

## Лекция №10. ([1] стр. 225-229)

### Спектральный анализ выходного тока в режиме с отсечкой.

#### I. Входной сигнал гармонический.

Если на входе безынерционного нелинейного четырехполюсника действует сигнал с большой амплитудой, то в работе БНЧ может возникнуть ситуация, когда он заперт, и ток через него не идет. Такой режим называется режимом отсечки тока. В этой ситуации для аппроксимации рабочего участка ВАХ используется линейно ломаная аппроксимация. Рассмотрим наиболее простой случай, когда рабочий участок ВАХ аппроксимируется двумя полупрямыми. На рисунке изображена ВАХ нелинейного элемента, ее аппроксимация линейно-ломаной функцией, а также входное гармоническое напряжение и ток, протекающий через БНЧ. Ток в этом режиме носит импульсный характер, а сами импульсы - косинусоидальную форму.

Рассмотрим алгоритм вычисления спектра тока в режиме отсечки при гармоническом входном напряжении.

Для расчета спектра тока следует знать следующие величины

$S = \operatorname{tg} \alpha$  - крутизну наклонной части ВАХ

$U_3$  - напряжение запирающего БНЧ

$U_0$  - напряжение смещения гармонического сигнала

$E$  - амплитуду гармонического сигнала

С помощью этих величин мы можем рассчитать параметры  $\Theta$  и  $I_m$ , где

$\Theta$  - угол отсечки, половина длительности косинусоидального импульса,  $I_m$  - его амплитуда.

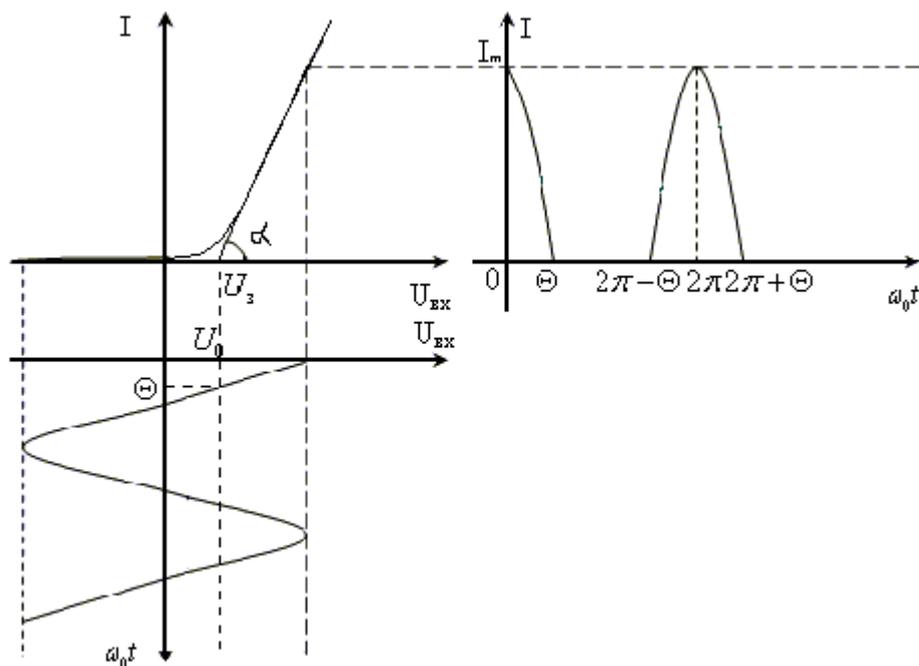


Рис.10.1

Из рисунка 10.1 видно, что, если  $U_{\text{вх}}(t) = U_0 + E \cos(\omega_0 t)$  и  $\omega_0 t = \Theta$ , то

$U_3 = U_0 + E \cos \Theta$ . Тогда  $\cos \Theta = \frac{U_3 - U_0}{E}$ . Кроме того, из рисунка видно, что

$I_m = (U_0 + E - U_3) \operatorname{tg} \alpha$ . Тогда

:

$$I_m = S(E + U_0 - U_3) = SE \left( 1 - \frac{U_3 - U_0}{E} \right) \left. \vphantom{I_m} \right\} \Rightarrow I_m = SE(1 - \cos \Theta)$$

$$\cos \Theta = \frac{U_3 - U_0}{E}$$

Импульсы тока носят периодический характер. Для простоты предположим, что начало отсчета совмещено с максимумом импульса. Тогда функция, описывающая ток, четная и эту функцию

можно разложить в тригонометрический ряд Фурье  $I(t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_n \cdot \cos(n\omega_0 t)$ , где

$$I_n = I_m \alpha_n(\Theta), \quad \alpha_n(\Theta) - \text{функции Берга. Например, } \alpha_0(\Theta) = \frac{\sin \Theta - \Theta \cos \Theta}{\pi(1 - \cos \Theta)}$$

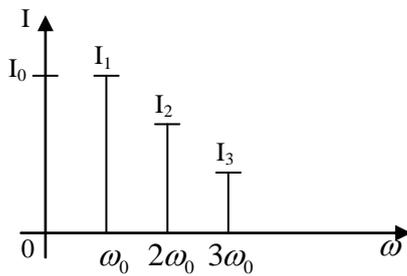


Рис.10.2а

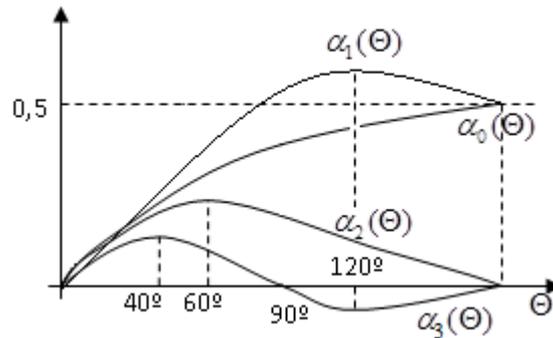


Рис.10.2б

На рисунках приведены амплитудный спектр тока (рис.10.2а) и графики функций Берга (рис.10.2б). Из рисунка спектра видно, что спектр дискретный. В спектре присутствует постоянная составляющая и гармоники с частотами, кратными частоте гармонического напряжения  $\omega_0$ .

Порядок расчета спектра тока в режиме с отсечкой.

Дано:  $E; \omega_0; U_0; S; U_3;$

Найти:  $I_n$

Решение

1. Найдём косинус угла отсечки  $\cos \Theta = \frac{U_3 - U_0}{E}$
2. Найдём амплитуду импульса  $I_m = SE(1 - \cos \Theta)$
3. Найдём значения коэффициентов Берга  $\alpha_n(\Theta)$  по графикам или таблицам  $\alpha_n(\Theta) \rightarrow \alpha_0(\Theta); \alpha_1(\Theta); \alpha_2(\Theta); \dots$
4. Вычислим амплитуды гармоник спектра тока  $I_n = I_m \cdot \alpha_n(\Theta)$

Из графиков функций Берга следует, что для удвоения частоты следует брать  $\Theta = 60^\circ$ ;

для утроения частоты –  $\Theta = 40^\circ$ .

:

Пример

Дано:  $E=2$  в;  $U_0=U_3=1$ в;  $S=100$  ма/в;  $\omega_0=2\pi \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>.

Найти спектр тока.

Решение.

1. Найдём косинус угла отсечки  $\cos \Theta = \frac{U_3 - U_0}{E} = \frac{1-1}{2} = 0$ . Тогда угол отсечки  $\Theta = 90^\circ$
2. Найдём амплитуду импульса  $I_m = SE(1 - \cos \Theta) = 100 \cdot 2(1 - 0) = 200$  ма
3. Найдём приближённые значения коэффициентов Берга  $\alpha_n(\Theta)$  по графикам (рис.10.2б):  
 $\alpha_0(90^\circ) \approx 0,4$ ;  $\alpha_1(\Theta) \approx 0,6$ ;  $\alpha_2(\Theta) \approx 0,2$ ;  $\alpha_3(\Theta) = 0$ ;...
4. Вычислим амплитуды гармоник спектра тока, используя формулу  $I_n = I_m \cdot \alpha_n(\Theta)$ . Тогда  
 $I_0 \approx 200 \cdot 0,4 = 40$  ма;  $I_1 \approx 200 \cdot 0,6 = 60$  ма;  $I_2 \approx 200 \cdot 0,2 = 20$  ма;  $I_3 = 0$ ;...  
 Эти гармоники будут соответственно на частотах:  $0$ ;  $\omega_0$ ;  $2\omega_0$ ;  $3\omega_0$ ;...

**II. Режим с отсечкой, при подаче на вход бигармонического сигнала.**

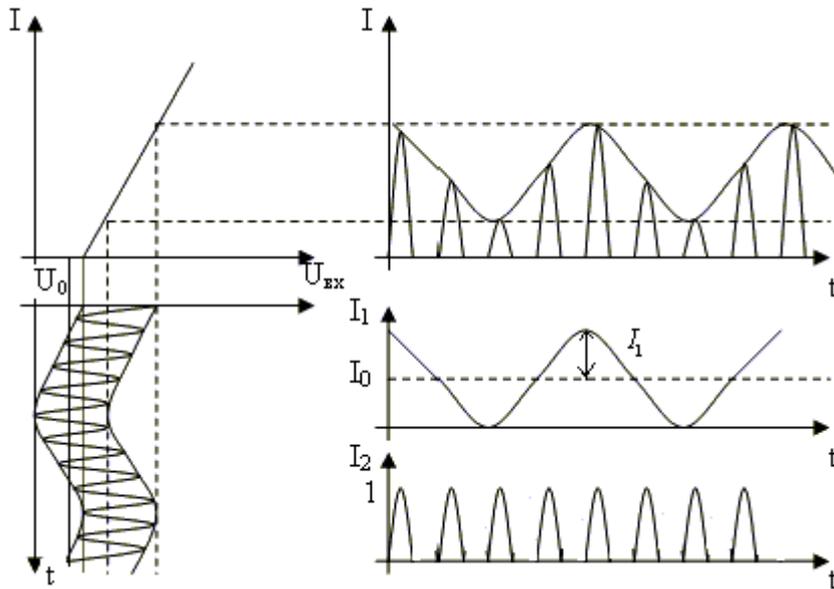


Рис.10.3.

Пусть  $U_{ex}(t) = U_0 + E_1 \cos \Omega t + E_2 \cos \omega_0 t$ . Из рисунка 10.3 видно, что, если постоянное смещение  $U_0$  подобрано таким образом, что отсечка осуществляется только по высокочастотному слагаемому входного сигнала, то ток, протекающий через нелинейный элемент можно приближенно представить в виде произведения двух функций  $I(t) = I_1(t) \cdot I_2(t)$ . Функция  $I_1(t)$  представляет собой сумму постоянной и низкочастотной гармонической составляющих  $I_1(t) = I_0 + I_1 \cos \Omega t$ . Функция  $I_2(t)$  – периодическая последовательность косинусоидальных импульсов, которую можно разложить в тригонометрический ряд Фурье,  $I_2(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos n\omega_0 t$ ,  $A_n = I_m \cdot \alpha_n(\Theta) = 1 \cdot \alpha_n(\Theta)$ .

:

Тогда ток, протекающий через нелинейный элемент в этом режиме можно записать в виде

$$I(t) = I_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t) + I_1 \cos \Omega t \cdot \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t)$$

$$I(t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_0 A_n \cos(n\omega_0 t) + \frac{I_1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} A_n I_1 \cdot \cos(n\omega_0 t \pm \Omega t)$$

Из последней формулы следует, что в спектре тока будут присутствовать постоянная составляющая, гармоники  $n\omega_0$ , кратные частоте  $\omega_0$  и комбинационные гармоники на частотах  $n\omega_0 \pm \Omega$ .

Ниже на рисунке 10.4 приведен график спектра тока.

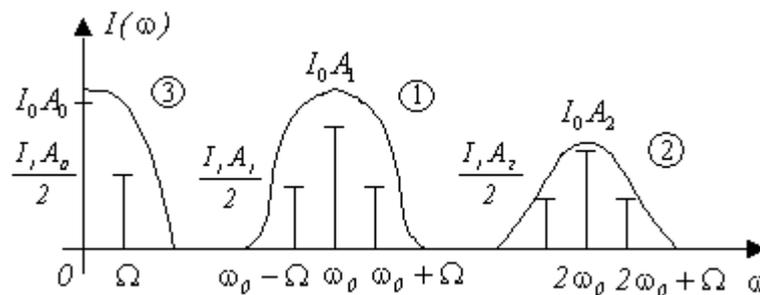


Рис.10.4. График спектра тока

Рассмотрим, какие устройства можно получить, если к нелинейному элементу, работающему в анализируемом режиме, подключать различные нагрузки.

1. Нагрузка - колебательный контур, настроенный на частоту  $\omega_0$ . Тогда на нагрузке будет выделяться АМ - колебание с несущей частотой  $\omega_0$ . Тогда получим АМ - модулятор без перестройки несущей частоты. Из полученного спектра видно, что коэффициент глубины модуляции зависит от отношения  $M = \frac{I_1}{I_0}$ . В свою очередь амплитуда тока

$I_1$  пропорциональна амплитуде модулирующего сигнала  $E_1$ . Таким образом, если огибающая входного сигнала попадает на линейный участок ВАХ, то мы получим амплитудный модулятор, на выходе которого огибающая АМ - колебания повторяет форму модулирующего сигнала (см. рис10.4., случай 1)

2. Нагрузка - колебательный контур настроен на частоту  $2\omega_0$ . Тогда на нагрузке получим АМ - колебание с несущей частотой  $2\omega_0$ . Это АМ - модулятор с преобразованием несущей частоты (см. рис10.4., случай 2).

### III. Режим с отсечкой, при подаче на вход АМ - колебания с тональной модуляцией.

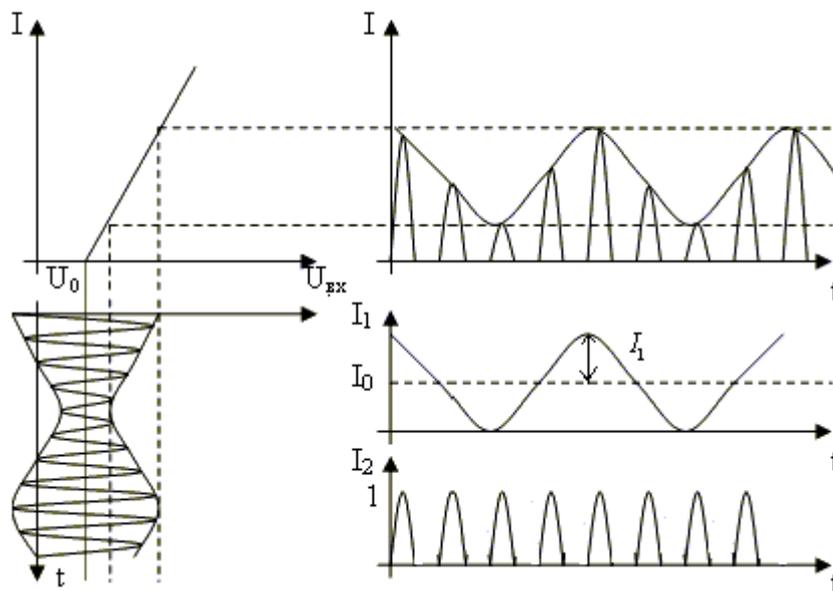


Рис.10.5

Пусть  $U_{\text{вх}}(t) = U_0 + E(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega_0 t$ . Из рисунка 10.5 видно, что, если постоянное смещение  $U_0$  подобрано таким образом, что отсечка осуществляется только по высокочастотному заполнению входного сигнала, то ток, протекающий через нелинейный элемент, повторяет форму тока, если на вход нелинейного элемента подано бигармоническое колебание. Тогда и спектр тока представлен теми же частотами, что и в предыдущем случае.

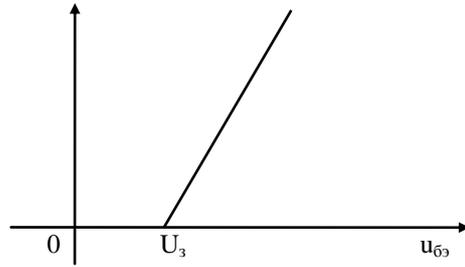
Если теперь в качестве нагрузки выбрать НЧ фильтр, то на этой нагрузке выделится сигнал, повторяющий форму входного сигнала (его огибающей). Тогда полученное устройство будет амплитудным демодулятором (детектором) (см. рис10.4., случай 3).

#### Контрольные вопросы к лекции 10

1. Какой режим нелинейного элемента называется режимом с отсечкой тока?
2. Какой вид аппроксимации ВАХ используется в режиме с отсечкой?
3. Какие частоты входят в состав спектра тока, если на вход БНЧ подан гармонический сигнал и рабочий участок ВАХ аппроксимирован линейно - ломаной функцией?
4. Как рассчитать спектр тока, если на вход БНЧ подан гармонический сигнал и рабочий участок ВАХ аппроксимирован линейно - ломаной функцией?
5. Какие радиотехнические устройства можно получить, используя БНЧ в сочетании с различными нагрузками, если рабочий участок ВАХ описывается линейно - ломаной функцией, а на вход нелинейного четырехполосника подан гармонический сигнал?
6. Почему для удвоения частоты гармонического сигнала следует выбирать угол отсечки  $\Theta = 60^\circ$ , а для утроения  $40^\circ$ ?
7. Какие частоты будут присутствовать в спектре тока, если рабочий участок ВАХ описывается линейно - ломаной функцией, отсечка осуществляется только по высокочастотному слагаемому входного сигнала, а на вход нелинейного четырехполосника подан бигармонический сигнал с частотами 2 кГц и 220 кГц?
8. Какую нагрузку следует использовать в сочетании с БНЧ, работающим в режиме, описанном в предыдущем вопросе, чтобы на этой нагрузке получить АМ-колебание с тональной модуляцией? Какой сигнал при этом должен действовать на входе?
9. Какие частоты будут присутствовать в спектре тока, если рабочий участок ВАХ описывается линейно - ломаной функцией, отсечка осуществляется только по несущей составляющей входного сигнала, а на вход нелинейного четырехполосника подано АМ - колебание с несущей частотой 220 кГц и частотой модуляции 2 кГц ?
10. Почему в режиме нелинейного резонансного усиления угол отсечки равен  $90^\circ$ ?

### Типовые задачи к экзамену

1. Прходная ВАХ транзистора аппроксимирована линейно-ломаной функцией (см.рис.). Определить спектр коллекторного тока, если к промежутку база-эмитер приложено напряжение  $u_{бэ}(t)=U_0+E\cos(2\pi f_0t)$  и  $U_0=2\text{в}$ ,  $E=2\text{в}$ ,  $f_0=4\text{кГц}$ ,  $U_3=3\text{в}$ ,  $S=50\text{ма/в}$ . Обсудить, какие устройства можно сформировать, используя эту нелинейность в сочетании с различными нагрузками.



2. Прходная ВАХ транзистора аппроксимирована линейно-ломаной функцией (см.рис.). Определить частоты спектра коллекторного тока, если к промежутку база-эмитер приложено напряжение  $u_{бэ}(t)=U_0+U_1\cos(2\pi Ft)+U_2\cos(2\pi f_0t)$  и  $U_0=0,2\text{в}$ ,  $U_1=0,1\text{в}$ ,  $U_3=0,5\text{в}$ ,  $f_0=10^5\text{Гц}$ ,  $F=10^3\text{Гц}$ ,  $U_2=0,4\text{в}$ . Обсудить, какие устройства можно сформировать, используя эту нелинейность в сочетании с различными нагрузками.
3. Прходная ВАХ транзистора аппроксимирована линейно-ломаной функцией (см.рис.). К промежутку база-эмитер приложено напряжение  $u_{бэ}(t)=U_0+E\cos(2\pi f_0t)$ . Определить по 4м-5 точкам зависимость амплитуды первой гармоники коллекторного тока от напряжения смещения  $U_0$  (статическую модуляционную характеристику), если  $E=0,2\text{в}$ ,  $U_3=0,4\text{в}$ ,  $S=50\text{ма/в}$ . Одно из значений  $U_0$  выбрать равным  $U_3$ , два меньше и два больше  $U_3$ . (Задачу решить с помощью нескольких студентов, предложив каждому свое значение  $U_0$ ).
4. Анализируя график статической модуляционной характеристики, полученной в задаче 3, предложите ориентировочные значения амплитуды модулирующего сигнала  $U_m$  и напряжения смещения  $U_0$ , при которых использование данного нелинейного элемента в схеме амплитудного модулятора было бы наиболее эффективным