

Глава 2. Основные параметры и характеристики усилительных устройств

2.1 Понятие усилительного устройства

Усилитель предназначен для усиления напряжения, тока, мощности сигнала до уровня, необходимого для нормальной работы устройства, подключенного к его выходу; наряду с усилением он служит для развязки между источником сигнала и другими цепями, а также для согласования сопротивлений.

В современной технике широко используется принцип управления энергией, позволяющий при помощи затраты небольшого количества энергии управлять энергией, но во много раз большей. Форма как управляемой, так и управляющей энергии может быть любой: механической, электрической, световой, тепловой и т.д.

Частный случай управления энергией, при котором процесс управления является плавным и однозначным и управляемая мощность превышает управляющую, носит название усиления мощности или просто усиления; устройство, осуществляющее такое управление, называют усилителем.

Очень широкое применение в современной технике имеют усилители, у которых как управляющая, так и управляемая энергия представляет собой электрическую энергию. Такие усилители называют усилителями электрических сигналов.

Управляющий источник электрической энергии, от которого усиливаемые электрические колебания поступают на усилитель, называют источником сигнала, а цепь усилителя, в которую эти колебания вводятся, – входной цепью или входом усилителя. Источник, от которого усилитель получает энергию, преобразуемую им в усиленные электрические колебания, назовем основным источником питания. Кроме него, усилитель может иметь и другие источники питания, энергия которых не преобразуется в электрические колебания. Устройство, являющееся потребителем усиленных электрических колебаний, называют нагрузкой усилителя или просто нагрузкой; цепь усилителя, к которой подключается нагрузка, называют выходной цепью или выходом усилителя.



Рис. 2.1

Усилители электрических сигналов (далее просто усилители), применяются во многих областях современной науки и техники. Особенно широкое применение усилители имеют в радиосвязи и радиовещании,

радиолокации, радионавигации, радиопеленгации, телевидении, звуковом кино, дальней проводной связи, технике радиоизмерений, где они являются основой построения всей аппаратуры.

2.2 Классификация усилителей

Усилители делятся на ряд типов по различным признакам. По роду усиливаемых электрических сигналов усилители можно разделить на две группы:

- усилители гармонических сигналов, предназначенные для усиления периодических сигналов различной величины и формы, гармонические составляющие которых изменяются много медленнее длительности устанавливающихся процессов в цепях усилителя;

- усилители импульсных сигналов, предназначенные для усиления непериодических сигналов, например непериодической последовательности электрических импульсов различной величины и формы.

По ширине полосы и абсолютным значениям усиливаемых частот усилители делятся на ряд следующих типов:

- усилители постоянного тока или усилители медленно меняющихся напряжений и токов, усиливающие электрические колебания любой частоты в пределах от низшей нулевой рабочей частоты до высшей рабочей частоты;

- усилители переменного тока, усиливающие колебания частоты от низшей границы до высшей, но неспособные усиливать постоянную составляющую сигнала;

- усилители высокой частоты (УВЧ), предназначенные для усиления электрических колебаний несущей частоты, например принимаемых приемной антенной радиоприемного устройства;

- усилители низкой частоты (УНЧ), предназначенные для усиления гармонических составляющих не преобразованного передаваемого или принимаемого сообщения.

Усилители низкой частоты характеризуются большим отношением высшей рабочей частоты к низшей, лежащим в пределах 10 – 500 для усилителей звуковых частот и превышающим 10^5 для некоторых типов видеоусилителей.

Усилители с высшей рабочей частотой порядка сотен килогерц и выше, одновременно имеющие большое отношение высшей рабочей частоты к низшей, обычно называются широкополосными усилителями.

Избирательные усилители усиливают электрические сигналы в очень узкой полосе частот.

2.3 Основные характеристики усилителей

2.3.1 Амплитудная характеристика

Амплитудная характеристика представляет собой зависимость амплитуды (действующего значения) выходного напряжения от амплитуды (действующего значения) сигнала на выходе усилителя.

$$U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}}) \quad (2.1)$$

Идеальная АХ представляет собой прямую (рис. 2.2а), проходящую через начало координат, то есть коэффициент усиления идеального усилителя представляет собой постоянную величину, не зависящую от входного сигнала. При входном напряжении, равном нулю, на выходе усилителя всегда существует напряжение, обусловленное шумами усилителя (изгиб в нижней части характеристики). При больших входных напряжениях характеристика также отлична от прямой (верхний изгиб) вследствие нелинейных искажений усилителя из-за выхода рабочей точки усилительных элементов за пределы рабочего участка характеристик (реальная АХ изображена на рис 2.2б).

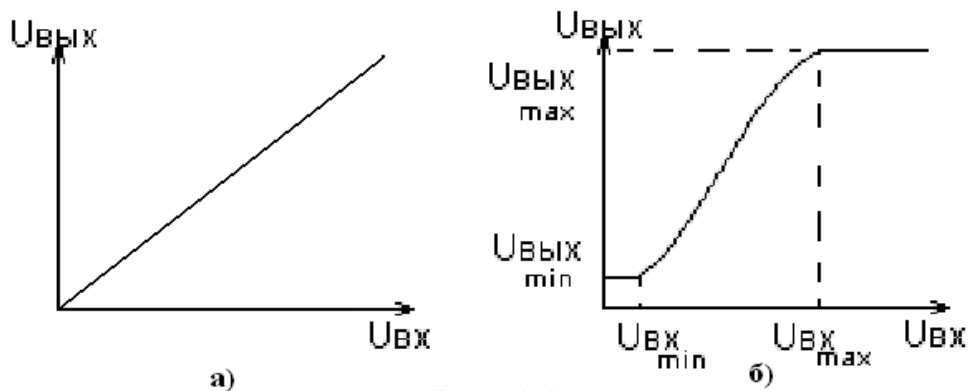


Рис. 2.2

Как видно из характеристики, усилитель может усиливать входные сигналы в диапазоне от U_{min} до U_{max} . Отношение максимального значения входного сигнала к минимальному, при котором усилитель не искажает выходной сигнал, называется динамическим диапазоном усилителя:

$$D_y = \frac{U_{\text{вх max}}}{U_{\text{вх min}}} \text{ или } D_y = 20 \lg \frac{U_{\text{вх max}}}{U_{\text{вх min}}}, \text{ дБ.} \quad (2.2)$$

2.3.2 Амплитудно-частотная характеристика усилителей (АЧХ)

Амплитудно-частотная характеристика представляет собой график зависимости коэффициента усиления K от частоты f (рис. 2.3), где по вертикальной оси откладывают K в линейном (логарифмическом) масштабе, а по горизонтальной оси – частоту f герцах.

Частоты $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ называются соответственно частотами нижнего и верхнего среза; коэффициент усиления на этих частотах при равномерной частотной характеристике равен:

$$K_{\text{н}} = K_{\text{в}} = 0.707 K_{\text{ср}} \quad (2.3)$$

где $K_{\text{ср}}$ – коэффициент усиления в области средних частот.

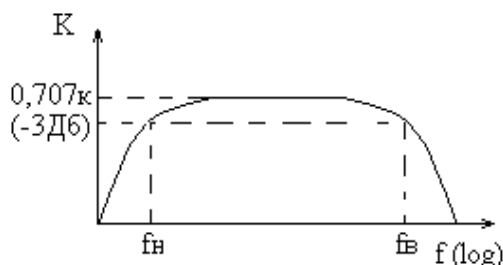


Рис. 2.3

По неравномерности частотной характеристики определяются частотные искажения, вносимые усилителем, в диапазоне рабочих частот и характеризуются коэффициентом частотных искажений M , который равен

$$M = \frac{K_{\text{ср}}}{K} \text{ или } M = 20 \lg \frac{K_{\text{ср}}}{K}, \text{ дБ}, \quad (2.4)$$

При $M = 1$ ($M = 0$ дБ) частотные искажения отсутствуют.

Допустимые частотные искажения зависят от назначения усилителя и могут изменяться в широких пределах. Так, для усилителей звуковых частот в аппаратуре среднего качества $M = 2 \dots 4$ дБ, а для измерительной аппаратуры усилители должны обладать частотными искажениями, составляющими десятые и даже сотые доли децибела.

При анализе усилителя часто используют нормированные АЧХ – это отношение $K(f)/K$, где K – коэффициент усиления на средних частотах (не зависит от частоты), (рис. 2.4).

По уровню 0,707 определяется частота нижнего среза и верхнего среза. Изменение коэффициента усиления в области нижних и верхних частот является результатом частотных искажений, которые можно считать линейными, т.к. изменяются лишь уровни частотных составляющих на выходе усилителя, но не появляется новых спектральных составляющих.

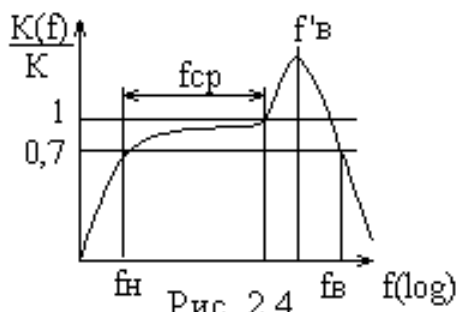


Рис. 2.4

Критерий выбора f_n и f_v для усилителя не всегда производится по уровню 0,707 или -3дБ . Это наиболее грубая и часто используемая мера частотных искажений. Часто для высококачественных усилителей, частоты среза определяются по уровню -1дБ , а для низкокачественных -10дБ . Соответственно частотные искажения определяются, как отличие нормированной АЧХ усилителя от идеальной АЧХ на заданных частотах среза, причем величина этой не идеальности определяется параметрами качества заданного усилителя. Мерой частотных искажений служит неравномерность в полосе пропускания усилителя, которая также задается параметрами качества усилителя

2.3.3 Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)

График ФЧХ представляет зависимость угла сдвига фазы φ между выходными и входными напряжениями от частоты (рис. 2.5).

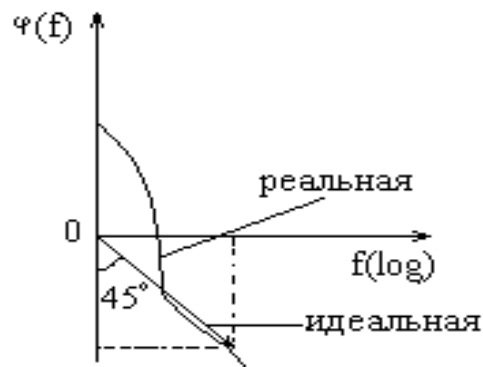


Рис. 2.5

Идеальной фазовой характеристикой усилителя, при которой он не вносит фазовых искажений, является прямая, проходящая под углом через начало координат.

Реальная ФЧХ не расходитя с идеальной только в области средних частот.

Очень часто ФЧХ не используют в качестве рассмотрения одного из параметров усилителя, т.к. считается, что человеческое ухо не воспринимает фазовое искажение.

Любой фазовый набег между входной спектральной составляющей и выходной спектральной составляющей приводит к искажению формы сигнала на выходе, следовательно, это также является проявлением линейных искажений, поэтому фазовые искажения относятся к линейным.

2.3.4 Переходная характеристика

Переходная характеристика представляет собой зависимость мгновенного значения выходного напряжения (тока) от времени при мгновенном скачкообразном изменении напряжения (тока) во входной цепи, описываемом единичной функцией $h(t) = 1(t)$.

При построении переходной характеристики пользуются нормированными величинами (по одной или двум осям).

На рис. 2.6 показана идеальная (рис. 2.6а) и реальная (рис. 2.6б) переходные характеристики.

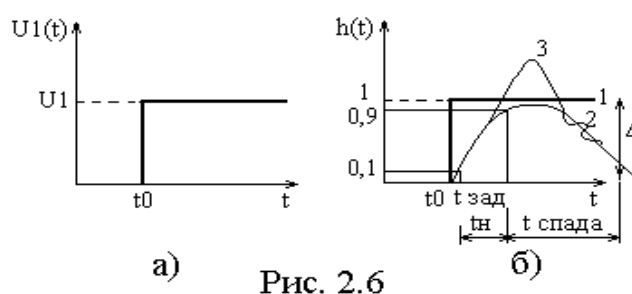


Рис. 2.6

2.3.5 Динамические характеристики

Сквозной динамической характеристикой - называется зависимость выходного напряжения (тока) от входной ЭДС сигнала (тока) при гармоническом его изменении. А, В - точки соответствия границам линейного участка (рис. 2.7).

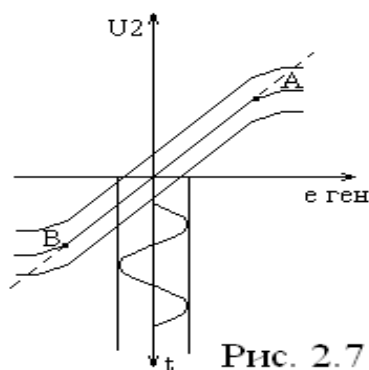


Рис. 2.7

Сквозная динамическая характеристика служит для оценки нелинейных искажений. Очень часто в результате температурных воздействий динамическая характеристика смещается и следовательно необходимо использовать меры для ее балансировки. Также существуют методы по сквозной характеристике коэффициента гармоник усилителя.

2.4 Основные параметры усилителей

В зависимости от вида усиливаемого сигнала различают коэффициенты усиления по току K_i , по напряжению K_u , по мощности K_p , которые соответственно равны

$$K_i = \frac{\Delta i_2}{\Delta i_1}; \quad K_u = \frac{\Delta u_2}{\Delta u_1}; \quad K_p = \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \quad (2.5)$$

или

$$K_i = 20 \lg \frac{\Delta i_2}{\Delta i_1}, \text{ дБ}; \quad K_u = 20 \lg \frac{\Delta u_2}{\Delta u_1}, \text{ дБ}; \quad K_p = 10 \lg \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}, \text{ дБ}. \quad (2.6)$$

Входными характеристиками усилителя являются: его входное напряжение, входной ток i_1 , входная мощность, при которой усилитель отдает в нагрузку заданную мощность, а также входное сопротивление r_{BX} . Входное сопротивление усилителя в общем случае носит комплексный характер, то есть наряду с активной составляющей может иметь и реактивные составляющие (входную емкость C_{BX}).

Входные параметры чаще всего определяют в условиях, при которых входное сопротивление можно считать активным и равным r_{BX} . в этом случае

$$\Delta u_1 = \Delta i_1 r_{BX}; \quad r_{BX} = \frac{\Delta u_1}{\Delta i_1}; \quad \Delta P = \Delta u_1 \Delta i_1. \quad (2.7)$$

Так как источник сигнала характеризуется источником эдс E и внутренним сопротивлением r_{BH} , то входное сопротивление может быть определено как

$$r_{BX} = \frac{E - i_1 r_{BH}}{i_1}. \quad (2.8)$$

К выходным параметрам усилителя относятся: расчетная выходная мощность сигнала P_2 , выходное напряжение u_2 или выходной ток i_2 , отдаваемые усилителем при работе его на заданное сопротивление нагрузки R_H , которое в общем случае носит комплексный характер. Так как выходные характеристики усилителя определяются в условиях, когда сопротивление нагрузки активно и равно R_H , то при этом

$$\Delta u_2 = \Delta i_2 R_H; \quad \Delta P_2 = \Delta i_2 \Delta u_2 = \Delta i_2^2 R_H = \frac{\Delta u_2^2}{R_H}. \quad (2.9)$$

Полоса пропускания: $\Delta f = f_B - f_H$. Полоса частот $\Delta f = f_B - f_H$, в которой коэффициент усиления изменяется по определенному закону с заданной точностью. Определяется АЧХ с учетом допустимого изменения коэффициента усиления на частотах среза (рис. 2.8).

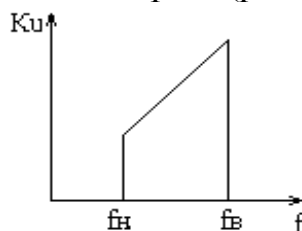


Рис. 2.8

2.5 Линейные искажения в усилителях

Обычно входной сигнал представляет собой сумму различных гармонических составляющих, находящихся между собой в определенных амплитудных и фазовых соотношениях. При несинусоидальном входном сигнале выходной сигнал усилителя может отличаться по форме от входного, из-за наличия в усилителе линейных искажений. К линейным искажениям относятся частотные и фазовые искажения.

Частотными искажениями называются искажения формы выходного сигнала из-за неодинакового усиления различных гармонических составляющих входного сигнала. Оценку вносимых усилителем частотных искажений можно сделать исходя из его частотной характеристики в рабочем диапазоне частот, в пределах которого параметры усилителя не выходят за пределы заданных допусков. Мерой частотных искажений является отклонение нормированной частотной характеристики усилителя от идеальной. Определяется на частотах среза и как неравномерность в полосе пропускания.

Фазовыми искажениями называются искажения, формы выходного сигнала которые обусловлены изменением взаимного расположения гармонических составляющих из-за фазовых сдвигов самого усилителя.

Слух не реагирует на изменение фазовых соотношений между гармоническими составляющими сложного сигнала в широком диапазоне интенсивности звука несмотря на то, что меняется форма сигнала. Поэтому в усилителях звуковых частот фазовые искажения не нормируют. В видеоусилителях электронных осциллографов фазовые искажения отражаются на качестве или форме изображения.

Фазовые искажения, вносимые усилителем, оцениваются по его фазовой характеристике и могут характеризоваться сдвигом фаз на заданных частотах либо временем задержки между различными частотными составляющими входного сигнала.

В усилителях импульсных сигналов может также происходить изменение формы выходного сигнала (импульса) за счет линейных искажений, которые обусловлены переходными процессами установления токов и напряжений в цепях, содержащих реактивные сопротивления (емкость, индуктивность).

Линейные искажения, обусловленные переходными процессами, называются переходными искажениями, для оценки которых используют переходную характеристику.

Переходные искажения разделяют на искажения фронтов и искажения импульсов.

Время установления фронтов обычно меньше длительности импульса. Поэтому для оценки искажения фронтов используют начальный участок переходной характеристики с растянутым масштабом горизонтального участка. Эту характеристику называют переходной характеристикой в области малых времен.

Искажения фронтов характеризуются временем установления $t_{уст}$ и выбросом δ (рис. 2.9).

Время установления $t_{уст}$ определяется временем нарастания сигнала от уровня 0,1 до уровня 0,9 своего установившегося значения

$$t_{уст} = t_{(0,9)} - t_{(0,1)} \quad (2.10)$$

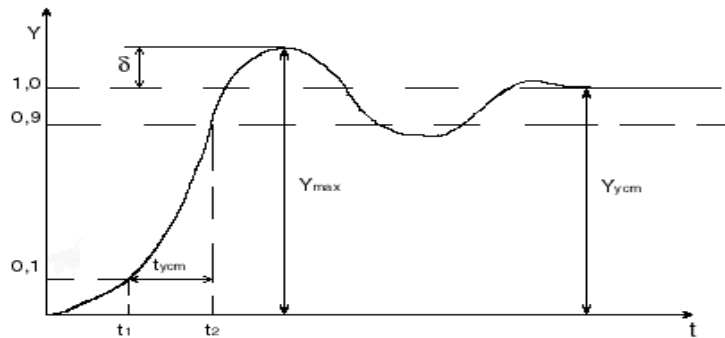


Рис. 2.9

Выброс δ определяется наибольшим превышением ординаты Y_{max} над установившимся значением, которое принимается равным единице (последующие быстроубывающие положительные и отрицательные выбросы обычно в расчетах не учитываются)

$$\delta = Y_{max} - 1 \quad \text{или} \quad \delta = 100(Y_{max} - 1), \quad \%. \quad (2.11)$$

Искажения вершины импульсов определяют при помощи переходной характеристики в области больших времен (переходная характеристика с сжатым масштабом по горизонтальной оси).

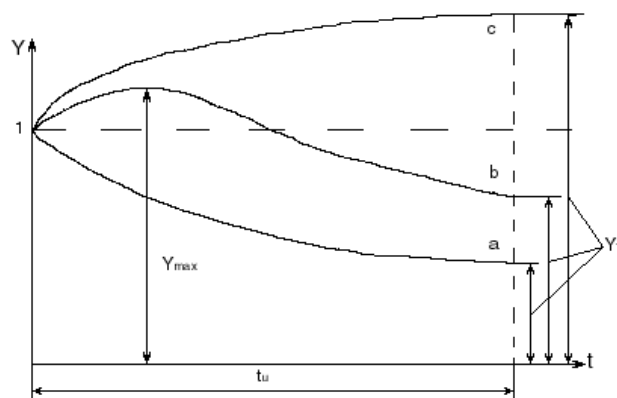


Рис. 2.10

Эти искажения оценивают относительной величиной Δ изменения ординаты в течение длительности импульса t_n (рис. 2.10), которая равна для характеристики а-типа (спад):

$$\delta\Delta = 1 - Y_T \quad \text{или} \quad \Delta = 100(1 - Y_T), \quad \%; \quad (2.12)$$

для характеристики b-типа (подъем):

$$\delta\Delta = Y_T - 1 \quad \text{или} \quad \Delta = 100(Y_T - 1), \quad \%; \quad (2.13)$$

для характеристики с-типа (изменение ординаты):

$$\delta\Delta = Y_{\max} - Y_T \quad \text{или} \quad \Delta = 100(Y_{\max} - Y_T), \quad \%. \quad (2.14)$$

2.6 Нелинейные искажения в усилителях

Наряду с линейными искажениями усилитель может вносить и нелинейные искажения выходного сигнала. Нелинейными искажениями сигнала называют изменение его формы, обусловленные нелинейностью характеристик усилительных элементов (транзисторов, электронных ламп).

В транзисторных усилителях нелинейные искажения возникают вследствие изменения формы входного сигнала из-за нелинейности входной характеристики, а также из-за снижения коэффициента усиления при больших амплитудах подводимого к транзистору сигнала.

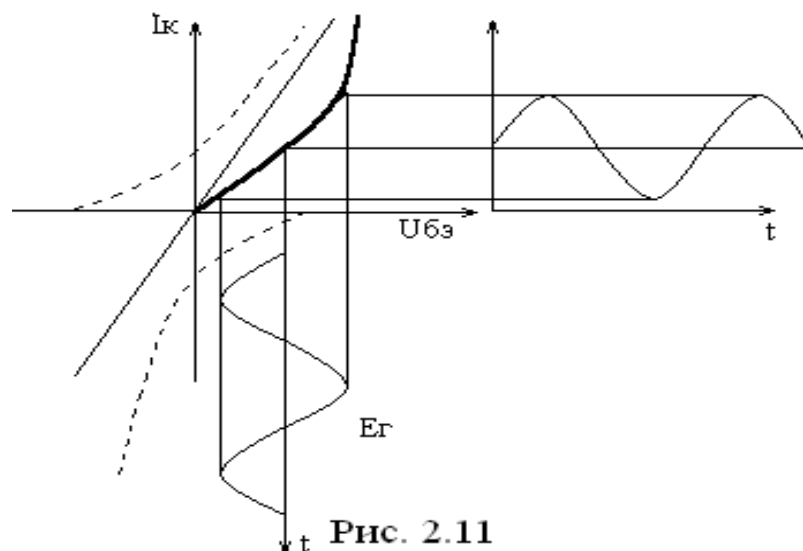


Рис. 2.11

Электронные лампы, как и транзисторы, могут изменять форму верхнего положительного полупериода вследствие изгиба характеристики при малых анодных напряжениях и нижнего отрицательного полупериода сигнала вследствие влияния сеточных токов, а также из-за сближения характеристик при малых токах. Нелинейные искажения оцениваются коэффициентом гармоник K_{Γ} , который равен

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1} \quad (2.15)$$

где I_1, I_2, \dots – действующие (амплитудные) значения соответственно первой (основной), второй и т.д. гармоник выходного тока.

U_1, U_2, \dots – действующие (амплитудные) значения соответственно первой (основной), второй и т.д. гармоник выходного напряжения.

Общий коэффициент гармоник равен

$$K_{\Gamma} = \sqrt{K_{\Gamma 2}^2 + K_{\Gamma 3}^2 + K_{\Gamma 4}^2 + \dots} \quad , \quad (2.16)$$

так как:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_2}{U_1} = K_{\Gamma 2}; \quad \frac{I_3}{I_1} = \frac{U_3}{U_1} = K_{\Gamma 3} \dots \quad (2.17)$$

где $K_{\Gamma 2}, K_{\Gamma 3} \dots$ – коэффициенты второй, третьей и т.д. гармоник.

Допустимое значение коэффициента гармоник зависит от назначения усилителя и составляет 0,1...0,7% для усилителей звуковых частот и 0,01...0,2 для усилителей многопроводной связи.