

Вариант N = 23

$$N_1 = 1 + \text{mod}(N, 20) = 4$$

$$N_2 = 1 + \text{mod}(NN_1, 9) = 3$$

$$N_3 = 1 + \text{mod}(N_1 + N_2, 10) = 8$$

2. Выполнить анализ установившегося режима схемы методом комплексных амплитуд.

Амплитуду A и начальную фазу ϕ гармонического сигнала $U_{\text{вх}}(t)$ взять в строке N_2 табл. 9.2. Период T гармонического сигнала выбрать в интервале $(\tau_{\min}, \tau_{\max})$

Исходные данные:

$$R_1 = 0.2(\text{Ом})$$

$$R_2 = 1(\text{Ом})$$

$$C_1 = 1(\text{мкФ})$$

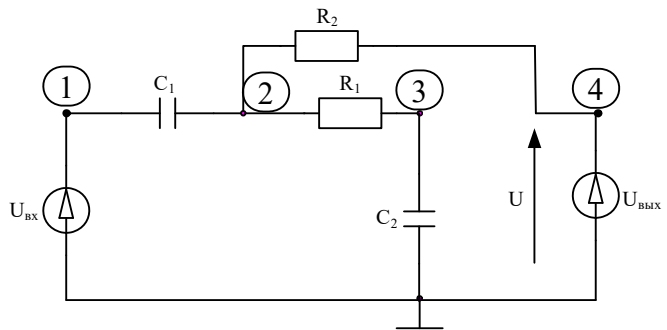
$$C_2 = 3(\text{мкФ})$$

$$A = 5(\text{В})$$

$$\phi = 0^\circ$$

$$T = 1 \times 10^{-3}(\text{с})$$

$$K = 100$$



2.1. Найти выходное напряжение $U_{\text{вых}}(t)$. Напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ представить в форме комплексной амплитуды и во временной форме; изобразить комплексную амплитуду $U_{\text{вых}}$ и напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ графически.

$$f = \frac{1}{T} = 1(\text{кГц})$$

$$\omega = 2\pi f = 6.28319 \times 10^3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = 5$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = 1$$

$$\omega C_1 = 6.28319$$

$$\omega C_2 = 0.01885$$

Y-матрица цепи рис.2

$$Y(\omega) = \begin{pmatrix} j\omega C_1 & -j\omega C_1 & 0 & 0 \\ -j\omega C_1 & G_1 + G_2 + j\omega C_1 & -G_1 & -G_2 \\ 0 & -G_1 & G_1 + j\omega C_2 & 0 \\ 0 & 0 & K & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Delta = |Y(\omega)| = -0.71061 + 3.17301j \times 10^3 \quad |\Delta| = 3.17301 \times 10^3 \quad \angle(\Delta) = 90.01283^\circ$$

Алгебраические дополнения

$$\Delta_{14}(\omega) = (-1)^{1+4} \begin{pmatrix} -j\omega C_1 & G_1 + G_2 + j\omega C_1 & -G_1 \\ 0 & -G_1 & G_1 + j\omega C_2 \\ 0 & 0 & K \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{14} = -G_1 K \omega C_1 j = -3.14159j \times 10^3 \quad |\Delta_{14}| = 3.14159 \times 10^3 \quad \angle(\Delta_{14}) = -90^\circ$$

$$\Delta_{11}(\omega) = \begin{pmatrix} G_1 + G_2 + j\omega C_1 & -G_1 & -G_2 \\ -G_1 & G_1 + j\omega C_2 & 0 \\ 0 & K & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Delta_{11} = -C_1 C_2 \omega^2 + (G_1 C_1 + G_1 C_2 + G_2 C_2)j\omega + (G_1 G_2 + 1)K$$

$$\Delta_{11} = 599.88156 + 31.52902j \quad |\Delta_{11}| = 600.70956 \quad \angle(\Delta_{11}) = 3.00863^\circ$$

коэффициент передачи по напряжению

$$k_u = \frac{\Delta_{14}}{\Delta_{11}} = -0.27449 - 5.22259j \quad |k_u| = 5.2298 \quad \angle(k_u) = -93.00863^\circ$$

входное сопротивление

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = 9.89429 \times 10^{-3} - 0.18906j \quad |Z_{\text{вх}}| = 0.18932 \quad \angle(Z_{\text{вх}}) = -87.00421^\circ$$

Входное и выходное напряжение в комплексной форме:

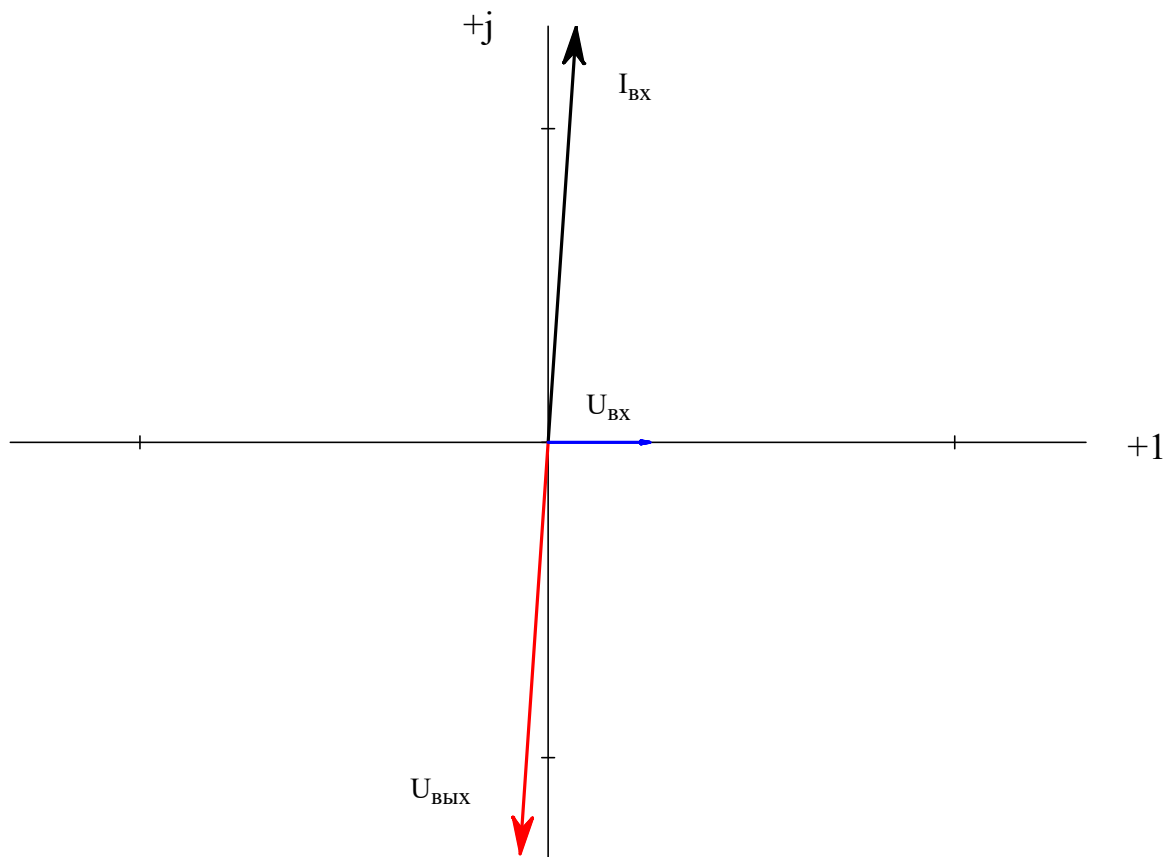
$$U_{\text{вх}} = A e^{j\phi} = 5 \quad |U_{\text{вх}}| = 5 \quad \angle(U_{\text{вх}}) = 0^\circ$$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} k_u = -1.37247 - 26.11297j \quad |U_{\text{вых}}| = 26.14902 \quad \angle(U_{\text{вых}}) = -93.00863^\circ$$

Входной ток в комплексной форме:

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{Z_{\text{вх}}} = 1.38028 + 26.37441j \quad |I_{\text{вх}}| = 26.41051 \quad \angle(I_{\text{вх}}) = 87.00421^\circ$$

векторная диаграмма тока и напряжений

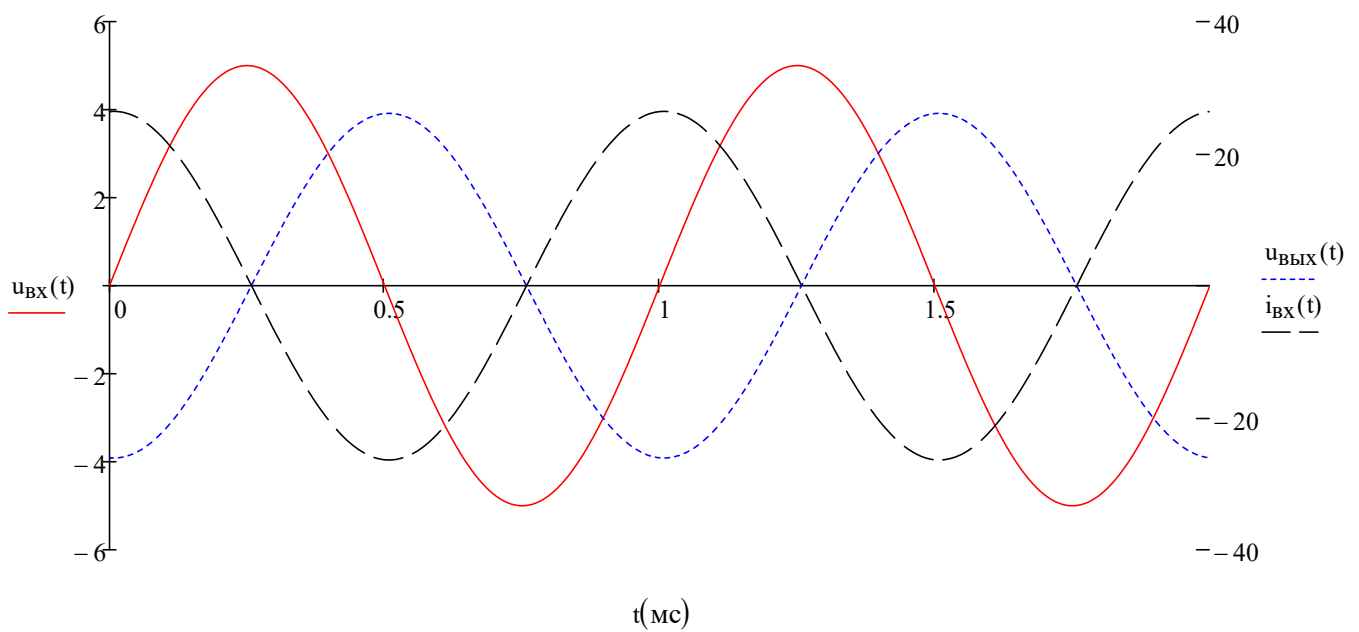


Мгновенные значения

$$u_{\text{BX}}(t) = |U_{\text{BX}}| \sin(\omega t + \angle(U_{\text{BX}})) = 5 \sin(6.283 \times 10^3 t)$$

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = |U_{\text{ВЫХ}}| \sin(\omega t + \angle(U_{\text{ВЫХ}})) = 26.1 \sin(6.283 \times 10^3 t - 1.62)$$

$$i_{\text{BX}}(t) = |I_{\text{BX}}| \sin(\omega t + \angle(I_{\text{BX}})) = 26.4 \sin(6.283 \times 10^3 t + 1.52)$$



2.2. Представить схему, подключенную к источнику входного напряжения $U_{ax}(t)$, в виде реактивного двухполюсника и определить параметры его схемной модели на частоте входного сигнала. Определить мощность, потребляемую двухполюсником. Параметры входного напряжения те же, что и в пункте 2.1.

$$r = \operatorname{Re}(Z_{BX}) = 9.89429 \times 10^{-3} (\text{Ом})$$

$$x_L = \operatorname{Im}(Z_{BX}) = -0.18906 (\text{Ом})$$

$$L = \frac{x_L}{\omega} = -30.08981 \text{ мкГн}$$

Полная мощность источника:

$$S = \frac{1}{2} U_{BX} \overline{I_{BX}} = 3.45071 - 65.93603j$$

активная мощность источника:

$$P = \operatorname{Re}(S) = 3.45071$$

реактивная мощность источника:

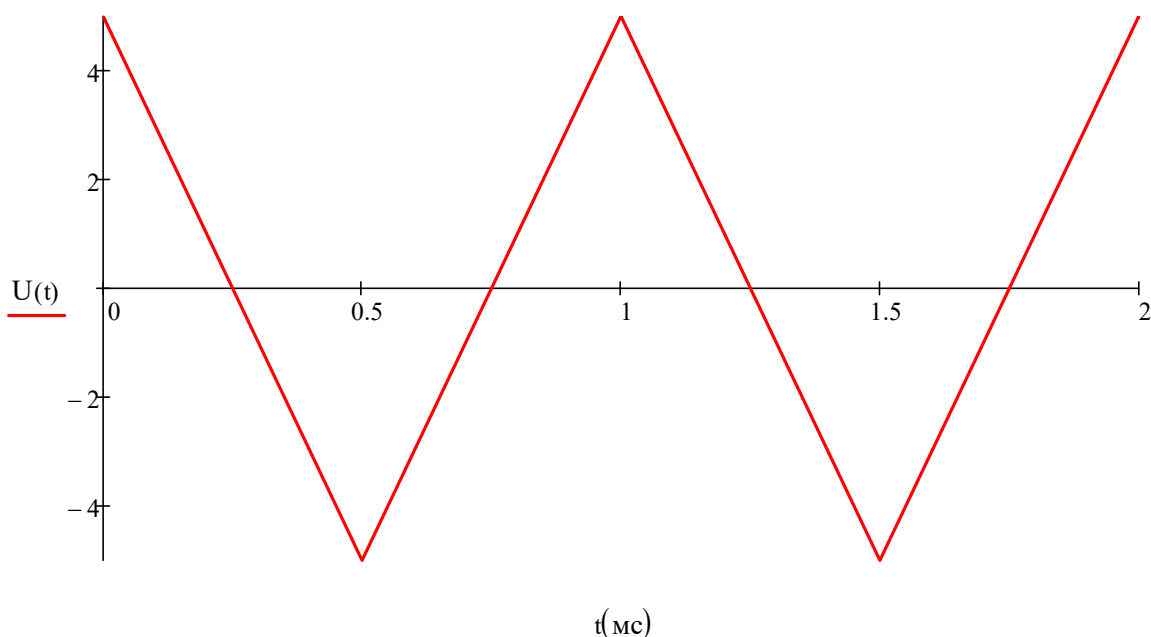
$$Q = \operatorname{Im}(S) = -65.93603$$

2.3. Определить аналитически и изобразить графически амплитудный и фазовый спектры периодического негармонического напряжения $U_{ax}(t)$ (см. табл 9.3, амплитуду напряжения A и период T взять такими же, как и в п.2.1).

Аналитическое описание заданной функции:

$$\text{на интервале } 0 \leq t \leq 0.5T \quad u(t) = A \left(\frac{4t}{T} - 1 \right)$$

$$\text{на интервале } 0.5T \leq t \leq T \quad u(t) = A \left[\frac{4(t - 0.5T)}{T} - 1 \right]$$



Для разложения заданной функций на гармоники воспользуемся комплексной формой ряда Фурье

$$U_0 = \frac{2A}{T} \left[\int_0^{\frac{T}{2}} \left(1 - \frac{4t}{T} \right) dt \right] = 0$$

$$u_k = \frac{2A}{T} \left[\int_0^{\frac{T}{2}} \left(1 - \frac{4t}{T} \right) e^{-jk\omega_1 t} dt + \int_{\frac{T}{2}}^T \left[\frac{4(t - 0.5T)}{T} - 1 \right] e^{-jk\omega_1 t} dt \right]$$

$$u_k = \frac{A \left(8e^{-Tjk\omega_1} - 16e^{-0.5Tjk\omega_1} - 2Tjk\omega_1 + 2Tjk\omega_1 e^{-Tjk\omega_1} + 8 \right)}{T^2 k^2 \omega_1^2}$$

$$\psi_k = \arg(u_k) \quad \omega_k = k\omega_1$$

график амплитудно - частотного спектра $|U_k|$ периодического сигнала

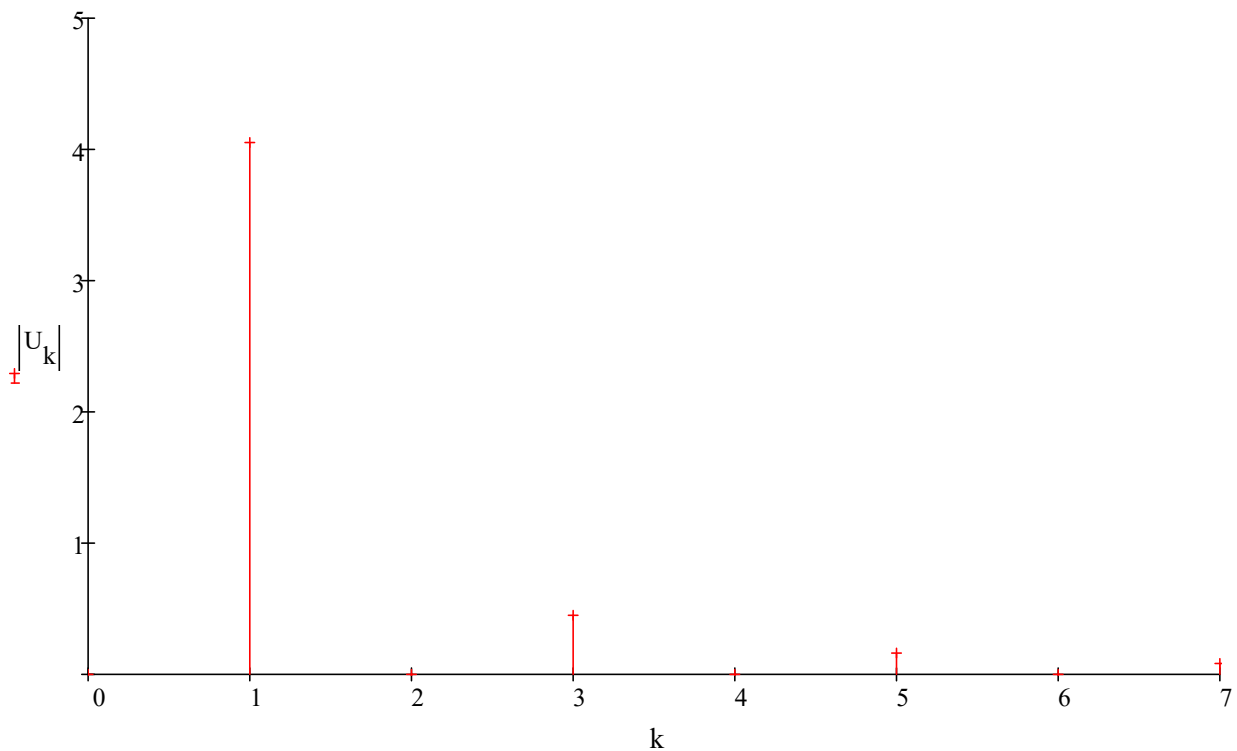


рис 2.1

график фазо - частотного спектра периодического сигнала

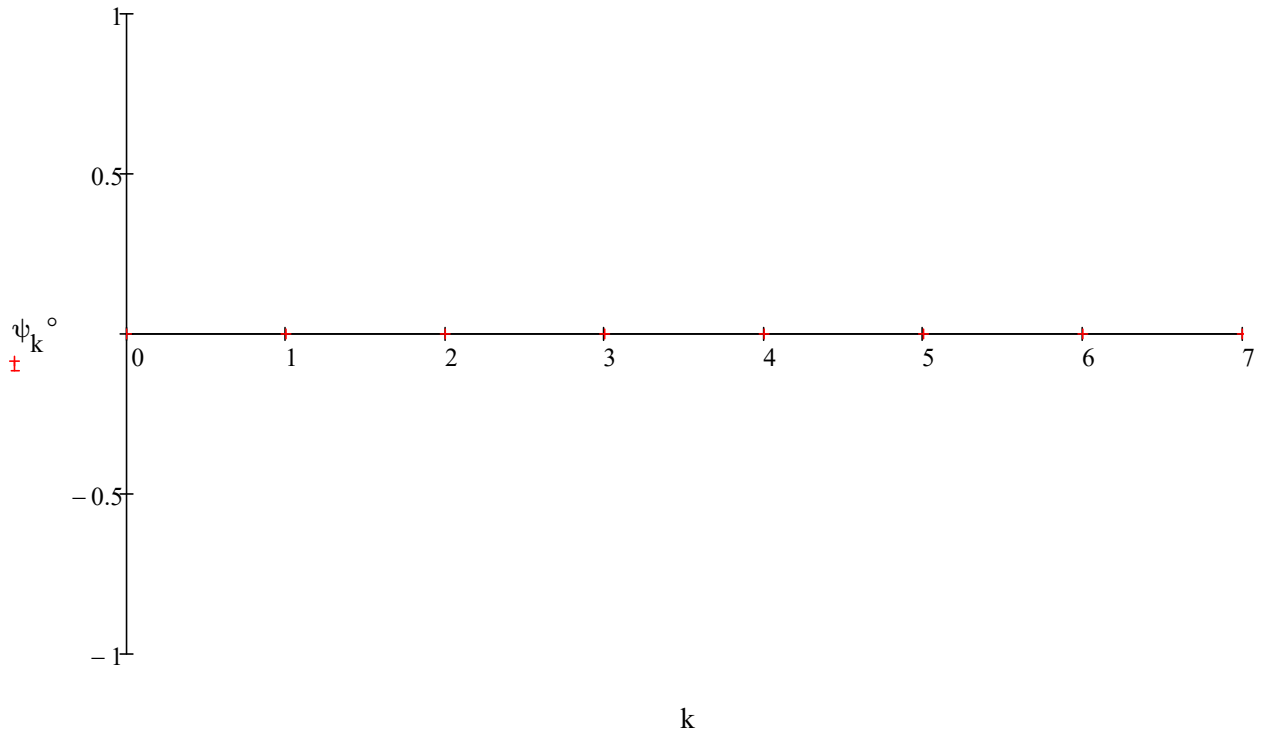


рис 2.2

2.6. Таблица расчета амплитудно и фазо - частотного спектра периодической последовательности импульсов на входе цепи, (для первых 4 гармоник)

k $\omega_k \left(\frac{\text{рад}}{\text{мкс}} \right)$ $|U_k| (\text{В})$ ψ_k

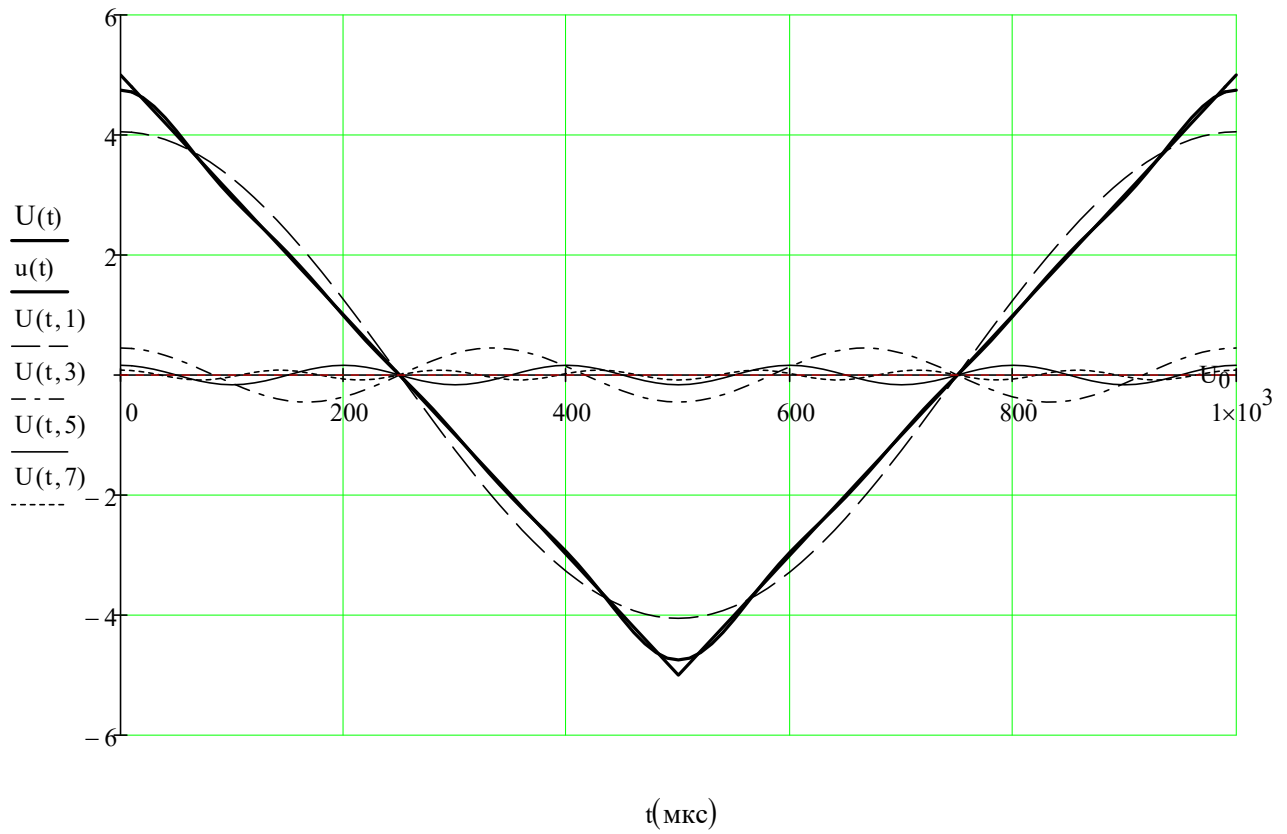
0	0	0	0
1	$6.28319 \cdot 10^{-3}$	4.05285	0
2	0.01257	0	0
3	0.01885	0.45032	0
4	0.02513	0	0
5	0.03142	0.16211	0
6	0.0377	0	0
7	0.04398	0.08271	0

таблица2 =

2.4. По найденным четырем гармоникам построить график входного напряжения $U_{ax}(t)$.

$$u(t) = U_0 + \sum_k (|U_k| \cos(\omega_k t + \psi_k))$$

$$U(t,k) = |U_k| \cos(\omega_k t + \psi_k)$$



3. Выполнить анализ схемы в частотной области.

3.1. Определить и изобразить графически амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики коэффициента передачи напряжения схемы.

3.2. Определить граничные частоты и полосу пропускания схемы.

3.3. Определить аналитически и изобразить графически амплитудный и фазовый спектры периодического негармонического напряжения $U_{\text{вых}}(t)$

3.4. По найденным четырем гармоникам построить график выходного напряжения $U_{\text{вых}}(t)$.

Коэффициент передачи по напряжению

$$k_u(\omega) = \frac{U_{\text{вых}}(\omega)}{U_{\text{вх}}(\omega)} = \frac{G_1 K C_1 j \omega}{C_1 C_2 \omega^2 - (G_1 C_1 + G_1 C_2 + G_2 C_2) j \omega - (G_1 G_2 + 1) K}$$

$$k_u(\omega) = \frac{(0.5j)\omega}{(5.018j \times 10^{-3})\omega + -3 \times 10^{-9} \omega^2 + 600}$$

Преобразуем передаточную функцию по напряжению к виду:

$$K_u(j\omega) = k_1 \frac{j\omega}{\omega^2 - b_1 j\omega - b_0}$$

где:

$$k_1 = \frac{G_1 K}{C_2} = 1.66667 \times 10^8$$

$$b_1 = \frac{G_1 C_1 + G_1 C_2 + G_2 C_2}{C_1 C_2} = 1.67267 \times 10^6$$

$$b_0 = \frac{(G_1 G_2 + 1)K}{C_1 C_2} = 2 \times 10^{11}$$

Запишем АЧХ ФЧХ :

$$K_u(\omega) = k_1 \frac{\omega}{\sqrt{(\omega^2 - b_0)^2 + (b_1 \omega)^2}}$$

$$\phi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{-b_1 \omega}{\omega^2 - b_0}\right)$$

3.1.4. графики модуля передаточной функции $|K(\omega)|$ и аргумента $\phi(\omega)$ (АЧХ и ФЧХ).

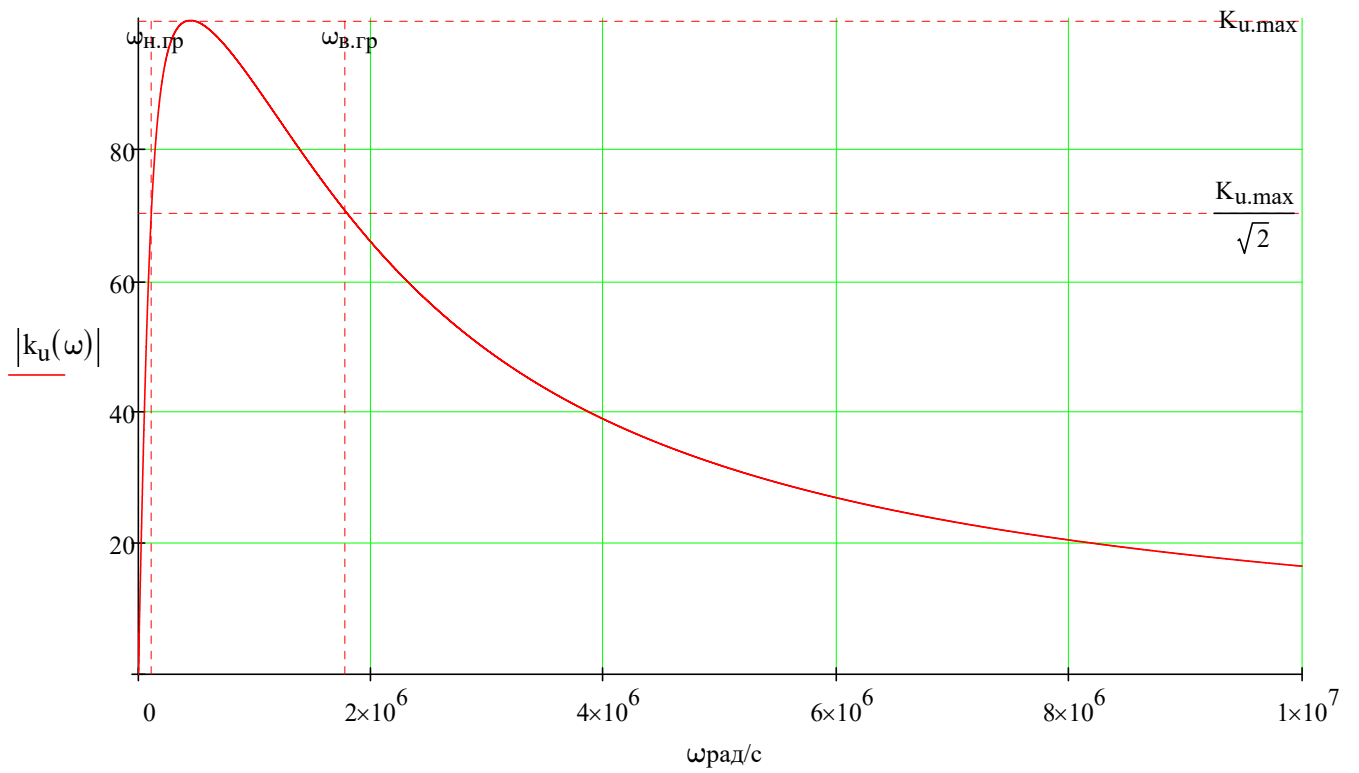


рис 3.1

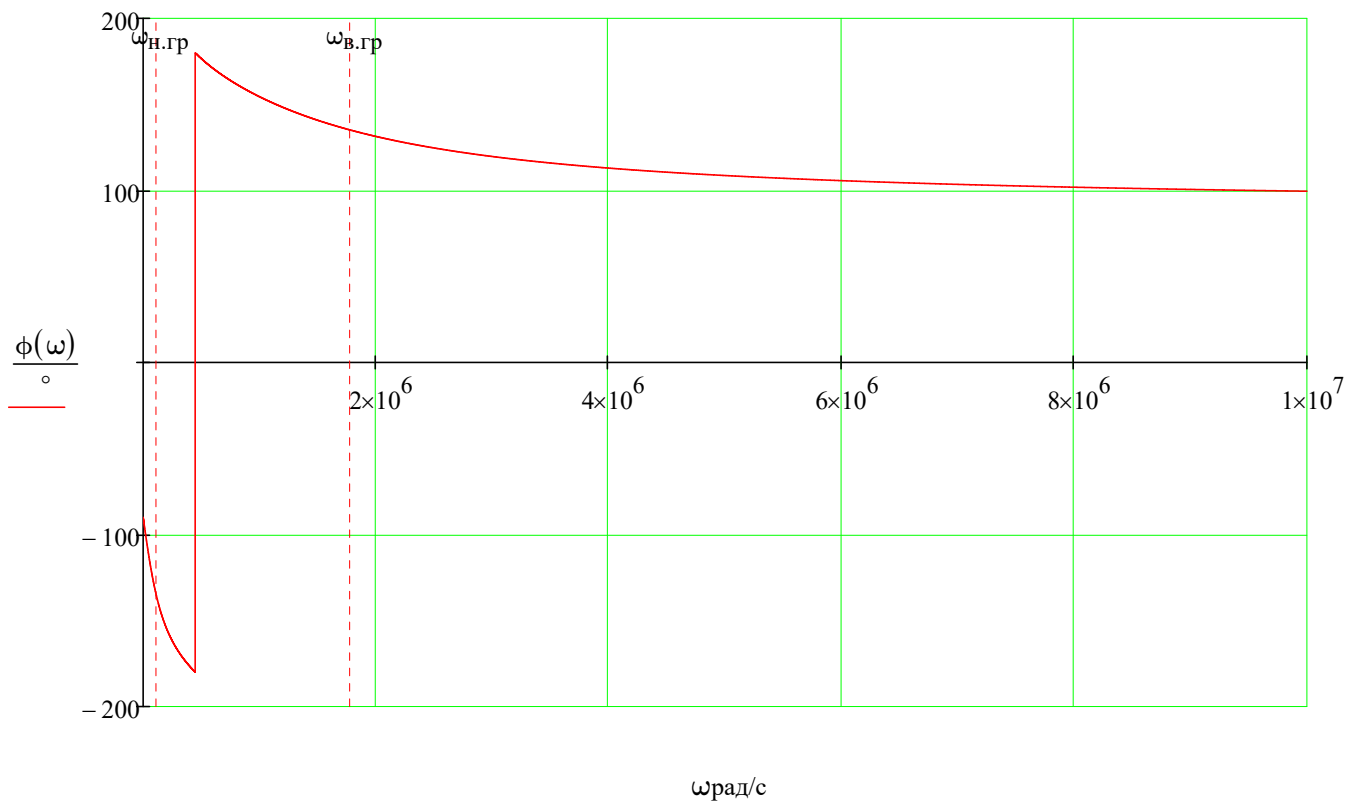


рис 3.2

3.2. Определить граничные частоты и полосу пропускания схемы.

Для того чтобы вычислить предельные частоты, нужно провести исследования уже полученных нами частотных характеристик, в частности АЧХ и ФЧХ.

Судя по выражению для АЧХ можно предположить, что перед нами - полосовой фильтр. Это означает, что цепь пропускает сигналы в диапазоне $[\omega_{в.гр}; \omega_{н.гр}]$.

АЧХ такой цепи принимает максимальное значение $K_u(\omega_p) = 99.64129$ на частоте $\omega_p = \sqrt{b_0} = \sqrt{2 \times 10^{11}} = 4.47214 \times 10^5$ рад/с, что соответствует середине условной полосы пропускания с предельными частотами $\omega_{в.гр}$ и $\omega_{н.гр}$, которые являются решением уравнения

$$\frac{\omega^2}{(\omega^2 - b_0)^2 + (b_1 \omega)^2} = \frac{1}{2b_1^2}$$

$$\omega^4 - \omega^2(b_1^2 + 2b_0) + b_0^2 = 0$$

Решив это уравнение, получим:

$$\omega_{в.гр} = \frac{b_1 + \sqrt{b_1^2 + 4b_0}}{2} = \frac{1.673 \times 10^6 + \sqrt{(1.673 \times 10^6)^2 + 42 \times 10^{11}}}{2} = 1.785 \times 10^6 \text{ рад/с}$$

$$\omega_{н.гр} = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 + 4b_0}}{2} = \frac{-1.673 \times 10^6 + \sqrt{(1.673 \times 10^6)^2 + 42 \times 10^{11}}}{2} = 1.121 \times 10^5 \text{ рад/с}$$

Таким образом условной полосой пропускания является диапазон

$$[\omega_{в.гр} = 1.78473 \times 10^6 \text{ рад/с}; \omega_{н.гр} = 1.12062 \times 10^5 \text{ рад/с}].$$

$$\Delta\omega = \omega_{в.гр} - \omega_{н.гр} = 1.78473 \times 10^6 - 1.12062 \times 10^5 = 1.67267 \times 10^6 \text{ рад/с}$$

3.3. Расчет АЧС и ФЧС периодической последовательности импульсов на выходе цепи равна:

$$U_{\text{вых}_k} = U_k K(j\omega_k) = |U_k| |k_u(\omega_k)| e^{j(\psi_k + \phi_k)}$$

АЧС на выходе цепи:

$$U_{\text{вых}_k} = |U_k| |k_u(\omega_k)|$$

ФЧХ на выходе цепи

$$\psi_{\text{вых}_k} = \psi_k + \phi_k$$

график амплитудно - частотного спектра $|U_{\text{ВЫХ}_k}|$ периодической последовательности импульсов на выходе цепи

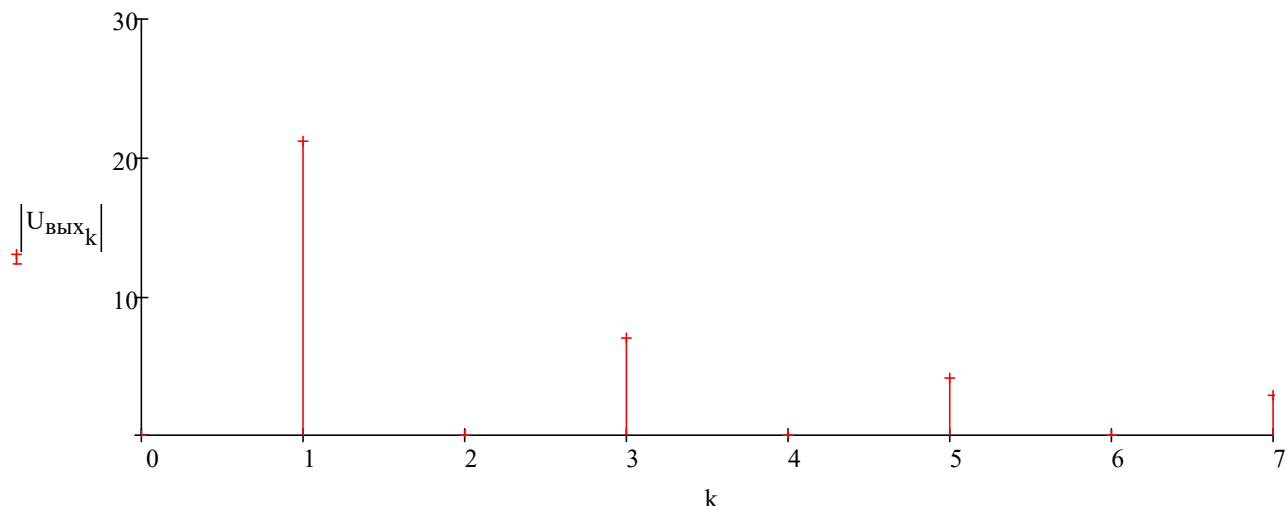


рис 3.3

график фазо - частотного спектра периодической последовательности импульсов на выходе цепи

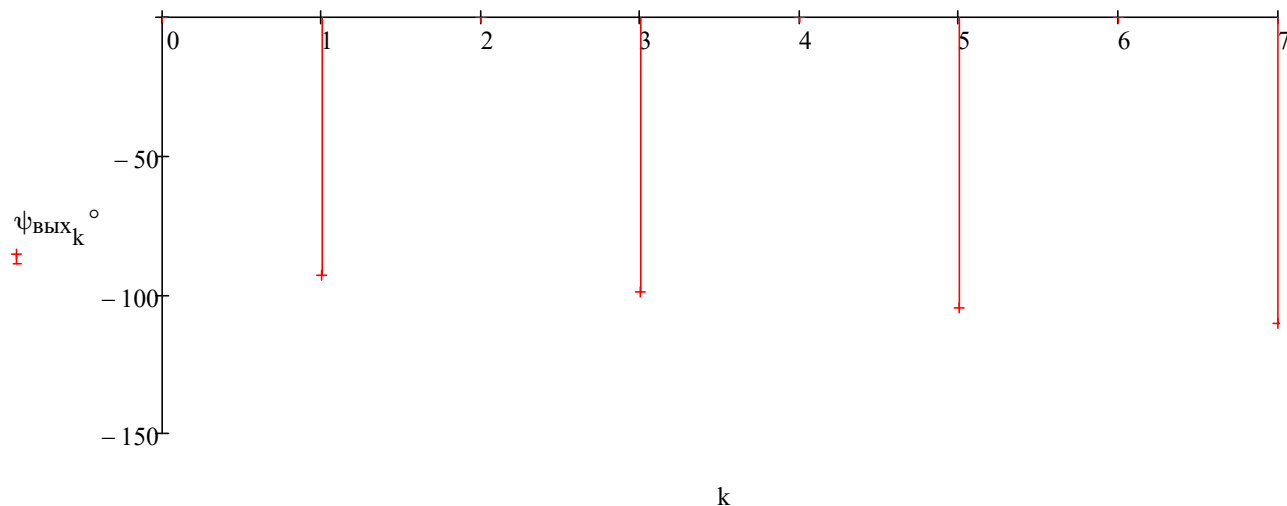


рис 3.4

Таблица расчета амплитудно и фазо - частотного спектра периодической последовательности импульсов на выходе цепи, АЧХ и ФЧХ цепи (для первых 4-х гармоник)

k	ω_k (кГц)	$ K(\omega_k) $	$\phi(\omega_k)$	$ U_{\text{ВЫХ}_k} $	$\psi_{\text{ВЫХ}_k}$
0	0	0	-90	0	0
1	6.283	5.23	-93.009	21.196	-93.009
2	12.566	10.423	-96.004	0	0
3	18.85	15.543	-98.974	6.999	-98.974
4	25.133	20.558	-101.907	0	0
5	31.416	25.438	-104.791	4.124	-104.791
6	37.699	30.157	-107.617	0	0
7	43.982	34.694	-110.377	2.87	-110.377

таблица4 =

3.4. По найденным четырем гармоникам построить график входного напряжения $U_{вх}(t)$.

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВЫХ}0} + \sum (|U_{\text{ВЫХ}k}| \cos(\omega_k t + \psi_{\text{ВЫХ}k})) \quad U_{\text{ВЫХ}}(t, k) = |U_{\text{ВЫХ}k}| \cos(\omega_k t + \psi_{\text{ВЫХ}k})$$

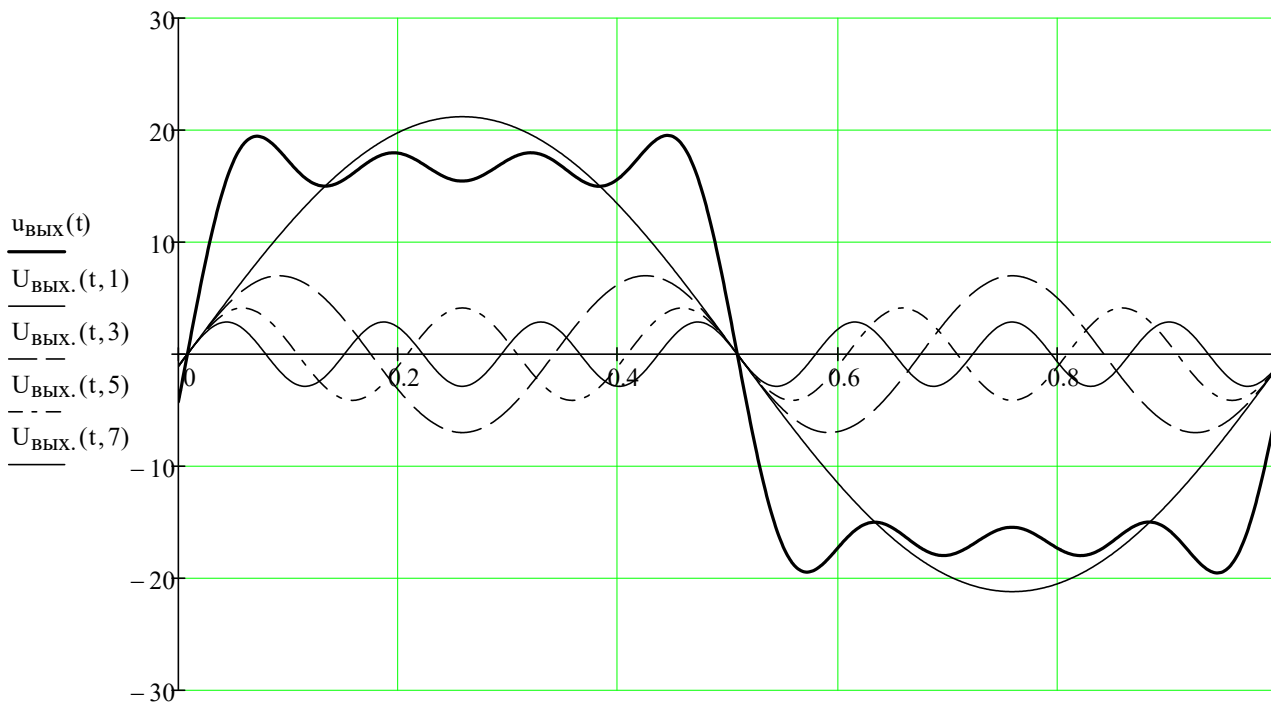


рис. 3.5

Таблица расчета четырех гармоник и их суммы на выходе цепи

$t(\text{мс})$ $U_{\text{ВЫХ}1}(\text{В})$ $U_{\text{ВЫХ}3}(\text{В})$ $U_{\text{ВЫХ}5}(\text{В})$ $U_{\text{ВЫХ}7}(\text{В})$ $u_{\text{ВЫХ}}(\text{В})$

0	-1.11248	-1.09185	-1.0528	-0.99915	-4.25628
0.05	5.48274	4.95153	3.98719	2.76356	17.18502
0.1	11.54127	6.91273	1.0528	-2.2496	17.2572
0.15	16.47006	3.17487	-3.98719	-0.11899	15.53874
0.2	19.78665	-3.18045	-1.0528	2.38948	17.94288
0.25	21.16638	-6.91371	3.98719	-2.69001	15.54985
0.3	20.4742	-4.9471	1.0528	0.77282	17.35271
0.35	17.77786	1.09804	-3.98719	1.78151	16.67022
0.4	13.3413	6.23793	-1.0528	-2.86711	15.65932
0.45	7.5988	6.23508	3.98719	1.58898	19.41006
0.5	1.11248	1.09185	1.0528	0.99915	4.25628
0.55	-5.48274	-4.95153	-3.98719	-2.76356	-17.18502
0.6	-11.54127	-6.91273	-1.0528	2.2496	-17.2572
0.65	-16.47006	-3.17487	3.98719	0.11899	-15.53874
0.7	-19.78665	3.18045	1.0528	-2.38948	-17.94288
0.75	-21.16638	6.91371	-3.98719	2.69001	-15.54985
0.8	-20.4742	4.9471	-1.0528	-0.77282	-17.35271
0.85	-17.77786	-1.09804	3.98719	-1.78151	-16.67022
0.9	-13.3413	-6.23793	1.0528	2.86711	-15.65932
0.95	-7.5988	-6.23508	-3.98719	-1.58898	-19.41006
1	-1.11248	-1.09185	-1.0528	-0.99915	-4.25628

таблица5 =

4. Выполнить анализ схемы операторным методом.

4.1. Определить в общем и численном виде операторную функцию передачи напряжения схемы.

4.2. Определить переходную и импульсную характеристики схемы.

Сравнить с п.п. 1.3, 1.4.

4.3. Определить амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики схемы. Сравнить с п. 3,1.

4.4. Определить и построить реакцию схемы на напряжение в форме идеального прямоугольного импульса амплитудой 2 вольты и длительностью $5\tau_{\max}$, где τ_{\max} - максимальная постоянная времени схемы.

Y-матрица цепи в операторной форме

$$Y(s) = \begin{pmatrix} sC_1 & -sC_1 & 0 & 0 \\ -sC_1 & G_1 + G_2 + sC_1 & -G_1 & -G_2 \\ 0 & -G_1 & G_1 + sC_2 & 0 \\ 0 & 0 & K & 1 \end{pmatrix}$$

$$Y(s) = \begin{pmatrix} 1 \times 10^{-3}s & -1 \times 10^{-3}s & 0 & 0 \\ -1 \times 10^{-3}s & 1 \times 10^{-3}s + 6 & -5 & -1 \\ 0 & -5 & 3 \times 10^{-6}s + 5 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 1 \end{pmatrix}$$

Алгебраические

$$\Delta_{14}(s) = (-1)^{1+4} \begin{vmatrix} -sC_1 & G_1 + G_2 + sC_1 & -G_1 \\ 0 & -G_1 & G_1 + sC_2 \\ 0 & 0 & K \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{14}(s) = -G_1 K C_1 s$$

$$\Delta_{11}(s) = \begin{vmatrix} G_1 + G_2 + sC_1 & -G_1 & -G_2 \\ -G_1 & G_1 + sC_2 & 0 \\ 0 & K & 1 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{11}(s) = C_1 C_2 s^2 + (G_1 C_1 + G_1 C_2 + G_2 C_2)s + (G_1 G_2 + 1)K$$

$$\Delta_{11}(s) = 5.02 \times 10^{-3}s + 3 \times 10^{-9}s^2 + 600$$

операторный коэффициент передачи по напряжению

$$k_u(s) = \frac{\Delta_{14}(s)}{\Delta_{11}(s)} = k_1 \frac{s}{s^2 + b_1 s + b_0} = \frac{1.67 \times 10^8 s}{1.67 \times 10^6 s + s^2 + 2 \times 10^{11}}$$

где:

$$k_1 = \frac{G_1 K}{C_2} = 1.66667 \times 10^8$$

$$b_1 = \frac{G_1 C_1 + G_1 C_2 + G_2 C_2}{C_1 C_2} = 1.67267 \times 10^6$$

$$b_0 = \frac{(G_1 G_2 + 1)K}{C_1 C_2} = 2 \times 10^{11}$$

Найдем изображение переходной характеристики цепи

$$h_u(s) = \frac{1}{s} k_u(s) = \frac{k_1}{(s^2 + b_1 s + b_0)} = \frac{H_1}{H_2}$$

Оригинал переходной характеристики найдем воспользовавшись теоремой разложения

приравняем H_2 к нулю и найдем корни

$$H_2 = (s^2 + b_1 s + b_0)s = 0$$

$$s = \left(\frac{-b_1}{2} \right) \pm \left(\frac{\sqrt{b_1^2 - 4b_0}}{2} \right) \quad \begin{aligned} s_1 &= -1.29613 \times 10^5 \\ s_2 &= -1.54305 \times 10^6 \end{aligned}$$

максимальная постоянная времени схемы

$$\tau_{\max} = \frac{1}{|s_1|} \quad \tau_{\max} = 7.71527 \times 10^{-6}$$

подставим в числитель H_1 корни p

$$H_{1(1)} = k_1 = 1.66667 \times 10^8$$

$$H_{1(2)} = k_1 = 1.66667 \times 10^8$$

производная H'_2 по p

$$H'_{2(1)} = 2s_1 + b_1 = 1.41344 \times 10^6$$

$$H'_{2(2)} = 2s_2 + b_1 = -1.41344 \times 10^6$$

разделим H_1 на H'_2

$$C_1 = \frac{H_{1(1)}}{H'_{2(1)}} = 117.9156$$

$$C_2 = \frac{H_{1(2)}}{H'_{2(2)}} = -117.9156$$

Переходную характеристику цепи получим в виде:

$$h_u(t) = \sum_k \left[\frac{H_{1(k)}}{H'_{2(k)}} e^{s(k)t} \right] = C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t} = -117.92 e^{-1.5431 \times 10^6 t} + 117.92 e^{-1.29613 \times 10^5 t}$$

Найдем изображение импульсной переходной характеристики цепи

$$g(s) = k_u(s) = k_1 \frac{s}{s^2 + b_1 s + b_0} = \frac{F_1}{F_2}$$

Оригинал импульсной переходной характеристики найдем воспользовавшись теоремой разложения

приравняем F_2 к нулю и найдем корни

$$F_2 = (s^2 + b_1 s + b_0) = 0$$

$$s = \left(\frac{-b_1}{2} \right) \pm \left(\frac{\sqrt{b_1^2 - 4b_0}}{2} \right) \quad \begin{aligned} s_1 &= -1.29613 \times 10^5 \\ s_2 &= -1.54305 \times 10^6 \end{aligned}$$

подставим в числитель F_1 корни p

$$F_{1(1)} = k_1 s_1 = -2.16022 \times 10^{13}$$

$$F_{1(2)} = k_1 s_2 = -2.57176 \times 10^{14}$$

производная F'_2 , по p

$$F'_{2(1)} = 2s_1 + b_1 = 1.41344 \times 10^6$$

$$F'_{2(2)} = 2s_2 + b_1 = -1.41344 \times 10^6$$

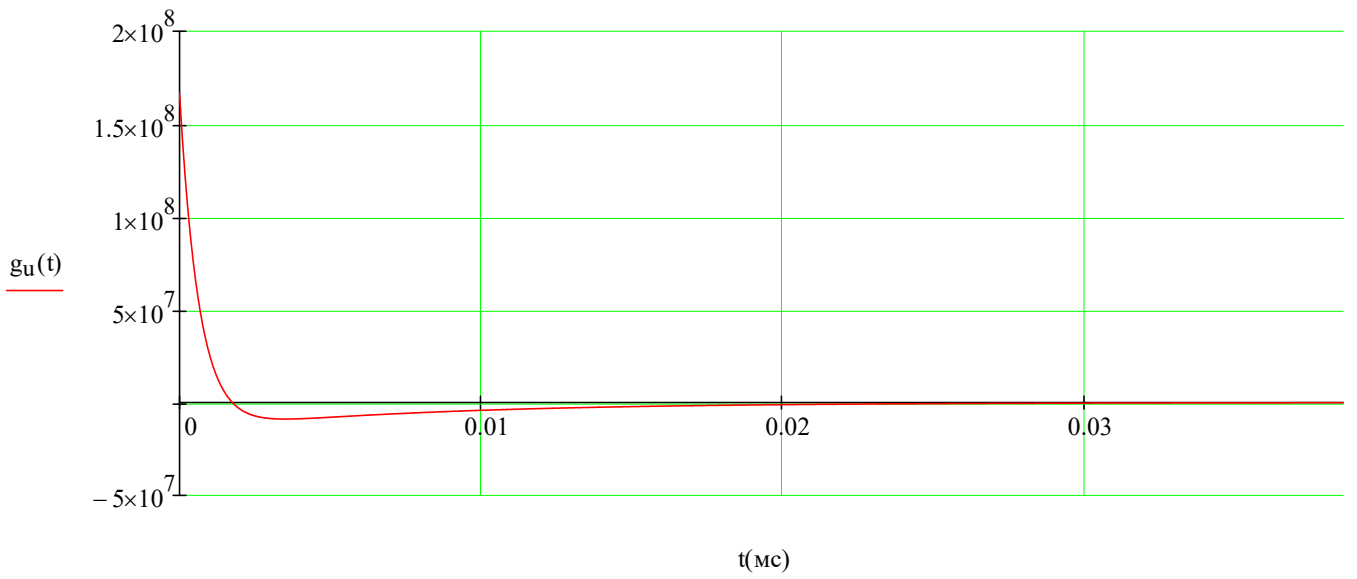
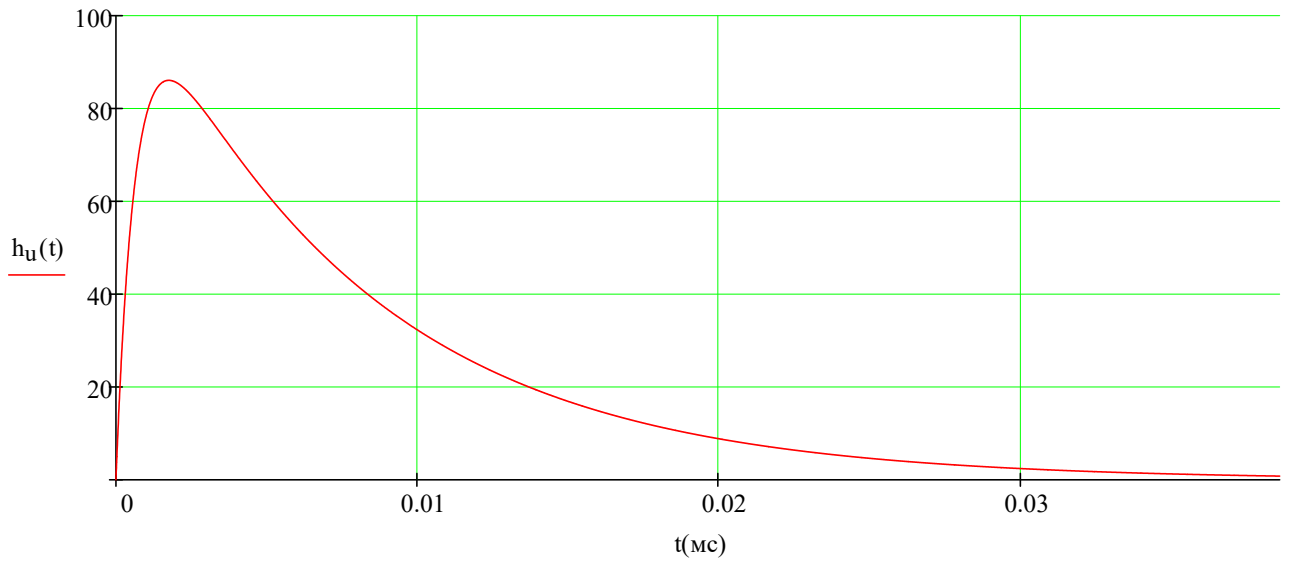
разделим H_1 на H'_2

$$A_1 = \frac{F_{1(1)}}{F'_{2(1)}} = -1.52834 \times 10^7$$

$$A_2 = \frac{F_{1(2)}}{F'_{2(2)}} = 1.8195 \times 10^8$$

Импульсную переходную характеристику цепи получим в виде:

$$g_u(t) = \sum_k \left[\frac{H_1(k)}{H'_2(k)} e^{s(k)t} \right] = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} = 1.8195 \times 10^8 e^{-1.5431 \times 10^6 t} + -1.5283 \times 10^7 e^{-1.29613 \times 10^5 t}$$



4.3. Для расчета АЧХ и ФЧХ цепи найдем комплексный коэффициент передачи по напряжению данной цепи. Для этого в выражении для найденного ранее операторного коэффициента передачи заменим оператор $\mathbf{s} \rightarrow j\omega$

$$K_u(j\omega) = k_1 \frac{j\omega}{\omega^2 - b_1 j\omega - b_0}$$

Запишем АЧХ ФЧХ :

$$K_u(\omega) = k_1 \frac{\omega}{\sqrt{(\omega^2 - b_0)^2 + (b_1 \omega)^2}}$$

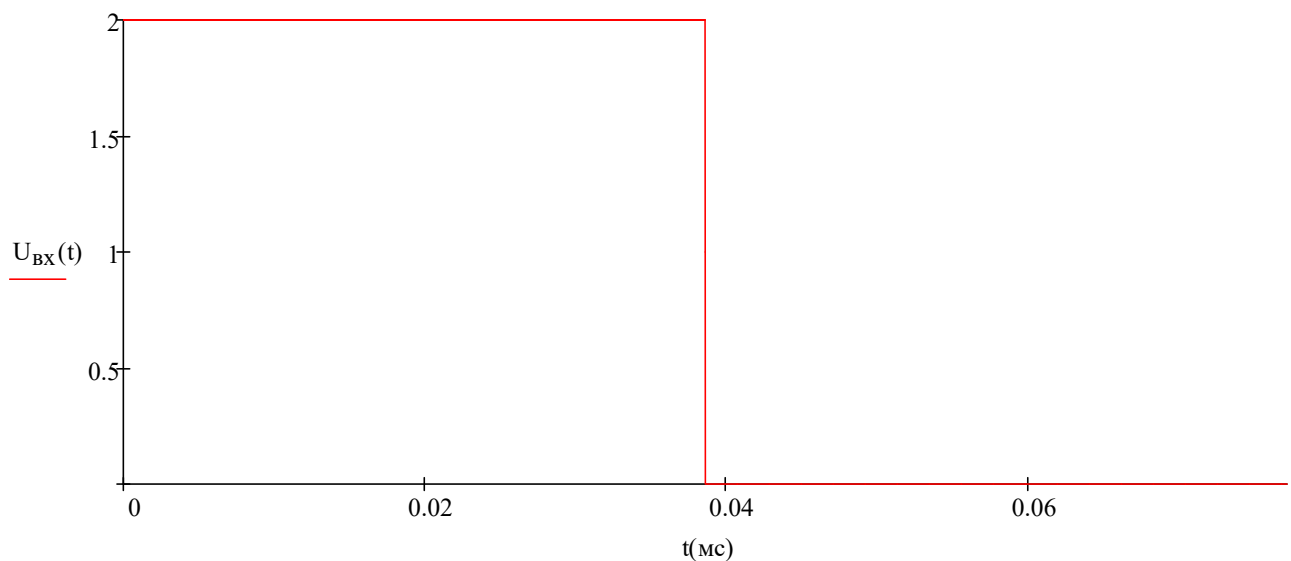
$$\phi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \text{arctg}\left(\frac{-b_1 \omega}{\omega^2 - b_0}\right)$$

4.4. Определить и построить реакцию схемы на напряжение в форме идеального прямоугольного импульса амплитудой 2 вольт и длительностью $5\tau_{\max}$, где τ_{\max} - максимальная постоянная времени схемы.

$$t_1 = 5\tau_{\max} = 3.85763 \times 10^{-5}$$

$$U_m = 2$$

$$U_{\text{ВХ}}(t) = U_m(1 - \Phi(t - t_1))$$



Расчет выходного напряжения операторным методом

изображение входного напряжения в операторной форме

$$U_1(s) = \frac{U_m}{s}$$

изображение выходного напряжения в операторной форме

$$U_{\text{ВЫХ}}(s) = U_{\text{ВХ}}(s) g_u(s) = \frac{U_m k_1}{s^2 + b_1 s + b_0} = \frac{H_1}{H_2}$$

Оригинал выходного напряжения найдем воспользовавшись теоремой разложения приравняем H_2 к нулю и найдем корни

$$H_2 = (s^2 + b_1 s + b_0)s = 0$$

$$s = \left(\frac{-b_1}{2} \right) \pm \left(\frac{\sqrt{b_1^2 - 4b_0}}{2} \right) \quad \begin{aligned} s_1 &= -1.29613 \times 10^5 \\ s_2 &= -1.54305 \times 10^6 \end{aligned}$$

подставим в числитель H_1 корни p

$$H_{1(1)} = U_m k_1 \quad H_{1_1} = 3.33333 \times 10^8$$

$$H_{1(2)} = U_m k_1 \quad H_{1_2} = 3.33333 \times 10^8$$

производная H'_2 по p

$$H'_{2(1)} = 2s_1 + b_1 \quad H'_{2(1)} = 1.41344 \times 10^6$$

$$H'_{2(2)} = 2s_2 + b_1 \quad H'_{2(2)} = -1.41344 \times 10^6$$

разделим H_1 на H'_2

$$B_1 = \frac{H_{1(1)}}{H'_{2(1)}} \quad B_1 = 235.83119$$

$$B_2 = \frac{H_{1(2)}}{H'_{2(2)}} \quad B_2 = -235.83119$$

напряжение $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ получим в виде:

$$U_{\text{ВЫХ1}}(t) = \sum_k \left[\frac{H_{1(k)}}{H'_{2(k)}} e^{s(k)t} \right] = B_1 e^{s_1 t} + B_2 e^{s_2 t} \quad U_{\text{ВЫХ1}}(t) = -235.83 e^{-1.5431 \times 10^6 t} + 235.83 e^{-1.29613 \times 10^5 t}$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВЫХ1}}(t) - U_{\text{ВЫХ1}}(t - t_1) \Phi(t - t_1)$$

