

1. Анализ ARC-цепи

1.1. Содержание задания

Схема ARC-цепи и её параметры представлены в табл. 1.1

Таблица 1.1

Схема ARC-цепи	Параметры
	$R_1 = 17,85 \text{ кОм}$ $R_2 = 70 \text{ кОм}$ $C = 4 \text{ нФ}$ $\mu \rightarrow \infty$

Требуется:

1. Найти операторную передаточную функцию ARC-цепи типа $H(p) = U_2(p)/U_1(p)$.

С этой целью составить схему замещения цепи, заменив усилитель соответствующей схемой замещения в виде источника напряжения управляемого напряжением (ИНУН) из табл. 1.2.

Таблица 1.2

Наименование элемента	Схемное изображение в стандартных программах для ПК	Схемы замещения
инверсный операционный усилитель		

Для полученной схемы замещения применить метод узловых напряжений, т.е. составить систему узловых уравнений и использовать её для нахождения $H(p)$ (базисный узел показан значком заземления в схемах ARC-цепей табл.1.1).

2. Получить комплексную передаточную функцию $H(j\omega)$ путём замены переменной $p=j\omega$ в $H(p)$. Записать выражения для амплитудно-частотной $H(\omega)=|H(j\omega)|$ и фазочастотной $\Theta(\omega)=argH(j\omega)$ характеристик. Построить графики АЧХ и ФЧХ в диапазоне частот $0...∞$. При использовании ПК рекомендуется выбирать $f_{min}=1$ Гц и f_{max} таким, чтобы на графиках отображались характерные качества АЧХ и ФЧХ исследуемой ARC-цепи. Обычно, $f_{max}=5...100$ кГц.

3. Найти переходную характеристику цепи $h(t)$ по операторной передаточной функции $H(p)$. Построить график $h(t)$ при изменении времени от 0 до $∞$. При использовании ПК рекомендуется выбирать $t_{min}=1$ нс, а время t_{max} – таким, чтобы было чётко видно установившееся значение $h(t)$. Обычно, $t_{max}=0,1...5$ мс. По рассчитанному графику переходной характеристики цепи $h(t)$ определить период свободных колебаний $T_{св}$ и частоту свободных колебаний $f_{св}$ ($\omega_{св}=2\pi f_{св}$), а также декремент затухания $\Delta=h(t_1)/h(t_1+T_{св})$, где t_1 – значение времени при максимальном значении переходной характеристики ($h(t_1)=max h(t)$).

4. Получить выражения для комплексных спектральных плотностей напряжения на входе $U_1(j\omega)$ и выходе $U_2(j\omega)$ цепи, если на вход поступает прямоугольный видеоимпульс напряжения с амплитудой U и длительностью $t_{и}$ (рис. 1.1,а). Рассчитать и построить график спектральной плотности амплитуд напряжения $|U_1(j\omega)|$ прямоугольного импульса, у которого амплитуда $U=1$ В, а длительность равна $t_{и}=1,2 \cdot T_{св}$, мс. Также построить графики АЧХ= $|H(j\omega)|$ и спектральной плотности амплитуд напряжения на выходе цепи $|U_2(j\omega)|=|U_1(j\omega)| \cdot |H(j\omega)|$. Графики строить в интервале частот $0 \leq \omega \leq 4 \omega_0$ с шагом $0,2\omega_0$, где $\omega_0=2\pi/t_{и}$.

5. Найти реакцию цепи $u_2(t)$ при воздействии на ARC-цепь периодической последовательности прямоугольных видеоимпульсов (рис. 1.1,б).

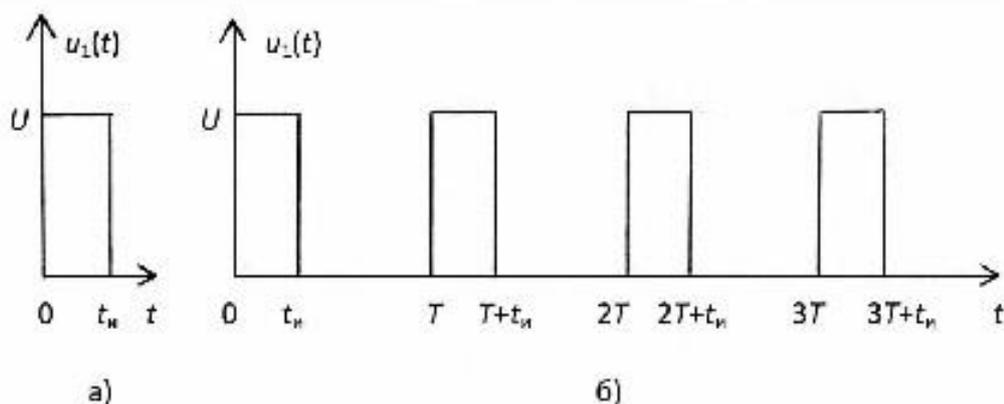


Рис. 1.1

Воздействие $u_1(t)$ представлено с допустимой погрешностью в виде усечённого ряда Фурье:

$$u_1(t) = \frac{U_0}{2} + \sum_{k=1}^n U_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k), \text{ где } \omega_1 = \frac{2\pi}{T}.$$

Амплитуда импульсов $U=1$ В, $n=6$, $T=0,5\pi$ мс.

В табл. 1.3 приведены амплитуды U_k и начальные фазы гармоник φ_k в ряду Фурье, включая нулевую гармонику $\frac{U_0}{2}$, рассчитанные для разных значений скважности $Q = \frac{T}{t_{и}}$ последовательности импульсов (см. рис. 1.1,б).

В работе необходимо представить рисунок воздействия $u_1(t)$ с учётом скважности Q и записать выражение для $u_1(t)$ в виде усечённого ряда Фурье, пользуясь табл. 1.3. Далее рассчитать значения АЧХ $|H(jk\omega_1)|$ и ФЧХ $\Theta(k\omega_1)$ на частотах гармоник $k=0, 1, 2, \dots, 6$. Затем рассчитать значения амплитуд U_{k2} и начальных фаз φ_{k2} напряжения на выходе цепи:

$$U_{k2} = U_{k1} \cdot |H(jk\omega_1)|; \quad \varphi_{k2} = \varphi_{k1} + \Theta(k\omega_1).$$

Записать выражение для реакции цепи $u_2(t)$ как сумму гармонических составляющих. Построить графики спектров амплитуд и фаз входного и выходного напряжений.

Таблица 1.3

Скважность $Q = \frac{T}{t_{и}}$	Номер гармоники							
	k	0	1	2	3	4	5	6
3	U_{k1}	0,333	0,551	0,276	0	0,138	0,110	0
	φ_{k1}	—	$-\frac{\pi}{3}$	$-\frac{2\pi}{3}$	—	$-\frac{\pi}{3}$	$-\frac{2\pi}{3}$	—

1.2. Методические рекомендации к выполнению задачи 1

Прежде чем приступить к работе, необходимо изучить следующие разделы дисциплины «Теория электрических цепей»:

1.2.1. Операторный метод анализа электрических цепей

[1. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей: Учебник. 2-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 544 с., с.218–253;

2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей: Учебник для вузов; Под редакцией В.П. Бакалова 3-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 596 с., с.185–199]

1.2.2. Временный метод анализа переходных колебаний

[1, с.254–273; 2, с.200–208]

1.2.3. Спектральный анализ электрических цепей

[1, с.274–304; 2, с.209–232]

Для задачи должна быть вычерчена схема, приведено условие и численные значения параметров. Все величины: сопротивления, напряжения и т.п., буквенные обозначения которых применяются в ходе решения, должны быть показаны на схеме. В пояснительной записке должен быть указан порядок решения задачи, записаны расчётные формулы, показано, какие числа в них подставляются.

При решении следует пользоваться международной системой единиц СИ. В промежуточных формулах наименование единиц не указывается. В окончательных формулах и в окончательных цифровых результатах обязательно следует указать единицы измерения, в которых получен ответ.

При расчётах следует ограничиваться точностью в четыре значащие цифры. При построении графиков необходимо привести таблицы расчётов значений функций и пример расчёта. На графике должны быть отмечены расчётные точки с численными метками вдоль осей, указаны масштабы по осям координат.

Графики рекомендуется рассчитывать на ПК, используя любую из программ: Mathcad, FASTMEAN DEMO, Electronics Workbench и другие.

1.3. Пример выполнения задачи 1

Рассмотрим схему ARC-цепи, изображённую на рис. 1.2.

Параметры ARC-цепи: $R=50$ кОм; $C=2$ нФ; $K=3,35$.

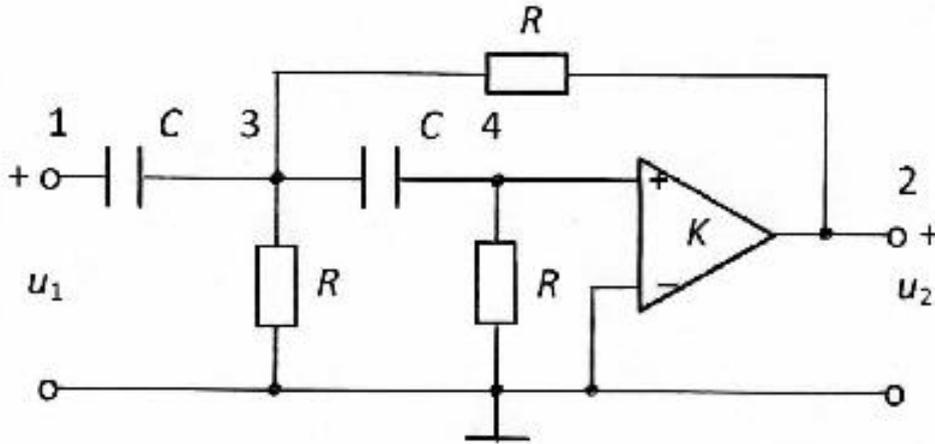


Рис. 1.2

Составим схему замещения цепи (рис. 1.3), заменив усилитель с конечным усилением источником напряжения управляемым напряжением (ИНУН) в соответствии с табл. 1.3.

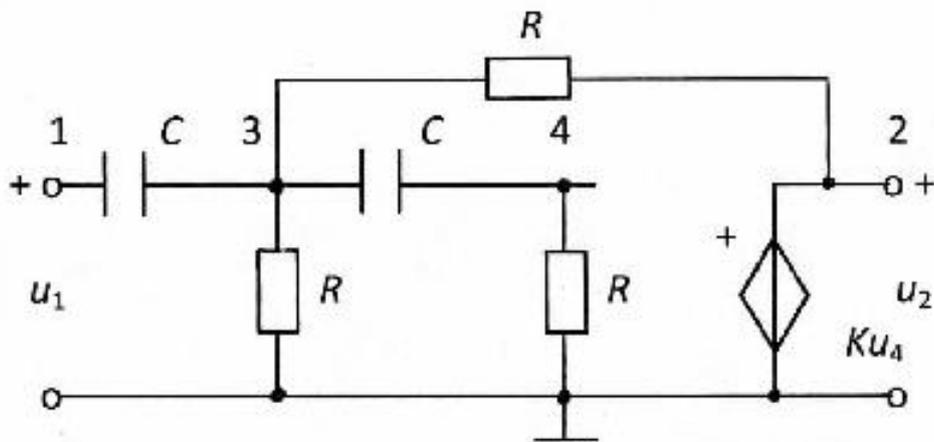


Рис. 1.3

Запишем узловые уравнения для узлов 3 и 4:

$$(2pC + \frac{2}{R})U_3(p) - pCU_1(p) - \frac{1}{R}U_2(p) - pCU_4(p) = 0,$$

$$(pC + \frac{1}{R})U_4(p) - pCU_3(p) = 0.$$

Кроме того, из схемы замещения видно, что $U_4(p) = U_2(p)/K$. Из второго уравнения выражаем $U_3(p)$ через $U_2(p)$:

$$U_3 = \frac{U_2}{K} \cdot \frac{pCR + 1}{pCR},$$

и подставляя в первое уравнение, получаем

$$(2p^2C^2R^2 + 2pCR + 2pCR + 2 - pCRK - p^2C^2R^2)U_2(p) = p^2C^2R^2KU_1(p).$$

Тогда отношение $U_2(p)/U_1(p)$ примет вид:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{Kp^2C^2R^2}{p^2C^2R^2 + pCR(4 - K) + 2},$$

а операторная передаточная функция:

$$H(p) = \frac{Kp^2}{p^2 + \frac{4 - K}{CR}p + \frac{2}{C^2R^2}}.$$

После подстановки значений параметров цепи, получаем:

$$H(p) = \frac{3,35p^2}{p^2 + 0,65 \cdot 10^4 p + 2 \cdot 10^8}.$$

Находим комплексную передаточную функцию, заменяя в $H(p)$ переменную $p = j\omega$:

$$H(j\omega) = \frac{3,35\omega^2}{2 \cdot 10^8 - \omega^2 + j0,65 \cdot 10^4 \omega}.$$

Выражение для АЧХ примет вид:

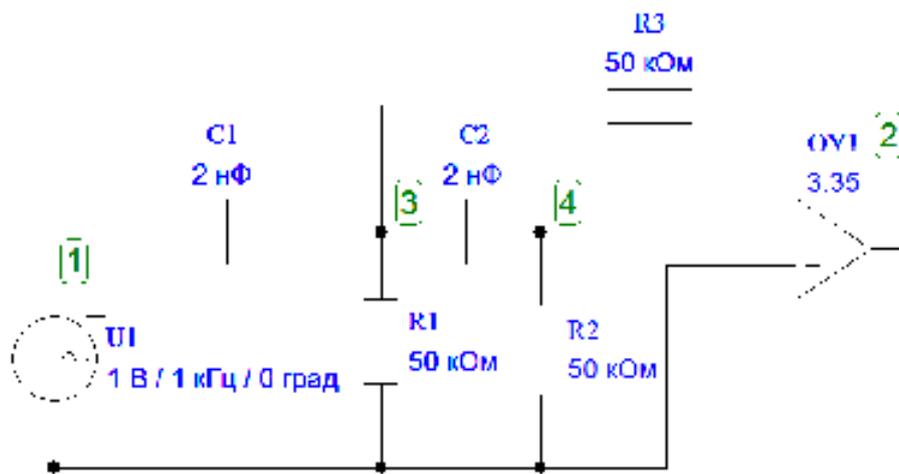
$$|H(j\omega)| = \frac{3,35\omega^2}{\sqrt{(2 \cdot 10^8 - \omega^2)^2 + (0,65 \cdot 10^4 \omega)^2}}.$$

Выражение для ФЧХ примет вид:

$$O(\omega) = \pi - \arctg \frac{0,65 \cdot 10^4 \omega}{2 \cdot 10^8 - \omega^2}.$$

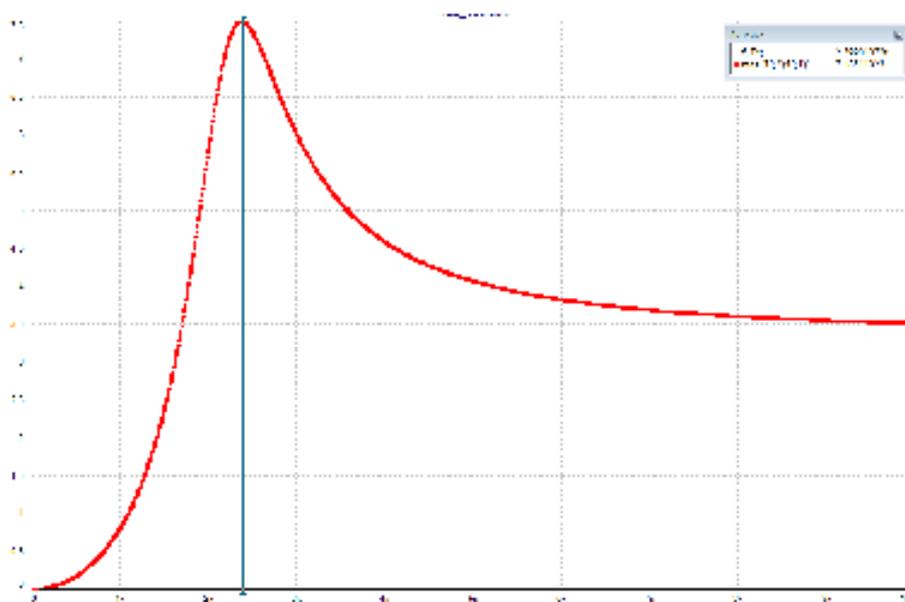
Вид графиков АЧХ и ФЧХ, рассчитанных на ПК для ARC-цепи с использованием программы *FASTMEAN* (<http://www.fastmean.ru>), представлен на рис. 1.4.

Схема ARC-цепи. Частотные характеристики.



a)

График АЧХ



b)

График ФЧХ

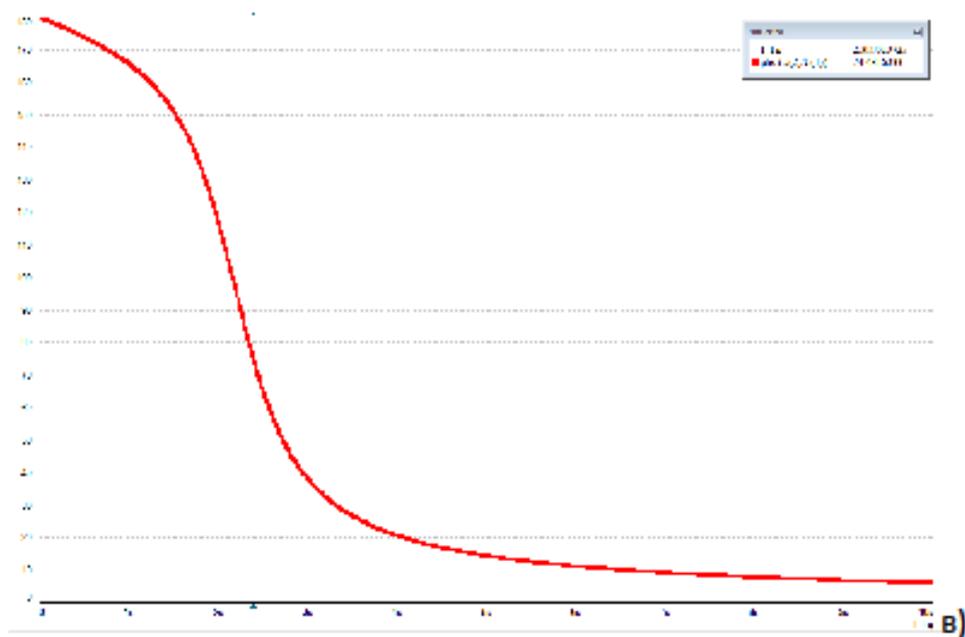


Рис.1.4

С помощью электронной линейки по графику АЧХ получено значение квазирезонансной частоты $f_{\text{рез}}=2,399$ кГц. $AЧХ(f_{\text{рез}})=7,485$. $ФЧХ(f_{\text{рез}})=74,48^\circ$. Определены граничные значения амплитудно-частотной характеристики: $|H(0)|=0$; $|H(\infty)|=3,35$.

Переходную характеристику $h(t)$ цепи находим из соответствия:

$$h(t) \div \frac{H(p)}{p},$$

$$\frac{H(p)}{p} = \frac{3,35p}{p^2 + 0,65 \cdot 10^4 p + 2 \cdot 10^9}.$$

Оригинал для получившейся дробно-рациональной функции можно найти либо с помощью таблицы соответствия [1, с. 222–224], либо пользуясь теоремой разложения [1, с. 238–241], как показано ниже.

$$\frac{H(p)}{p} = \frac{3,35p}{p^2 + 0,65 \cdot 10^4 p + 2 \cdot 10^9} = 3,35 \cdot \left(\frac{A_1}{p - p_1} + \frac{A_2}{p - p_2} \right),$$

где p_1 и p_2 – нули полинома знаменателя, которые определяются как корни уравнения

$$p^2 + 0,65 \cdot 10^4 p + 2 \cdot 10^8 = 0.$$

Рассчитаем значения p_1 и p_2 :

$$p_{1,2} = \frac{0,65 \cdot 10^4}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0,65 \cdot 10^4}{2}\right)^2 - 2 \cdot 10^8},$$

$$p_{1,2} = -0,325 \cdot 10^4 \pm j1,3764 \cdot 10^4.$$

Поскольку корни p_1 и p_2 являются комплексно-сопряжёнными числами, то и коэффициенты \dot{A}_1 и \dot{A}_2 тоже будут комплексно-сопряжёнными, т.е. достаточно рассчитать коэффициент \dot{A}_1 :

$$\dot{A}_1 = \lim_{p \rightarrow p_1} \frac{p}{(p - p_1)(p - p_2)} (p - p_2) = \frac{p_2}{p_1 - p_2},$$

$$\dot{A}_1 = \frac{-0,325 \cdot 10^4 + j1,3764 \cdot 10^4}{2j1,3764 \cdot 10^4} = 0,5 + j0,1181.$$

Запишем число \dot{A}_1 в показательной форме, найдя его модуль, а также аргумент в радианах:

$$\dot{A}_1 = 0,5138 \cdot e^{j \arctg 0,2362} = 0,5138 \cdot e^{j13,3^\circ} \quad (13,3^\circ = 0,2321 \text{ рад}).$$

Тогда переходная характеристика цепи

$$\begin{aligned} h(t) &= 3,35 \cdot 2 \operatorname{Re}[\dot{A}_1 e^{p_1 t}] = \\ &= 6,7 \operatorname{Re}[0,5138 \cdot e^{j0,2321} \cdot e^{(-0,325 \cdot 10^4 + j1,3764 \cdot 10^4)t}] = \\ &= 6,7 \cdot 0,5138 \cdot e^{-0,325 \cdot 10^4 t} \cos(1,3764 \cdot 10^4 t + 0,2321) = \\ &= 3,442 \cdot e^{-0,325 \cdot 10^4 t} \cos(1,3764 \cdot 10^4 t + 0,2321). \end{aligned}$$

Найдём граничные значения переходной характеристики

$$t = 0, \quad h(0) = 3,442 \cdot \cos 13,3^\circ = 3,442 \cdot 0,9732 = 3,35;$$

$$t = \infty, \quad h(\infty) = 0.$$

Очевидно, что связь между временными и частотными характеристиками ARC-цепи выполняется, так как равны соотношения для их граничных значений: $h(0) = H(\infty) = 3,35$; $h(\infty) - H(0) = 0$.

На рис. 1.5 представлен график $h(t)$, рассчитанный с помощью программы *FASTMEAN*.

Схема ARC-цепи. Переходный процесс.

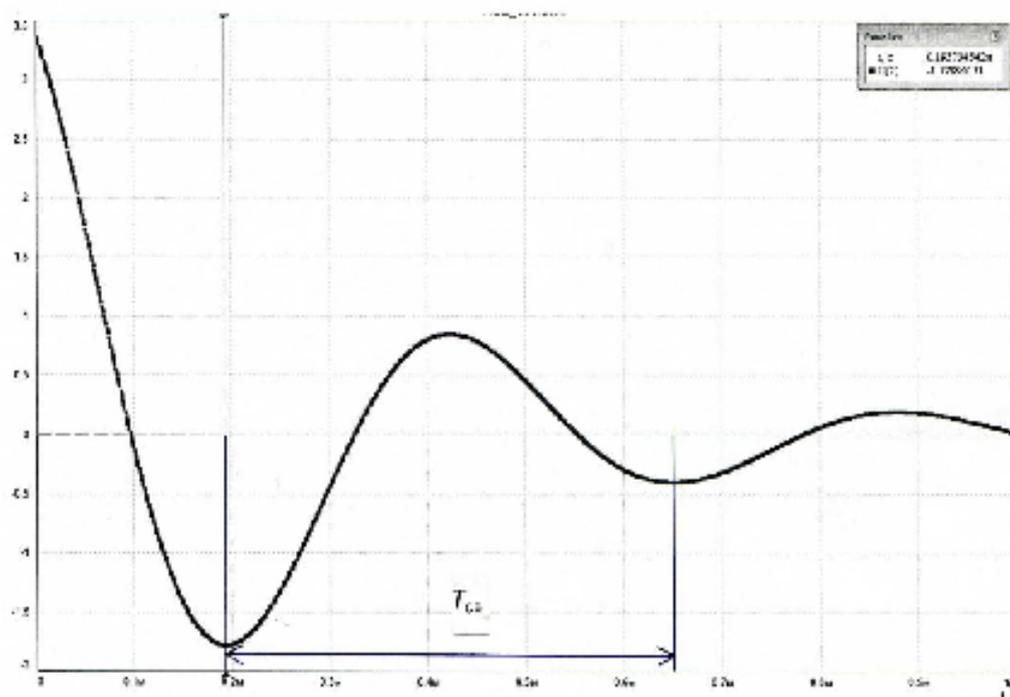
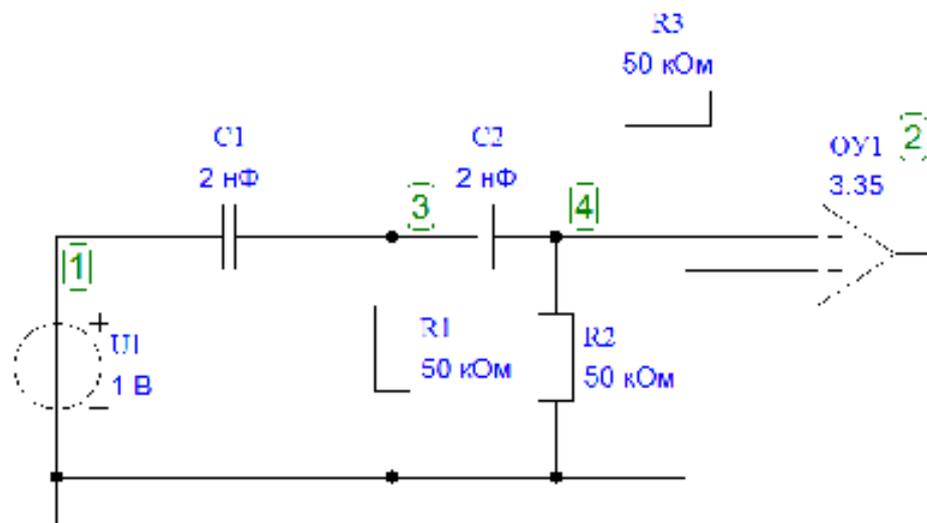


Рис.1.5

На графике $h(t)$:

$$t_1 = 0,19 \text{ мс}; \quad h_1 = |h(t_1)| = 1,78;$$

$$t_2 = t_1 + T_{\text{св}} = 0,65 \text{ мс}; \quad h_2 = |h(t_2)| = 0,40$$

Из графика $h(t)$ видно, что период свободных колебаний равен $T_{\text{св}} = t_2 - t_1 = 0,65 - 0,19 = 0,46 \text{ мс}$. Частота свободных колебаний равна $f_{\text{св}} = 1/T_{\text{св}} = 2,174 \text{ кГц}$ или $\omega_{\text{св}} = 2\pi f_{\text{св}} = 13,66 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{с}}$. Декремент затухания свободных колебаний

$$\Delta = \frac{h_1}{h_2} = \frac{1,78}{0,40} = 4,45.$$

Найдём спектральные характеристики сигналов на входе и выходе ARC-цепи при подаче на вход прямоугольного видеоимпульса напряжения (рис. 1.1, а).

Пусть $N=2$, тогда длительность импульса равна

$$t_n = 3,6 \cdot T_{\text{св}} / N = 1,8 \cdot 0,46 = 0,828 \text{ мс}.$$

Спектральная плотность амплитуд входного напряжения вычисляется по формуле [1, с.287]:

$$|U_1(j\omega)| = 2U \frac{|\sin \frac{\omega t_n}{2}|}{\omega} = Ut_n \frac{|\sin \frac{\omega t_n}{2}|}{\frac{\omega t_n}{2}}.$$

Нормированная спектральная плотность амплитуд напряжения на выходе цепи равна:

$$\frac{|U_2(j\omega)|}{Ut_n} = \frac{|U_1(j\omega)|}{Ut_n} \cdot |H(j\omega)| = \frac{|\sin \frac{\omega t_n}{2}|}{\frac{\omega t_n}{2}} \cdot |H(j\omega)|,$$

где выражение для АЧХ ARC-цепи имеет вид

$$|H(j\omega)| = \frac{3,35\omega^2}{\sqrt{(2 \cdot 10^8 - \omega^2)^2 + (0,65 \cdot 10^4 \omega)^2}}.$$

Расчёт выполним в пределах $0 < \omega < 4\omega_0$, где $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_{\text{ш}}} = 7588,1 \frac{1}{\text{с}}$ шагом $0,2\omega_0$. Частота $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 1208 \text{ Гц}$ ($0 < f < 4f_0$).

Результаты расчёта приведены в табл. 1.4.

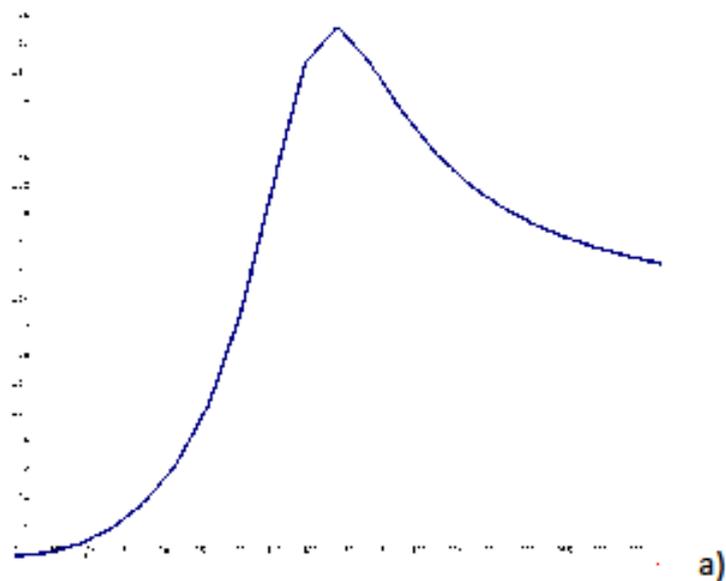
Таблица 1.4

ω	$x = \omega \cdot 10^{-3}, \frac{1}{\text{с}}$	$\frac{ U_1(j\omega) }{U_{1\text{н}}}$	$ H(j\omega) $	$\frac{ U_2(j\omega) }{U_{2\text{н}}}$
0	0	1	0	0
$0,2\omega_0$	1,52	0,935	0,039	0,036
$0,4\omega_0$	3,04	0,757	0,161	0,122
$0,6\omega_0$	4,55	0,505	0,382	0,193
$0,8\omega_0$	6,07	0,234	0,736	0,172
ω_0	7,59	0	1,280	0
$1,2\omega_0$	9,11	0,156	2,117	0,330
$1,4\omega_0$	10,62	0,216	3,401	0,735
$1,6\omega_0$	12,14	0,189	5,207	0,985
$1,8\omega_0$	13,66	0,104	6,961	0,723
$2\omega_0$	15,18	0	7,476	0
$2,2\omega_0$	16,69	0,085	6,965	0,592
$2,4\omega_0$	18,21	0,126	6,275	0,792
$2,6\omega_0$	19,73	0,116	5,704	0,664
$2,8\omega_0$	21,25	0,067	5,272	0,352
$3\omega_0$	22,77	0	4,947	0
$3,2\omega_0$	24,28	0,058	4,699	0,275
$3,4\omega_0$	25,80	0,089	4,506	0,401
$3,6\omega_0$	27,32	0,084	4,352	0,366
$3,8\omega_0$	28,84	0,049	4,229	0,208
$4\omega_0$	30,35	0	4,127	0

На рис. 1.6 показаны графики АЧХ и нормированных спектральных плотностей амплитуд на входе и выходе цепи.

Из графиков видно, что данная ARC-цепь сильно искажает спектр входного сигнала, следовательно, выходной сигнал резко изменяет свою форму.

График АЧХ $|H(j\omega)|$ цепи в интервале $0 \leq \omega \leq 4\omega_0$



Графики нормированных спектральных плотностей амплитуд на входе $\frac{|U_1(j\omega)|}{U_{10}}$ (тонкая линия) и выходе $\frac{|U_2(j\omega)|}{U_{20}}$ (толстая линия) цепи в интервале $0 \leq \omega \leq 4\omega_0$

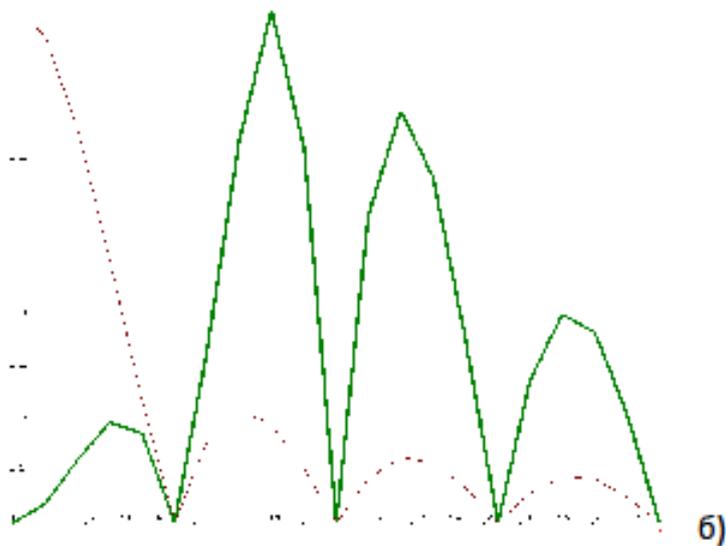


Рис. 1.6

Найдём реакцию цепи при подаче на её вход последовательности прямоугольных видеоимпульсов напряжения (см. рис. 1.1, б). Пусть период следования импульсов равен $T=0,1(M+N)\pi=0,1(3+2)\pi=0,5\pi$ мс, а

скважность $Q = \frac{T}{t_{\text{н}}} = 3$. При таком значении скважности в ряду Фурье для воздействия будут отсутствовать третья и шестая гармоники (см. табл. 1.3). Частота первой гармоники равна $\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = 4 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{с}}$. Тогда напряжение на входе цепи запишется с учётом данных табл. 1.3 в следующем виде:

$$u_1(t) = \frac{U_{01}}{2} + \sum_{k=1}^6 U_{k1} \cos(k\omega_1 t + \varphi_{k1}),$$

$$u_1(t) = 0,333 + 0,551 \cdot \cos(4 \cdot 10^3 t - 60^\circ) + 0,276 \cdot \cos(8 \cdot 10^3 t - 120^\circ) + 0,138 \cdot \cos(16 \cdot 10^3 t - 60^\circ) + 0,110 \cdot \cos(20 \cdot 10^3 t - 120^\circ), \text{ В.}$$

Реакция цепи $u_2(t)$ на периодическое воздействие $u_1(t)$ есть сумма реакций на гармонические составляющие этого воздействия:

$$u_2(t) = \frac{U_{01}}{2} H(0) + \sum_{k=1}^6 U_{k2} \cos(k\omega_1 t + \varphi_{k2}),$$

$$U_{k2} = U_{k1} \cdot |H(jk\omega_1)|; \quad \varphi_{k2} = \varphi_{k1} + \Theta(k\omega_1).$$

Выражения для АЧХ и ФЧХ получены ранее:

$$|H(j\omega)| = \frac{3,35\omega^2}{\sqrt{(2 \cdot 10^8 - \omega^2)^2 + (0,65 \cdot 10^4 \omega)^2}},$$

$$\Theta(\omega) = \pi - \arctg \frac{0,65 \cdot 10^4 \omega}{2 \cdot 10^8 - \omega^2}.$$

Вычислим значения АЧХ и ФЧХ на частотах гармоник входного напряжения.

$$\text{При } \omega = 0: \quad |H(j\omega)| = 0; \quad \Theta(\omega) = 0.$$

$$\text{При } \omega = \omega_1 = 4 \cdot 10^3, \text{ с}^{-1}:$$

$$|H(j\omega_1)| = \frac{3,35 \cdot (4 \cdot 10^3)^2}{\sqrt{(2 \cdot 10^8 - 0,16 \cdot 10^8)^2 + (0,65 \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot 10^3)^2}} = 0,288;$$

$$\Theta(\omega_1) = \pi - \arctg \frac{0,65 \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^8 - 0,16 \cdot 10^8} = 3,001 \text{ рад} = 172^\circ.$$

При $\omega = 2\omega_1 = 8 \cdot 10^3, \text{ c}^{-1}$:

$$|H(j2\omega_1)| = \frac{3,35 \cdot (8 \cdot 10^3)^2}{\sqrt{(2 \cdot 10^9 - 0,64 \cdot 10^9)^2 + (0,65 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 10^3)^2}} = 1,473;$$

$$\Theta(2\omega_1) = \pi - \arctg \frac{0,65 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^9 - 0,64 \cdot 10^9} = 2,776 \text{ рад} = 159,1^\circ.$$

При $\omega = 4\omega_1 = 16 \cdot 10^3, \text{ c}^{-1}$:

$$|H(j4\omega_1)| = \frac{3,35 \cdot (16 \cdot 10^3)^2}{\sqrt{(2 \cdot 10^9 - 2,56 \cdot 10^9)^2 + (0,65 \cdot 10^4 \cdot 16 \cdot 10^3)^2}} = 7,261;$$

$$\Theta(4\omega_1) = \pi - \arctg \frac{0,65 \cdot 10^4 \cdot 16 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^9 - 2,56 \cdot 10^9} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{0,56}{1,04} = 1,077 \text{ рад} = 61,7^\circ.$$

При $\omega = 5\omega_1 = 20 \cdot 10^3, \text{ c}^{-1}$:

$$|H(j5\omega_1)| = \frac{3,35 \cdot (20 \cdot 10^3)^2}{\sqrt{(2 \cdot 10^9 - 4 \cdot 10^9)^2 + (0,65 \cdot 10^4 \cdot 20 \cdot 10^3)^2}} = 5,618;$$

$$\Theta(5\omega_1) = \pi - \arctg \frac{0,65 \cdot 10^4 \cdot 20 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^9 - 4 \cdot 10^9} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2}{1,3} = 0,576 \text{ рад} = 33^\circ.$$

Примечание. При вычислении значений ФЧХ для четвертой и пятой гармоник использовалась формула:

$$\arctg \frac{\alpha X}{\beta - X^2} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{X^2 - \beta}{\alpha X} \quad \text{при } X^2 > \beta.$$

На выходе ARC-цепи амплитуда k -й гармоники изменяется в $|H(jk\omega_1)|$ раз, а начальная фаза – на величину $\Theta(k\omega_1)$. Тогда напряжение на выходе ARC-цепи равно:

$$\begin{aligned} u_2(t) &= 0,333 \cdot 0 + 0,551 \cdot 0,288 \cdot \cos(4 \cdot 10^3 t - 60^\circ + 172^\circ) + \\ &+ 0,276 \cdot 1,473 \cdot \cos(8 \cdot 10^3 t - 120^\circ + 159,1^\circ) + \\ &+ 0,138 \cdot 7,261 \cdot \cos(16 \cdot 10^3 t - 60^\circ + 61,7^\circ) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+0,110 \cdot 5,618 \cdot \cos(20 \cdot 10^3 t - 120^\circ + 33^\circ) - \\
 &= 0,159 \cdot \cos(4 \cdot 10^3 t + 112^\circ) + 0,407 \cdot \cos(8 \cdot 10^3 t + 39,1^\circ) + \\
 &+ 1,002 \cdot \cos(16 \cdot 10^3 t + 1,7^\circ) + 0,618 \cdot \cos(20 \cdot 10^3 t - 87^\circ), \text{ В.}
 \end{aligned}$$

На рис. 1.7 представлены графики спектров амплитуд и фаз входного (а) и выходного (б) напряжений.

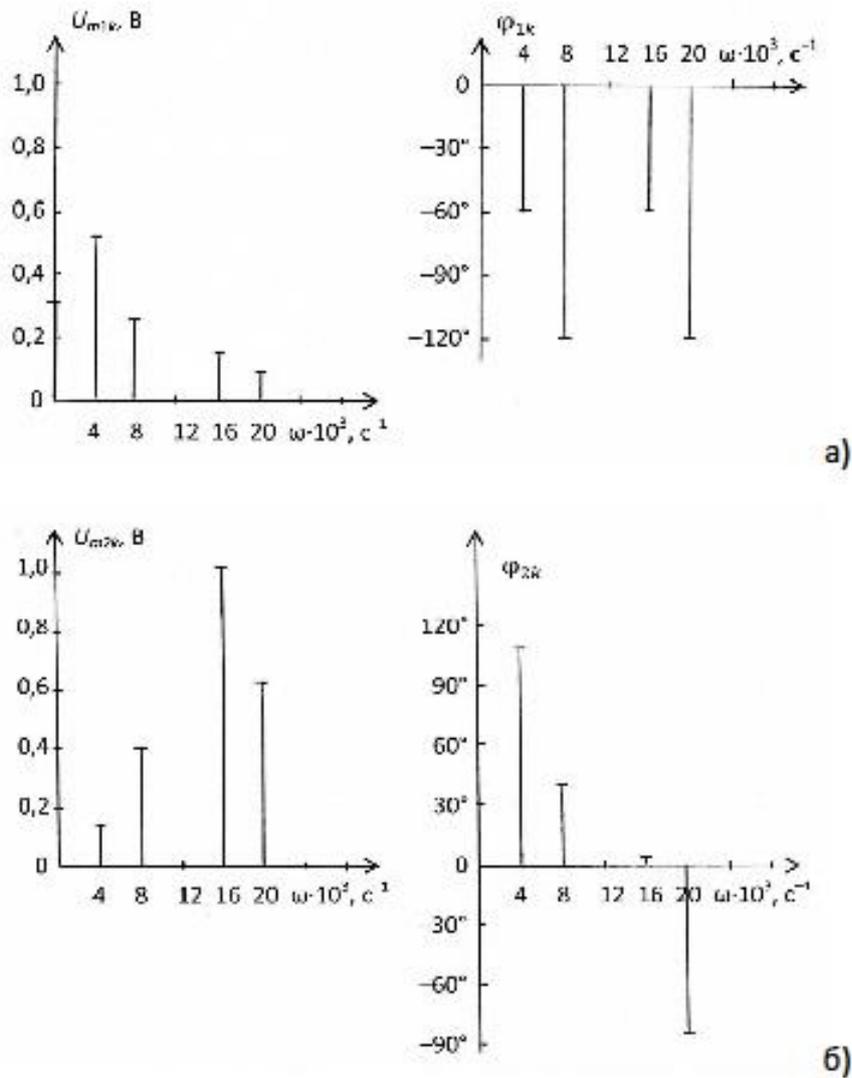


Рис. 1.7