

Лабораторная работа № 22
ПРОХОЖДЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНУЮ ЦЕПЬ

Составители: Б.Н.Молчаев, ст. преподаватель
В.А.Корзинкин, доцент

Издание утверждено советом ОТФ-2, протокол № 5 от 28.04.98 г.

Рецензент В.Н.Шакин, доцент

1. Цель работы

Цель работы состоит в исследовании формы и спектра тока через нелинейный резистивный элемент при гармоническом входном напряжении в режиме с отсечкой тока.

2. Домашнее задание

2.1. Изучить методы гармонического анализа отклика нелинейной безынерционной цепи на гармоническое воздействие (метод кратных дуг, метод угла отсечки, графоаналитические методы трех и пяти ординат) по конспекту лекций, рекомендуемой литературе и приложению к настоящей работе.

2.2. Построить вольт-амперную характеристику (ВАХ) нелинейного элемента по данным, приведенным в табл.1 (допускается использовать экспериментальные данные, полученные при выполнении лабораторной работы №1). Аппроксимировать ВАХ отрезками двух прямых (одна из которых соответствует уравнению $i(u)=0$), применяя для аппроксимации наклонного участка метод наименьших квадратов (см. Приложение к работе). Определить параметры аппроксимации: *крутизну* S (угловой коэффициент) аппроксимирующей прямой и *напряжение отсечки* U_0 .

2.3. Выбрать для последующих расчетов значение *амплитуды* входного сигнала $U_m = U_0/2$. Рассчитать значения *напряжения смещения* E_s , соответствующие углам *отсечки* θ , равным $0, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ и 180° .

2.4. Рассчитать значения *амплитуд токов* первой I_1 , второй I_2 , третьей I_3 гармоник и постоянной составляющей I_0 при заданных углах отсечки, используя *функции Берга* (см. Приложение). Построить на одном графике зависимости указанных величин от напряжения смещения. Значения амплитуд токов рекомендуется брать *по модулю*.

2.5. Рассчитать зависимости тех же величин (I_0, I_1, I_2, I_3) от напряжения смещения *методом пяти ординат* и построить соответствующие графики.

Таблица 1

Вольтамперные характеристики нелинейных элементов

№ стэнды	Ток i (мА) при напряжении смещения E (В)											
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	
1	3.0	2.0	1.4	1.1	0.5	0.2	0.1	0	0	0	0	
2	4.8	3.4	2.4	1.7	1.1	0.5	0.2	0	0	0	0	
3	1.5	0.9	0.5	0.25	0	0	0	0	0	0	0	
4	4.4	3.5	2.6	1.9	1.2	0.8	0.5	0.25	0	0	0	
5	4.0	3.0	2.1	1.0	0.5	0.2	0	0	0	0	0	
6	4.1	3.0	2.2	1.6	1.0	0.5	0.2	0	0	0	0	
7	3.4	2.8	2.0	1.4	0.7	0.3	0.1	0	0	0	0	
8	4.8	4.0	3.2	2.6	1.9	1.4	1.1	0.7	0.4	0.2	0	
9	3.8	3.0	2.1	1.3	0.9	0.5	0.2	0	0	0	0	
10	4.7	3.7	2.7	1.8	1.2	0.6	0.2	0.1	0	0	0	
11	4.1	2.8	1.9	1.1	0.6	0.2	0	0	0	0	0	
12	4.2	3.0	2.4	1.6	1.0	0.6	0.25	0	0	0	0	

3. Описание лабораторного макета

В работе используется макет №1 универсального лабораторного стенда. Роль нелинейного элемента выполняет полевой транзистор, включенный в схему резонансного усилителя (рис. 1). Частота резонанса колебательного контура в выходной цепи транзистора лежит в районе 15 КГц и не может перестраиваться в процессе работы. Для настройки контура в резонанс следует подстраивать частоту входного сигнала, подаваемого на вход макета от внешнего генератора сигналов. При этом для настройки контура в резонанс со второй, третьей и т.д. гармониками входного сигнала следует уменьшать частоту входного сигнала по сравнению с резонансной в 2, 3 и т.д. раза соответственно.

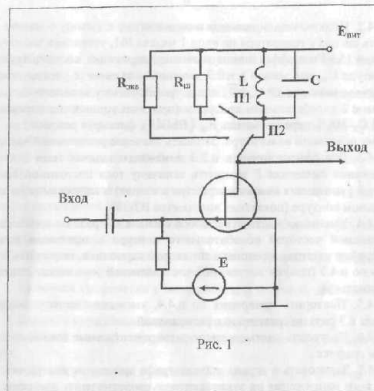


Рис. 1

Добротность контура может изменяться путем включения - выключения шунтирующего сопротивления. Для наблюдения формы выходного тока транзистора предусмотрена возможность переключения усилителя из резонансного в резистивный режим путем отключения контура с одновременным включением вместо него эквивалентного сопротивления. Другие части схемы макета №1 в работе не используются.

4. Лабораторное задание

4.1. Включить первый макет и питание универсального лабораторного стенда, включить внешние приборы: генератор низкочастотных сигналов (ГЗ-33 или аналогичный), вольтметр (ВЗ-38) и осциллограф. Установить напряжение смещения на приборе в стенде +1В.

4.2. Подключить вольтметр и осциллограф к выходу 6 макета №1. Подать сигнал с генератора на вход 1 макета №1, установив частоту колебаний 15 КГц и эффективное значение напряжения, соответствующее амплитуде U_m , найденной в п.2.3 домашнего задания (с учетом, что эффективное значение $U = U_m/\sqrt{2}$) и подстроить частоту входного сигнала в резонанс с колебательным контуром (при этом установить: переключатель LC - ВКЛ, переключатель R_m - ВЫКЛ), фиксируя резонанс по максимуму показаний вольтметра. Записать значение резонансной частоты.

4.3. Для рассчитанных в п.2.3 домашнего задания семи значений напряжения смещения E измерить величину тока постоянной составляющей (показания микроамперметра в степе) и напряжения на колебательном контуре (показания вольтметра В3-38).

4.4. Уменьшив частоту входного сигнала в 2 раза по сравнению с резонансной частотой колебательного контура и произведя точную подстройку частоты в резонанс по второй гармонике, повторить измерения по п.4.3 (график постоянной составляющей тока может повторно не сниматься).

4.5. Повторить измерения по п.4.4, уменьшив частоту входного сигнала в 3 раза по сравнению с резонансной.

4.6. Построить снятые четыре экспериментальные зависимости на одном графике.

4.7. Зарисовать с экрана осциллографа временные диаграммы импульсного напряжения на эквивалентном сопротивлении для семи рассчитанных ранее напряжений смещения (при этом установить: переключатель LC - в положение ВЫКЛ, переключатель R - в положение ВКЛ). Рассчитать по зарисованным осциллограммам экспериментальные значения напряжений отсечки.

5. Содержание отчета

При составлении отчета следует руководствоваться общими требованиями к отчету по лабораторной работе (см. описание лабораторной работы №1). Отчет должен содержать структурно-принципиальную схему измерительной установки, результаты расчетов и графики домашнего задания, экспериментальные результаты в виде графиков и осциллограмм, выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Критерии выбора аппроксимирующей функции при аппроксимации характеристик нелинейных элементов.
2. Типовые режимы работы нелинейных элементов и способы аппроксимации характеристик в этих режимах.
3. Пояснить смысл и методику определения параметров кусочно-линейной аппроксимации.
4. В чем состоит принципиальное отличие нелинейной цепи от линейной?
5. В чем выражается различие спектрального состава отклика линейной и нелинейной цепи?
6. Гармонический анализ отклика нелинейной цепи в режиме без отсечки (метод кратных дуг).
7. Спектральный состав отклика нелинейной цепи при бигармоническом воздействии (режим без отсечки).
8. Пояснить графически режим работы с отсечкой, дать определение параметров режима.
9. Вывести выражение для определения угла отсечки.
10. Общий метод спектрального анализа отклика в режиме с отсечкой.
11. Дать определение функциям Берга $\alpha(\theta)$ и $\gamma(\theta)$. В каких режимах применяют те или другие функции?
12. Изобразить зависимость угла отсечки от напряжения смещения при постоянной амплитуде входного сигнала.
13. Изобразить зависимость угла отсечки от амплитуды сигнала при трех различных положениях рабочей точки ($E < U_0$, $E = U_0$, $E > U_0$).
14. Как осуществить умножение частоты в исследуемой схеме в заданное число раз?
15. Дать определение оптимального угла отсечки в режимах с постоянной амплитудой импульса тока и с постоянной амплитудой входного сигнала.
16. Графоаналитические методы гармонического анализа.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Аппроксимация массы точек линейной функцией методом наименьших квадратов (линейная регрессия)

Параметры a и b линейной функциональной связи $y = ax + b$ между массивами чисел $\{y_i\}, \{x_i\}, i = 1, 2, \dots, N$ могут быть рассчитаны методом наименьших квадратов, минимизирующим среднеквадратическую погрешность

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - (ax + b)]^2.$$

Дифференцируя (1) раздельно по a и b и приравнивая производные к нулю, получим

$$\sigma^2 = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}.$$

При вычислении параметров наклонного участка аппроксимационной прямой в п. 2.2. допущено следующее: значения следует отбрасывать месячные, включая нуль (первое) значение с нулевой ординатой. Уравнение наклонного участка ВАХ удобно записывать в виде

$$i = S(u - U_0), \text{ где } S = a; U_0 = b/a. \text{ Для приведенных в табл. 1 ВАХ } S < 0.$$

2. Метод угла отсечки

Метод угла отсечки используется при гармоническом анализе отклика нелинейной цепи с кусочно-линейной аппроксимацией ВАХ нелинейного элемента, как правило, присоединенной в режиме большого сигнала. Теоретически задача сводится к разложению в ряд Фурье периодической последовательности импульсов косинусоидальной формы. Прямая такая последовательность является амплитудой импульсов $I_{\text{кн}}$ и их длительности, которую в безразмерном времени ωt обозначают 2θ , а параметр θ называют углом отсечки. Очевидно, что θ может принимать значения от 0 (нет импульсов тока) до π (нет отсечки, ток становится гармоническим). Здесь ω_0 - угловая частота входного гармонического сигнала

$$u(\omega t) = E + U_0 \cos \omega t.$$

(3)

Аппроксимирющая функция имеет два параметра - крутизну S и точку излома, называемую напряжением отсечки U_0 . Обычно в литературе рассматривают правые вольт-амперные характеристики, соответствующие излому, называемую функцией

выраженно

$$i(u) = S(u - U_0), \quad u > U_0; \quad (S > 0)$$

Для таких характеристик справедливо соотношение, вытекающее из (3) при подстановке в него (4) - U_0

$$\cos \theta = (U_0 - E) / U_m.$$

В рассматриваемом случае все вольт-амперные характеристики являются левыми, т.е. соответствующим выражению

$$i(u) = S(u - U_0), \quad u < U_0.$$

В этом случае очевидно, что импульсы тока будут противостоить входному напряжению, а уравнение для угла отсечки примет вид

$$\cos \theta = -(U_0 - E) / U_m.$$

В спектре периодической последовательности импульсов косинусоидальной формы теоретически содержится бесконечное число высших гармоник частоты входного сигнала и постоянная составляющая. Значения спектральных компонент определяются выражением

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t.$$

принимем $I_0 = I_m$ при $k > 0, I_0 = a_0/2$.

Режим отсечки существует в двух равновесных: режим с постоянной амплитудой входного напряжения U_m (изменяется напряжение смещения, а вместе с ним - амплитуда и длительность импульсов тока) и режим с постоянной амплитудой импульсов тока $I_{\text{кн}}$ (для поддержания такого режима надо периодически менять смещение и амплитуду входного сигнала). Первый режим характерен для амплитудных модуляторов и детекторов, второй - для умножителей частоты и мощных усилителей гармонических колебаний. Для обоих режимов выражения (8) выписаны в нормированном виде и известны под названием функций Берга. Для резки с постоянной амплитудой входного напряжения U_m используются семейство функций $\gamma_k(\theta)$, для резки с постоянной амплитудой импульсов тока $I_{\text{кн}}$ - семейство функций $\alpha_k(\theta)$. Эти функции взаимосвязаны соотношением

$$\alpha_k(\theta) = \gamma_k(\theta) / (1 - \cos \theta).$$

(9)

При известных параметрах U_m , S и θ спектральные компоненты тока определяются как

$$I_k = S U_m \gamma_k(\theta), \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

При известных параметрах I_{max} и θ спектральные компоненты тока определяются как

$$I_k = I_{max} \alpha_k(\theta), \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

Несложные расчеты позволяют получить аналитические выражения для функций Берга

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \frac{1}{\pi} (\sin \theta - \theta \cos \theta); \quad \gamma_1 = \frac{1}{\pi} (\theta - \sin \theta \cos \theta); \\ \gamma_k &= \frac{2}{\pi} \frac{(\sin k\theta \cos \theta - k\theta \cos k\theta \sin \theta)}{k(k^2 - 1)}, \quad k=2, 3, 4, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

однако удобнее пользоваться их графиками (рис. 3). Графики функций Берга имеют максимумы при оптимальных углах отсечки

$$\theta_{k(\text{опт } \gamma)} = \pi/k; \quad \theta_{k(\text{опт } \alpha)} = 2\pi/(3k).$$

3. Графоаналитические методы

В инженерной практике для приближенного гармонического анализа широко используются формулы трех и пяти ординат, не требующие предварительной аппроксимации характеристики нелинейного элемента. Пусть на вход нелинейной цепи действует гармоническое напряжение (рис. 2). Определим пять значений тока i_{max} , i_1 , i_0 , i_2 , i_{min} (пять ординат) для пяти последовательных моментов времени $\omega t = 0, \pi/3, \pi/2, 2\pi/3$ и π . Эти ординаты позволяют рассчитать постоянную составляющую I_0 и амплитуды четырех гармоник тока

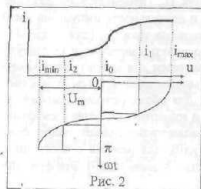
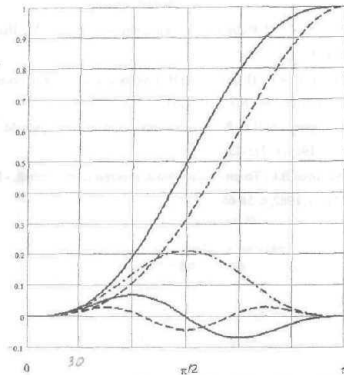


Рис. 2

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{6} (i_{max} + i_{min} + 2i_1 + 2i_2); \\ I_1 &= \frac{1}{3} (i_{max} - i_{min} + i_1 - i_2); \\ I_2 &= \frac{1}{4} (i_{max} + i_{min} - 2i_1); \\ I_3 &= \frac{1}{6} (i_{max} - i_{min} - 2i_1 + 2i_2); \\ I_4 &= \frac{1}{12} (i_{max} + i_{min} - 4(i_1 + 2i_2) + 6i_0). \end{aligned} \quad (13)$$

Рис. 3. Функции Берга $\gamma_0(\theta)$, $\gamma_1(\theta)$, $\gamma_2(\theta)$, $\gamma_3(\theta)$, $\gamma_4(\theta)$

Формулы трех ординат позволяют приближенно определить постоянную составляющую и амплитуды двух гармоник тока. Ординаты i_{max} , i_0 , i_{min} определяются для трех последовательных моментов времени, соответствующих 0 , $\pi/2$ и π .

$$I_0 = \frac{1}{4} (i_{max} + i_{min} + 2i_0);$$

$$I_1 = \frac{1}{2} (i_{max} - i_{min});$$

$$I_2 = \frac{1}{4} (i_{max} + i_{min} - 2i_0).$$

(14)

Литература

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высш. шк., 1988, с. 38-42.
2. Назаров М.В., Прохоров Ю.Н. Теория электрической связи. Учебное пособие. - М.: МТУСИ, 1991.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Радио и связь, 1986, с. 225-238.
4. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1982, с. 58-68.

Лабораторная работа № 22

ПРОХОЖДЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНУЮ ЦЕПЬ

Редактор Т.В.Ракова

Подписано в печать 28.03.98г. Формат 60х84/16. Печать
офсетная. Объем 0,8 усл.п.л. Тираж 500 экз. Изд. № 53. Заказ 253.

ЗАО "Информсвязьиздат". Москва, ул. Авиамоторная, 8.