

Лабораторная работа

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПАССИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НА СПЕКТР КОЛЕБАНИЙ НЕГАРМОНИЧЕСКОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

1. Цель работы

Изучение спектрального метода анализа электрических цепей.

2. Задание на самостоятельную подготовку к работе

2.1. Изучите методику спектрального анализа колебаний при периодическом негармоническом воздействии на электрическую цепь.

2.2. Рассчитайте спектры амплитуд и фаз колебания $u_1(t)$ на входе RC-цепи (рис. 1.1), если $u_1(t)$ представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов (рис. 1.2) и представлено рядом Фурье:

$$u_1(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \cos(k\omega_1 t + \varphi_k).$$

Параметры периодической последовательности импульсов: амплитуда импульсов $U_1=5$ В, период следования импульсов $T=70$ мкс, длительности импульсов $t_{\text{и}}=(20+n)$ мкс (n - номер варианта).

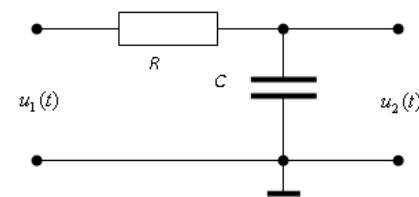


Рис. 1.1

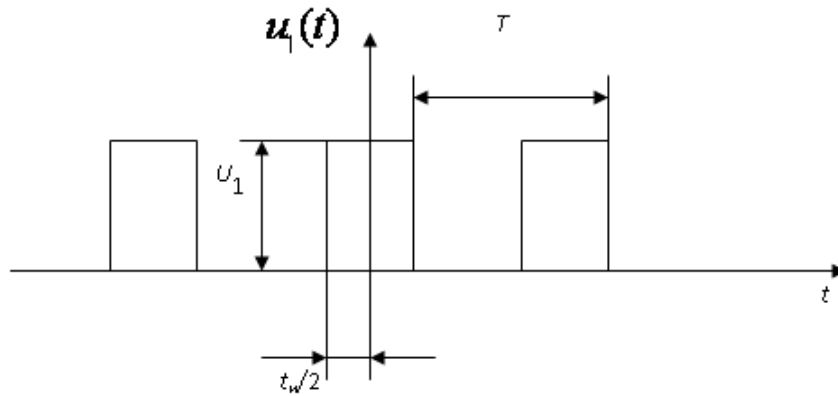


Рис.1.2.

Расчет выполните для первых десяти гармоник, полагая $\tau = RC = t_n$.

Спектр амплитуд и фаз воздействия $u_1(t)$:

$$U_0^{(1)} = \frac{U_1}{Q};$$

$$U_{mk}^{(1)} = \frac{2U_1}{k\pi} \cdot \left| \sin \frac{k\pi}{Q} \right|; \quad k = 1, 2, 3 \dots, 10$$

$$\text{скважность } Q = \frac{T}{t_n};$$

$$\varphi_{mk} = m\pi, \quad m - \text{целая часть числа } \frac{m}{n}, \quad \pi = 180^\circ.$$

Результаты расчета запишите в табл. 1.1.

2.2. Рассчитать спектры амплитуд и фаз колебания $u_2(t)$ на выходе RC-цепи (рис. 1.1), если известно, что:

$$u_2(t) = U_0 \cdot H(0) + \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} |H(jk\omega_1)| \cos(k\omega_1 t + \varphi_k + \theta(k\omega_1)).$$

Расчет выполните по формулам:

$$U_0^{(2)} = H(0) \cdot U_0^{(1)};$$

$$U_{mk}^{(2)} = |H(jk\omega_1)| \cdot U_{mk}^{(1)};$$

$$\varphi_{2k} = \varphi_{1k} + \theta(k\omega_1); \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{T}.$$

Выражение для комплексной передаточной функции RC-цепи (рис.1.1) при $\tau = t_n$ имеет вид:

$$H(jk\omega_1) = |H(jk\omega_1)| e^{j\theta(k\omega_1)} = \frac{1}{1 + j \frac{2\pi k}{T} RC}$$

Результаты расчета запишите в табл. 1.1.

3. Задание для экспериментальной работы

3.1 Выбрав значение сопротивления $R5$ на макете порядка 1500 Ом, рассчитать величину емкости

$$C = \frac{t_{и}}{R5}.$$

3.2. Соберите цепь по схеме рис. 1.3.

Вход фильтра гармоник, который представляет собой набор высокочастотных колебательных контуров, имеющих кратные резонансные частоты, подключите к выходу генератора Г5-60 (рис.1.3, клемма 1). К этой же клемме подключите вход 1-го канала осциллографа.

3.3. Переключателями на панели генератора Г5-60 установите расчетные значения T , $t_{и}$, U_1 .

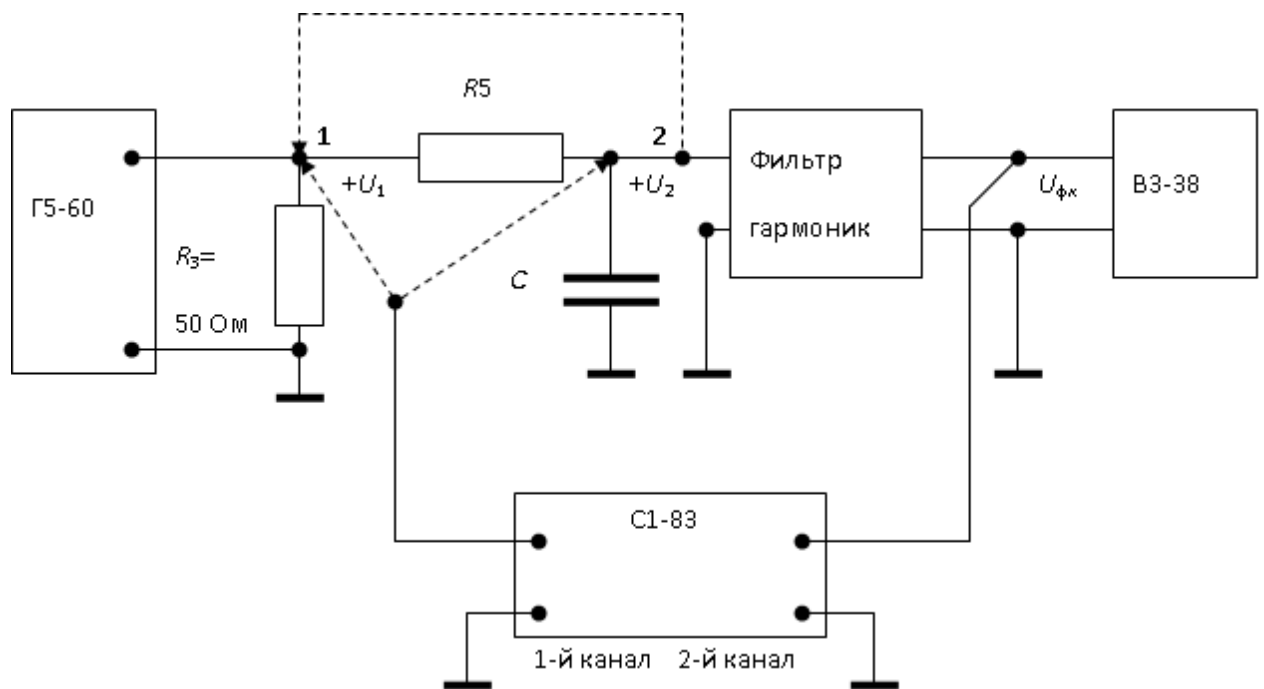


Рис. 1.3.

Таблица 1.1

Результаты предварительного расчета

k	$U_{mk}^{(1)}$, В	φ_{1k} , градусы	$ H(jk\omega_1) $	$\theta(k\omega_1)$, градусы	$U_{mk}^{(2)}$, В	φ_{2k} , градусы
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

3.4. Переключатель фильтра гармоник установить в положение 1 (положение ручки переключателя соответствует номеру выделяемой гармоники). Поворачивая ручку настройки на панели фильтра, добейтесь максимума показаний вольтметра ВЗ-38. При точной настройке на частоту первой гармоники осциллограммы колебаний $u_1(t)$ на входе и $u_{\phi 1}(t)$ на выходе фильтра гармоник должны соответствовать рис. 1.4.

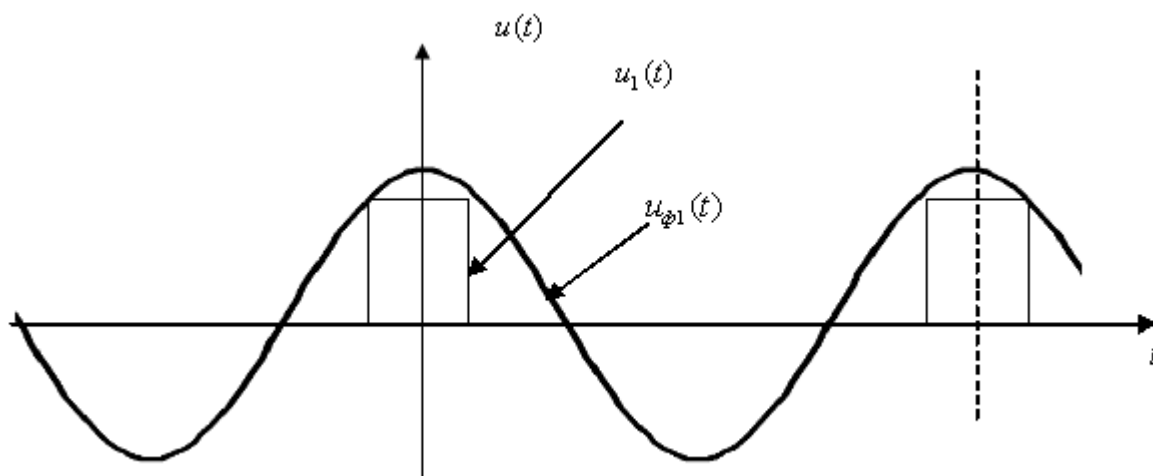


Рис. 1.4

Измерьте вольтметром действующее значение напряжения $U_{\phi 1}$ и запишите его значение в табл. 1.2.

Снимите осциллограммы $u_1(t)$ и $u_{\phi 1}^{(1)}(t)$.

3.5. Последовательно устанавливая переключатель фильтра в положение 2-5 и, настраивая фильтр по максимуму показаний вольтметра, измерьте напряжения $U_{\phi k}^{(1)}$. Результаты измерений запишите в табл.1.2. Снимите осциллограммы $u_1(t)$ и $u_{\phi k}^{(1)}(t)$.

3.6. Подключите вход фильтра гармоник к выходу RC-цепи (клемма 2 на рис.1.4). Измерьте действующие значения напряжения на выходе фильтра $U_{\phi k}^{(2)}$. Результаты измерений запишите в табл.1.2. Снимите осциллограммы $u_1(t), u_2(t)$.

3.7. По измеренным значениям $U_{\phi k}^{(1)}, U_{\phi k}^{(2)}$ вычислите амплитуды гармоник

$$U_{mk} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\phi k}}{H_{\phi}},$$

где H_{ϕ} - коэффициент передачи фильтра (его значение указано на макете).

Таблица 1.2

Результаты эксперимента

$T=$	мкс	$t_{и}=$	мкс	$Q = \frac{T}{t_{и}} =$		
	k	1	2	3	4	5
RC-цепь (рис.1.1)	$U_{\phi k}^{(1)}, \text{ В}$					
	$U_{mk}^{(1)}, \text{ В}$					
	$U_{\phi k}^{(2)}, \text{ В},$					
	$U_{mk}^{(2)}, \text{ В}$					

4. Указания к защите

4.1. Отчет должен содержать:

- схемы измерений;
- расчетные формулы;
- заполненные таблицы 1.1 и 1.2;
- графики амплитудно-частотной характеристики $|H(jk\omega_1)|$ и фазо-частотной характеристики $\theta(k\omega_1)$ исследуемой цепи, рассчитанные как функции переменной k в таблице 1.1;
- графики спектров амплитуд на входе $U_{mk}^{(1)}$ и на выходе $U_{mk}^{(2)}$ RC-цепи, рассчитанные как функции переменной k в таблице 1.1;
- графики спектров фаз на входе φ_{1k} и на выходе φ_{2k} RC-цепи, рассчитанные как функции переменной k в таблице 1.1;
- графики спектров амплитуд на входе $U_{mk}^{(1)}$ и на выходе $U_{mk}^{(2)}$ RC-цепи, полученные экспериментально (табл. 1.2).

4.2. Подготовьтесь к ответам на вопросы и решению типовых задач.

Контрольные вопросы

1. Какие колебания имеют дискретный (линейчатый) спектр?
2. Что называют спектром амплитуд и спектром фаз?
3. Какую составляющую называют первой гармоникой колебаний?
4. Чем определяется изменение амплитуд и начальных фаз гармонических составляющих колебания при прохождении его через линейную цепь?
5. Какие гармонические составляющие колебания $u_1(t)$ попадают в полосу пропускания цепи рис. 1.1?
6. Какими должны быть частотные характеристики цепи, удовлетворяющей условиям безыскаженной передачи сигналов?

Лабораторная работа
СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
РЕАКЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
с использованием программы FASTMEAN

1. Цель работы

С помощью программы FASTMEAN смоделировать процессы в нелинейной резистивной цепи при гармоническом воздействии и исследовать спектр реакции нелинейной резистивной цепи при различных режимах работы нелинейного элемента.

2. Задание на самостоятельную подготовку к работе

Получите аппроксимирующую функцию $i(u)$, аналитически представляющую заданную вольт-амперную характеристику (ВАХ) $I(U)$ в интервале изменения переменной U от $U_{\min} = -3$ В до $U_{\max} = 0$ В с допустимой погрешностью аппроксимации $\Delta_{\text{доп}} \leq 0,15 I_0$, где

$I_0 = I(U) \big|_{U=0}$. Вольт-амперная характеристика приведена в табл. 2.1.

В качестве аппроксимирующей функции используйте укороченный полином 3-ей степени:

$$i(u) = a_0 + a_1 u + a_3 u^3.$$

Для нахождения a_0, a_1, a_3 выберите три узла интерполяции u_1, u_2, u_3 и составьте систему линейных уравнений относительно a_0, a_1, a_3 и решите ее:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 u_1 + a_3 u_1^3 = i(u_1) \\ a_0 + a_1 u_2 + a_3 u_2^3 = i(u_2) \\ a_0 + a_1 u_3 + a_3 u_3^3 = i(u_3) \end{cases}$$

Расчет коэффициентов a_0, a_1, a_3 можно сделать с использованием Mathcad.

Ниже приведен пример такого расчета.

Дана вольт-амперная характеристика нелинейного резистивного элемента и произведен выбор узлов интерполяции:

$U, \text{ В}$	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0
$I, \text{ мА}$	0,16	0,31	0,52	0,93	1,51	2,43	3,54

given

$$a_0 := 1 \quad a_1 := 1 \quad a_3 := 1$$

Первый узел интерполяции

$$U_1 := -2.5 \quad i_1 := 0.31 \cdot 10^{-3}$$

Второй узел интерполяции

$$U_2 := -1.5 \quad i_2 := 0.93 \cdot 10^{-3}$$

Третий узел интерполяции

$$U_3 := -0.5 \quad i_3 := 2.43 \cdot 10^{-3}$$

$$a_0 + a_1 \cdot U_1 + a_3 \cdot U_1^3 = i_1$$

$$a_0 + a_1 \cdot U_2 + a_3 \cdot U_2^3 = i_2$$

$$a_0 + a_1 \cdot U_3 + a_3 \cdot U_3^3 = i_3$$

$$\text{find}(a_0, a_1, a_3) \rightarrow \begin{pmatrix} 0.003326 \\ 0.001817 \\ -0.000097 \end{pmatrix}$$

После нахождения коэффициентов a_0 , a_1 , a_3 проверьте точность аппроксимации $\Delta = i(u) - I(U)$, рассчитав $i(u)$ при всех значениях U . Результаты расчета запишите в табл. 2.2. Во всем интервале аппроксимации погрешность Δ не должна превосходить $\Delta_{\text{доп}} \leq 0,15 I_0$, где $I_0 = I(U) \big|_{U=0}$. Если это условие не выполняется, необходимо выбрать другие узлы интерполирования и повторить расчет.

Таблица 2.1

Варианты вольт-амперных характеристик

вариант	U , В	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0
1	I , мА	0,15	0,3	0,5	0,9	1,5	2,4	3,5
2	I , мА	0	0,01	0,02	0,1	0,3	0,8	1,1
3	I , мА	0,15	0,25	0,5	1,3	2,4	3,8	5,6
4	I , мА	0,25	0,35	0,5	0,7	1,1	1,7	2,5
5	I , мА	0	0,05	0,1	0,5	1,5	4	5,5
6	I , мА	0,5	0,7	1	2,6	4,8	7,6	12,2
7	I , мА	0,05	0,1	0,16	0,3	0,5	0,8	1,2
8	I , мА	0	0,1	0,3	0,9	1,8	3	4,5
9	I , мА	0	0,03	0,06	0,3	0,9	2,4	3,3
10	I , мА	0,1	0,2	0,5	1	1,8	2,8	4

Таблица 2.2

Результаты предварительного расчета

U , В	-3	-2,5	-2,0	-1,5	-1,0	-0,5	0
$I(U)$, мА (задано)							
$i(u)$, мА							
$\Delta = i(u) - I(U)$, мА							

2.2. Постройте методом трех плоскостей графики тока $i(t)$ при разных параметрах воздействия. На графиках покажите два периода подведенного к нелинейному элементу гармонического колебания

$u(t) = U_0 + U_m \cos(\omega t + \varphi)$ и реакции $i(t)$ на это воздействие.

2.3. Рассчитайте спектры амплитуд I_{mk} тока $i(t)$ при разных параметрах воздействия. Параметры воздействия приведены в табл. 2.3.

Для расчета спектра амплитуд тока используйте следующие формулы:

$$i(t) = I_0^1 + I_{m1} \cos(\omega t + \varphi) + I_{m2} \cos 2(\omega t + \varphi) + \dots + I_{mn} \cos n(\omega t + \varphi),$$
 где

$$I_0^1 = a_0 + a_1 U_0 + a_2 U_0^2 + a_3 U_0^3 + \frac{1}{2} a_2 U_m^2 + \frac{2}{3} a_3 U_0 U_m^2 + a_4 U_0^4 + 3a_4 U_0^2 U_m^2 + \dots$$

$$I_{m1} = a_1 U_m + 2a_2 U_0 U_m$$

$$+ 3a_3 U_0^2 U_m + \frac{3}{4} a_3 U_m^3 + 4a_4 U_0^3 U_m + 3a_4 U_m^3 U_0 + \dots$$

$$I_{m2} = \frac{1}{2} a_2 U_m^2 + \frac{3}{2} a_3 U_0 U_m^2 + 3a_4 U_0^2 U_m^2 + \frac{1}{2} a_4 U_m^4 + \dots$$

$$I_{m3} = \frac{1}{4} a_3 U_m^3 + a_4 U_0 U_m^3 + \dots$$

Для расчета спектра амплитуд воспользуйтесь значениями a_0 , a_1 , a_3 , полученными в п. 2.1.

2.4. Рассчитайте коэффициенты нелинейных искажений (коэффициент гармоник) K_Γ при разных параметрах воздействия:

$$K_\Gamma = \frac{\sqrt{I_{m2}^2 + I_{m3}^2 + \dots}}{I_{m1}}$$

Таблица 2.3.

Параметры воздействия $u(t) = U_0 + U_m \cos(\omega t + \varphi)$

1	$U_0 = -1.5 \text{ В}$ $U_m = 1.5 \text{ В}$ $\omega = 2\pi \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ $\varphi = 0$
2	$U_0 = -1.5 \text{ В}$ $U_m = 0,15 \text{ В}$ $\omega = 2\pi \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ $\varphi = 0$

2.5. Сделайте выводы о режимах работы нелинейного резистивного элемента при разных параметрах воздействия.

2.6. Постройте спектры амплитуд воздействия и реакции при двух значениях параметров воздействия.

3. Задание для работы в компьютерном классе

3.1. Загрузите программу FASTMEAN. Описание работы с программой приведено в приложении методических указаний.

3.2. Постройте на экране дисплея схему нелинейной резистивной цепи, показанную на рис. 2.1 ($R_1 = 50 \text{ Ом}$). Выберите нелинейный резистор NLR1 и введите заданную в табл.2.1 вольт-амперную характеристику, соответствующую своему номеру варианта.

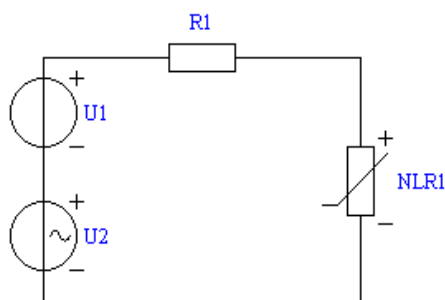


Рис. 2.1

3.3. Смоделируете первое воздействие (табл. 2.3).

Задайте параметры источника U_1 :

«Тип источника» – Постоянный

«Напряжение (U_0)» - U_0 (табл. 2.3)

«Задержка включения ($delay$)» – 0

«Длительность фронта (dfr)» – 1 н

Задайте параметры источника U_2 :

«Тип источника» – Гармонический

«Амплитуда (U_0)» - U_m (табл. 2.3)

«Частота (f)» - $\frac{\omega}{2\pi}$ (табл. 2.3)

«Начальная фаза (ϕ_0)» – ϕ (табл. 2.3)

«Задержка включения ($Delay$)» – 0

3.4. Выберите в меню «Анализ» → «Переходный процесс». Выведите на дисплее графики входного напряжения и тока, спектр амплитуд тока. Для этого таблицу анализа заполните следующим образом:

«Начальное время» - 0

«Конечное время» -40 мкс

«Число точек» -1000

«Погрешность (EPS)» – 1м

«Тип графика» – непрерывный

График	Выражение по оси X	Выражение по оси Y
1	t	$U(k)$, где k - номер узла подключения источника входного напряжения
2	t	$I(NLR1)$ - ток через нелинейный резистивный элемент
3	f	$MAG(FFT(I(NLR1)))$ - спектр амплитуд тока через нелинейный резистивный элемент

Поставьте отметку в поле «Установки FFT», далее нажмите кнопку «Установки FFT». В появившемся окне выберите

«Начальное время» - 0

«Конечное время» - 40 мкс

«Число гармоник» - 100

«Число показанных гармоник» - 10

«Тип графика» - дискретный.

3.5. Сохраните графики входного напряжения и тока. При помощи линейки определите амплитуды гармоник тока. Результаты запишите в табл. 2.4.

3.6. Смоделируйте второе воздействие из табл. 2.3 и повторите пп.2.2-2.5.

Таблица 2.4

Сводная таблица результатов

I_{mk} мА	воздействие 1		воздействие 2	
	предварительный расчет	результаты моделирования	предварительный расчет	результаты моделирования
I_o^1				
I_{m1}				
I_{m2}				
I_{m3}				
K_{Γ}				

4. Указания к защите

4.1. Оформите отчет по лабораторной работе. Отчет должен содержать:

- расчет коэффициентов аппроксимирующей функции методом интерполирования;
- расчет погрешности аппроксимации $\Delta = i(u) - I(U)$;
- графики тока $i(t)$ при разных параметрах воздействия, выполненные методом трех плоскостей;
- графики спектра амплитуд I_{mk} тока $i(t)$ при разных параметрах воздействия;
- значения коэффициента нелинейных искажений (коэффициент гармоник) K_{Γ} при разных параметрах воздействия;
- графики тока $i(t)$ при разных параметрах воздействия, рассчитанные с помощью программы FASTMEAN;
- графики спектра амплитуд I_{mk} тока $i(t)$ при разных параметрах воздействия, рассчитанные с помощью программы FASTMEAN;
- заполненную таблицу 2.4.

4.2. Подготовьтесь к ответам на вопросы и решению типовых задач.

Контрольные вопросы

1. Какие элементы называются нелинейными?
2. Какие зависимости используются в качестве характеристик нелинейных элементов?
3. В чем состоит задача аппроксимации?
4. Какие критерии близости применяются при решении задачи аппроксимации?
5. Какие функции используются для аппроксимации характеристик нелинейных резистивных элементов?
6. Какими способами можно уменьшить погрешность при полиномиальной аппроксимации?
7. Какие методы используются для нахождения варьируемых параметров аппроксимируемой функции?
8. В чем заключается метод трех плоскостей?
9. Как изменяется спектр колебаний при прохождении гармонического колебания через нелинейную резистивную цепь?
10. Какой спектр имеет реакция нелинейного резистивного элемента на гармоническое воздействие при полиномиальной вольт-амперной характеристике?
11. Какой режим в цепи с нелинейным резистивным элементом называется режимом малых колебаний?
12. Какой режим в цепи с нелинейным резистивным элементом называется режимом больших колебаний?
13. Как отличаются спектры амплитуд тока в режиме больших и малых колебаний?