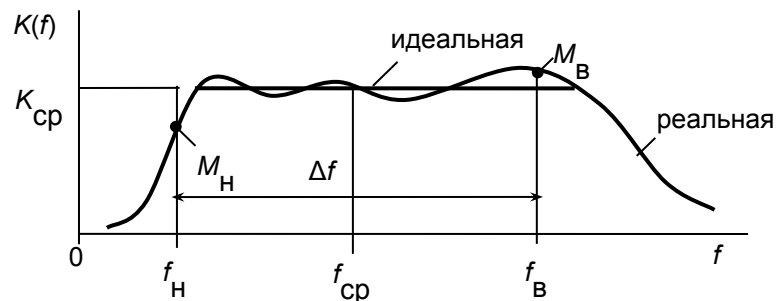


ТЕМА 10

ИСКАЖЕНИЯ В УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

ЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

- По характеру возникновения различают **линейные** и **нелинейные** искажения.
- Линейные искажения подразделяются на **амплитудно-частотные** (сокращённо – частотные), **фазочастотные** (сокращённо – фазовые) и **переходные**.
- Частотные искажения оценивают изменением коэффициента усиления реальной АЧХ $K(f)$, нормированного на его номинальное значение $K_{\text{ср}}$ на средней частоте $f_{\text{ср}}$ рабочего диапазона: $Y(f)_{\text{дБ}} = 20\lg(K(f) / K_{\text{ср}})$.
- В расчётах используют обратную величину, называемую **коэффициентом частотных искажений**: $M(f)_{\text{дБ}} = 20\lg(K_{\text{ср}} / K(f))$.
- Частоты $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$, на которых значения $M(f)$ достигают заданных (допустимых) величин $M_{\text{н}}$ и $M_{\text{в}}$, называются граничными, а область частот $\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$ называется **полосой пропускания** усилителя.



ЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

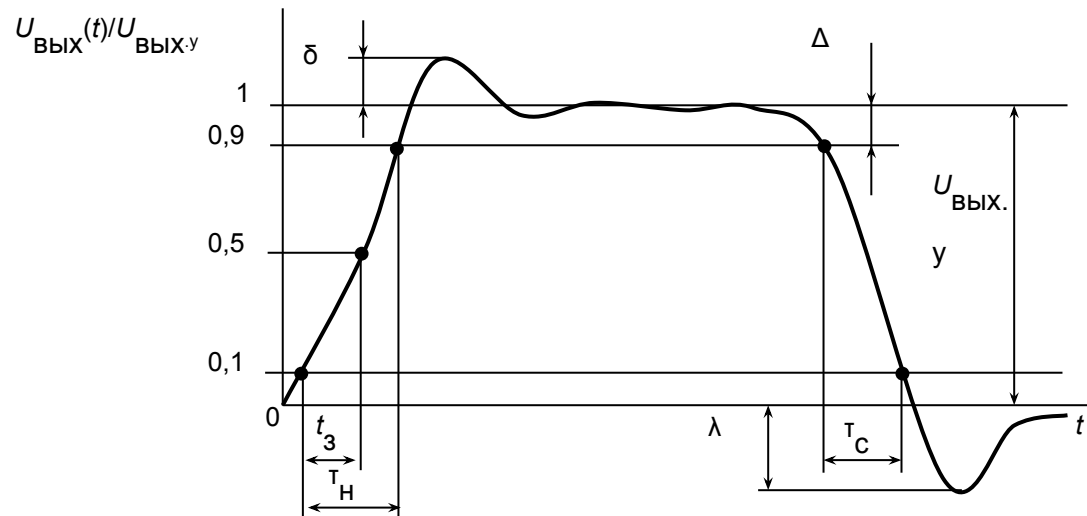
- У идеальной АЧХ $M(f)_{\text{дБ}} = \text{const} = 0$ в пределах полосы частот от $f_{\text{н}}$ до $f_{\text{в}}$. Реальная АЧХ может иметь в рабочей полосе неравномерность (пульсации) относительно среднего значения $K_{\text{ср}}$, которые не должны превышать заданные.
- Допустимая величина частотных искажений зависит от назначения усилителя и изменяется в пределах от сотых долей до единиц децибел.
- Поскольку общий коэффициент усиления для многокаскадного усилителя в децибелах равен $K_1(f) + K_2(f) + K_3(f) \dots$, то результирующий уровень искажений в децибелах для $f_{\text{н}}$ равен $M_{\text{н}\Sigma} = M_{\text{н}1} + M_{\text{н}2} + M_{\text{н}3} + \dots$, а для $f_{\text{в}}$ — $M_{\text{в}\Sigma} = M_{\text{в}1} + M_{\text{в}2} + M_{\text{в}3} + \dots$.
- **Фазовыми искажениями** называют изменения формы выходного сигнала, вызванные нелинейностью ФЧХ, то есть неодинаковым сдвигом фаз (временем задержки) между его отдельными гармоническими составляющими.
- Мерой фазовых искажений являются величины отклонения фазы $\Delta\phi$ реальной ФЧХ от идеальной или задержки $\Delta\tau_z$ реального ГВЗ от идеального $\tau_z = \text{const}$. Для оценки $\Delta\phi$ и $\Delta\tau_z$ идеальная ФЧХ проводится из начала координат как касательная к реальной. Уровень фазовых искажений оценивается значениями $\Delta\phi_{\text{н}}$, $\Delta\phi_{\text{в}}$ и $\Delta\tau_{z,\text{н}}$, $\Delta\tau_{z,\text{в}}$ на заданных частотах $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$.

ЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

- Сдвиг фазы первой (низшей) гармоники сложного колебания на $7...10^0$ заметно искажает его форму и поэтому в области нижних частот ФЧХ допускаются фазовые искажения не более $3...5^0$.
- В области верхних частот фазовые искажения меньше влияют на форму сигнала.
- Вследствие жёсткой связи ФЧХ с АЧХ, обычно удаётся получить фазовые искажения допустимой величины, обеспечивая заданный вид АЧХ с допустимыми частотными искажениями. Поэтому в большинстве случаев нет необходимости отдельно оценивать фазовые искажения.
- Исключение составляют определение устойчивости усилителей с цепями обратной связи и усилители фазометрических средств измерений.

ЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

- Переходными искажениями** называются искажения формы усиливаемого прямоугольного импульса (представляющего два разнополярных единичных скачка), вызванные процессами установления напряжений и токов в схеме усилителя, содержащей реактивные элементы (ёмкости и индуктивности). Искажения импульса связаны с нарастанием (фронтом), спадом (срезом) импульса и его вершиной.



ЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Искажения нарастания, вершины и спада импульса, оцениваются:

- временем установления t_n – определяется временем нарастания сигнала от уровня 0,1 до 0,9 установившегося значения $U_{\text{вых.у}}$;
- положительным выбросом δ – определяется максимальным превышением мгновенного значения сигнала над $U_{\text{вых.у}}$ и выражается в процентах от него;
- спадом или подъёмом вершины Δ – измеряется в процентах от значения $U_{\text{вых.у}}$ импульса.
- временем спада t_c – определяется временем спадания сигнала от уровня 0,9 до 0,1 значения $U_{\text{вых.у}}$;
- временем спада t_c – определяется временем спадания сигнала от уровня 0,9 до 0,1 значения $U_{\text{вых.у}}$;
- отрицательным выбросом λ – определяется максимальной величиной выброса ($\lambda \approx \Delta + \delta$) и выражается в процентах от значения $U_{\text{вых.у}}$;
- условной величиной t_z – запаздывание импульса, оценивается по времени нарастания сигнала от уровня 0,1 до уровня 0,5 значения $U_{\text{вых.у}}$.

Для многокаскадного усилителя результирующая величина времени нарастания подчиняется геометрическому закону суммирования.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

- Усилительные устройства как правило содержат нелинейные элементы (лампы, транзисторы, диоды, трансформаторы и др.), поэтому являются нелинейными и искажают форму выходного сигнала.
- Нелинейные искажения** при усилении гармонических сигналов характеризуются **коэффициентом гармоник** k_r , под которым понимают отношение действующего или амплитудного среднеквадратического значения всех гармоник выше первой к действующему или амплитудному значению первой гармоники на выходе усилителя,

$$k_r = \sqrt{U_{2f}^2 + U_{3f}^2 + \dots} / U_{1f} = \sqrt{I_{2f}^2 + I_{3f}^2 + \dots} / I_{1f}$$

где U_{1f} (I_{1f}) – номинальное выходное напряжение (ток) частоты гармонического сигнала, подаваемого на вход усилителя;

U_{2f} (I_{2f}), U_{3f} (I_{3f}) – гармонические составляющие выходного напряжения (тока), появившиеся за счёт нелинейных свойств усилителя.

Коэффициент k_r усилителя существенно зависит от величины входного напряжения.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

- Нелинейные искажения значительно увеличиваются, начиная с превышения $U_{\text{вх max}}$, когда заканчивается линейный участок АХ усилителя и, как правило, наибольшие нелинейные искажения возникают в выходных каскадах усилителей. Результирующий k_r для многокаскадных усилителей равен сумме k_r отдельных каскадов $k_{r \text{ общ}} = k_{r1} + k_{r2} + \dots + k_{rn}$.
- Иногда требуется определить частные коэффициенты гармоник: $k_{r2f} = U_{2f} / U_{1f}$ – второй, $k_{r3f} = U_{3f} / U_{1f}$ – третьей и т. д. Полный k_r от всех частных коэффициентов гармоник равен

$$k_r = \sqrt{k_{r2f}^2 + k_{r3f}^2 + \dots}$$

- Коэффициент k_r не даёт полной оценки искажений в усилителе, так как не учитывает возникновение комбинационных частот (суммарных и разностных), возникающих между различными частотами гармоник подаваемых на вход (перекрёстные или интермодуляционные искажения). Поэтому иногда нелинейность усилителей оценивают по амплитуде комбинационной (суммарной или разностной) частоты $U_k(f_1 \pm f_2)$, появляющейся на выходе усилителя при подаче на его вход двух гармоник с некратными частотами f_1 и f_2 . Тогда $k_r = U_k(f_1 \pm f_2) / U_{f1}$.

ВНУТРЕННИЕ ПОМЕХИ В УСИЛИТЕЛЯХ

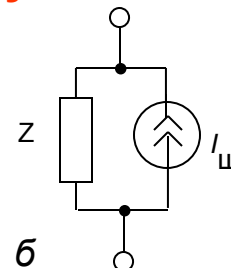
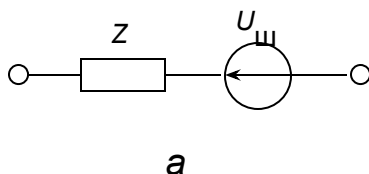
- Внутренними (собственными) помехами считаются любые воздействия, которые возникают в усилителе при усилении сигнала и затрудняют определение его параметров. Они возникают по различным причинам, основными из них являются: **наводка** (фон, и т. п.) **помеха от микрофонного эффекта**, **шумы** пассивных и усилительных элементов.
- **Наводка** - напряжение на выходе усилителя, появляющееся от воздействия на цепи усилителя посторонних источников сигналов и помех (соседних источников питания, усилителей, генераторов, электродвигателей и т. п.). Для его уменьшения цепи усилителя удаляют или экранируют от источников наводок, а в цепи питания вводят развязывающие фильтры.
- **Фон** - периодическое напряжение на выходе усилителя, имеющее частоту питающей сети переменного тока и/или кратные ей частоты. Фон появляется из-за недостаточного сглаживания выпрямленного напряжения, наводок от цепей переменного тока из-за плохой экранировки схемы и т.п. Для уменьшения уровня фона необходимо улучшать сглаживание напряжения питания, применять развязывающие цепи, экранировать отдельные цепи усилителя, правильно выбирать геометрию и уменьшать сопротивление общего провода схемы и т.д.

ВНУТРЕННИЕ ПОМЕХИ В УСИЛИТЕЛЯХ

- **Помеха от микрофонного эффекта** - напряжение на выходе усилителя, образованное от механических воздействий в виде звука, вибраций, ударов и т.п. на детали усилителя (например, лампы, конденсаторы). Для устранения этой помехи в усилителе, особенно в первом каскаде, следует применять компоненты, не обладающие микрофонным эффектом (например, транзистор).
- **Шумом** усилителя называют напряжение на выходе усилителя, вызванное беспорядочно изменяющимся напряжением на концах любого проводника цепи и элемента схемы, вследствие теплового движения в них заряженных частиц (электронов), а также процессами прохождения тока (эффект мерцания и дробовой эффект) в электронных лампах и полупроводниках.

СОБСТВЕННЫЕ ШУМЫ УСИЛИТЕЛЯ

- **Тепловые шумы сопротивлений**
- Шумящее комплексное сопротивление Z можно представить в виде эквивалентных схем, содержащих не шумящее сопротивление Z и генератор напряжения $U_{\text{ш}}$ или тока $I_{\text{ш}}$ ($U_{\text{ш}} = I_{\text{ш}} Z$). Энергия шумов сопротивления **не может быть передана другому сопротивлению, имеющему ту же температуру.**



- Действующее напряжение теплового шума на выводах сопротивления определяется формулой Найквиста:

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{4kT \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} R(f) df}$$

где $k = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана; T – температура сопротивления в K° ; $R(f)$ – активная составляющая сопротивления; $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$ – частоты участка рабочей полосы $\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$.

СОБСТВЕННЫЕ ШУМЫ УСИЛИТЕЛЯ

- Приведенное ко входу напряжение тепловых шумов усилителя (при 20 °С), выраженное в микровольтах, приближенно равно

$$U_{\text{ш}} \approx 0,13\sqrt{R_{\text{вх}}\Delta f}$$

где $R_{\text{вх}}$ – активное входное сопротивление в кОм; Δf – в кГц.

- Максимальная мощность, поступающая от эквивалентного источника шума на вход усилителя при равенстве его входного сопротивления внутреннему сопротивлению источника:

$$P_{\text{ш.мах}} = kT\Delta f.$$

- Эффективное напряжение шума на выходе усилителя в пределах рабочей полосы частот от $f_{\text{н}}$ до $f_{\text{в}}$ равно

$$U_{\text{ш.вых}} = \sqrt{4kT \int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} K^2(f)R(f)df}$$

где $K(f)$ – коэффициент передачи усилителя.

СОБСТВЕННЫЕ ШУМЫ УСИЛИТЕЛЯ

- Напряжение $U_{\text{ш}}$ активных усилительных элементов (электронных ламп или транзисторов) определяется по формуле

$$U_{\text{ш}} \approx 0,13 \sqrt{R_{\text{экв}} \Delta f}$$

где $R_{\text{экв}}$ - так называемое эквивалентное шумовое сопротивление лампы или транзистора.

- Уровень собственных шумов усилителя в основном определяется входным каскадом, так как его шумы усиливаются всеми последующими каскадами. Для уменьшения напряжения шумов требуется:
 - выбирать малошумящий усилительный элемент и специальный режим его работы;
 - оптимально выбирать активную составляющую входного сопротивления $R_{\text{вх}}$, с параллельно подключенной ёмкостью $C_{\text{вх}}$;
 - сужать полосу пропускания усилителя.
- Уровень шумовых помех интегральных микросхем (ИМС) выражают значением входного напряжения шума, относящемуся к заданной полосе частот Δf , принимаемой равной 1 Гц или 1 кГц.

ОЦЕНКА ШУМОВ И ПОМЕХ

- Собственные шумы усилителя оцениваются так называемым коэффициентом шума.
- **Коэффициент шума** определяется отношением мощности шумов, которую имеет на выходе реальный усилитель, к той мощности шумов, которую имел бы на выходе не шумящий (идеальный) усилитель, работающий в тех же условиях (и усиливающий только мощность тепловых шумов источника сигнала):

$$F_{\text{шдБ}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{ш}}}{P'_{\text{ш}}} \right)$$

где $P_{\text{ш}}$ – мощность шумов на выходе реальной схемы усилителя;

$P'_{\text{ш}}$ – мощность шумов в случае идеального усилителя.

- Очевидно, что $F_{\text{ш}} > 1$.
- Достигнутый в настоящее время минимальный коэффициент шумов усилителей равен приблизительно 1,1, что соответствует 0,5 дБ.
- Расчёт шумов многокаскадного усилителя сводится к расчёту общего уровня шумов входной цепи и первого каскада усилителя, приведенного к ЭДС источника сигнала.

ОЦЕНКА ШУМОВ И ПОМЕХ

- Наличие собственных помех в усилителе ограничивает $U_{\text{вх. min}}$ в АХ и определяет порог его чувствительности, то есть возможность усиления слабых сигналов.
- Среднеквадратическое значение всех напряжений помех, существующих в полосе рабочих частот на входе устройства определится как

$$U_{\text{п.общ}} = \sqrt{U_{\text{п1}}^2 + U_{\text{п2}}^2 + \dots + U_{\text{пn}}^2}$$

- Уровень помехи** (фона, шума и др.) – отношение напряжения помехи к номинальному напряжению полезного сигнала $U_{\text{п}} / U_{\text{с.ном}}$, выраженное в дБ. Напряжение помехи оценивается при отсутствии передачи основного сигнала.
- Часто используется **отношение сигнала к помехе** (с / п) – отношение величины номинального полезного сигнала к помехе (например, по напряжению) $U_{\text{с.ном}} / U_{\text{п}}$, выраженное в дБ.
- Защищённость от помех при передаче сигнала оценивается отношением среднеквадратических значений напряжений сигнала $U_{\text{с}}$ и помех $U_{\text{п}}$, выраженным в дБ. Может быть получено как разность абсолютных уровней по напряжению сигнала и помех на входе.

ОЦЕНКА ШУМОВ И ПОМЕХ

- Напряжение фона – среднеквадратическое значение суммы напряжений спектральных составляющих выходного сигнала с частотами кратными частоте питающего переменного тока (50, 100, 150 Гц и так далее), возникающих в результате недостаточной фильтрации напряжения источника питания или действия наводки:

$$U_{\phi} = \sqrt{U_{50}^2 + U_{100}^2 + U_{150}^2 + \dots}$$

- **Уровень фона** – отношение напряжения фона к напряжению сигнала $U_{\phi} / U_{\text{с.ном}}$ на выходе, выраженное в дБ и соответствующее номинальной выходной мощности.
- **Уровень шума** – отношение напряжения шума к напряжению сигнала $U_{\text{ш}} / U_{\text{с.ном}}$ на выходе, выраженное в дБ и соответствующее номинальной выходной мощности. В некоторых случаях задаётся отношение сигнал / шум $U_{\text{с.ном}} / U_{\text{ш}}$.
- **Коэффициент шума** – отношение мощностей сигнала и шума на входе $(P_{\text{с}} / P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$ отнесённое к отношению на выходе $(P_{\text{с}} / P_{\text{ш}})_{\text{вых}}$. Он показывает, во сколько раз увеличиваются шумы на выходе устройства за счёт шумов, возникающих в самом устройстве.

$$K_{\text{ш}} = \frac{(P_{\text{с}} / P_{\text{ш}})_{\text{вх}}}{(P_{\text{с}} / P_{\text{ш}})_{\text{вых}}}$$

ОЦЕНКА ШУМОВ И ПОМЕХ

- **Эффективная шумовая температура** – характеризует дополнительную мощность тепловых шумов (“белого” шума), вносимых устройством, и используется для оценки малошумящих устройств, коэффициент шума которых близок к единице:

$$T_{\text{эф}} = (K_{\text{ш}} - 1)T,$$

где T – температура в градусах Кельвина ($^{\circ}\text{K}$) внутреннего сопротивления эквивалентного генератора шума, равного входному сопротивлению устройства.

СТАБИЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ УУ

- ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК К ОТКЛОНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ
- При проектировании усилителей весьма важна оценка чувствительности их характеристик к отклонению параметров используемой элементной базы.
- **Чувствительность** представляет меру изменения той или иной характеристики усилителя, вызванного изменением параметров одного или нескольких элементов его схемы. Чувствительность обозначают символом S_x^A . Индекс A обозначает оцениваемую характеристику, а индекс x – указывает изменяемый элемент (причину).
- **Стабильность** того или иного показателя усилителя Π_i является некоторой функцией $\Pi_i = \Phi[a_1, a_2, \dots, a_k]$ от ряда дестабилизирующих факторов $a_j (j \in [1; k])$. В первую очередь к ним относят напряжение питания, температуру, разброс элементов схемы на стадии производства, старение элементов в процессе эксплуатации и т.п. Обычно полагают, что изменения этих факторов не связаны друг с другом, а вызванные ими отклонения параметра Π_i достаточно малы. Часто удобнее определять и нормировать относительную нестабильность параметра $\delta \Pi_i = \Delta \Pi_i / \Pi_i$