

УДК 621.371

Р.Г. СИДОРЕНКО

*Харьковский университет Воздушных Сил, Украина***АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА  
В УСИЛИТЕЛЕ ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОМЕХИ**

Оценена степень воздействия узкополосных помех на показатели качества тракта приема и на этой основе определено отношение сигнал/помеха на выходе усилителя звуковых частот.

**тракт приема, узкополосная помеха, усилитель звуковой частоты, радиометрические системы****Введение**

Известно, что радиотепловой сигнал наблюдаемых поверхностей Земли обладает значительным динамическим диапазоном. Причем наиболее неадекватным элементом тракта приема радиометрической системы к уровням усиливаемых сигналов является усилитель звуковых частот (УЗЧ), в котором при больших уровнях сигналов будут проявляться нелинейные искажения (НИ). Под нелинейными искажениями понимается любое изменение сигнала, вызывающее искажения информации об излучаемой мощности и обусловленное нелинейностью оператора передачи тракта, в том числе в присутствии помех [1, 2].

В силу случайности уровня полезного сигнала даже присутствие детерминированной помехи, способствующей захождению рабочей точки в нелинейную область амплитудной характеристики усилителя, будет вызывать случайные нелинейные искажения сигнала.

Кроме того, на входе УЗЧ будет всегда присутствовать медленно меняющееся напряжение, являющееся результатом действия флуктуаций коэффициента усиления приемника, которое, складываясь с полезным сигналом, будет вызывать его нелинейные искажения.

В связи с этим возникла необходимость оценить степень НИ полезного сигнала в результате дейст-

вия возмущающих напряжений в усилителе звуковых частот.

**Целью статьи** является определение результатов увеличения уровня сигнала, а также присутствия помехи на входе усилителя звуковых частот.

**Результаты исследований**

При оценке нелинейных свойств по характеристикам оператора передачи тракта используются различного рода аппроксимации характеристик. Так, для трактов с резистивным характером нелинейности широкое распространение получила полиномиальная аппроксимация степенного вида

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^i . \quad (1)$$

При допустимой погрешности амплитудную характеристику УЗЧ можно представить в виде [3]:

$$y = a_1 x - a_3 x^3, \quad (2)$$

где  $x$  – входное воздействие;  $y$  – выходной сигнал;  $a_1, a_3$  – коэффициенты, характеризующие линейные и нелинейные свойства каскада.

Выбор аппроксимации характеристик полиномом третьей степени определяется минимально необходимым для исследования всех основных нелинейных эффектов в приемно-усилительных трактах, связанных с нелинейными искажениями. Подобный подход нашел широкое применение в анализе приемно-усилительных трактов и их каскадов [2, 4 – 7].

Для оценки нелинейных искажений сигнала в усилителе звуковых частот, как показывает анализ, наиболее приемлемым представляется использование аппарата многомерных частотных характеристик, позволяющих описывать нелинейные свойства каскада [8].

К достоинствам описания электрических цепей с помощью многомерных частотных характеристик относятся:

- 1) явная связь отклика и воздействия;
- 2) одновременный компактный учет инерционных и нелинейных свойств цепи;
- 3) обобщенное описание свойств тракта, которое в частных случаях для линейных цепей переходит в описание с помощью обычного комплексного коэффициента передачи для резистивной цепи – в степенной ряд вида (1);
- 4) блочное представление преобразования входного воздействия в виде суммы позволяет упростить задачу разделения нелинейных продуктов различных порядков;
- 5) возможность введения хорошо известного в инженерной практике понятия передаточной характеристики цепи, связывающей воздействие  $x$  и отклик  $y$  в явном виде;
- 6) простая связь применяемых на практике нелинейных критериев с характеристиками коэффициентов передачи цепи.

Представим усилитель звуковых частот в виде функционального устройства с передаточной характеристикой  $H(x) = a_1x - a_3x^3$ , структурная схема которого представлена на рис. 1. Тогда выходной сигнал в частотной области можно записать как [8]:

$$H(j\omega) = H_1(j\omega) \cdot X(j\omega) + \{H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) \cdot X(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3)\}^*, \quad (3)$$

где  $H_1(j\omega)$ ,  $H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3)$  – изображения коэффициентов передачи первого и третьего порядка соответственно, а символ  $\{\cdot\}^*$  означает операцию ассоциирования переменных.

Если известен спектр входного сигнала  $S(\omega)$ , то по известным коэффициентам передачи может быть

найдена автокорреляционная функция выходного сигнала устройства [8]:

$$K \approx \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_1(j\omega) \cdot H_1(-j\omega) S(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega + 3 \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_3(j\omega_1, -j\omega_1, j\omega_2) \times H_1(-j\omega_2) S(\omega_1) S(\omega_2) \times [\exp(j\omega_2\tau) + \exp(-j\omega_2\tau)] d\omega_1 d\omega_2. \quad (4)$$

На вход УЗЧ тракта приема в процессе работы будет поступать сигнал, соответствующий радиотепловой картине местности.

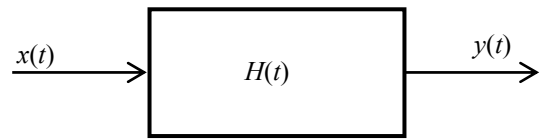


Рис. 1. Структурная схема УЗЧ

Если представить просматриваемую местность в виде однородных зон с постоянной, присущей данной зоне яркостной температурой, то сигнал на входе УЗЧ может быть выражен в виде стационарного телеграфного сигнала. Корреляционная функция такого сигнала будет иметь вид [9]:

$$R(\tau) = R_0 e^{-\frac{|\tau|}{T_c}}, \quad (5)$$

а его спектр запишется в виде

$$S(\omega) = 4R_0 \int_0^{\infty} e^{-\frac{|\tau|}{T_c}} \cos \omega\tau d\tau = \frac{4R_0 T_c}{T_c^2 \omega^2 + 1} = \frac{S_0}{T_c^2 \omega^2 + 1}, \quad (6)$$

где  $S_0 = 4R_0 T_c$ .

Выражение (6) хорошо согласуется с экспериментальными результатами, полученными в [8].

В выражениях (5), (6) величина  $T_c$  является временем корреляции изображений, зависящих от размеров однородных зон местности и скорости движения луча диаграммы направленности приемной антенны, а величина  $R_0$  зависит от излучательной способности местности.

Коэффициенты передачи для полиномиальной безынерционной нелинейности вида (2) будут иметь вид

$$H_1(j\omega) = a_1, \quad H_3(j\omega_1, j\omega_2, j\omega_3) = -a_3. \quad (7)$$

Тогда после подстановки (6) и (7) в (4) запишем:

$$K(\tau) \approx \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a_1 \cdot a_1 \frac{S_0}{T_C^2 \omega^2 + 1} \exp(j\omega\tau) d\omega -$$

$$- 3 \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a_3 a_1 \frac{S_0}{T_C^2 \omega_1^2 + 1} \cdot \frac{S_0}{T_C^2 \omega_2^2 + 1} \times$$

$$\times [\exp(j\omega_2 \tau) + \exp(-j\omega_2 \tau)] d\omega_1 d\omega_2 =$$

$$= \frac{a_1^2 S_0}{2T_C} e^{-\frac{\tau}{T_C}} - \frac{3S_0^2 a_3 a_1}{2T_0^2} e^{-\frac{\tau}{T_C}} = K_1(\tau) + K_3(\tau).$$

Из выражений (4), (8) видно, что первое слагаемое автокорреляционной функции выходного процесса  $K_1(\tau)$  определяется линейной частью характеристики УЗЧ, а второе слагаемое  $K_3(\tau)$  является продуктом нелинейных свойств каскада. Тогда степень нелинейности каскада может быть определена отношением средних мощностей линейной и нелинейной части выходного процесса

$$\left| \frac{K_1(0)}{K_3(0)} \right| = \frac{S_0 a_1^2 2T_C^2}{6S_0^2 a_3 a_1 T_C} = \frac{T_C}{3S_0} \cdot \frac{a_1}{a_3} = \frac{a_1}{12R_0 a_3}. \quad (9)$$

Из выражения (9) легко видеть, что нелинейные искажения процесса в каскаде пропорциональны его средней мощности, т.е. интенсивности излучения местности, а также зависят от нелинейных свойств характеристики каскада.

Отношение (9) можно расценивать как отношение сигнал/помеха на выходе каскада. Тогда, если положить, что на входе наряду с полезным сигналом действует возмущение с мощностью  $P_{\Pi}$ , можем записать суммарно действующий сигнал на входе каскада

$$P_{\Sigma} = R_0 + P_{\Pi} \quad (10)$$

и отношение сигнал/помеха

$$q_{\text{выхл}} = R_0 / P_{\Pi}. \quad (11)$$

Из выражения (8) с учетом (10) запишем для суммарного сигнала

$$\begin{cases} K_1(0) = 2a_1^2 (R_0 + P_{\Pi}) = 2a_1^2 R_0 + 2a_1^2 P_{\Pi}; \\ -K_3(0) = 24(R_0 + P_{\Pi})^2 a_3 a_1. \end{cases} \quad (12)$$

В (12) первое слагаемое  $2a_1^2 R_0$  является линейным откликом полезного сигнала на выходе усилителя, а второе слагаемое  $2a_1^2 P_{\Pi}$  и  $K_3(0)$  являются вредными, искажающими компонентами выходного

сигнала. Таким образом, отношение сигнал/шум на выходе при воздействии суммарного сигнала будет иметь вид

$$q_{\text{выхл}} = \frac{2a_1^2 R_0}{24(R_0 + P_{\Pi})^2 a_1 a_3 + 2a_1^2 P_{\Pi}} =$$

$$= q_{\text{вхл}} \frac{1}{12P_{\Pi} (q_{\text{вхл}} + 1)^2 \frac{a_3}{a_1} + 1}. \quad (13)$$

При  $P_{\Pi} \rightarrow 0$  выражение (13) преобразуется в выражение (9).

Обозначим

$$12 \frac{a_3}{a_1} P_{\Pi} = N_{\Pi}, \quad (14)$$

где  $N_{\Pi}$  – коэффициент влияния помехи, зависящий от относительного параметра нелинейности каскада, а также от мощности помехи.

На рис. 2 представлены зависимости  $q_{\text{выхл}} = f(q_{\text{вхл}})$  при различных значениях коэффициента влияния помехи.

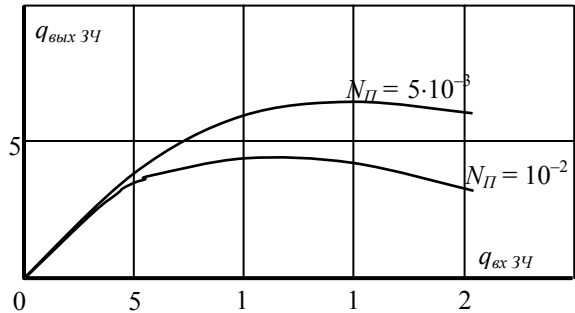


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/помеха на выходе УЗЧ от  $q_{\text{вхл}}$

Из представленных зависимостей видно, что  $q_{\text{вхл}}$  имеет оптимальные значения, при которых  $q_{\text{выхл}}$  максимально. Определим эти значения:

$$\frac{\partial q_{\text{выхл}}}{\partial q_{\text{вхл}}} =$$

$$= \frac{N_{\Pi} (q_{\text{вхл}} + 1)^2 + 1 - N_{\Pi} 2q_{\text{вхл}} (q_{\text{вхл}} + 1)}{[N_{\Pi} (q_{\text{вхл}} + 1)^2 + 1]^2} = 0. \quad (15)$$

Тогда из выражения (15) следует, что

$$N_{\Pi} (q_{\text{вхл}} + 1)^2 + 1 - N_{\Pi} 2q_{\text{вхл}} (q_{\text{вхл}} + 1) = 0,$$

отсюда находим

$$q_{\text{вхл}} = \sqrt{1 + 1/N_{\Pi}}. \quad (16)$$

При этом выражение (14) примет вид

$$q_{(вых\ 3Ч)\ макс} = \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{N_{II}}}}{N_{II} \left( \sqrt{1 + \frac{1}{N_{II}}} + 1 \right)^2 + 1}. \quad (17)$$

На рис. 3 представлена зависимость  $q_{ex\ опт}$  от коэффициента помехи  $N_{II}$ , а на рис. 4 – зависимость  $q_{(вых\ 3Ч)\ макс}$  от  $N_{II}$ .

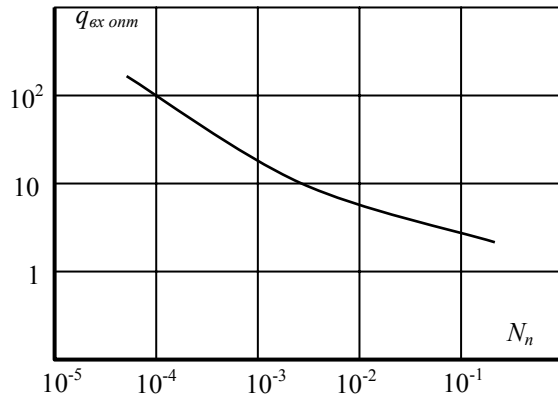


Рис. 3. Зависимость оптимального значения сигнал/помеха на входе от  $N_n$

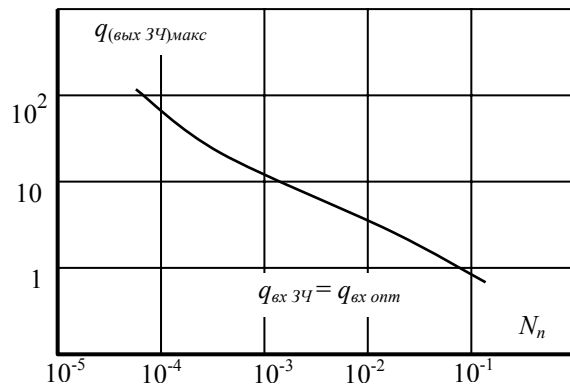


Рис. 4. Зависимость максимального значения сигнал/помеха на выходе от  $N_n$

Из рис. 3 можно видеть, что при больших уровнях помехи оптимальная величина сигнала приближается к уровню помехи. На рис. 4 зависимость  $q_{(вых\ 3Ч)\ макс}$  представляет собой граничную линию, выше которой значение  $q_{вых\ 3Ч}$  при заданном  $N_{II}$  получить невозможно.

### Выводы

Таким образом, из проведенного анализа можно заключить следующее:

– увеличение уровня сигнала, а также присутствие помехи на входе УЗЧ увеличивают искажение полезного сигнала на выходе каскада;

– при известных характеристиках нелинейности каскада, а также при известном, либо хорошо прогнозируемом уровне возможной помехи, можно задаваться оптимальным значением среднего уровня полезного сигнала на входе каскада.

### Литература

1. Богданович Б.М. Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах. – М.: Связь, 1980. – 280 с.
2. Пчелин Б.К. Специальные разделы высшей математики (функции комплексного переменного, операционное исчисление). – М.: Высш. шк., 1973. – 464 с.
3. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
4. Бедросян А., Райс А. Свойства выходного сигнала систем, описываемых рядами Вольтерра, при подаче на вход гармонических колебаний и гауссова шума // ТИИЭР. – 1971. – № 12. – С. 58-82.
5. Буссанг, Эрман, Грейман. Анализ нелинейных систем при воздействии нескольких входных сигналов // ТИИЭР. – 1974. – № 8. – С. 56-92.
6. Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. – М.: Наука, 1967. – 660 с.
7. Narayanan S. Application of Volterra Series to Intermodulation Distortion Analysis of Transistor Feedback Amplifiers // IEEE Trans. On Circuit Theory. – 1970. – V. CT-17, № 4. – P. 518-527.
8. Пупков К.А., Капалин В.И., Ющенко А.С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. – М.: Наука, 1976. – 448 с.
9. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. – М.: Сов. радио, 1974. – 552 с.

Поступила 31.01.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. научн. сотр. В.И. Антофеев, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Украины, Харьков.