

7. УСИЛИТЕЛИ ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

7.1. Шумы усилительного тракта

Эквивалентные шумовые схемы пассивных и активных элементов

Принято считать [4], что усилители высокой (предельной) чувствительности – это усилители с большим коэффициентом усиления, при котором вместе с выходным сигналом заметное влияние на качество воспроизведения сигнала оказывают шумы. Для качественного воспроизведения необходимо, чтобы минимальное значение выходного сигнала в заданное количество раз превышало эффективное значение выходного шума. Такое минимальное значение и определяет чувствительность усилителя, а также его динамический диапазон. Для расчета чувствительности необходимо рассчитать эффективное значение шума в усилителе. Далее приводится материал, позволяющий выполнить такие расчеты.

Помехи в усилителях

Наряду с полезным сигналом в усилительном тракте действуют помехи – внутренние и внешние. Под внешними помехами мы будем понимать помехи, поступающие на вход усилителя извне, вместе с полезным сигналом. Внутренние помехи – это помехи, возникающие в самом усилителе. И внутренние и внешние помехи, смешиваясь с сигналом, искажают его. Если усилитель предназначен для усиления звуковых колебаний, то помехи ухудшают разборчивость речи и качество музыкальной передачи. Для качественного воспроизведения сигнала необходимо, чтобы его минимальный уровень (амплитуда напряжения) превышал уровень помехи в несколько раз. Обозначим минимальный уровень сигнала $U_{\text{вых мин}}$. На выходе усилительного тракта максимальный уровень сигнала $U_{\text{вых макс}}$ ограничен из-за появляющихся нелинейных искажений. По значениям минимальной и максимальной амплитуд сигнала определяют динамический диапазон выходных сигналов:

$$D_{\text{вых макс}} = U_{\text{вых макс}} / U_{\text{вых мин}} \cdot \quad (7.1)$$

Чем меньше помеха, тем меньше может быть минимальный уровень сигнала при сохранении качества воспроизведения сигнала, а, следовательно, больше динамический диапазон выходных сигналов. Уменьшение уровня внешних помех,

поступающих на вход усилителя вместе с полезным сигналом, необходимо осуществлять в источнике сигнала. Уменьшение внутренних помех усилителя – это задача разработчиков усилителя. Для борьбы с внутренними помехами необходимо знать природу помех. По своей природе внутренние помехи усилителя представляют собой случайные колебания – шум. Источниками шума являются пассивные элементы (резисторы) и активные элементы (диоды, транзисторы, микросхемные операционные усилители). Для определения динамического диапазона усилителя необходимо рассчитать уровень шума элементов, составляющих усилитель.

Эквивалентные шумовые схемы пассивных и активных элементов

Шум резисторов.

На выводах резистора, нагретого до температуры T , возникает шумовая ЭДС. Эффективное значение шумовой ЭДС на всех частотах одинаково, другими словами, шум резистора – это "белый" шум. На эквивалентных шумовых схемах, используемых при анализе шумовых характеристик устройства, шумящий резистор заменяют последовательным соединением нешумящего резистора и шумовой ЭДС $e_{шR}$, как это показано на рис. 7.1.

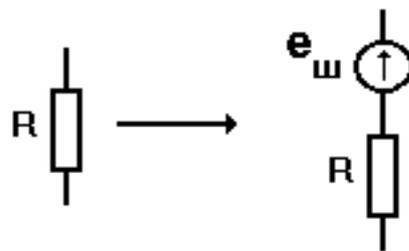


Рис. 7.1. Эквивалентная шумовая схема резистора.

Средний квадрат шумовой ЭДС (дисперсия) определяется выражением:

$$\overline{(e_{шR})^2} = 4kTR\Delta f, \quad (7.2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, T - температура сопротивления в $^{\circ}K$, R – сопротивление (действительная составляющая полного сопротивления), Δf – полоса пропускания усилителя.

Если цепь содержит несколько резисторов, то на эквивалентной шумовой схеме их можно заменить одним резистором и одной шумовой ЭДС, как это показано на рис. 7.2.

Резистор $R_{\text{сумм}}$ и средний квадрат шумовой ЭДС определяются выражениями:

$$R_{\text{сумм}} = \frac{(R1+R2)R3}{R1+R2+R3}; \quad \overline{(e_{\text{ш сумм}})^2} = 4kTR_{\text{сумм}}\Delta f.$$

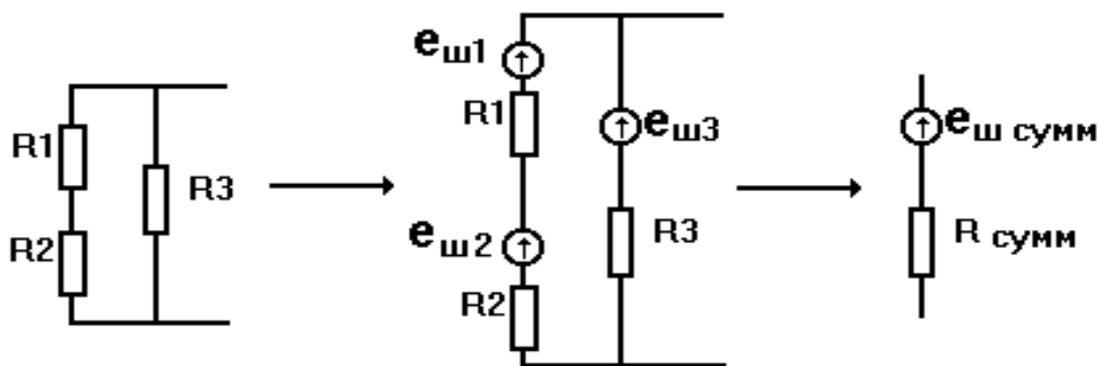


Рис. 7.2. Эквивалентные шумовые схемы соединений резисторов.

В ряде случаев шумящий резистор удобно заменить эквивалентной схемой, куда входит источник шумового тока, как это показано на рис. 7.3.

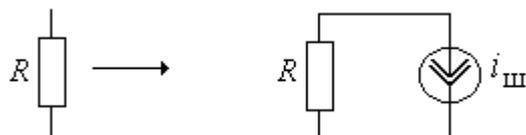


Рис. 7.3. Эквивалентная шумовая схема резистора с генератором шумового тока.

Квадрат шумового тока в схеме рис. 7.3 определяется выражением:

$$\overline{(i_{\text{ш}R})^2} = 4kTG\Delta f, \quad (7.3)$$

где $G = 1/R$.

Шумы активных элементов.

Шум диода (шум $p-n$ -перехода).

Эквивалентная шумовая схема $p-n$ -перехода приведена на рис. 7.4.

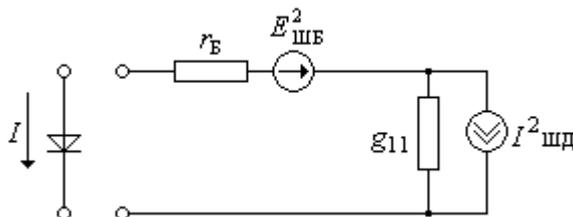


Рис. 7.4. Эквивалентная шумовая схема $p-n$ -перехода

В эквивалентную схему включают шумовую ЭДС, появление которой обусловлено наличием сопротивления r_b . Квадрат шумовой ЭДС определяется выражением:

$$E^2_{шб} = 4kTr_b\Delta f, \quad (7.4)$$

где Δf – полоса пропускания устройства, в схему которого входит диод.

Еще одним источником шума является дробовой шум, который возникает в результате флуктуаций постоянного прямого тока через диод I . Этот источник представлен на эквивалентной схеме генератором токового шума $I^2_{шд}$ и проводимостью g_{11} . Квадрат шумового тока $I^2_{шд}$ определяется выражением:

$$I^2_{шд} = 2kTg_{11}\Delta f = 2eI\Delta f, \quad (7.5)$$

где e – заряд электрона.

Шум транзисторного каскада

Основное назначение транзисторного каскада – усилить сигнал. Однако, как было сказано ранее, через усилитель проходит не только сигнал, но и шумы.

Выше были рассмотрены шумы пассивных элементов – резисторов и шум активного элемента – p - n -перехода диода. Этот материал будет использован при описании шумовых свойств транзисторного каскада. На рис. 7.5 и 7.6 приведены принципиальная и эквивалентная шумовая схема транзисторного каскада.

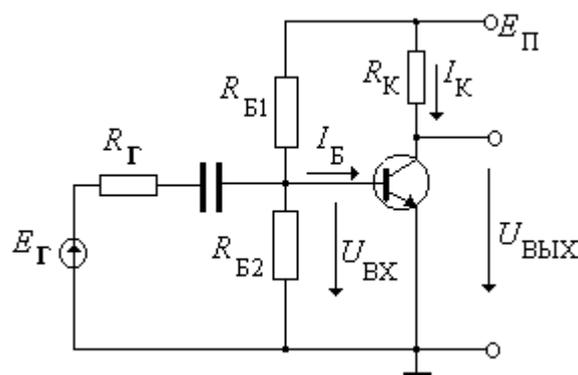


Рис. 7.5. Принципиальная схема транзисторного каскада

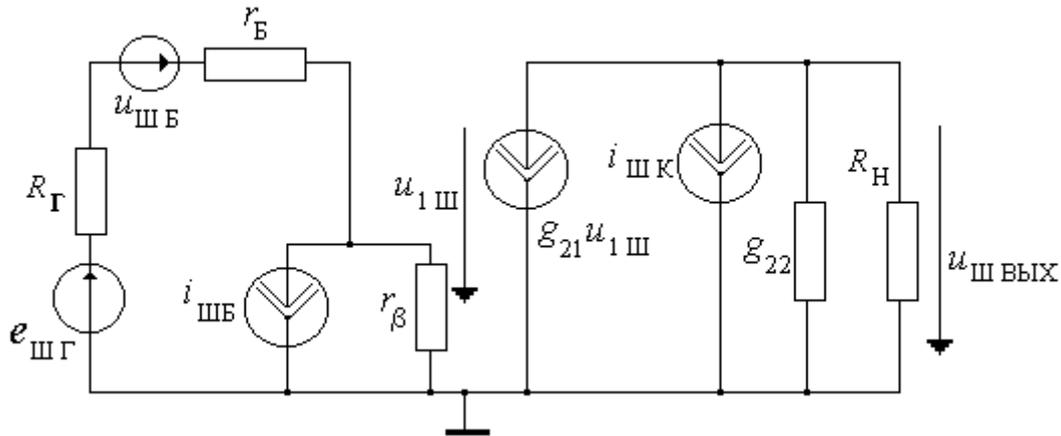


Рис. 7.6. Эквивалентная шумовая схема каскада

Выражения, описывающие шумовые источники:

- шум сопротивления генератора:

$$\overline{(e_{шГ}^2)} = 4kTR_Г\Delta f; \quad (7.6)$$

- шум сопротивления $r_Б$:

$$\overline{(u_{шБ}^2)} = 4kTr_Б\Delta f; \quad (7.7)$$

- дробовой шум базового тока:

$$\overline{(i_{шБ}^2)} = 2eI_Б\Delta f = 2kT\Delta f / r_Б, \quad (7.8)$$

где $I_Б$ – постоянная составляющая тока базы,

- дробовой шум коллекторного тока:

$$\overline{(i_{шК}^2)} = 2eI_К\Delta f, \quad (7.9)$$

где $I_К$ – постоянная составляющая коллекторного тока.

В выходном контуре эквивалентной шумовой схемы каскада протекает выходной шумовой ток. Его составляющие: дробовой шум коллекторного тока (выражение (7.9)), шум сопротивления нагрузки

$$\overline{(E_{шН}^2)} = 4kTR_Н\Delta f \quad (7.10)$$

и шум источника тока $g_{21} \cdot u_{1ш}$, значение которого определяется результирующим шумовым напряжением $u_{1ш}$ во входном контуре.

Найдем результирующее значение квадрата шумового напряжения $\overline{(u_{1ш}^2)}$ входного контура, используя выражения (7.6) ÷ (7.8):

$$\overline{(u_{1ш}^2)} = \frac{\overline{(e_{шГ}^2)} \cdot r_{\beta}^2}{(R_{\Gamma} + r_{\delta} + r_{\beta})^2} + \frac{\overline{(u_{ш\delta}^2)} \cdot r_{\beta}^2}{(R_{\Gamma} + r_{\delta} + r_{\beta})^2} + \frac{\overline{(i_{ш\delta}^2)} \cdot r_{\beta}^2 \cdot (R_{\Gamma} + r_{\delta})^2}{(R_{\Gamma} + r_{\delta} + r_{\beta})^2}. \quad (7.11)$$

Шумовое напряжение $\overline{(u_{1ш})}$ управляет источником тока $g_{21} \cdot u_{1ш}$. Квадрат шумового напряжения $\overline{(u_{2ш}^2)}$ определяется выражением:

$$\overline{(u_{2ш}^2)} = (g_{21} \cdot R_{Н})^2 \cdot \overline{(u_{1ш}^2)}, \quad (7.12)$$

где $g_{21} R_{Н}$ – коэффициент усиления каскада по напряжению.

Квадрат результирующего шумового напряжения $\overline{(u_{шВЫХ}^2)}$ рассчитывается по формуле:

$$\overline{(u_{шВЫХ}^2)} = (g_{21} \cdot R_{Н})^2 \cdot \overline{(u_{1ш}^2)} + \overline{(i_{шК}^2)} + \overline{(E_{шН}^2)}, \quad (7.13)$$

где два последних слагаемых определяются выражениями (7.9) и (7.10).

В выражении (7.13) основной вклад дает первое слагаемое. В связи с этим приближенно можно считать, что $\overline{(u_{шВЫХ}^2)}$ определяется только шумами входного контура каскада.

Шум операционного усилителя.

Схема операционного усилителя с источниками шума приведена на рис. 7.7.

Заземляя неинвертирующий вход и подключая генератор сигнала, получим эквивалентную шумовую схему, приведенную на рис. 7.8.

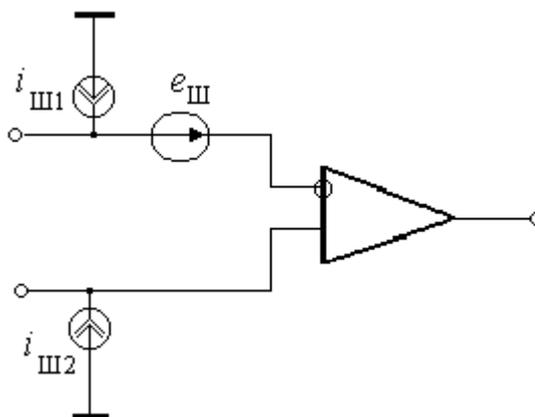


Рис. 7.7. Схема операционного усилителя с источниками шума.

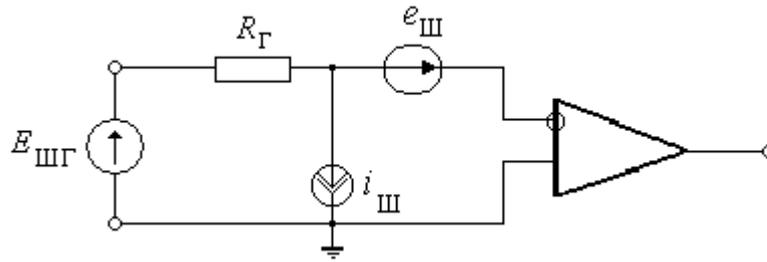


Рис. 7.8. Эквивалентная шумовая схема ОУ.

В соответствии с рис. 7.8 для суммарного напряжения шума на входе ОУ можно записать выражение:

$$\overline{(e_{ш\text{ сумм}}^2)} = \overline{(e_{шГ}^2)} + \overline{(e_{ш}^2)} + \overline{(i_{ш}^2)} \cdot R_{Г}^2, \quad (7.14)$$

где $\overline{(e_{шГ}^2)} = 4kTR_{Г}\Delta f$, а $\overline{(e_{ш}^2)}$ и $\overline{(i_{ш}^2)}$ – приведенные ко входу источники шумового напряжения и тока, характеризующие собственный шум ОУ. Параметры этих источников берутся из паспортных данных ОУ.

7.2. Динамический диапазон усилителя, ограниченный шумами

Методика расчета динамического диапазона

В многокаскадном усилителе шумит каждый каскад. Однако, при определенных условиях основной вклад в результирующий шум всего многокаскадного усилителя вносит первый каскад, а значит в первом приближении можно учитывать шум только первого каскада. Проведем расчет коэффициент шума многокаскадного усилителя.

Коэффициент шума многокаскадного усилителя

На рис. 7.9 приведена структурная схема трехкаскадного усилителя.

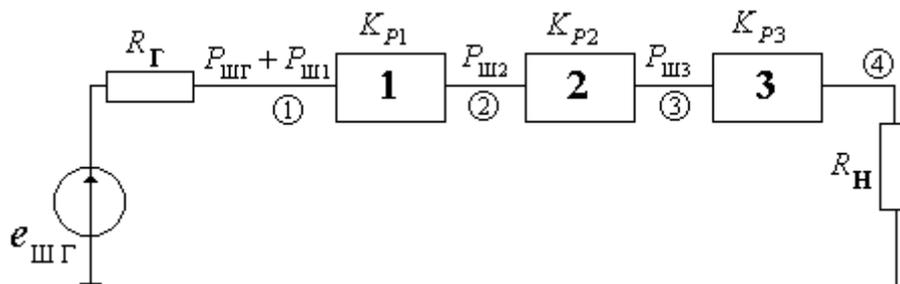


Рис. 7.9. Схема для расчета коэффициента шума усилителя.

Сигнал подается на вход первого каскада от источника с сопротивлением R_{Γ} . На этот же вход поступает шум, источником которого является тепловой шум сопротивления R_{Γ} . При исследовании шумовых характеристик оперируют не напряжениями и токами, а средним квадратом шумового напряжения, или, что то же самое – мощностью шума. Обозначим мощность теплового шума сопротивления генератора через $P_{\text{ШГ}}$. Мощность шума 1-го каскада приведем (пересчитаем) ко входу и обозначим $P_{\text{Ш1}}$. Аналогично обозначим приведенный ко входу шум 2-го и 3-го каскадов. Мощность шума сопротивления нагрузки обозначим как $P_{\text{Ш4}}$. Коэффициенты передачи по мощности каскадов обозначим соответственно через K_{P1} , K_{P2} и K_{P3} .

Рассчитаем результирующий шум всего усилителя $P_{\Sigma \text{ Ш РЕАЛ}}$ в точке 4:

$$P_{\Sigma \text{ Ш РЕАЛ}} = (P_{\text{ШГ}} + P_{\text{Ш1}}) \cdot K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot K_{P3} + P_{\text{Ш2}} \cdot K_{P2} \cdot K_{P3} + P_{\text{Ш3}} \cdot K_{P3} + P_{\text{Ш4}}. \quad (7.15)$$

Если бы шумело только сопротивление генератора, то в этом идеальном случае мощность шума на выходе определялось бы выражением:

$$P_{\Sigma \text{ Ш ИДЕАЛ}} = P_{\text{ШГ}} \cdot K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot K_{P3}. \quad (7.16)$$

Коэффициентом шума F_{Σ} называется отношение $P_{\Sigma \text{ Ш РЕАЛ}} / P_{\Sigma \text{ Ш ИДЕАЛ}}$. Выражение для коэффициента шума имеет вид:

$$F_{\Sigma} = 1 + \frac{P_{\text{Ш1}}}{P_{\text{ШГ}}} + \frac{P_{\text{Ш2}}}{P_{\text{ШГ}} \cdot K_{P1}} + \frac{P_{\text{Ш3}}}{P_{\text{ШГ}} \cdot K_{P1} \cdot K_{P2}} + \frac{P_{\text{Ш4}}}{P_{\text{ШГ}} \cdot K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot K_{P3}}. \quad (7.17)$$

Анализ выражения (7.17) позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Минимальное значение коэффициента шума равно единице и реализуется в идеальном случае, когда в усилителе нет источников шума.
- 2) Если коэффициенты передачи по мощности K_{P1} , K_{P2} , K_{P3} достаточно велики, то результирующий коэффициент шума определяется шумом 1-го каскада.
- 3) Для уменьшения коэффициента шума целесообразно уменьшать мощность шума 1-го каскада и увеличивать его коэффициент передачи по мощности.

Методика расчета динамического диапазона шумящего усилителя

В качестве примера рассмотрим многокаскадный транзисторный усилитель. В разделе 7.1 динамический диапазон на выходе усилителя был определен выражением:

$$D_{\text{ВЫХ МАКС}} = U_{\text{ВЫХ МАКС}} / U_{\text{ВЫХ МИН}}, \quad (7.18)$$

где максимальное значение амплитуды сигнала $U_{\text{ВЫХ МАКС}}$ ограничено допустимым уровнем нелинейных искажений, а минимальное значение амплитуды сигнала $U_{\text{ВЫХ МИН}}$ должно превышать уровень помехи в заданное число раз.

Будем считать, что помеха представляет собой внутренний шум усилителя, плотность вероятности которого подчиняется нормальному закону. Для характеристики уровня шума будем использовать эффективное значение напряжения шума на выходе усилителя $\sigma_{\text{ш}}$. В зависимости от требований, которые предъявляются к качеству воспроизведения выходного сигнала при действии помех, устанавливаются значения отношения сигнал/помеха, в рассматриваемом случае это отношение минимальной амплитуды сигнала к эффективному значению напряжения шума. Обозначим это отношение как N :

$$N = U_{\text{ВЫХ МИН}} / \sigma_{\text{ш}}. \quad (7.19)$$

При проведении расчетов примем некоторые допущения, которые упростят процесс получения результатов и в то же время не приведут к существенным ошибкам:

- 1) Будем считать, что шум усилителя определяется только шумом сопротивления источника сигнала R_{Γ} и шумом первого (входного) каскада усилителя.
- 2) Эффективное значение шумового напряжения первого каскада определяется шумящими элементами входного контура каскада. В разделе 7.1 квадрат эффективного значения шумового напряжения входного контура каскада обозначен как $\overline{(u_{1\text{ш}})^2}$.

С учетом принятых допущений запишем выражение для квадрата эффективного значения шумового напряжения на выходе усилителя с коэффициентом усиления K_0 :

$$\sigma_{\text{ш}}^2 = \overline{(u_{1\text{ш}}^2)} \cdot K_0^2 \quad (7.20)$$

Амплитуда минимального выходного сигнала определяется выражением:

$$U_{\text{ВЫХ МИН}} = N \cdot \sigma_{\text{ш}} \quad (7.21)$$

В соответствии с выражениями (7.18) и (7.21), выражение для расчета динамического диапазона примет вид:

$$D_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ МАКС}} / N \cdot \sigma_{\text{ш}} \quad (7.22)$$

Проведем расчеты для получения численного значения динамического диапазона.

1. Расчет значения $\sigma_{\text{ш}}$.

Вначале, используя выражения (7.6), (7.7), (7.8) и (7.11) из раздела 7.1, рассчитаем значение $\overline{(u_{1\text{ш}}^2)}$.

Зададим следующие значения параметров:

$R_{\Gamma} = 100 \text{ Ом}$; $r_{\text{б}} = 40 \text{ Ом}$; $r_{\beta} = 1 \text{ кОм}$; $\Delta f = 100 \text{ кГц}$; $T = 300^{\circ}\text{К}$.

Для справки приведем результаты расчета:

$$\overline{(e_{\text{шГ}}^2)} = 16,56 \cdot 10^{-14} \text{ В}^2; \quad \overline{(u_{\text{шб}}^2)} = 6,62 \cdot 10^{-14} \text{ В}^2; \quad \overline{(i_{\text{шб}}^2)} = 8,28 \cdot 10^{-19} \text{ А}^2;$$

$$\overline{(u_{1\text{ш}}^2)} = 19,1 \cdot 10^{-14} \text{ В}^2.$$

Рассчитаем значение квадрата шумового напряжения на выходе усилителя с коэффициентом усиления K_0 по выражению:

$$\sigma_{\text{ш}}^2 = \overline{(u_{1\text{ш}}^2)} \cdot K_0^2$$

Положим $K_0 = 1000$. Тогда $\sigma_{\text{ш}}^2 = 19,1 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2$, а эффективное значение шума на выходе усилителя: $\sigma_{\text{ш}} = 4,37 \cdot 10^{-4} \text{ В} = 0,437 \text{ мВ}$.

2. Расчет значения $U_{\text{ВЫХ МИН}}$.

Положим, что отношение сигнал/шум N равно 10. Тогда $U_{\text{ВЫХ МИН}} = N \cdot \sigma_{\text{ш}} = 4,37 \text{ мВ}$.

3. Расчет динамического диапазона.

Для расчета надо задаться значением максимального выходного напряжения. В транзисторных каскадах с напряжением питания 12В ÷ 15В линейный участок амплитудной характеристики имеет протяженность не менее 5В. Будем считать поэтому, что $U_{\text{ВЫХ МАКС}} = 5\text{В}$. Тогда

$D_{\text{ВЫХ МАКС}} = U_{\text{ВЫХ МАКС}} / U_{\text{ВЫХ МИН}} = 5\text{В} / 4,37 \text{ мВ} = 1140$, или в децибелах:

$D_{\text{ВЫХ МАКС}} = 61 \text{ дБ}$.

Контрольные вопросы

1. Какие элементы в электронных цепях являются источниками шума?
2. Каким образом шум в электронных цепях влияет на динамический диапазон усилителя?
3. Из каких соображений рассчитывают минимальное значение напряжения сигнала на выходе усилителя?
4. Чем ограничен максимальный уровень сигнала на выходе усилителя?
5. Изобразите эквивалентную шумовую схему резистора. Приведите выражение для среднего квадрата шумовой ЭДС в этой схеме.
6. Изобразите эквивалентную шумовую схему полупроводникового диода. Приведите выражение для среднего квадрата шумового напряжения и шумового тока в этой схеме.
7. Объясните переход от принципиальной схемы транзисторного каскада к эквивалентной шумовой схеме. Запишите выражения, по которым рассчитываются средние квадраты шумовых напряжений и токов в этой схеме.
8. Изобразите эквивалентную шумовую схему операционного усилителя (ОУ).
9. Как определяется коэффициент шума многокаскадного усилителя?
10. Какие условия надо соблюдать для уменьшения коэффициента шума многокаскадного усилителя?
11. Объясните, как выводится выражение для динамического диапазона усилителя при учете внутренних шумов.

◀ НАЗАД