

Основные показатели качества усилительных устройств

Рассмотрим основные показатели качества усилительных устройств, которые отражают степень искажения усиливаемого сигнала.

В общем случае усилитель совершает над поступающим на его вход сигналом нелинейное инерционное преобразование, описывающееся соответствующим оператором. При прохождении сигнала возникают линейные и нелинейные искажения. Соответственно различают показатели качества для линейного режима работы и характеристики, описывающие нелинейные свойства.

1. Линейный режим работы

В этом режиме уровни входных сигналов настолько малы, так что нелинейные свойства не проявляются. В линейном режиме можно использовать частотные методы анализа электрических цепей, в частности метод комплексных амплитуд. Рассмотрим эквивалентную схему усилительного каскада (рис. 1).

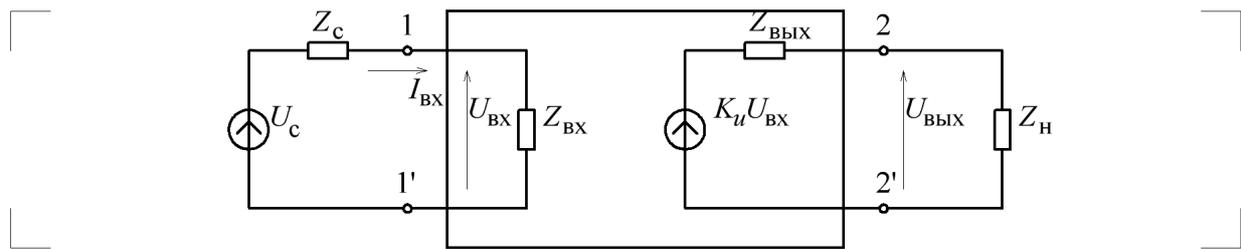


Рис. 1

На рис. 1 токи и напряжения представлены своими комплексными амплитудами, а эквивалентные параметры схемы – комплексными импедансами. Усилительные свойства отражает зависимый источник ЭДС.

Под действием ЭДС источника на входных зажимах появляется входное напряжение и протекает входной ток, а на вещественной составляющей входного сопротивления выделяется мощность $P_{ВХ}$. При условии согласования по входу источник отдает в усилитель максимальную мощность, называемую номинальной $P_{ВХНОМ}$. Аналогично согласование может обеспечиваться и по выходу.

Усилительные свойства описываются коэффициентом усиления, который определяют в установившемся режиме при гармоническом входном сигнале $u_{ВХ}(t) = U_{mВХ} \cos(2\pi ft + \varphi_{ВХ})$ фиксированной частоты f . Комплексная амплитуда входного сигнала $\tilde{U}_{ВХ} = U_{mВХ} \exp(j\varphi_{ВХ})$. В линейном режиме выходной сигнал также будет гармоническим $u_{ВЫХ}(t) = U_{mВЫХ} \cos(2\pi ft + \varphi_{ВЫХ})$, а его комплексная амплитуда будет иметь вид $\tilde{U}_{ВЫХ} = U_{mВЫХ} \exp(j\varphi_{ВЫХ})$.

Комплексный коэффициент усиления по напряжению на частоте f определяется отношением

$$K_U = \tilde{U}_{\text{ВЫХ}} / \tilde{U}_{\text{ВХ}}.$$

Сквозной коэффициент усиления по напряжению учитывает потери на сопротивлении источника сигнала

$$K_{U\text{СКВ}} = \tilde{U}_{\text{ВЫХ}} / \tilde{U}_{\text{С}},$$

где $\tilde{U}_{\text{С}}$ – комплексная амплитуда сигнала источника.

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = P_{\text{Н}} / P_{\text{ВХ}}.$$

При $Z_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} + j X_{\text{ВХ}}$ и $Z_{\text{Н}} = R_{\text{Н}} + j X_{\text{Н}}$ мощность в нагрузке

$$P_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{мВЫХ}}^2}{2 R_{\text{Н}}}, \text{ а мощность, поступающая на вход усилителя } P_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{мВХ}}^2}{2 R_{\text{ВХ}}}.$$

В отличие от коэффициентов усиления по току и напряжению, коэффициент усиления по мощности есть величина вещественная.

Отношение мощностей часто выражают в логарифмических единицах – децибелах: $K_{P\text{дБ}} = 10 \lg (P_{\text{Н}} / P_{\text{ВХ}})$.

Относительно этой величины сделаем ряд замечаний.

1). Выражение коэффициентов усиления в децибелах удобно при каскадировании усилителей и аттенуаторов. В этом случае коэффициенты складываются, а большие отношения выражаются небольшими числами.

2). Иногда децибелы используют для выражения абсолютных мощностей. В этом случае необходимо оговаривать относительно какого значения отсчитывается измеряемая мощность. Наиболее широко в радиотехнике используется выражение абсолютной мощности относительно 1 милливатта. Например, мощность 100 мВт выражается как 20 дБмВт или в англоязычной литературе 20 dBm.

3). Если два напряжения выделяются на одинаковых сопротивлениях (и только в этом случае), децибелы можно использовать для выражения отношения напряжений $K_{U\text{дБ}} = 20 \lg (U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}})$.

В линейном режиме искажения сигнала связаны с неравномерностью комплексного коэффициента усиления по частоте. В каждой частотной точке комплексный коэффициент передачи по напряжению определяется следующим образом

$$K_U(jf) = K_U(f) e^{j\varphi(f)},$$

где $K_U(f)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), $\varphi(f)$ – фазочастот-

ная характеристика (ФЧХ).

На практике фазочастотные искажения, вызванные нелинейностью ФЧХ, часто описывают с помощью частотной зависимости группового времени запаздывания (ГВЗ) или *group delay (GD)*

$$GD(f) = -\frac{d\varphi_U(f)}{df}.$$

Размерность ГВЗ – секунды.

Пример АЧХ приведен на рис. 2.

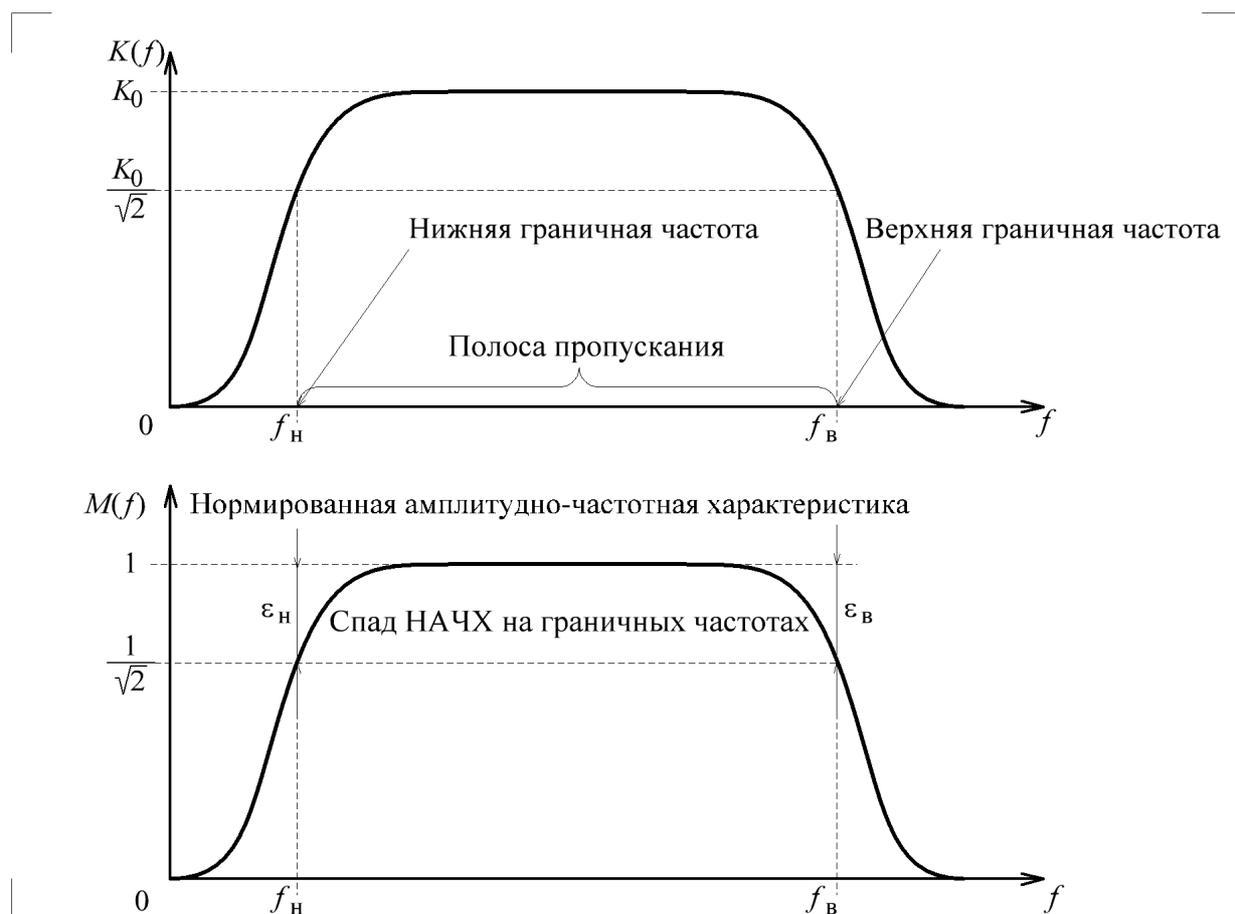


Рис. 2

Допустимая неравномерность АЧХ обычно задается спадом нормированной АЧХ на граничных частотах полосы пропускания ϵ_H и ϵ_B , а неравномерность ГВЗ – абсолютным значением.

Нормированная АЧХ (модуль нормированного коэффициента передачи) $M(f) = K(f) / K_0$ иногда выражается в децибелах $M_{дБ} = 20 \lg(M)$.

При усилении импульсных сигналов при скачкообразном изменении сигнала на входе в усилителе вследствие неравномерности АЧХ и ГВЗ возникают переходные процессы, приводящие к искажениям сигнала. Эти искажения проявляются

- искажением фронта, связанным с его затягиванием;
- колебательностью переходного процесса;
- искажением вершины импульса, характеризующимся ее спадом.

Искажения импульсного сигнала целиком описываются частотной зависимостью комплексного коэффициента передачи. Однако для удобства описания усилительных устройств используют специальные характеристики, отражающие искажения непосредственно во временной области. В частности при подаче на вход усилителя скачкообразного сигнала выделяют следующие параметры выходного сигнала (рис. 3а).

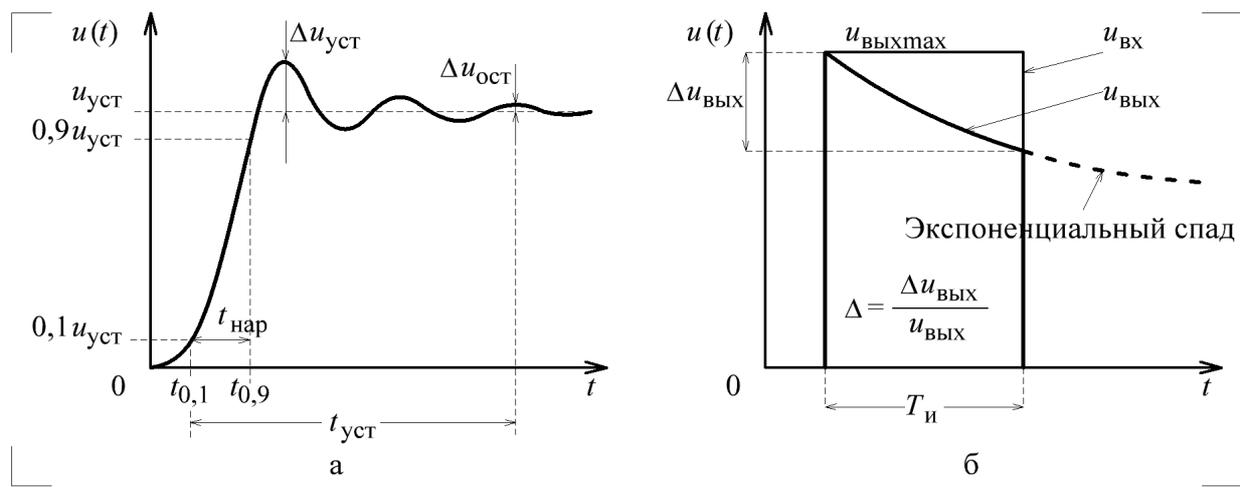


Рис. 3

Время нарастания фронта выходного сигнала $t_{нар}$ – это интервал времени, на котором выходное напряжение изменяется на величину, составляющую от 0,1 до 0,9 установившегося значения напряжения $u_{уст}$.

Время установления переходного процесса – это интервал времени от начала воздействия до того момента, когда $\Delta u_{ост}$ будет меньше заданной величины, например 0,1 или 0,01 от установившегося значения напряжения.

$\Delta u_{уст}$ – это выброс выходного напряжения относительно установившегося значения.

При подаче на вход импульса прямоугольной формы в усилителях, не являющихся усилителями постоянного тока возникает спад вершины Δ (рис. 3б).

Очевидно, что затягивание фронта импульса отражает инерционность схемы, т. е. связано со снижением усиления в области верхних частот, а спад вершины – снижение усиления в области нижних частот.

2. Параметры, характеризующие нелинейные искажения

Для характеристики нелинейных свойств используются более сложные ме-

тоды, поскольку характер и степень искажений зависит не только от формы, но и от интенсивности сигнала.

При преобразовании сигнала нелинейным устройством в спектре выходного сигнала могут появляться частотные составляющие, которые отсутствовали в исходном сигнале. В ряде случаев это свойство оказывается полезным и широко используется. Однако в усилительных устройствах появление новых частотных составляющих означает искажение сигнала.

Гармонические искажения (коэффициент гармоник)

На вход усилителя подается тестовый гармонический сигнал заданной фиксированной амплитуды и частоты $\omega_1 = 2\pi f_1$: $u_{\text{вх}}(t) = U_{m\text{вх}} \cos(\omega_1 t + \varphi_{\text{вх}})$. Аппроксимируя нелинейную зависимость выходного сигнала от входного степенным рядом и ограничиваясь сверху кубическим членом ряда, получаем выходной сигнал в виде $u_{\text{вых}} = K_0 + K_1 u_{\text{вх}} + K_2 u_{\text{вх}}^2 + K_3 u_{\text{вх}}^3$. Подставляя в последнее соотношение выражение для входного сигнала и применяя тригонометрические тождества, получаем

$$u_{\text{вх}}^2 = \frac{1}{2} U_{m\text{вх}}^2 (1 + \cos(2\omega_1 t)) ,$$
$$u_{\text{вх}}^3 = \frac{1}{4} U_{m\text{вх}}^3 (3 \cos(\omega_1 t) + \cos(3\omega_1 t)) .$$

Из последних соотношений видно, что в спектре выходного сигнала окажутся составляющие не только с частотой исходного сигнала ω_1 , но и составляющие кратных частот $2\omega_1$, $3\omega_1$, амплитуды которых зависят от коэффициентов K_1 , K_2 и K_3 , описывающих характер нелинейности (рис. 4).

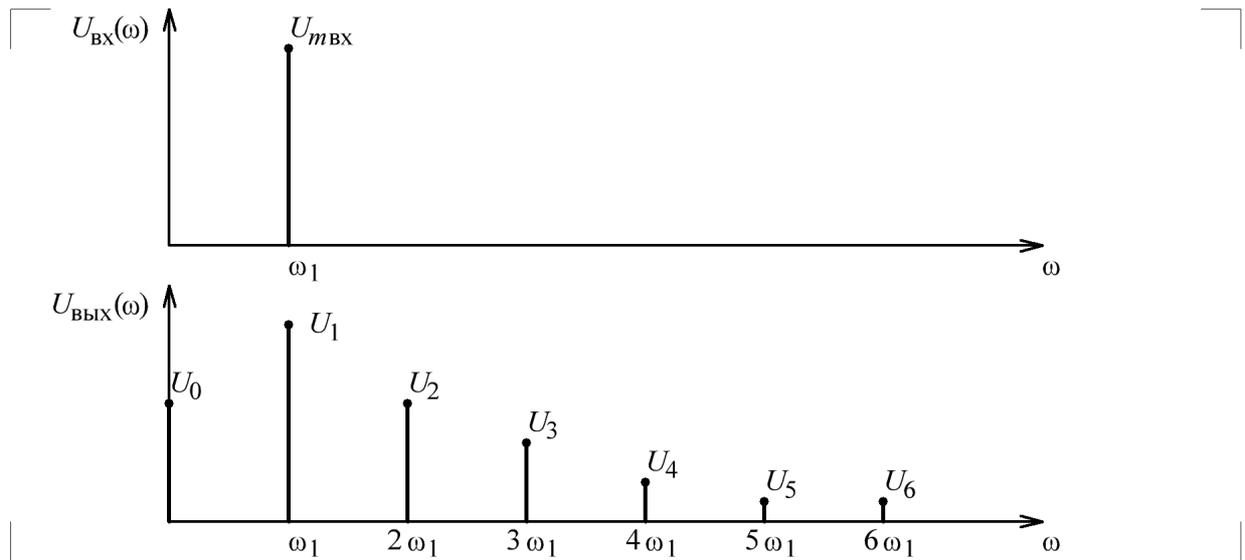


Рис. 4

Численно искажения гармонического сигнала описываются коэффициентом гармоник

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1},$$

который показывает, насколько малы высшие гармонические составляющие выходного сигнала, по сравнению с основным тоном.

Интермодуляционные искажения

Тестовый сигнал – 2-тоновой сигнал с одинаковыми амплитудами и близкими частотами $u_{\text{ВХ}} = U_m \cos(\omega_1 t) + U_m \cos(\omega_2 t)$. Подавая этот тестовый 2-тоновой сигнал на устройство с нелинейной характеристикой, получаем

$$u_{\text{ВЫХ}} =$$

$$K_0 + \quad \text{(постоянное смещение)}$$

$$K_1 (U_m \cos(\omega_1 t) + U_m \cos(\omega_2 t)) + \quad \text{(основные тона)}$$

$$K_2 (U_m \cos(\omega_1 t) + U_m \cos(\omega_2 t))^2 + \quad \text{(искажения 2 порядка } D_2)$$

$$K_3 (U_m \cos(\omega_1 t) + U_m \cos(\omega_2 t))^3 \quad \text{(искажения 3 порядка } D_3).$$

Воспользовавшись тригонометрическими тождествами, рассмотрим искажения 2 порядка подробнее:

$$D_2 = K_2 U_m^2 - \frac{1}{2} K_2 U_m^2 (\cos(2\omega_1 t) + \cos(2\omega_2 t)) + K_2 U_m^2 (\cos(\omega_2 - \omega_1)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t)$$

Здесь 1 слагаемое – это постоянное смещение, 2 слагаемое – это 2 гармоники входных сигналов, а 3 слагаемое – это так называемые интермодуляционные искажения 2 порядка (*intermodulation distortion* IMD_2).

Аналогичным образом описываются искажения 3 порядка.

$$D_3 = \frac{9}{4} K_3 U_m^3 (\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)) + \frac{1}{4} K_3 U_m^3 (\cos(3\omega_1 t) + \cos(3\omega_2 t)) + \frac{3}{4} K_3 U_m^3 (\cos(2\omega_1 - \omega_2)t - \cos(2\omega_1 + \omega_2)t) + \frac{3}{4} K_3 U_m^3 (\cos(2\omega_2 - \omega_1)t - \cos(2\omega_2 + \omega_1)t)$$

Здесь 1 слагаемое – это основные тона, 2 слагаемое – 3 гармоники входных сигналов, 3 и 4 слагаемые – это интермодуляционные искажения 3 порядка (IMD_3).

Спектральная картина выходного сигнала приведена на рис. 5.

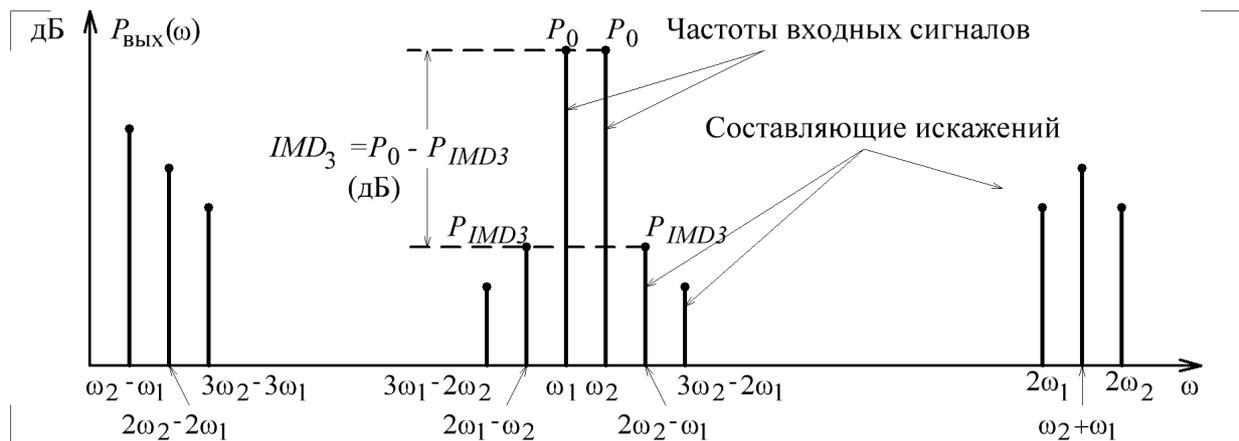


Рис. 5

На этом рисунке по вертикальной оси отложены мощности отдельных спектральных составляющих.

Если $\omega_1 \approx \omega_2$, то составляющие искажений вблизи суммарной и разностной частот могут быть устранены частотными фильтрами. Однако некоторые составляющие искажений 3 порядка сосредоточены вблизи частот тестовых сигналов и не могут быть устранены линейной фильтрацией. Кроме того, из приведенных соотношений следует, что составляющие искажений 3 порядка возрастают пропорционально кубу приращения входного сигнала. Поэтому важно избегать кубической нелинейности передаточной характеристики.

Численно интермодуляционные искажения оцениваются разностью мощностей выходных сигналов основных тонов и искажений, как правило, выража-

ющейся в децибелах. Для интермодуляционных искажений 3 порядка эта величина обозначена на рис. 5 как IMD_3 . Эту величину легко измерить, наблюдая выходной сигнал на экране анализатора спектра. Недостатком такого описания является зависимость этой разности от амплитуды входного воздействия. Поэтому часто используется следующий подход.

Для численной оценки интермодуляционных искажений используются гипотетические точки пересечения (IP_2 , IP_3) прямых, соответствующих мощностям составляющих основных тонов и составляющих искажений при повышении мощности входного сигнала (рис. 6).

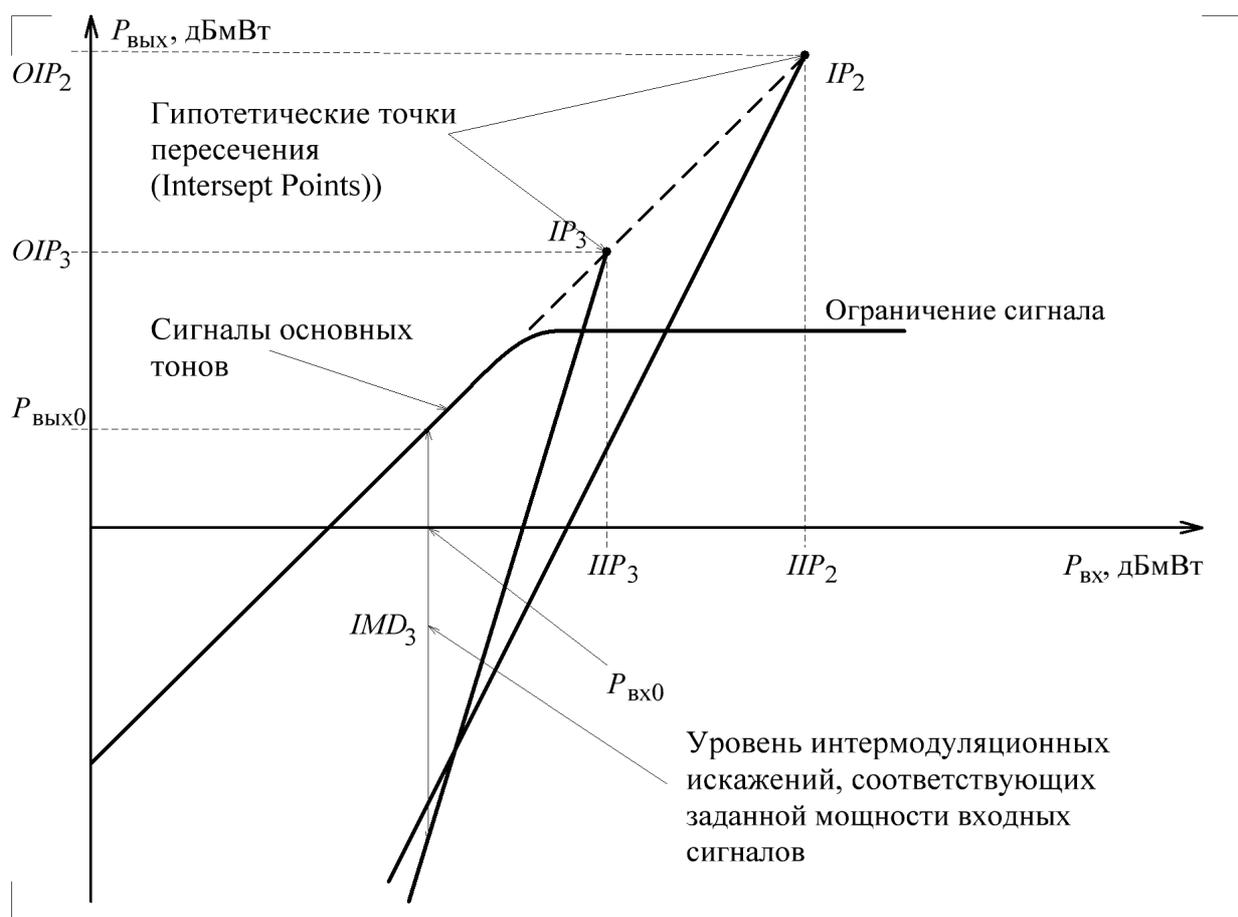


Рис. 6

На практике пересечение указанных прямых не может произойти, поскольку при повышении мощности входного сигнала раньше наступит ограничение сигнала на выходе. Однако такой метод обладает тем преимуществом, что положение этих гипотетических точек не зависит от уровня входного сигнала, оно характеризует собственные нелинейные свойства устройства.

Положение точек IP_2 , IP_3 проецируют либо на горизонтальную, либо на вертикальную ось и выражают либо уровнем входной мощности – *input* (IIP_3), либо уровнем выходной мощности – *output* (OIP_3).

Из геометрических соображений связь между уровнем интермодуляционных составляющих 3 порядка относительно уровня составляющих основных тонов и точкой IP_3 выражается соотношением

$$IMD_{3,дБн} = -2 (OIP_{3дБ,мВт} - P_{\text{ВЫХ,дБмВт}}),$$

где обозначение "дБн" означает уровень сигнала искажений относительно несущих (сигнальных) составляющих. Получение этой формулы иллюстрируется рис. 7.

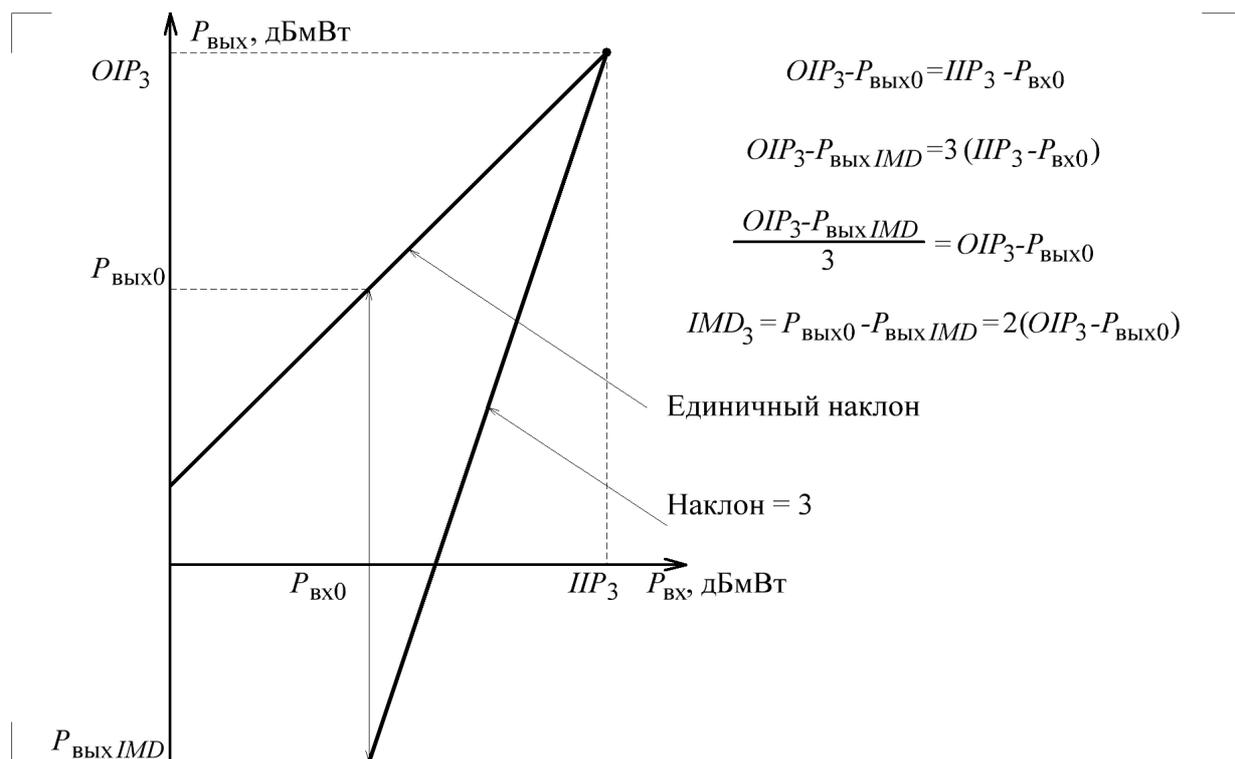


Рис. 7

Все величины здесь выражены в логарифмических единицах.

Иногда для оценки интермодуляционных искажений используется коэффициент интермодуляционных искажений, как отношение суммарной мощности интермодуляционных продуктов на выходе устройства к суммарной мощности полезного сигнала.

Динамический диапазон

Подадим на вход усилителя гармонический сигнал. При уменьшении его мощности наступит момент, когда мощность выходного сигнала станет равной собственной мощности шума усилителя, выделяющейся в нагрузке. Эта мощность, отнесенная ко входу устройства, может считаться нижней границей входных сигналов.

При увеличении входной мощности наступит момент, когда начнет сказываться

ваться нелинейность усилителя, в спектре выходного сигнала появятся высшие гармоники, а мощность 1 гармоники перестанет расти, наступит компрессия (ограничение) сигнала. Это верхняя граница входных сигналов (рис. 8).



Рис. 8

Часто верхнюю границу динамического диапазона оценивают мощностью сигнала, отнесенной ко входу или выходу, при которой коэффициент усиления уменьшается на 1 дБ по сравнению с его малосигнальным значением, как это показано на рис. 8. Эту мощность называют точкой компрессии "1 дБ".

Динамическим диапазоном называется отношение максимальной мощности к минимальной, выраженных в линейных единицах, или разность максимальной и минимальной мощностей, выраженных в дБ.