

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра теоретических основ радиотехники

В.М.Дашенков

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СИГНАЛОВ

Методическое пособие

для практических и лабораторных занятий по дисциплинам
«Радиотехнические цепи и сигналы», «Основы радиоэлектроники»,
«Основы радиоэлектроники и радиоэлектронные устройства»

Минск 2000

Дашенков В.М. Исследование нелинейных преобразований сигналов: Метод. пособие для лабораторных и практических занятий по дисциплинам «Радиотехнические цепи и сигналы», «Основы радиоэлектроники», «Основы радиоэлектроники и радиоэлектронные устройства». – Мн.: БГУИР. 2000. – 27 с.

С использованием специально разработанной ЭВМ программы в работе изучаются ограничение мгновенных значений, амплитудное ограничение, резонансное усиление сигналов, умножение и преобразование частоты. Производится исследование различных режимов работы, измеряются основные параметры и характеристики преобразованных сигналов.

Ил. 12, табл. 2, список лит. – 5 назв.

Содержание

1. Цель работы
 2. Краткие теоретические сведения
 - 2.1. Метод угла отсечки
 - 2.2. Режим «слабых» сигналов. Степенная аппроксимация ВАХ
 - 2.3. Нелинейные функциональные преобразования
 - 2.3.1. Ограничение
 - 2.3.2. Нелинейное резонансное усиление колебаний высокой частоты
 - 2.3.3. Умножение частоты
 - 2.3.4. Преобразование частоты
 3. Краткая информация о программе «NT»
 4. Порядок выполнения работы
 - 4.1. Исследование ВАХ
 - 4.1.1. Кусочно-линейная ВАХ.
 - 4.1.2. Криволинейная ВАХ.
 - 4.1.3. Формирование ВАХ.
 - 4.2. Ограничение
 - 4.2.1. Одностороннее и двухстороннее ограничения мгновенных значений гармонического сигнала.
 - 4.2.2. Амплитудное ограничение.
 - 4.3. Нелинейное резонансное усиление
 - 4.4. Умножение частоты
 - 4.5. Преобразование частоты
 5. Контрольные вопросы
- Литература

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СИГНАЛОВ

1. Цель работы

Изучение нелинейных функциональных преобразований сигналов путем их моделирования на ЭВМ. Исследуются ограничения мгновенных значений, амплитудное ограничение, резонансное усиление, умножение и преобразование частоты.

2. Краткие теоретические сведения

Нелинейными называются такие преобразования, при которых изменяется форма сигнала и происходит обогащение его спектра новыми частотными компонентами.^{*)}

Нелинейные преобразования (НП) широко используются в радиотехнике. Они лежат в основе выпрямления, детектирования, модуляции, умножения частоты и других функциональных преобразований сигналов. Возникают НП в электрических цепях, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями и содержащими резистивные и реактивные элементы с нелинейными характеристиками. Появление новых частотных составляющих и изменения формы сигнала в одних случаях является нежелательным, и тогда говорят о *нелинейных искажениях*. В других случаях появление новых частотных компонент и есть смысл НП, и тогда для их выделения на выходе ставится частотный фильтр (рис. 1). В некоторых случаях фильтр может отсутствовать. Цепь, предназначенная для определенного вида преобразований сигнала, называется **функциональным узлом**.

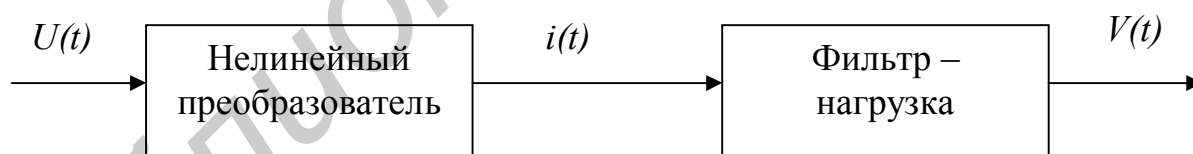


Рис. 1. Нелинейный функциональный узел

В дальнейшем будем рассматривать НП в цепях, содержащих резистивные нелинейные элементы (резисторы, диоды, транзисторы, лампы и т.п.), описываемые нелинейной проходной ВАХ

*) При **линейных** преобразованиях в спектре сигнала не появляются новые составляющие, и изменения формы сигнала, если они происходят, связаны с изменениями амплитуд и фаз уже имеющихся компонент спектра.

$$i = f(U). \quad (1)$$

Математический анализ прохождения сигнала произвольной формы $U(t)$ через нелинейную цепь представляет сложную задачу, т.к. к нелинейным цепям не применим принцип суперпозиции. Поэтому выходной сигнал не есть сумма сигналов от отдельных элементарных воздействий, на которые можно было бы разложить входной сигнал.

Рассмотрим периодический с периодом T (частота повторения $\omega_1 = 2\pi/T$) входной сигнал $U(t) = U(t+T)$. Согласно (1) ток также будет периодической функцией $i(t) = i(t+T)$ и может быть представлен рядом Фурье

$$i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} I_k \cos \omega_k t \quad (2)$$

где $\omega_k = k \cdot \omega_1$ – частота и I_k – амплитуда гармонических составляющих

$$I_k = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cos \omega_k t dt \quad (3)$$

Для нахождения тока $i(t)$ прежде всего нужно знать вид ВАХ (1), определяемый изначально из эксперимента. При проведении расчетов функция $f(U)$ должна быть задана аналитически, т.е. тем или иным способом аппроксимирована. Выбор аппроксимирующих функций делается из тех соображений, чтобы с одной стороны была обеспечена необходимая точность, а с другой – чтобы расчеты не были слишком громоздкими. Наиболее общим методом является представление характеристики $i = f(U)$ степенным полиномом

$$i = \sum_{k=0}^n a_k U^k, \quad (4)$$

порядок которого зависит от вида характеристики и требуемой точности аппроксимации.

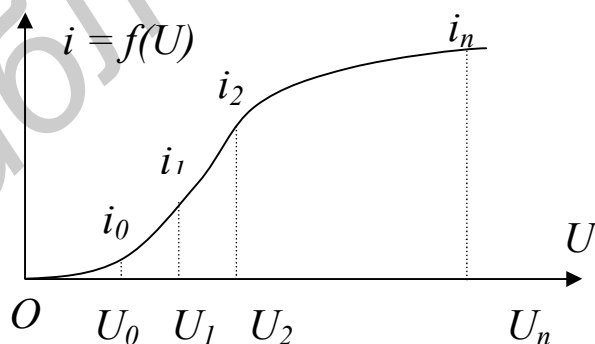


Рис. 2. Узловые точки на ВАХ

Коэффициенты полинома a_k находят, пользуясь разными методами, например, методом наименьших квадратов или методом узловой аппроксимации. В по-

следнем случае на рабочем участке ВАХ выделяется $n+1$ точек - узлов $(U_0, i_0), (U_1, i_1), \dots (U_n, i_n)$ (рис.2). Затем составляется система из $n+1$ уравнений

$$i = \sum_{k=0}^n a_k U_q^k, \quad q = 0 \dots n,$$

решаемая относительно неизвестных коэффициентов a_k . Размерность a_k зависит от их номера и равна

$$a_k = [A] / [B]^k.$$

Другим простым и потому часто используемым способом представления $i = f(U)$ является кусочно-линейная аппроксимация, когда реальная характеристика задается отрезками прямых линий, количество которых определяется требуемой точностью.

Реальные характеристики диодов, транзисторов, ламп обычно имеют криволинейный начальный участок AB , затем более или менее выраженную линейную часть BC с крутизной S и близкую к линейной область насыщения за точкой D (рис. 3).

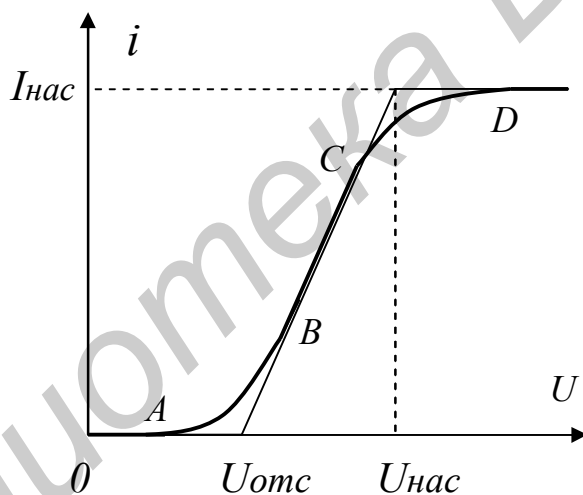


Рис. 3 . Кусочно-линейная аппроксимация ВАХ

Приближенно такую характеристику можно представить тремя прямыми

$$i = \begin{cases} 0, & U < U_{отс}, \\ S(U - U_{отс}), & U_{отс} \leq U \leq U_{нас}, \\ I_{нас}, & U > U_{нас}. \end{cases} \quad (5)$$

При расчетах часто используются понятия режимов «сильных» и «слабых» входных сигналов. Режим «сильных» сигналов предполагает, что их амплитуда

велика по сравнению с протяженностью криволинейных участков AB и CD и поэтому их роль в формировании тока относительно невелика. В этих случаях с успехом можно использовать кусочно-линейную аппроксимацию ВАХ.

Режим «слабых» сигналов предполагает, что их амплитуда соизмерима с протяженностью криволинейных участков ВАХ, и работа ведется в пределах этих участков или вблизи них. В этом режиме кусочно-линейная аппроксимация дает большую погрешность и нужно пользоваться степенным представлением (4).

2.1. Метод угла отсечки

В этом методе предполагается сильный гармонический входной сигнал

$$U(t) = E_{см} + U_1 \cos \omega_1 t$$

и кусочно-линейная ВАХ. В зависимости от амплитуды U_1 входного сигнала и постоянного напряжения смещения $E_{см}$, определяющего положение рабочей точки на ВАХ, могут иметь место следующие режимы работы: без отсечки тока, если напряжение $U(t)$ не выходит за пределы линейного участка ВАХ, с нижней отсечкой тока, с верхней отсечкой тока, с верхней и нижней отсечкой, если $U(t)$ сверху и снизу выходит за пределы линейной части ВАХ.

Работа без отсечки соответствует линейному режиму, и мы его не будем рассматривать.

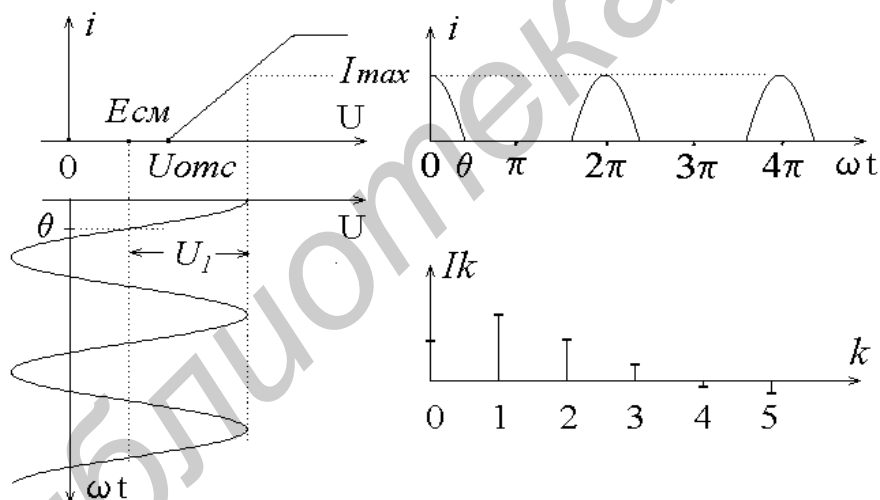


Рис. 4. Нижняя отсечка тока

Режим с нижней отсечкой показан на рис. 4. Ток имеет форму усеченных косинусоидальных импульсов, ширина которых по основанию в угловой мере оценивается углом отсечки θ , равным части периода, в течение которой ток изменяется от I_{max} до 0. Из построений на рис. 4 легко установить, что

$$\cos \theta = (U_{omc} - E_{см}) / U_1 \quad (6)$$

и

$$\begin{aligned}
 i(t) &= S(U(t) - U_{omc}) = S(E_{cm} - U_{omc} + U_1 \cos \omega_1 t) = \\
 &= SU_1 (\cos \omega_1 t - \cos \theta) .
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

При $\omega_1 t = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ ток достигает максимального значения, равного согласно (7)

$$I_{\max} = SU_1 (1 - \cos \theta) . \tag{8}$$

Спектральный состав импульсов тока находится путем разложения их в ряд Фурье (2). Амплитуды гармоник тока I_k определяются по формуле (3). С учетом (7) результаты вычислений представимы в виде

$$I_k = SU_1 \cdot \gamma_k(\theta) , \tag{9}$$

где $\gamma_k(\theta)$ – так называемые коэффициенты гармоник, равные

$$\begin{cases}
 \gamma_0(\theta) = \frac{1}{\pi} (\sin \theta - \cos \theta), & \gamma_1(\theta) = \frac{1}{\pi} (\theta - \sin \theta \cdot \cos \theta), \\
 \gamma_k(\theta) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin k\theta \cdot \cos \theta - k \cos k\theta \cdot \sin \theta}{k(k^2 - 1)} \right), & k > 1.
 \end{cases}
 \tag{10}$$

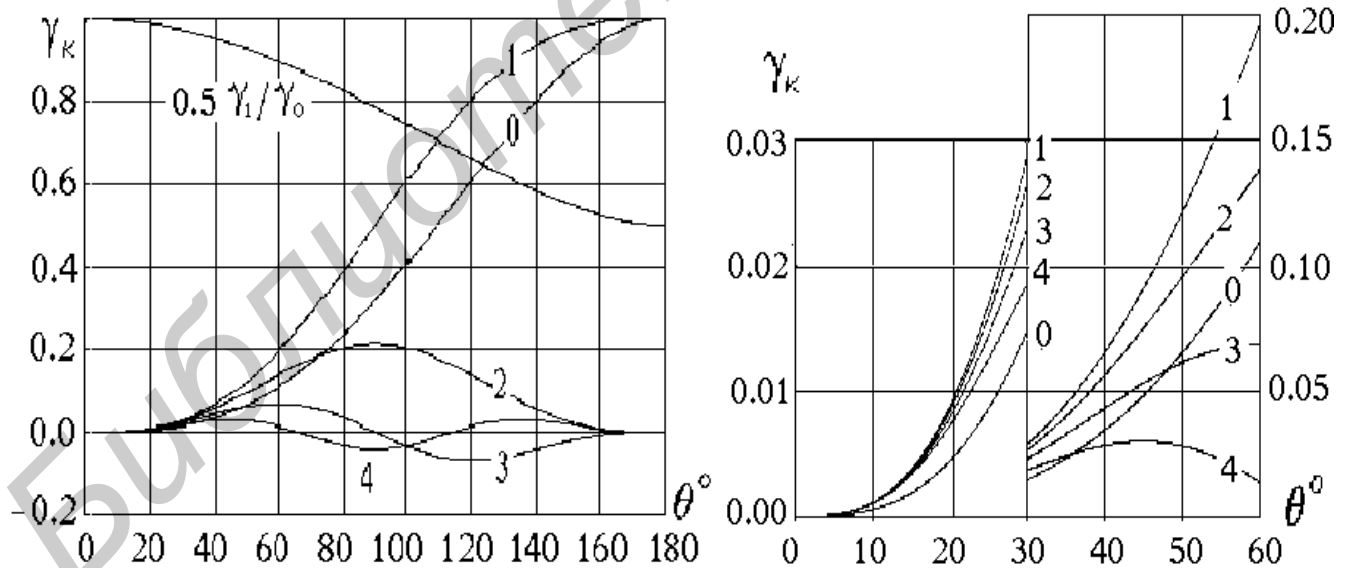


Рис. 5. Графики коэффициентов гармоник γ_k

С увеличением номера k значения γ_k быстро уменьшаются, так что при $k > 5$ гармоники тока I_k достаточно малы. Характерно, что при углах отсечки, называемых оптимальными и равными

$$\theta_{opt, \gamma_k} = 180^\circ / k, \quad (11)$$

значения γ_k максимальны. При $\theta = 90^\circ$ для нечетных $k=3,5,7,\dots$ γ_k проходят через нуль. При $\theta = 180^\circ$ (переход в режим без отсечки) спектр тока содержит только постоянную составляющую I_0 и первую гармонику I_1 .

Если нелинейный элемент используется в условиях, когда максимальное значение тока I_{max} поддерживается постоянным, для чего при изменении угла отсечки требуется одновременное изменение амплитуды входного сигнала U_I или смещения $E_{см}$, то более удобно вместо $\gamma_k(\theta)$ использовать коэффициенты гармоник Берга А.И.

$$\alpha_k(\theta) = I_k / I_{max}, \quad (12)$$

связанные с $\gamma_k(\theta)$ соотношением

$$\alpha_k(\theta) = \gamma_k(\theta) / (1 - \cos\theta). \quad (13)$$

Их графики показаны на рис. 6. В отличие от $\gamma_k(\theta)$ они принимают максимальные значения при оптимальных углах

$$\theta_{opt, \alpha_k} = 120^\circ / k. \quad (14)$$

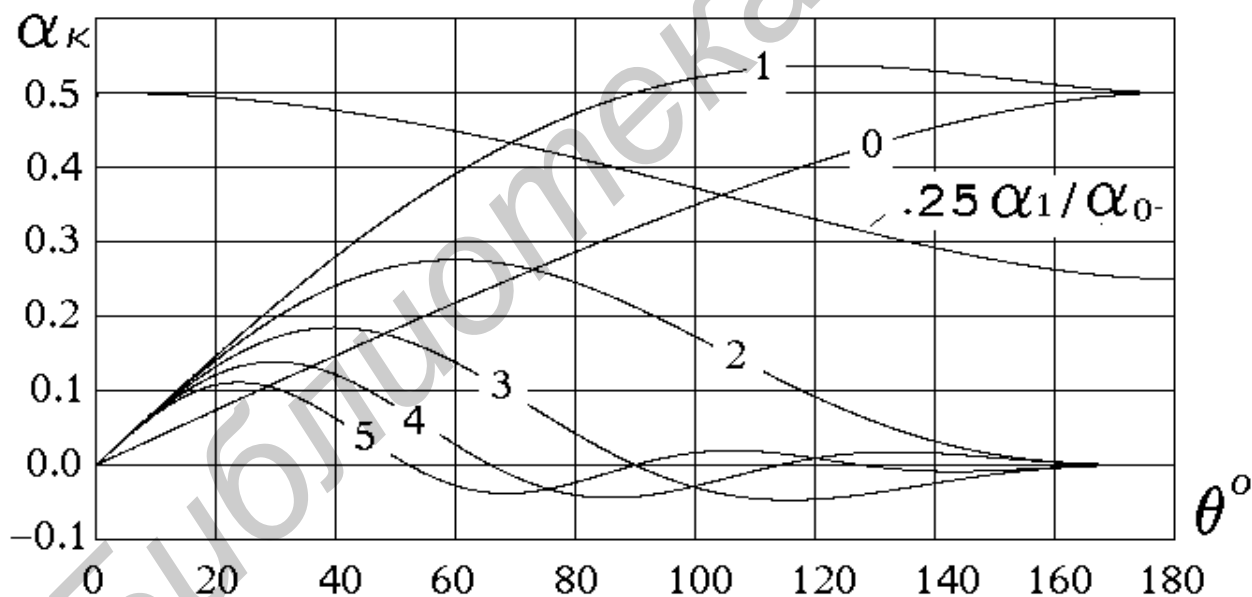


Рис. 6. Графики коэффициентов гармоник Берга А.И.

Если напряжение $U(t)$, приложенное к нелинейному элементу, в течение части периода превышает $U_{нас}$, то появляется верхняя отсечка тока (рис.7) с углом θ_I , равным отсеченной части периода на уровне $I_{нас}$. Для этого слу-

чая нижний угол отсечки обозначим θ_2 .

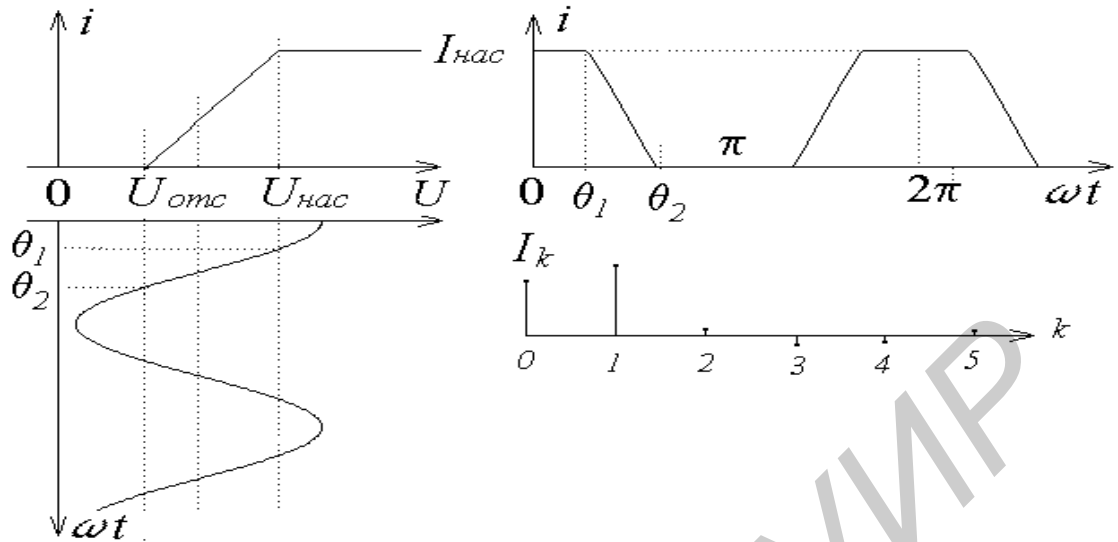


Рис. 7. Верхняя и нижняя отсечки тока

Нетрудно видеть, что

$$\begin{cases} \cos \theta_1 = SU_1(U_{нас} - E_{см})/U_1, \\ \cos \theta_2 = SU_1(U_{отс} - E_{см})/U_1. \end{cases} \quad (15)$$

Усеченные сверху и снизу импульсы можно представить как разность двух импульсов, усеченных только снизу (рис. 8)

$$i(t) = i_2(t) - i_1(t), \quad (16)$$

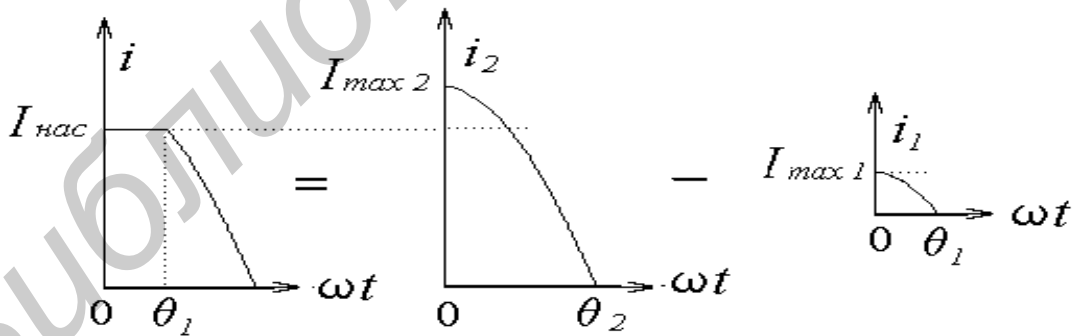


Рис. 8. К расчету импульсов тока с двухсторонней отсечкой

где

$$\begin{cases} i_1(t) = SU_1(\cos \omega_1 t - \cos \theta_1) \\ i_2(t) = SU_1(\cos \omega_1 t - \cos \theta_2) \end{cases} \quad (17)$$

Спектр тока $i(t)$ равен разности спектров токов $i_2(t)$ и $i_1(t)$, поэтому гармоники тока $i(t)$ согласно (16) и (9) будут равны

$$I_k = SU_1 (\gamma_k (\theta_2) - \gamma_k (\theta_1)). \quad (18)$$

Метод двойного усечения при $\theta_1 \rightarrow \theta_2$ используется на практике для формирования импульсов по форме, близкой к прямоугольной.

2.2. Режим «слабых» сигналов. Степенная аппроксимация ВАХ

Если ВАХ $i = f(U)$ задана полиномом (4) конечной степени n (обычно $n \leq 5$), и на входе действует гармонический сигнал

$$U(t) = U_1 \text{Cos } \omega_1 t, \quad (19)$$

то, как показывают расчеты, выходной ток будет содержать гармоники, высший номер которых не превосходит степени аппроксимирующего полинома, т.е.

$$i(t) = \sum_{k=0}^n I_k \text{Cos } \omega_1 k t. \quad (20)$$

Амплитуды четных гармоник I_0, I_2, \dots определяются четными коэффициентами полинома a_0, a_2, a_4, \dots , а нечетных гармоник I_1, I_3, \dots нечетными коэффициентами a_1, a_3, \dots

Например, при $n = 5$ они равны

$$\begin{cases} I_0 = a_0 + 1/2 a_2 u_1^2 + 3/8 a_4 u_1^4, & I_1 = a_1 u_1 + 3/4 a_3 u_1^3 + 5/8 a_5 u_1^5, \\ I_2 = 1/2 a_2 u_1^2 + 1/2 a_4 u_1^4, & I_3 = 1/4 a_3 u_1^3 + 5/16 a_5 u_1^5, \\ I_4 = 1/8 a_4 u_1^4, & I_5 = 1/16 a_5 u_1^5. \end{cases} \quad (21)$$

Вывод о том, что в выходном токе содержится только конечное число гармоник, является прямым следствием принятой аппроксимации ВАХ конечным рядом. Естественно, что реальный вид ВАХ отличается от заданного, поэтому и гармоник на выходе будет больше.

Если входной сигнал является бигармоническим, т.е. представляет сумму двух колебаний с разными частотами

$$U(t) = U_1 \text{Cos } \omega_1 t + U_0 \text{Cos } \omega_2 t, \quad (22)$$

и ВАХ задана конечным полиномом n степени, то спектр выходного тока будет содержать набор так называемых **комбинационных частот** разного порядка

$$\omega_{k_1, k_2} = \left| k_1 \omega_1 + k_2 \omega_2 \right|, \quad (23)$$

где k_1 и k_2 – целые числа в интервале от $-n$ до n . **Порядком** комбинационной частоты называется число

$$p = \left| k_1 \right| + \left| k_2 \right|. \quad (24)$$

Оно не должно превышать степени аппроксимирующего полинома, т.е.

$$p \leq n. \quad (25)$$

Например, если ВАХ задана полиномом второй степени ($n = 2$), то в спектре тока будут содержаться следующие комбинационные частоты:

одна частота нулевого порядка ($p=0$), $\omega_{00} = \omega_1$, при $k_1=0$ и $k_2=0$;

две частоты первого порядка ($p=1$), $\omega_{\pm 1, 0} = \omega_1$ и $\omega_{0, \pm 1} = \omega_2$,

если $k_1=0$, $k_2=\pm 1$ или $k_1=\pm 1$, $k_2=0$;

четыре частоты второго порядка ($p=2$):

$$\omega_{\pm 2, 0} = 2\omega_1, \quad \text{при } k_1 = \pm 2, k_2 = 0,$$

$$\omega_{0, \pm 2} = 2\omega_2, \quad \text{при } k_1 = 0, k_2 = \pm 2,$$

$$\omega_{\pm 1, \pm 1} = \left| \pm \omega_1 \pm \omega_2 \right|, \quad \text{при } k_1 = \pm 1, k_2 = \pm 1.$$

Как видно, помимо частот входных сигналов ω_1 и ω_2 и их вторых гармоник $2\omega_1$ и $2\omega_2$, ток будет содержать постоянную составляющую $\omega=0$, суммарную $\omega_1 + \omega_2$ и разностную $\omega_1 - \omega_2$ частоты.

В общем случае, если входное воздействие представляет полигармонический сигнал

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_i \cos \omega_i t, \quad (26)$$

то спектр выходного тока будет содержать различные комбинационные частоты

$$\omega_{k_1, k_2, \dots, k_N} = \left| \sum_{i=1}^N \omega_i k_i \right|, \quad (27)$$

порядок которых

$$p = \sum_{i=1}^N \left| k_i \right|. \quad (28)$$

Целые числа $k_1, k_2 \dots k_N$ могут принимать любые значения от $-n$ до n , но так, что

$$p \leq n, \quad (29)$$

где n – степень аппроксимирующего полинома ВАХ.

Богатство спектра комбинационных частот открывает широкие возможности для реализации различных функциональных преобразований сигнала путем выделения полезных и подавления не нужных составляющих тока $i(t)$. Рассмотрим некоторые из них.

2.3. Нелинейные функциональные преобразования

2.3.1. Ограничение

Различают два вида ограничения: *ограничение мгновенных значений* сигнала и *ограничение амплитуды* гармонических колебаний.

В результате ограничения первого типа мгновенные значения сигнала не выходят за некоторые пределы, называемые порогом ограничения. Возможны три типа ограничения: сверху, снизу и двустороннее.

Транзисторный усилитель с резистивной нагрузкой ВАХ имеет участок насыщения, и в зависимости от амплитуды входного сигнала и напряжения смещения может быть реализован любой из этих видов ограничения. В схеме ограничителя мгновенных значений фильтр не требуется, нагрузка чисто активная.

Целью амплитудного ограничения является стабилизация амплитуды выходного сигнала, которая не должна зависеть от амплитуды входного сигнала. Амплитудное ограничение реализуется в схеме двухстороннего ограничителя мгновенных значений, на выходе которого включается фильтр (обычно колебательный контур), настроенный на частоту первой гармоники входного сигнала.

Транзисторные схемы обоих типов ограничителей нарисуйте самостоятельно.

2.3.2. Нелинейное резонансное усиление колебаний высокой частоты

Функционально усиление колебаний высокой частоты представляет собой линейный процесс, т.к. выходной сигнал должен воспроизводить входное воздействие, однако реализацию выгоднее осуществлять с использованием нелинейных режимов, т.к. это позволяет улучшить энергетические характеристики.

Простейшая схема транзистора усилителя высокой частоты (УВЧ) представлена на рис. 9.

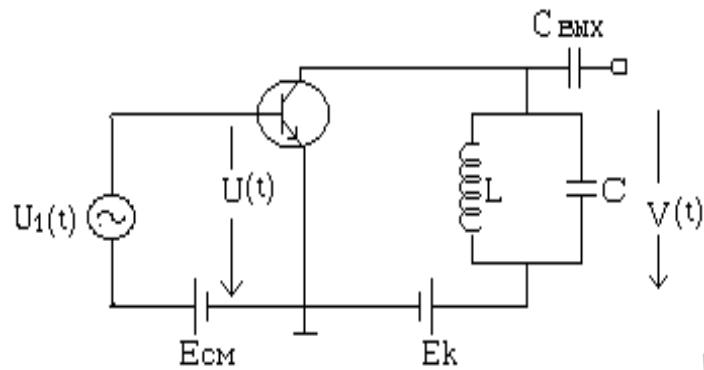


Рис. 9. Резонансный усилитель высокой частоты

На вход подается сигнал $U(t) = U_1 \cos \omega_1 t$. Усиленный сигнал $V(t) = V_1 \cos \omega_1 t$ снимается с нагрузки – фильтра, роль которой играет колебательный контур, настроенный на частоту сигнала и потому имеющий на этой частоте чисто активное сопротивление $R_э$. Амплитуда сигнала на выходе определяется первой гармоникой тока коллектора I_1 :

$$V_1 = R_э I_1 .$$

Отсюда коэффициент усиления

$$k = V_1 / U_1 = R_э I_1 / U_1 = R_э S_{cp} , \quad (30)$$

где $S_{cp} = I_1 / U_1$ - средняя крутизна ВАХ по первой гармонике тока.

Воспользуемся методом угла отсечки. Согласно (9) $I_1 = S U_1 \gamma_1(\theta)$, и поэтому (30) можно записать в виде

$$k = S \cdot R_э \cdot \gamma_1(\theta). \quad (31)$$

С учетом графика для $\gamma_1(\theta)$ (см. рис. 5) зависимость k от θ имеет вид, показанный на рис. 10.

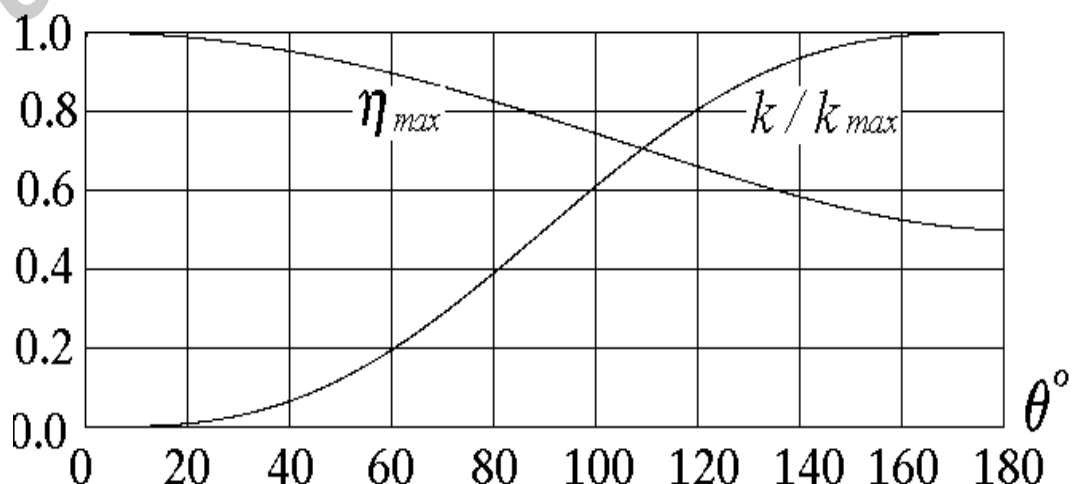


Рис. 10. Коэффициент усиления и к.п.д. резонансного усилителя

Максимум, равный $k_{max} = SR_{э}$, достигается при $\theta = 180^0$, т.е. при переходе в линейный режим работы без отсечки тока.

Выходная высокочастотная мощность равна $P_1 = 0.5 V_1 I_1$, а мощность, забираемая от источника питания $P_0 = E_k \cdot I_0$, где $I_0 = SU_1 \gamma_0(\theta)$ – нулевая гармоника, т.е. постоянная составляющая тока коллектора. Отсюда к.п.д. усилителя равен

$$\eta = \frac{P_1}{P_0} = \frac{1}{2} \frac{V_1 I_1}{E_k I_0} = \frac{1}{2} \xi \frac{\gamma_1(\theta)}{\gamma_0(\theta)}. \quad (32)$$

Величина $\xi = V_1/E_k$ называется коэффициентом напряженности режима. Напряжение на контуре V_1 не может быть больше напряжения питания E_k , поэтому $\xi \leq 1$. Полагая для критического режима $\xi = 1$, находим, что к.п.д. не может превышать величину

$$\eta_{max} = 0.5 \gamma_1(\theta) / \gamma_0(\theta) = 0.5 \alpha_1(\theta) / \alpha_0(\theta)_1. \quad (33)$$

Зависимости $\gamma_1(\theta) / \gamma_0(\theta)$ и $\alpha_1(\theta) / \alpha_0(\theta)$ изображены на рис. 5 и 6. При больших углах отсечки ($\theta \approx 180^0$) в режимах, близких к линейному, к.п.д. не превышает 50%, что энергетически явно не выгодно. Этот режим (класс «А») может использоваться в маломощных усилителях, называемых *усилителями напряжения*, когда величина к.п.д. не имеет существенного значения. Для усилителей большой мощности, называемых *усилителями мощности*, величина к.п.д. является важнейшим параметром, и поэтому приходится переходить к нелинейным режимам с отсечкой тока, поскольку с уменьшением θ растет к.п.д.. Однако, режимы с отсечкой $\theta < 60^0$ (класс «С») обычно не используются, т.к. с уменьшением θ падает и полная мощность

$$P_1 = 0.5 V_1 I_1 = 0.5 R_{э} (SU_1 \gamma_1(\theta))^2 \quad (34)$$

вследствие уменьшения $\gamma_1(\theta)$. Из компромиссных соображений между высоким к.п.д., большой выходной мощностью и большим коэффициентом усиления часто используется режим класса «В» с углом отсечки $\theta = 90^0$, при котором $\eta = 78\%$, а $k = 0.5 SR_{э} = 0.5 k_{max}$. Этот режим выгоден еще и тем, что позволяет без искажений усиливать колебания с изменяющейся во

времени амплитудой $U_1(t)$ (АМ сигналы), т.к. при $\theta = 90^\circ$, когда $E_{см} = U_{отс}$ ток первой гармоники линейно зависит от U_1 , ($I_1 = 0.5 S U_1$).

2.3.3. Умножение частоты

Умножение есть такое преобразование сигнала, при котором на выходе получается колебание с частотой в целое число раз n более высокой, чем на входе. На вход же обычно подается гармоническое колебание

$$U(t) = U_1 \cos \omega_1 t.$$

Известны различные типы умножителей, в том числе транзисторный резонансный, схема которого не отличается от резонансного усилителя (рис. 9), но выходной контур настраивается на n гармонику входного сигнала $\omega_n = n \cdot \omega_1$, выделяя ее из спектра тока коллектора. Коэффициент передачи умножителя определяется по формуле

$$k_n = \frac{V_n}{U_1} = \frac{I_n \cdot R_{\text{э}}}{U_1} = S \gamma_n(\theta) \cdot R_{\text{э}}, \quad (35)$$

а к.п.д.

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_0} = \frac{0.5 I_n V_n}{E_k I_0} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_n(\theta)}{\gamma_0(\theta)} \cdot \frac{V_n}{E_k}. \quad (36)$$

Для достижения максимального выходного сигнала выбирают оптимальный угол отсечки θ , равный $180^\circ/n$. Ввиду того, что с увеличением номера гармоники ток I_n резко падает, на практике редко реализуют умножение более, чем в 2-3 раза.

2.3.4. Преобразование частоты

Преобразованием частоты (ПЧ) называют перемещение спектра сигнала без изменения его вида вверх или вниз по шкале частот. Осуществляется ПЧ в нелинейных или параметрических цепях. ПЧ широко используется в супергетеродинных приемниках, где основное усиление ведется на преобразованной частоте, называемой промежуточной и равной $\omega_{пр} = \omega_1 \pm \omega_2$, где ω_1 – частота входного сигнала, а ω_2 – частота вспомогательного генератора (гетеродина).

С точки зрения нелинейного преобразования $\omega_1 \pm \omega_2$ являются комбинационными частотами второго порядка, возникающими в том случае, если ВАХ имеет квадратичный член

$$i = a_0 + a_1 U + a_2 U^2,$$

и на входе действует бигармонический сигнал

$$U(t) = E_{см} + U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t.$$

Раскрывая, выражение для тока, получим

$$i(t) = I_{00} + I_{10} \cos \omega_1 t + I_{01} \cos \omega_2 t + I_{20} \cos 2\omega_1 t + I_{02} \cos 2\omega_2 t + I_{1,-1} \cos (\omega_1 - \omega_2)t + I_{1,1} \cos (\omega_1 + \omega_2)t,$$

где

$$\begin{cases} I_{0,0} = a_0 + a_1 E_{см} + a_2 E_{см}^2 + 0.5(U_1^2 + U_2^2), \\ I_{1,0} = a_1 U_1 + 2a_2 E_{см} U_1, & I_{0,1} = a_1 U_2 + 2a_2 E_{см} U_2, \\ I_{2,0} = 0.5 a_2 U_1^2, & I_{0,2} = 0.5 a_2 U_2^2, \\ I_{1,-1} = a_2 U_1 U_2, & I_{1,1} = a_2 U_1 U_2. \end{cases} \quad (37)$$

Для выделения полезных составляющих с частотами $\omega_1 - \omega_2$ или $\omega_1 + \omega_2$ используют фильтр, обычно колебательный контур.

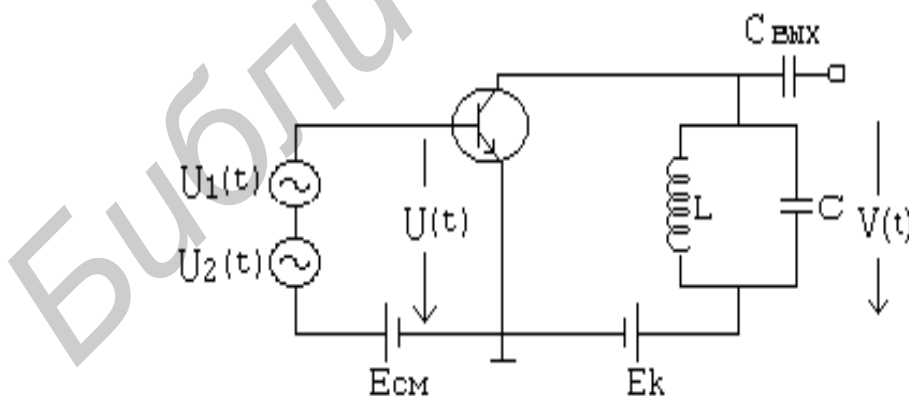


Рис. 11. Транзисторный преобразователь частоты

Схема транзисторного преобразователя частоты показана на рис. 11. Напряжение смещения $E_{см}$ устанавливает рабочую точку на нижнем сгибе ВАХ, в середине квадратичного участка. Выходное напряжение равно

$$V(t) = S_{np} R_{э} U_1 \text{Cos}(\omega_1 \pm \omega_2) t, \quad (38)$$

где $R_{э}$ – эквивалентное сопротивление контура, и

$$S_{np} = a_2 U_2 \quad (39)$$

- крутизна преобразования, зависящая от вида ВАХ и напряжения U_2 гетеродина.

Если входной сигнал не одночастотный (например, АМ или ЧМ колебание), а реальная ВАХ описывается полиномом степени выше второй, то возникает богатый спектр комбинационных частот, среди которых наряду с полезными есть и нежелательные. Если эти последние попадают в полосу пропускания контура, то они накладываются на полезные составляющие и искажают выходной сигнал. Для уменьшения этих искажений на практике часто используют более сложные балансные и мостовые схемы, содержащие по 2 и 4 нелинейных элемента.

3. Краткая информация о программе «NT»

Программа «NT» (Nonlinear Transformations) моделирует процессы некоторых функциональных преобразований сигналов в нелинейных цепях.

Моделируется работа на установке, содержащей генераторы входных сигналов, нелинейный преобразователь, фильтр-нагрузку, измерительный осциллограф и спектроанализатор (рис.12).

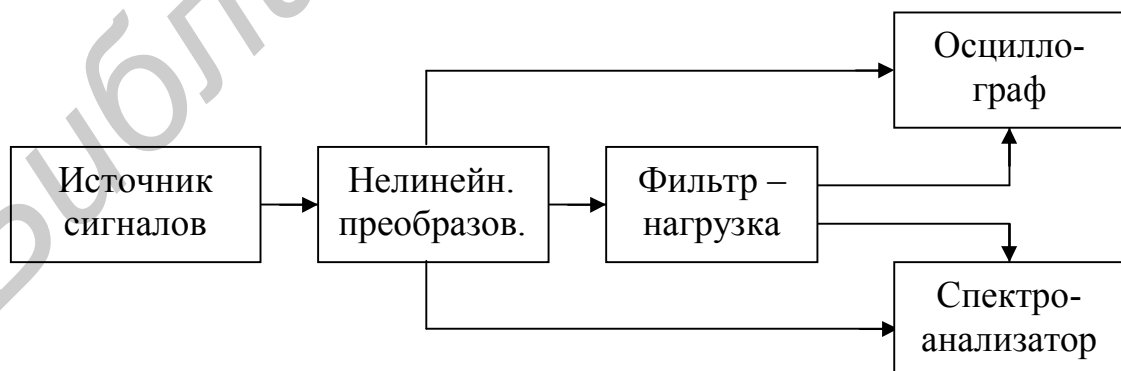


Рис. 12. Структурная схема моделируемой установки

Допускается изучение ограничения мгновенных значений, амплитудного ограничения, резонансного усиления, умножения и преобразования частоты, а также амплитудой модуляции. Воспроизводятся форма и спектральный состав сигналов. Роль нелинейного преобразователя для наглядности выполняет как бы транзистор. Условность этого представления в том, что ВАХ нелинейного элемента в программе задается и не зависит от режима работы (напряжения питания и других факторов). Заданную ВАХ можно сохранить в файле для последующего использования.

Отличительной чертой программы является то, что параметры ВАХ и фильтра-нагрузки, устанавливаемые в начальном диалоге, в процессе работы могут быть оперативно изменяемы. Это позволяет в динамике следить за их влиянием на работу схемы и создает эффект общения с реальным физическим устройством почти в реальном масштабе времени.

Нагрузкой преобразователя является либо резистор, либо колебательный контур, добротность которого Q можно изменять. Значению $Q = 0$ соответствует замена контура активным сопротивлением R . Такой переход является чисто программным приемом, и его не следует воспринимать буквально.

Расчет спектров тока и выходных сигналов ведется методом дискретного преобразования Фурье с числом точек на периоде порядка сотни, что обеспечивает достаточно высокую точность вычислений.

При выводе на монитор графической информации применена система автоматического масштабирования, когда при изменении сигналов их размер как бы не меняется. Это не должно вызывать недоумения, т.к. одновременно изменяется оцифровка шкал и выводимая цифровая информация. Вы как бы одновременно изменяете усиление осциллографа и масштабы развертки, сохраняя неизменным размер изображения.

Все манипуляции осуществляются либо мышкой, либо с клавиатуры. Рекомендуется выбор той или иной позиции Меню для последующего изменения соответствующего параметра производить мышью. Само же изменение параметра можно осуществлять либо дискретно, используя стрелки клавиатуры, или мышью, либо делать численный ввод «по запросу» после нажатия клавиши <I>. Первый способ удобен для непрерывного отслеживания влияния параметра на работу схемы. Второй – в том случае, когда нужно изменить параметр сразу в больших пределах или сделать его несовпадающим с дискретными значениями, получаемыми первым способом.

Имейте в виду, что активизация мыши для изменения параметров происходит, когда ее курсор находится вне строки с высвеченной позицией Меню.

4. Порядок выполнения работы

В работе могут быть исследованы следующие вопросы, конкретный перечень которых для выполнения указывает преподаватель:

Исследование ВАХ.

Кусочно-линейная ВАХ. Криволинейная ВАХ. Формирование ВАХ.

Ограничение.

Ограничение мгновенных значений сигнала снизу, сверху и двухстороннее. Расчет и измерение коэффициентов гармоник.

Амплитудное ограничение

Выходная характеристика ограничителя.

Резонансное усиление.

Исследование коэффициента усиления и к.п.д. в функции угла отсечки.

Умножение частоты.

Исследование коэффициента передачи умножителя частоты в функции угла отсечки для различных коэффициентов умножения.

Преобразование частоты.

Исследование спектра комбинационных частот.

Исследование крутизны преобразования.

Ниже описывается порядок выполнения работы по каждой позиции.

4.1. Исследование ВАХ

4.1.1. Кусочно-линейная ВАХ.

1. Включите программу и выберите любой из видов преобразования, например, «Ограничение».

2. Вызовите из файла характеристику № 1, для чего последовательно нажмите кнопки <A> и <1>.

3. Пользуясь кнопками «Стрелки», просмотрите, а затем проведите измерение и зарисуйте ВАХ. Определите крутизну S , напряжение отсечки $U_{отс}$, напряжение насыщения $U_{нас}$ и ток насыщения $I_{нас}$.

4. Выйдите из программы, нажав F10.

4.1.2. Криволинейная ВАХ.

1. Аналогично предыдущему, войдите в программу и вызовите из файла ВАХ № 2.

2. Зарисуйте и измерьте характеристику.

3. Аппроксимируйте ВАХ степенным полиномом второй степени. Рассчитайте коэффициенты полинома a_0 , a_1 , a_2 , по ним постройте характеристику $i = f(U)$ и сравните ее с измеренной.

4. Нажав F10, выйдите из программы.

* 4.1.3. Формирование ВАХ.

1. Войдите в программу и выберите любой вид преобразования.
2. Нажмите кнопку <В>.
3. Внимательно ознакомьтесь с появившимся макетом ВАХ и смыслом обозначений.
4. Введите запрашиваемые параметры характеристики и записывайте появившуюся информацию.
5. Сформированную ВАХ запишите в файл под № 15. Теперь вы можете многократно использовать ее.
6. Выйдите из программы, нажав F10.

4.2. Ограничение

4.2.1. Одностороннее и двухстороннее ограничения мгновенных значений гармонического сигнала.

1. Войдите в программу и, выбрав опцию «Ограничение», вызовите из файла ВАХ № 1.

2. Нажмите <С>, <У> и переходите к вводу параметров входного сигнала и схемы транзисторного ограничителя:

напряжение смещения $E_{см} = 0$,

амплитуда входного сигнала $U_1 = 1$ В,

частота сигнала $f_1 = 1$ кГц,

нагрузка $R = 1$ кОм.

3. Нажав «У», переходите на рабочее поле программы, где отображаются ВАХ нелинейного элемента $i = f(U)$, приложенное к нему напряжение U , ток $i(t)$ и напряжение $V(t)$ на выходе. Внизу справа - панель спектров тока i и напряжения V .

4. Перед началом проведения исследований освоитесь с выводимой на монитор информацией и способами изменения параметров.

В левом верхнем углу – подсказка. В нижней строчке - Меню опций параметров и проводимых измерений. Войдите в каждую из них и, пользуясь стрелками клавиатуры или клавишами мыши, изменяйте соответствующий параметр. Следите за происходящими изменениями. Сделайте ввод параметра «по запросу», нажав клавишу <1>. Обратите внимание, что при желании вы можете также изменять и параметры ВАХ, для чего следует активизировать опции, расположенные вдоль оси U .

В опции «Визир $V.I.U$ » производятся измерения токов и напряжений в функции времени. Это позволяет фиксировать моменты верхней и нижней отсечек тока и определять соответствующие им углы .

В опции «Визир спектра» измеряются составляющие спектра тока и выходного напряжения.

Опция «N(ew)» выводит в начало программы, а F10 – прерывает работу. Их пока нажимать не следует.

По окончании ознакомления установите исходные значения параметров и переходите к измерениям.

5. Мышкой или клавиатурой в Меню выберите опцию «Масштаб осей» и, нажав клавишу <I>, по запросу введите значение 2, что обеспечит удобное наблюдение и измерение параметров сигнала.

Исследуйте режим **ограничения снизу**. Для $E_{см} = 0.134, 0.5, 1, 1.5, 1.87$ и 2 В запишите I_{max} , значения амплитуд гармоник тока $I_0 \dots I_5$ и измерьте угол отсечки, для чего войдите в опцию «Визир V, I, U». Результаты запишите в табл. 1. и зарисуйте характерные случаи.

Таблица 1

$E_{см}$	I_{max}	θ^0	I_0	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5

По результатам измерений определите коэффициенты гармоник $\gamma_k(\theta)$ и $\alpha_k(\theta)$, начертите их графики и сравните с теоретическими.

6. Аналогичные измерения и расчеты проведите для режима **ограничения сверху**, изменяя $E_{см}$ в пределах от 2 В до 4 В. Сопоставьте результаты для отсечек снизу и сверху и дайте их объяснение.

7. Исследуйте режим симметричного двухстороннего ограничения. Установите $E_{см} = 2$ В. Изменяйте U_1 в пределах от 2 до 5 В с шагом 1 В. Для каждого $E_{см}$ измерьте верхний и нижний углы отсечки и запишите значения гармоник тока. Зарисуйте характерные ситуации.

Постройте зависимости гармоник тока в функции углов отсечки, сравните их с расчетными, объясните, почему постоянная составляющая тока I_0 остается неизменной, а все четные гармоники I_2, I_4 равны нулю.

4.2.2. Амплитудное ограничение.

1. Войдите в начало программы и выберите опцию «Ампл. ограничение». Вызовите из файла ВАХ № 1. Нажмите <C>, <Y> и переходите к вводу параметров сигнала и контура фильтра: $E_{см} = 2$ В, $U_1 = 0.1$ В, $f_1 = 100$ кГц, $f_{рез} = 100$ кГц, $Q = 50$, $R = 1$ кОм. Для перехода к измерениям нажмите <Y>.

Снимите **характеристику ограничения**, т.е. зависимость амплитуды напряжения на выходе V_1 от амплитуды входного сигнала U_1 в интервале 0.1...1 В с шагом 0.2 В и в интервале 1...5 В с шагом 1 В. Обратите внимание на фор-

му выходного сигнала. Зарисуйте эюры тока $i(t)$ и напряжения $V(t)$ для характерных случаев. Постройте зависимость $V_1(U_1)$. Объясните ее отличие от идеальной.

4.3. Нелинейное резонансное усиление

4.3.1. Войдите в начало программы, выберите опцию «Усиление» и вызовите из файла ВАХ № 1. Введите следующие значения параметров сигнала и контура:

$$E_{см} = 0 \text{ В}, U_1 = 1 \text{ В}, f_1 = 100 \text{ кГц}, f_{рез} = 100 \text{ кГц}, Q = 30, R = 2 \text{ кОм}.$$

Нажав <Y>, переходите к измерениям.

4.3.2. Измерьте зависимости коэффициента усиления в функции угла отсечки при фиксированном U_1 . Изменяйте смещение $E_{см}$ в тех же пределах, как в п 4.2.1. Для каждого $E_{см}$ измерьте угол отсечки θ , амплитуду выходного сигнала V_1 и гармоники тока I_0 и I_1 . Для $E_{см} = 0.134, 1$ и 2 В зарисуйте эюры $i(t)$, $V(t)$ и их спектры. По результатам измерений определите коэффициент усиления $k = V_1/U_1$. Постройте зависимость $k(\theta)$ и сравните ее с расчетной.

4.3.3 В режиме фиксированного $I_{max} = 10 \text{ мА}$ измерьте $k(\theta)$, $P_1(\theta)$ и $\eta(\theta)$. С этой целью для каждой пары значений $E_{см}$ и U_1 , приведенных в табл.2, измерьте θ, I_0, I_1, V_1 .

Табл. 2

$E_{см}, \text{ В}$	-11.93	-1	1	1.67	1.93	2
$U_1, \text{ В}$	14.93	4	2	1.33	1.07	1

Затем определите $k = I_1/U_1$, $P_1 = 0,5 Y_1 I_1$ и $\eta = 0.5(I_1/E_k)(I_1/I_0)$ и постройте их зависимости от θ . Результаты сравните с соответствующими теоретическими, рассчитанными по следующим формулам, которые предлагается вывести самостоятельно:

$$k = R_3 S \gamma_1(\theta); \quad P_1 = V_{max} I_{max} \alpha_1(\theta),$$

$$\eta = (V_{max}/E_k)(\alpha_1(\theta)/\alpha_0(\theta)) \alpha_1(\theta),$$

где

$$V_{max} = 0.5 R_3 I_{max}.$$

Коэффициенты $\gamma_1(\theta)$, $\alpha_0(\theta)$ и $\alpha_1(\theta)$ возьмите из результатов вашей работы по п. 4.2.1.

4.3.4. Проследите за влиянием добротности контура на форму выходного сигнала. Установите $E_{см} = 0.2 \text{ В}$ и, уменьшая Q от 30 до 1, следите, как изменя-

ется $V(t)$. Для $Q = 1$ и $Q = 4$ зарисуйте эюры $i(t)$, $V(t)$, их спектры и форму АЧХ.

4.3.5. Проследите, как влияет расстройка контура на форму выходного сигнала. Установите $Q = 10$ и по своему усмотрению значение $E_{см}$. “По запросу” сделайте $f_{рез} = 50$ кГц. Зарисуйте эюры $i(t)$, $V(t)$, их спектры и АЧХ. Объясните искажения формы $V(t)$. Это же исследование проведите для $f_{рез} = 150$ кГц.

4.4. Умножение частоты

Исследуйте режимы **удвоения** и **утроения** частоты. Войдите в опцию «Умножение» и вызовите ВАХ №1.

4.4.1. Установите $E_{см} = 0$ В, $U_1 = 1$ В, $f_1 = 100$ кГц, $f_{рез} = 200$ кГц (режим удвоения), $Q = 30$, $R = 2$ кОм.

4.4.2. Исследуйте коэффициент передачи k_2 и к.п.д. в режиме **удвоения**. Для этого изменяйте $E_{см}$ от 0 до 2 В с шагом 0.1 В, следя за выходным сигналом. Зафиксируйте $E_{см}$, при котором амплитуда выходного сигнала достигает максимума, и измерьте при этом угол отсечки θ и гармоники спектра I_0 , I_2 , V_2

Рассчитайте $k_2 = V_2 / U_1$ и $\eta_2 = \frac{1}{2} \frac{V_2 \cdot I_2}{E_k \cdot I_0}$ для $E_k = 12.5$ В. Сравните полученные результаты с расчетными данными.

4.4.3. Исследуйте режим **утроения**, для чего установите $f_{рез} = 300$ кГц и проведите те же исследования, что и в предыдущем пункте, но для гармоник I_3 и V_3 вместо I_2 и V_2 . В отличие от режима удвоения теперь выходной сигнал при изменении θ от 0 до 180° дважды достигает максимума. Найдите эти углы отсечки и определите для них значения коэффициентов передачи

$k_3 = V_3 / U_1$ и $\eta_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_3 \cdot I_3}{E_k \cdot I_0}$. Сделайте вывод об оптимальном угле

отсечки θ_{opt} .

4.4.4. Установите θ_{opt} и проследите, как зависит форма выходного сигнала от добротности. Зарисуйте $V(t)$ и спектр V при $Q = 30$, 10 и 5. Объясните результаты.

4.5. Преобразование частоты

Исследуются спектральный состав, крутизна преобразования и форма колебаний на выходе преобразователя с квадратичной ВАХ при подаче на его вход бигармонического сигнала.

4.5.1. Войдите в опцию «Преобразование» и вызовите из файла ВАХ №2.

4.5.2. Введите параметры сигналов и цепи: $E_{см} = 2$ В, $U_1 = 1$ В, $U_2 = 1$ В, $f_1 = 12$ кГц, $f_1/f_2 = 4$, $f_2 = 3$ кГц, $f_{рез} = 12$ кГц, $Q = 0$, $R = 2$ кОм. При вводе $Q = 0$ программа устанавливает чисто активную нагрузку R (см. раздел 3).

4.5.3. Исследуйте спектр комбинационных частот тока. Зарисуйте и измерьте амплитуды всех частотных составляющих. Сравните полученные результаты с рассчитанными по формуле (37), используя параметры ВАХ, измеренные при выполнении п.4.1.2.

Объясните, почему в спектре тока отсутствуют составляющие с частотами выше 24 кГц.

4.5.4. Исследуйте режим выделения частот $f_1 \pm f_2$.

Установите $Q = 100$ и $f_{рез} = f_1 - f_2 = 9$ кГц. Зарисуйте эюры тока и напряжений.

Измерьте амплитуду выходного сигнала $V(t)$. Определите крутизну преобразования на этой частоте $S_{пр} = I_{1,-1} / U_1$ и сравните ее с рассчитанной по формуле (39).

Проведите такие же исследования на суммарной частоте $f = f_1 + f_2 = 15$ кГц.

4.5.5. Исследуйте влияние избирательности фильтра на форму выходного напряжения. Установите $f_{рез} = 12$ кГц и для $Q = 30, 100$ и 200 зарисуйте форму $V(t)$ и объясните ее отличие от идеальной гармонической.

5. Контрольные вопросы

1. Какие преобразования сигналов называются линейными и нелинейными?
2. Каков спектр сигнала на выходе нелинейного преобразователя, если на входе гармонический сигнал?
3. Что такое комбинационные частоты и когда они возникают?
4. Что такое режим «сильных» и «слабых» сигналов?
5. Как провести аппроксимацию ВАХ?
6. Что такое метод угла отсечки?

7. Что такое коэффициенты гармоник $\gamma_k(\vartheta)$ и коэффициенты Берга А.И. $\alpha_k(\vartheta)$? . В чем их отличие?
8. Что такое оптимальный угол отсечки?
9. Как найти гармоники тока при верхней и нижней отсечке тока?
10. Для чего на выходе нелинейного преобразователя используется фильтр?
11. Что такое ограничение сигнала и какие виды ограничения вы знаете?
12. Как рассчитать коэффициент усиления и к.п.д. резонансного усилителя?
13. Что такое режимы усиления классов «А», «В» и «С»?
14. Что такое умножение частоты?
15. Как выбрать оптимальный режим работы умножителя частоты?
16. Что такое преобразование частоты и для чего оно применяется?
17. Какова должна быть ВАХ нелинейного элемента преобразователя частоты?
18. Что такое крутизна преобразования преобразователя частоты?
19. Как зависит форма выходных сигналов в усилителе, умножителе и преобразователе от добротности колебательного контура и его расстройки?

Литература

1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Сов. радио, 1977.
2. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. - М.: Связь, 1982.
3. Радиотехнические цепи и сигналы. Под ред. К.А.Самойло. – М.: Радио и связь, 1982.
4. Кушнир В.Ф., Ферсман Б.А. Теория нелинейных электрических цепей. – М.: Связь, 1974.
5. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высш. школа, 1988.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СИГНАЛОВ**

Методическое пособие

для практических и лабораторных занятий по дисциплинам
«Радиотехнические цепи и сигналы», «Основы радиоэлектроники»,
«Основы радиоэлектроники и радиоэлектронные устройства»

Дашенков Виталий Михайлович

Редактор Н.В. Гриневич
Корректор Б.Н. Батурчик

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16.
Объем усл. печ. л.	уч.- изд. л. Тираж экз.
Заказ	

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Министерства образования Республики Беларусь
Отпечатано на ротапинтере БГУИР. 220027, Минск, П.Бровки, 6