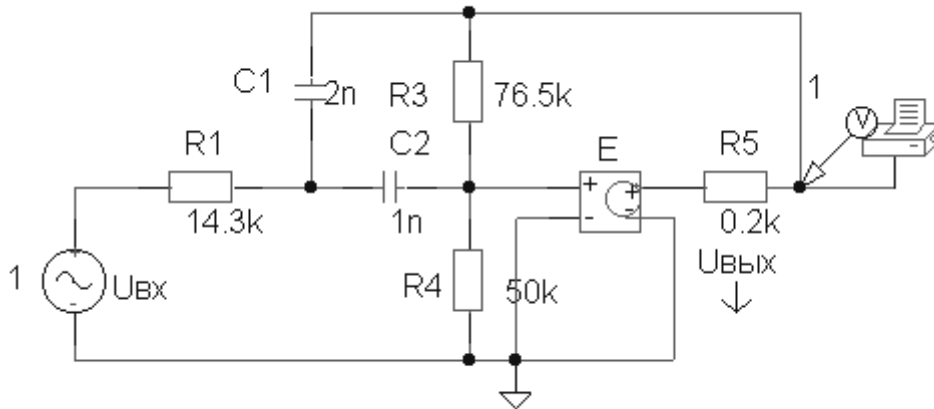


Рис. 7. Исследуемая схема для реального ОУ

Как видно из схемы добавились параметры ОУ: $R_{вх\ ОУ} = 50\text{ кОм}$ и $R_{вых\ ОУ} = 0,2\text{ кОм}$. Кроме этого, коэффициент усиления ОУ $k = 250$. Режим анализа схемы задается аналогично п. 1.1 и получаем решение в виде графиков АЧХ и ФЧХ реального фильтра, изображенных на рис. 8:

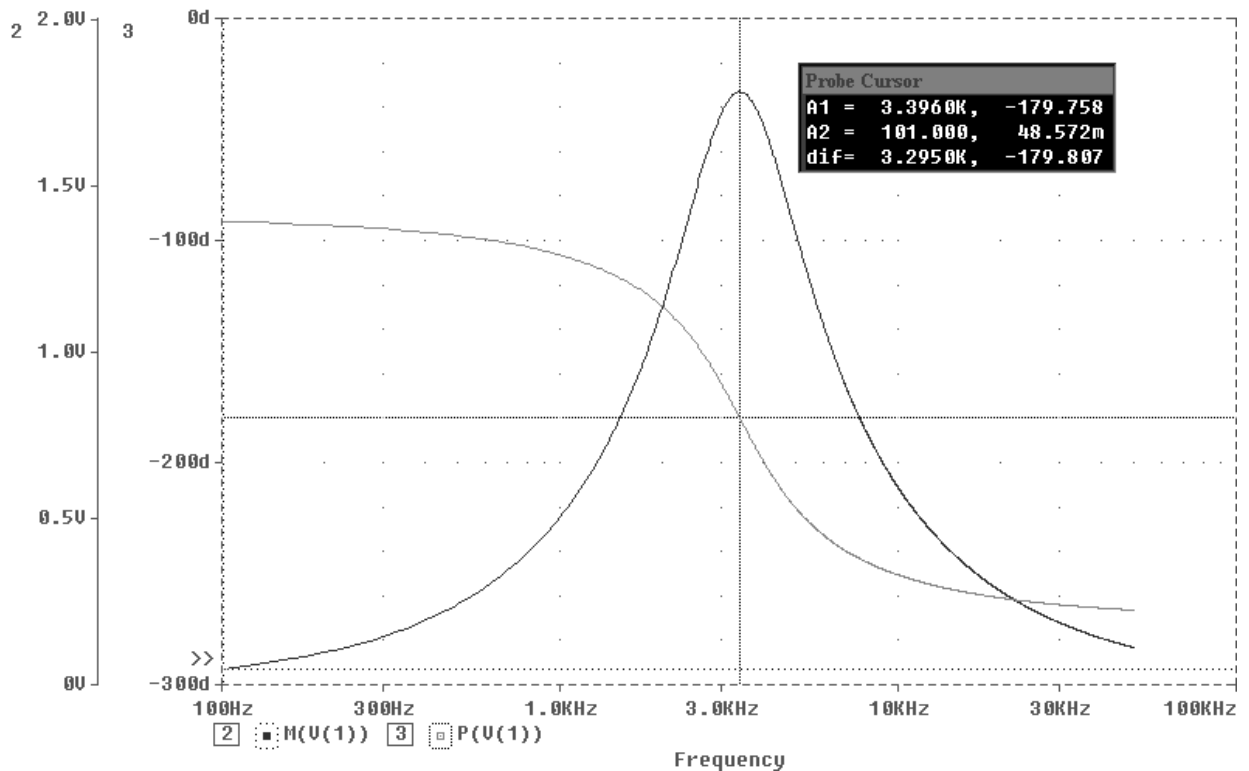


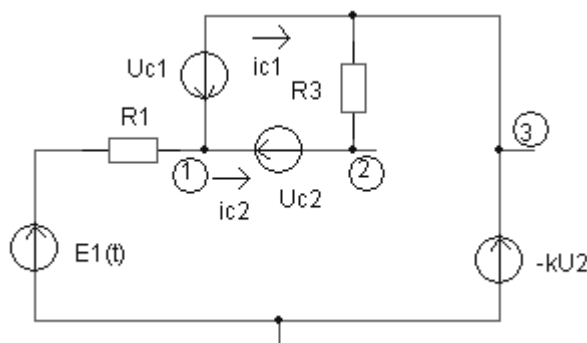
Рис. 8. АЧХ и ФЧХ исследуемой схемы для случая реального ОУ

Как видно, графики, представленные на рис. 6 и рис. 8, практически совпадают. На этом анализ частотных характеристик схемы завершён.

4. АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕПИ

4.1. Составление уравнений состояния для схемы с идеальным ОУ

Изобразим схему для составления уравнений состояния (УС) с учётом того, что ОУ — идеальный [3]:



Исходные данные:

$$\begin{aligned} E &= 1 \text{ В}, \\ U_{c1}(0) &= 0 \text{ В}, \\ U_{c2}(0) &= 0 \text{ В}, \\ U_2 &= \varphi_2. \end{aligned}$$

Рис. 9. Расчётная схема для составления УС

Примечание:

Для схем с обратной связью уравнения состояния удобнее составлять по методу наложения.

Рассматриваемая схема в исходном варианте не содержит обратную связь, поэтому уравнения состояния составим с использованием расширенных узловых уравнений:

$$\begin{cases} g_1 \varphi_1 + i_{c1} + i_{c2} = U_{\text{ВХ}} \cdot g_1, & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} g_3 \varphi_2 - g_3 \varphi_3 - i_{c2} = 0, & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_2 = 0, & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_1 - \varphi_3 = U_{c1}, & (4) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2 = U_{c2}. & (5) \end{cases}$$

Решим систему относительно токов i_{c1} и i_{c2} . С учётом (3) система упрощается:

$$(5) \varphi_1 = U_{c2},$$

$$(4) \varphi_3 = U_{c2} - U_{c1},$$

$$(2) i_{c2} = -g_3 \varphi_3 = -g_3 (U_{c2} - U_{c1}) = g_3 U_{c1} - g_3 U_{c2},$$

$$(1) i_{c1} = U_{\text{ВХ}} g_1 - i_{c2} - g_1 \varphi_1 = U_{\text{ВХ}} g_1 - g_3 U_{c1} + g_3 U_{c2} - g_1 U_{c2} = -g_3 U_{c1} + (g_3 - g_1) U_{c2} + U_{\text{ВХ}} g_1.$$

Так как $i_{c1} = C \frac{dU_{c1}}{dt}$, $i_{c2} = C \frac{dU_{c2}}{dt}$, то уравнения состояния примут вид:

$$\begin{cases} \frac{dU_{c1}}{dt} = -\frac{g_3}{C_1} U_{c1} + \frac{g_3 - g_1}{C_1} U_{c2} + \frac{g_1}{C_1} U_{\text{ВХ}}, \\ \frac{dU_{c2}}{dt} = \frac{g_3}{C_2} U_{c1} - \frac{g_3}{C_2} U_{c2} + 0 \cdot U_{\text{ВХ}}. \end{cases}$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{vmatrix} -\frac{g_3}{C_1} & \frac{g_3 - g_1}{C_1} \\ \frac{g_3}{C_2} & -\frac{g_3}{C_2} \end{vmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{vmatrix} \frac{g_1}{C_1} \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Численные значения коэффициентов матриц \mathbf{A}_1 и \mathbf{B}_1 для рассматриваемого примера равны:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{vmatrix} -6,536 \cdot 10^3 & -28,429 \cdot 10^3 \\ 13,072 \cdot 10^3 & -13,072 \cdot 10^3 \end{vmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{vmatrix} 34,965 \cdot 10^3 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Составим характеристическое уравнение:

$$\det(\lambda \cdot \mathbf{1} - \mathbf{A}_1) = 0,$$

$$\begin{vmatrix} \lambda + \frac{g_3}{C_1} & \frac{g_1 - g_3}{C_1} \\ -\frac{g_3}{C_2} & \lambda + \frac{g_3}{C_2} \end{vmatrix} = 0.$$

По правилу расчёта определителя получаем квадратное уравнение:

$$\lambda^2 + \lambda \frac{g_3}{C_2} + \lambda \frac{g_3}{C_1} + \frac{g_3^2}{C_1 C_2} + \frac{g_3(g_1 - g_3)}{C_1 C_2} = 0,$$

$$\lambda^2 + \lambda \frac{g_3(C_1 + C_2)}{C_1 C_2} + \frac{g_1 g_3}{C_1 C_2} = 0.$$

Характеристическое уравнение совпадает по виду со знаменателем передаточной функции $H(p)$, полученной в первой части расчёта. После подстановки чисел получаем следующее характеристическое уравнение (ХУ):

$$\lambda^2 + 1,9615 \cdot 10^4 \lambda + 4,57 \cdot 10^8 = 0.$$

Найдём его корни:

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2} &= -\frac{1,9615 \cdot 10^4}{2} \pm j \frac{\sqrt{(1,9615 \cdot 10^4)^2 - 4 \cdot 4,57 \cdot 10^8}}{2} = \\ &= -0,98075 \cdot 10^4 \pm j 1,8995 \cdot 10^4 = -\alpha \pm j \omega_{CB}. \end{aligned}$$

Так как корни ХУ получились комплексно-сопряженные, то вид решения для напряжений на конденсаторах запишется следующим образом:

$$U_{c1}(t) = U_{c1уст} + A_1 e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \gamma_1),$$

$$U_{c2}(t) = U_{c2уст} + A_2 e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \gamma_2).$$

Напряжение на выходе схемы вычисляется по формуле:

$$\varphi_3 = U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{c2} - U_{c1}.$$

Составим схему для установившегося режима (рис. 10):

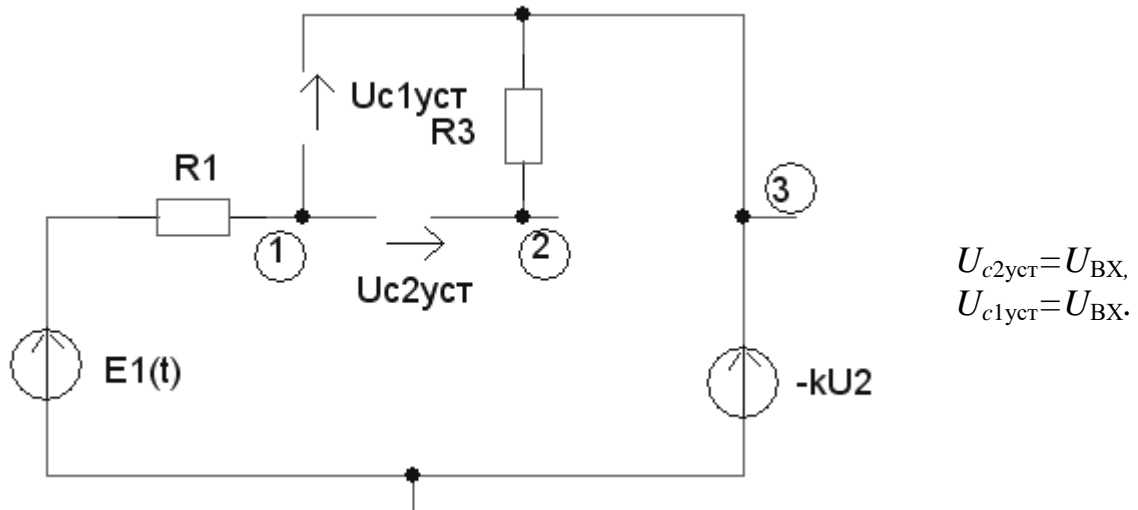


Рис. 10. Расчётная схема для установившегося режима

Рассмотрим момент времени $t = 0_+$. УС примут вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{dU_{c1}}{dt} \\ \frac{dU_{c2}}{dt} \end{bmatrix}_0 = A_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U_{BX} = \begin{bmatrix} 34,965 \cdot 10^3 \text{ В/с} \\ 0 \end{bmatrix} 1(t).$$

Система для поиска неизвестных коэффициентов в выражении для $U_{c1}(t)$ примет следующий вид:

$$\begin{cases} U_{c1}(0) = 0 = 1 + A_1 \sin \gamma_1, & \Rightarrow A_1 = -\frac{1}{\sin \gamma_1}, \\ \frac{dU_{c1}}{dt} = -0,98075 \cdot 10^4 A_1 \sin \gamma_1 + 1,8995 \cdot 10^4 \cdot A_1 \cos \gamma_1 = 3,4965 \cdot 10^4. \end{cases}$$

Решая эту систему, получаем:

$$\gamma_1 = -37,05^\circ, \quad A_1 = 1,6596 \text{ В.}$$

Вид решения для напряжения на конденсаторе C_1 :

$$U_{c1}(t) = \left[1 + 1,6596 e^{-0,98 \cdot 10^4 t} \sin(1,8995 \cdot 10^4 t - 37,05^\circ) \right] \cdot 1(t), \text{ В.}$$

Система для поиска неизвестных коэффициентов в выражении для $U_{c2}(t)$ примет следующий вид:

$$\begin{cases} U_{c2}(0) = 0 = 1 + A_2 \sin \gamma_2, & \Rightarrow A_2 = -\frac{1}{\sin \gamma_2}, \\ \frac{dU_{c2}}{dt} = -0,98075 \cdot 10^4 A_2 \sin \gamma_2 + 1,8995 \cdot 10^4 \cdot A_2 \cos \gamma_2 = 0. \end{cases}$$

Решая эту систему, получаем:

$$\gamma_2 = 62,59^\circ, \quad A_2 = -1,1254 \text{ В.}$$

Вид решения для напряжения на конденсаторе C_2 :

$$U_{c2}(t) = \left[1 - 1,1254 e^{-0,98 \cdot 10^4 t} \sin(1,8995 \cdot 10^4 t + 62,59^\circ) \right] \cdot 1(t), \text{ В.}$$

Вид решения для выходного напряжения схемы:

$$U(t) = U_{c2} - U_{c1} = \left[1 - 1,1254e^{-0,98 \cdot 10^4 t} \sin(1,8995 \cdot 10^4 t + 62,59^\circ) \right] -$$

$$- \left[1 + 1,6596e^{-0,98 \cdot 10^4 t} \sin(1,8995 \cdot 10^4 t - 37,05^\circ) \right] 1(t) = (-1,1254e^{-0,98 \cdot 10^4 t} \times$$

$$\times \sin(1,8995 \cdot 10^4 t + 62,59^\circ) - 1,6596e^{-0,98 \cdot 10^4 t} \sin(1,8995 \cdot 10^4 t - 37,05^\circ)) 1(t), \text{ В.}$$

Переходная функция $h(t) = U_{\text{ВЫХ}}(t)$.

После получения аналитического выражения для переходной характеристики необходимо построить график $h(t)$. Его удобно строить с помощью системы DESIGN LAB 8.0. Расчётная схема для идеального ОУ будет выглядеть так:

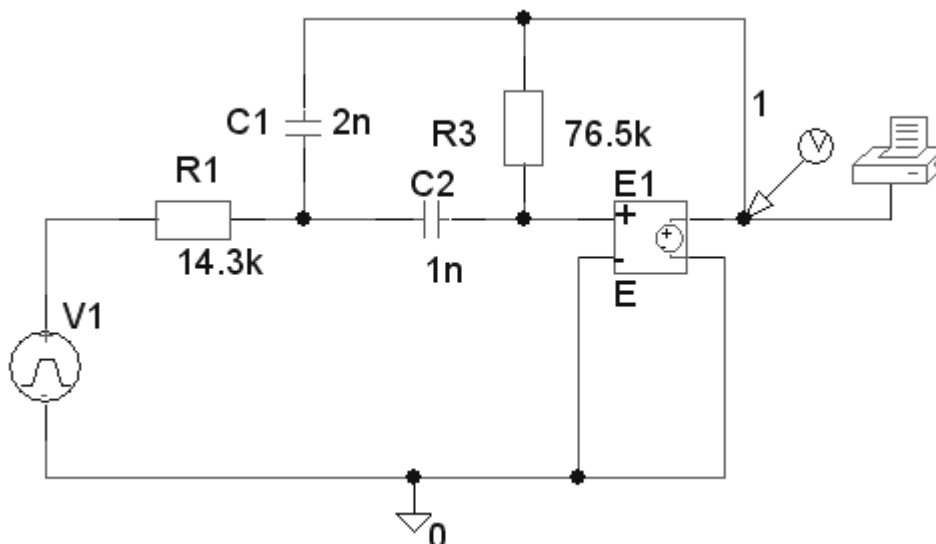


Рис. 11. Расчетная схема для получения временных характеристик

V1 — это импульсный источник напряжения **VPULSE** со следующими значениями атрибутов:

V1 = 0 (минимальное напряжение импульса),

V2 = 1 (максимальное напряжение импульса),

TD = 0 (задержка импульса относительно начала отсчёта времени),

TR = 0 (длительность переднего фронта импульса),

TF = 0 (заднего фронта импульса),

PW = 2m (длительность плоской вершины импульса),

PER = 10m (период повторения импульса).

Окно запуска на решение должно выглядеть так:

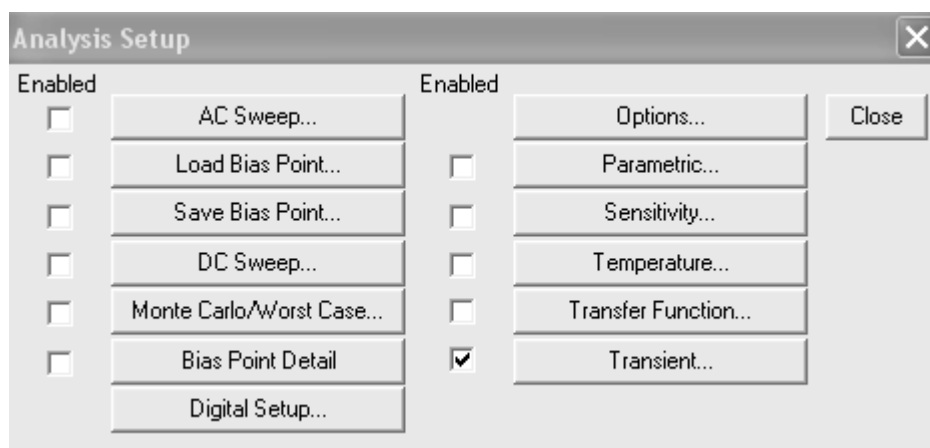


Рис. 12. Окно для задания временного анализа схемы

Предварительно необходимо рассчитать примерный временной диапазон расчёта *Final Time*, который рассчитывается через полученное значение ω_{CB} . Чтобы получить “хорошую” картинку, этот расчёт можно повторять несколько раз и соответственно несколько раз запускать задачу на решение. Окно запуска должно выглядеть так:

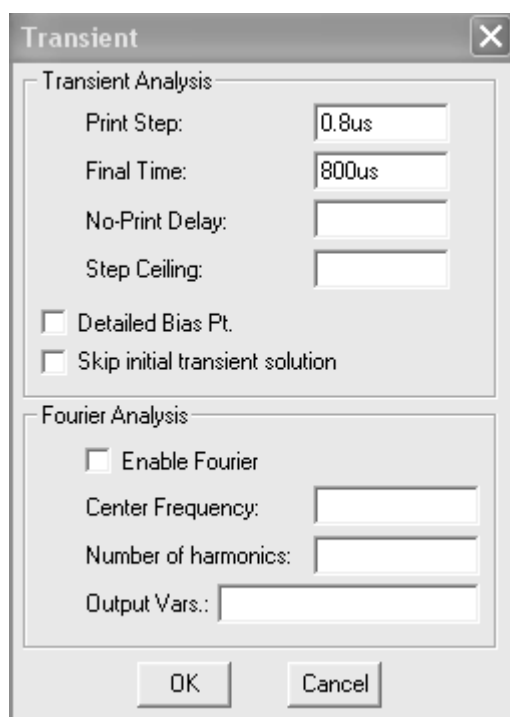


Рис. 13. Окно для определения временного диапазона расчёта

После того, как все параметры заданы, задача запускается на решение нажатием клавиши **F11** и на экран выводится временная характеристика:

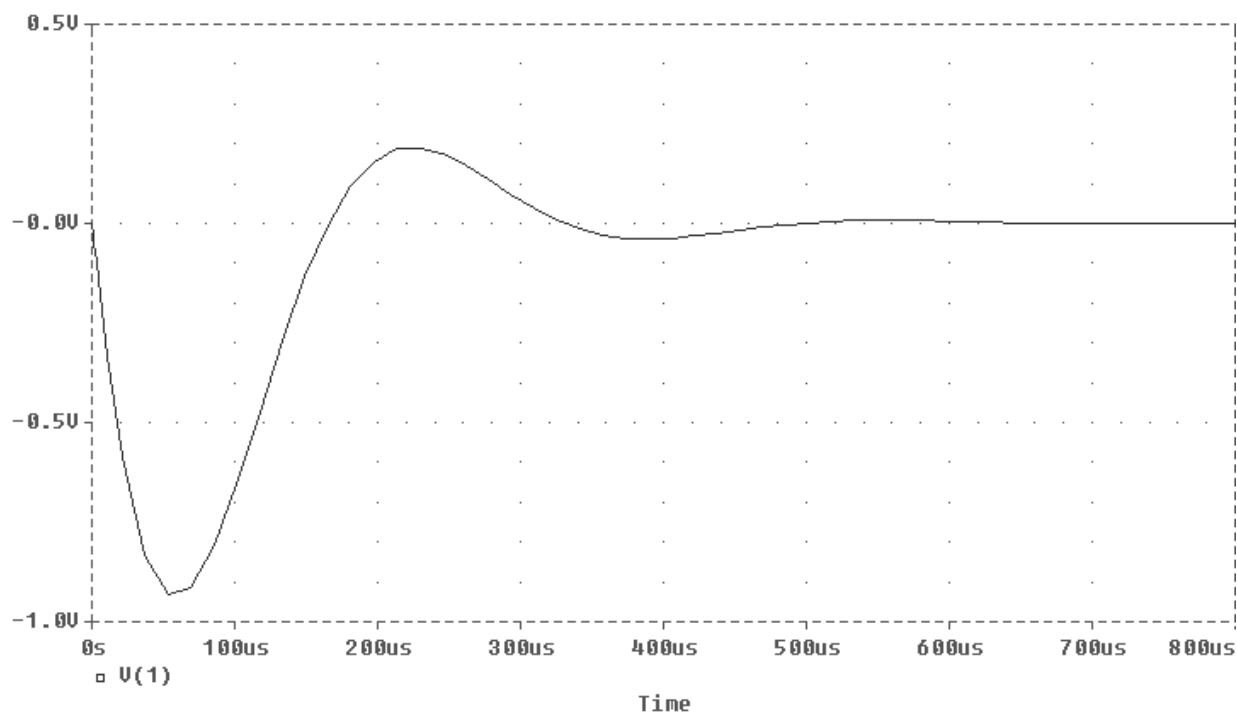


Рис. 14. Переходная функция для схемы с идеальным ОУ

Для реального ОУ также надо рассчитать переходную характеристику. Для этого надо внести изменения в расчётную схему:

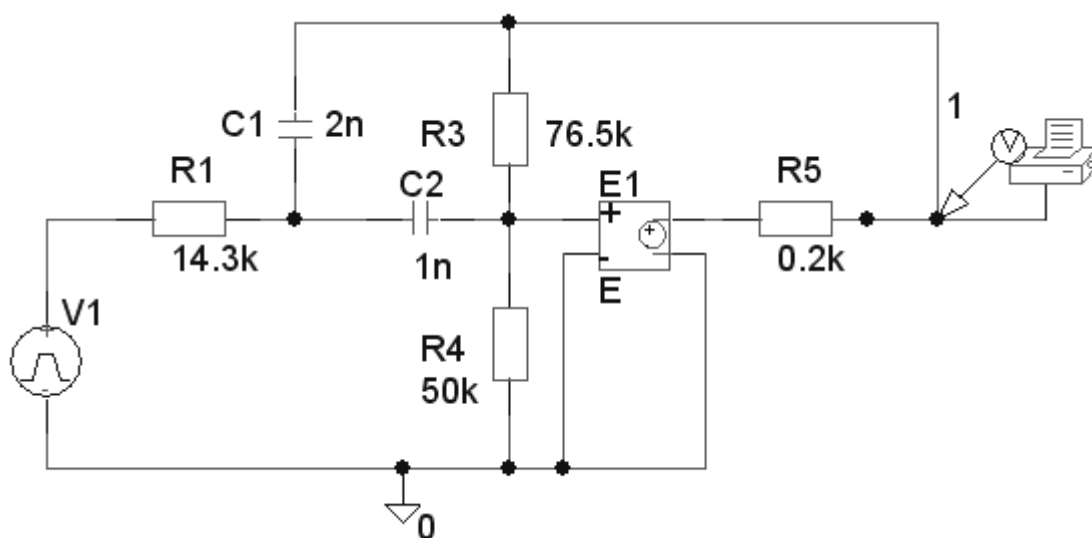


Рис. 15. Расчётная схема для случая реального ОУ

После этого задача отправляется на решение и результаты выводятся на экран (см. рис.16). Сравнительный анализ показывает, что “картинки” для случая идеального и реального ОУ практически совпадают.

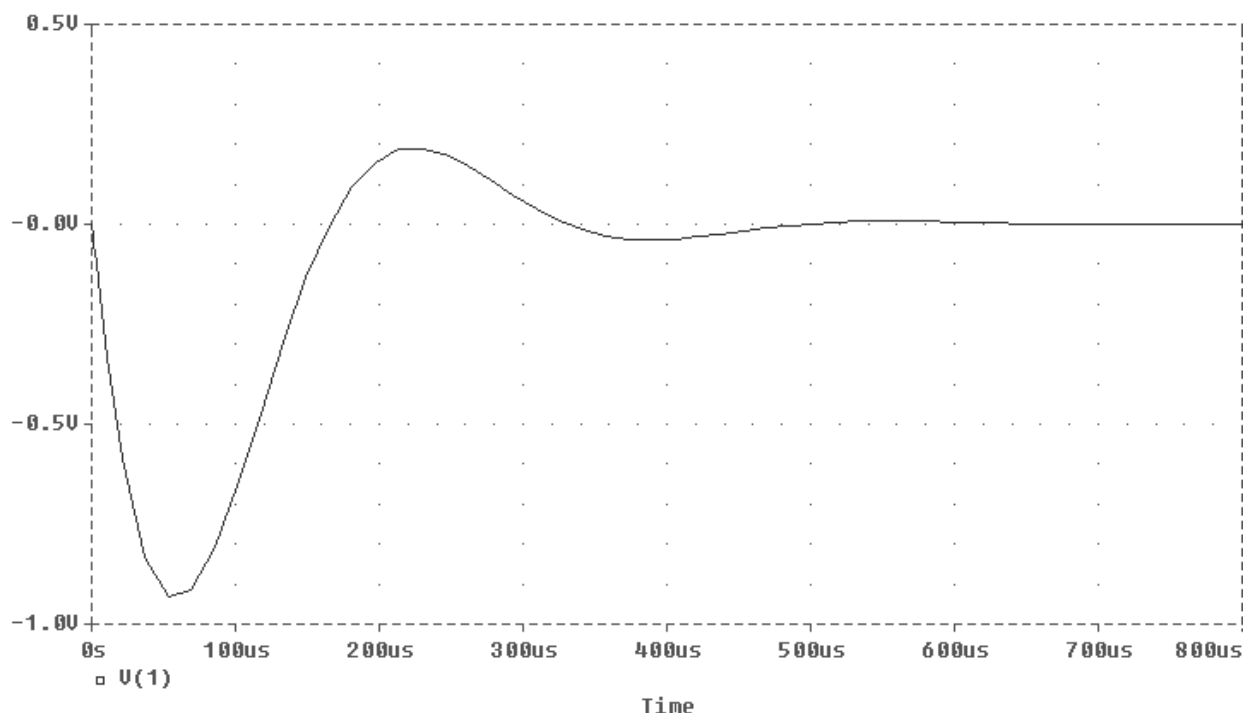


Рис. 16. Переходная характеристика для реального ОУ

4.2. Операторный метод расчёта

По определению переходной характеристики на вход схемы подается единичное воздействие $U_{\text{ВХ}}(t) = 1(t)$. При переходе в частотную область с помощью преобразования Лапласа получаем $U_{\text{ВХ}}(p) = \frac{1}{p}$.

Из определения передаточной функции $H(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)}$ можно посчитать $U_{\text{ВЫХ}}(p) = \frac{H(p)}{p}$, (1).

Итак, для того чтобы найти переходную характеристику $h(t) = U_{\text{ВЫХ}}(t)$ операторным методом, необходимо посчитать оригинал выражения (1), воспользовавшись теоремой разложения. Передаточная функция $H(p)$ получена в первой части (см. п. 1.1) расчёта, поэтому воспользуемся уже известным нам значением:

$$\frac{H(p)}{p} = \frac{-3,496 \cdot 10^4}{p^2 + 1,9615 \cdot 10^4 p + 4,57 \cdot 10^8} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}.$$

Корни знаменателя $F_2(p)$ нам уже известны:

$$p_{1,2} = -0,98075 \cdot 10^4 \pm j1,8995 \cdot 10^4,$$

$$F_2'(p) = 2p + 1,9615 \cdot 10^4.$$

Воспользуемся теоремой разложения для случая комплексно-сопряженных корней знаменателя:

$$\begin{aligned}
 h(t) = U_{\text{ВЫХ}}(t) &= 2 \operatorname{Re} \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} = 2 \operatorname{Re} \frac{-3,496 \cdot 10^4}{3,923 \cdot 10^4 j} e^{-0,98075 \cdot 10^4 t} \cdot e^{j1,8995 \cdot 10^4 t} \cong \\
 &\cong -1,782 e^{-0,98075 \cdot 10^4 t} \operatorname{Re} e^{j(1,9 \cdot 10^4 t - 90^\circ)} = -1,782 e^{-0,98075 \cdot 10^4 t} \cdot \cos(1,9 \cdot 10^4 t - 90^\circ) = \\
 &= -1,782 e^{-0,98075 \cdot 10^4 t} \cdot \sin 1,9 \cdot 10^4 t, \text{ В.}
 \end{aligned}$$

Проверим правильность полученного выражения, сравнив значения переходной характеристики, посчитанной по методу уравнений состояния:

$$U_{\text{ВЫХ}}(0) = -1,1254 \sin 62,59^\circ - 1,6596 \sin(-37,05^\circ) = -0,999 + 0,999 = 0, \text{ В, (УС),}$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(0) = -1,782 \sin 0^\circ = 0, \text{ В, (ОМ).}$$

4.3. Расчёт $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ при импульсном входном воздействии

По принципу суперпозиции импульсное входное воздействие можно представить следующим образом:

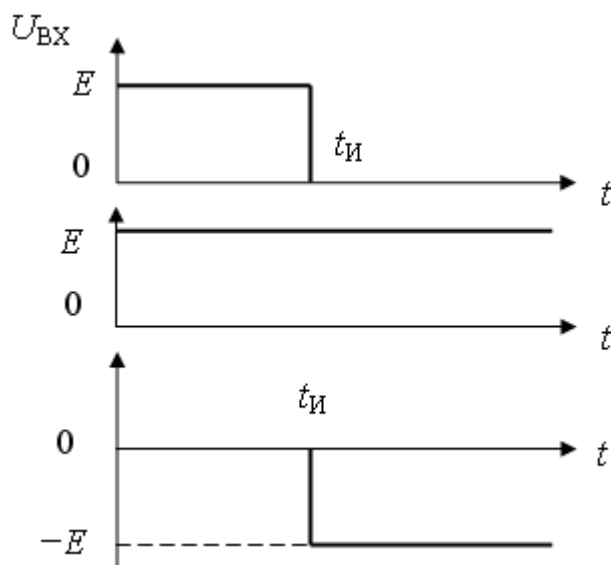


Рис. 17. Представление импульсного воздействия в виде суммы двух постоянных воздействий

Тогда выражение для выходного воздействия можно получить с помощью интеграла Дюамеля:

$$t < t_{\text{И}} \quad U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВХ}}(0)h(t) + \int_0^t U'_{\text{ВХ}}(\theta) \cdot h(t - \theta) d\theta = U_{\text{ВХ}}(0)h(t),$$

$$t \geq t_{\text{И}} \quad U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВХ}}(0)h(t) - U_{\text{ВХ}}(t_{\text{И-}})h(t - t_{\text{И-}}).$$

Временную характеристику можно рассчитать с помощью системы DESIGN LAB 8.0 для схемы с реальным ОУ, приведенной на рис. 15. При этом необходимо изменить входные параметры источника **VPULSE**:

$V1 = 0$ (минимальное напряжение импульса),
 $V2 = E$ (максимальное напряжение импульса),
 $TD = 0$ (задержка импульса относительно начала отсчёта времени),
 $TR = 0$ (длительность переднего фронта импульса),
 $TF = 0$ (заднего фронта импульса),
 $PW = t_{\text{и}}$ (длительность плоской вершины импульса),
 $PER = 10\text{m}$ (период повторения импульса).
 Значения E и $t_{\text{и}}$ берутся из условия задания.

Временная характеристика будет выглядеть следующим образом:

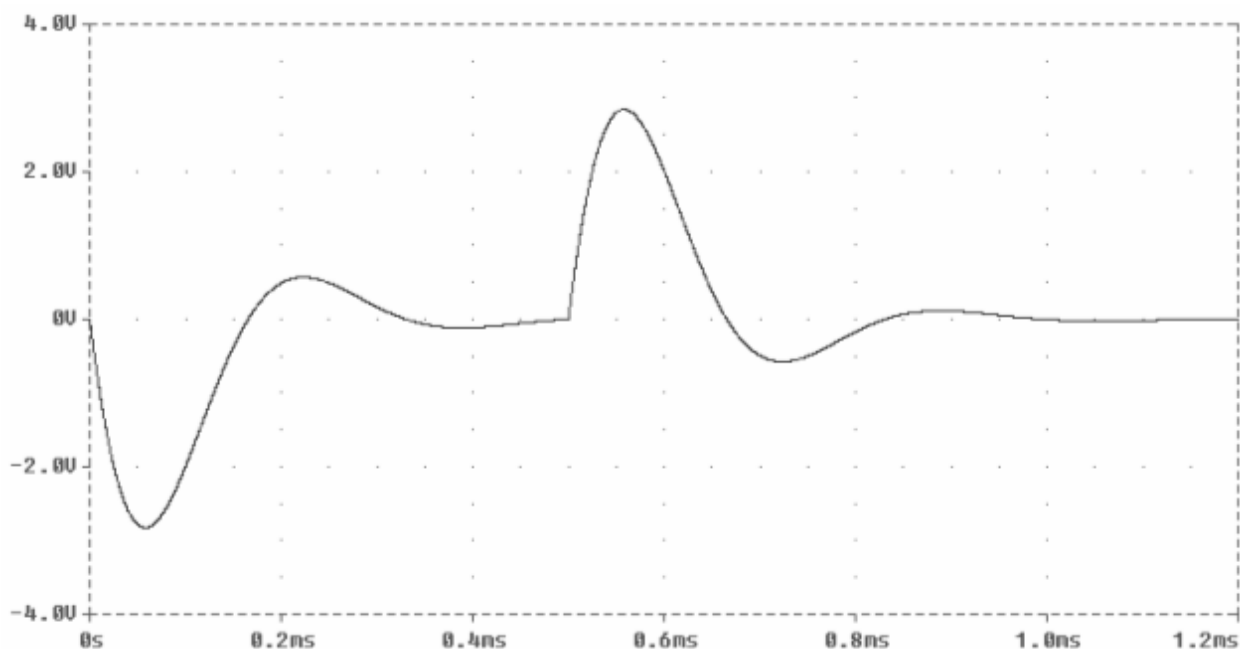


Рис. 18. Изображение выходного напряжения для случая импульсного воздействия на входе схемы при реальном ОУ

ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Отдельные части курсовых работ рекомендуется оформлять в виде отчёта, на обложке которого следует указать название расчёта, номер варианта задания, фамилию и инициалы студента и номер студенческой группы.

Отчёт должен содержать:

1. Текст технического задания.
2. Графики характеристик, используемые при расчёте.
3. Расчёт с необходимыми пояснениями.
4. Результаты анализа на ЭВМ.
5. Сравнительный анализ результатов расчёта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. **Теоретические** основы электротехники. Т. 1: Учебник для электротехн. вузов /Под ред. П.А. Ионкина. Изд.—2-е; М.:Высш. шк.,1976.
2. **Сборник** задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: Учебн. пособие для вузов/Под ред. проф. П. А. Ионкина. М.: Энергоиздат,1982.
3. **Основы** теории цепей: Учебник для вузов/Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. — 5-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. **Кобяк А.Т., Новикова Н.Р., Паротькин В.И., Титов А.А.** Применение системы Design Lab 8.0 в курсах ТОЭ и электроники: Метод. пособие. М.: Издательство МЭИ, 2001, 128с.