

Предисловие

В настоящее время в медицинской диагностике широко применяются электронные устройства различного назначения. К числу таких устройств относятся электрокардиографы, энцефалографы, томографы и т.д. Расшифровка электрокардиограмм, энцефалограмм и других информационных средств является одним из наиболее трудоемких и ответственных процессов диагностики, который также реализуется электронными средствами, обеспечивающими быструю и достоверную переработку больших объемов информации.

Именно поэтому все большее применение получают системы автоматической медицинской диагностики и информационные системы на основе компьютеров, используемые для сбора, преобразования, передачи и автоматизированной обработки больших объемов медико-биологической информации в процессе исследования больного, диагностики его текущего состояния и т.д.

Использование различных средств и методов анализа, реализуемых электронными устройствами, позволяет существенно расширить пределы медицинского исследования и заметно уменьшить вероятность ошибки при диагностике. Наглядным примером является применение спектрального анализа для установления динамического ряда RR-электрокардиограммы, позволяющего достаточно точно установить диагноз больного. Все большее распространение получает спектральный анализ биопотенциалов головного мозга в практике электроэнцефалографии, что позволяет получить информацию о деятельности головного мозга и установить патологические нарушения.

Современные электронные устройства, применяемые в медицине, представляют собой сложные комплексы, которые состоят из датчиков, а иногда и системы датчиков, электронных усилителей, функциональных преобразователей, регистрирующих, вычислительных и управляющих устройств, устройств памяти, предварительной обработки и отображения информации.

Датчики предназначены для регистрации электрических сигналов, связанных с деятельностью мозга, сердца и мышц человеческого организма.

Они регистрируют различные виды энергии (тепловую, световую, механическую) и преобразуют ее в электрическую энергию. Электронные усилители, которые рассматриваются в первом разделе пособия, усиливают электрические сигналы, поступающие с датчиков.

Функциональные преобразователи преобразуют регистрируемые сигналы с тем, чтобы обеспечить их обработку последующими узлами аппаратуры для установления признаков или характеристик, несущих диагностическую информацию. При этом преобразованию подлежат такие информационные признаки сигналов, регистрируемых датчиками, как амплитуда, фаза, частота их следования, число и длительность импульсов и др.

Преобразование аналоговых сигналов в цифровой код для последующей обработки компьютером реализуют при помощи аналого-цифровых преобразователей – так называемых АЦП.

Цель части 1 настоящего пособия – дать краткое описание основных узлов электронных устройств, применяемых в медицине для диагностики и лечения, а также рекомендации по обеспечению точности и надежности работы электронной аппаратуры.

Часть 2 пособия будет посвящена основным видам усилителей: импульсным, видеоусилителям на интегральных операционных усилителях, интегральным избирательным усилителям и активным фильтрам, а также усилителям постоянных сигналов. В ней также будут рассмотрены источники питания и стабилизаторы напряжения и тока; электронные устройства на интегральных компараторах напряжений: пороговые устройства, АЦП, усилители-формирователи, ключевые стабилизаторы напряжения, регуляторы и индикаторы, генераторы и формирователи импульсных сигналов.

В части 2 раздел «Цифровые устройства» дополнится описанием триггеров и триггерных систем, регистров, счетчиков, АЛУ, полупроводниковых запоминающих устройств и микропроцессоров.

В части 3 пособия представлены аппаратные структуры компьютерных систем медицинской диагностики, предназначенные для создания баз данных в памяти компьютера для хранения и использования медицинских архивов в высококвалифицированных лечебных учреждениях, приведены описания основных электронных устройств медицинской диагностики: электрокардиографов, энцефалографов и томографов.

Часть 1. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

1. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

1.1. Характеристики электронных усилителей

Электронные усилители (ЭУ) предназначены для усиления мощности электрических сигналов различной формы и амплитуды. Иногда наряду с усилением мощности ЭУ выполняют и другие функции, например, селекцию сигналов по частотному спектру или по амплитуде.

ЭУ разбиваются на два обширных класса: линейные и нелинейные. Первые из них предназначены для усиления сигналов без заметных искажений их формы, вторые – наоборот. При этом нелинейные ЭУ, наряду с усилением, как правило, производят формирование сигналов по амплитуде или по длительности.

На рис. 1.1 представлена структурная схема ЭУ. К входным зажимам усилителя 1–1 подключают источник (датчик) усиливаемых сигналов, который характеризуется внутренним импедансом (сопротивлением) Z_d и напряжением холостого хода \dot{U}_d . Иногда оказывается целесообразным представлять датчик эквивалентным источником тока короткого замыкания $\dot{i}_{д.к.з} = \frac{\dot{U}_d}{Z_d}$, который подключается к зажимам 1–1 параллельно вместе с Z_d .

К выходным зажимам усилителя 2–2 подключается нагрузка Z_n , которая характеризуется (кроме сопротивления Z_n) выходным напряжением $\dot{U}_{вых}$ или током $\dot{i}_n = \dot{i}_{вых}$.

Для характеристики ЭУ применяются следующие параметры.

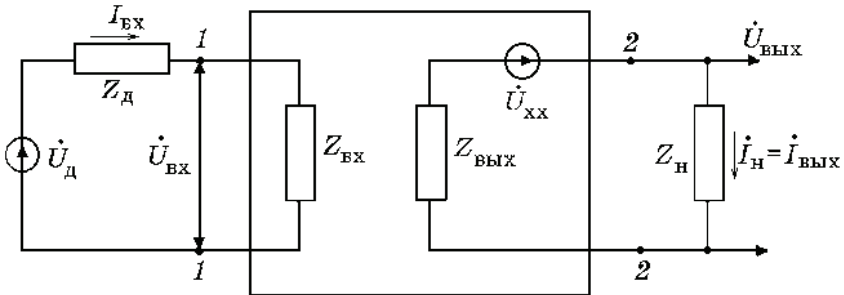


Рис. 1.1. Структурная схема ЭУ с источником усиливаемого сигнала $\dot{U}_д$ на входе и нагрузкой Z_n на выходе

1. *Входной импеданс* $Z_{вх} = \frac{\dot{U}_{вх}}{i_{вх}}$, который определяется отношением входного напряжения $\dot{U}_{вх}$ к входному току $i_{вх}$ усилителя.

Этим параметром определяется взаимодействие ЭУ с источником сигналов. Обычно $Z_{вх}$ представляется входным сопротивлением $R_{вх}$ и входной паразитной емкостью $C_{вх}$. В высокочастотных ЭУ сказываются также паразитные индуктивности.

2. *Выходной импеданс* $Z_{вых} = \frac{\dot{U}_{xx}}{i_{вых.кз}}$, который определяется отношением выходного напряжения при холостом ходе \dot{U}_{xx} ($Z_n \rightarrow \infty$) к выходному току при коротком замыкании ($Z_n = 0$) на выходе $i_{вых.кз}$. Этот параметр позволяет установить взаимодействие ЭУ с нагрузкой, представляемой Z_n .

Усилительные свойства ЭУ характеризуют различные коэффициенты усиления:

Усилительные свойства ЭУ характеризуют различные коэффициенты усиления:

- коэффициент усиления по напряжению $\dot{K}_u = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_д}$;
- коэффициент усиления по току $\dot{K}_i = \frac{i_{вых}}{i_{д.кз}}$;

- крутизна характеристики выходного тока $\dot{S}_{сх} = \frac{i_{ввых}}{\dot{U}_д}$;
- передаточный импеданс $\dot{Z}_{тр} = \frac{\dot{U}_{ввых}}{i_{вх}}$ (последнее время более распространен термин «трансимпеданс»);
- коэффициент усиления по мощности $K_p = \frac{\dot{U}_{ввых} i_{ввых}}{\dot{U}_д i_{вх}}$.

При усилении и преобразовании сигналов весьма важной является точность воспроизведения формы входного сигнала, которая определяется уровнем искажений, вносимых аналоговым устройством. К числу таких устройств относятся и ЭУ.

В аналоговых устройствах различают нелинейные и линейные искажения.

Нелинейные искажения обусловлены наличием нелинейных элементов в схеме (например, транзисторов) и связаны с величиной амплитуды сигнала. Эти искажения уменьшают до допустимого уровня соответствующим выбором элементов (транзисторов) и их режима работы.

При синусоидальном входном сигнале $\dot{U}_д = U_{дт} \sin \omega_d t$ нелинейные искажения проявляются в том, что выходной сигнал $\dot{U}_{ввых}$, помимо сигнала с частотой $f_d = \frac{\omega_d}{2\pi}$, содержит гармоники с частотой, кратной f_d . При этом нелинейные искажения принято характеризовать коэффициентом нелинейных искажений – клир-фактором. При усилении сигналов сложной формы из-за нелинейных искажений на выходе ЭУ появляются гармоники, не содержащиеся во входном сигнале.

В линейных ЭУ, предназначенных для точных и прецизионных измерений амплитуды сигналов, нелинейные искажения не должны превышать единиц, а иногда и сотых долей процента. Поэтому их уменьшают соответствующим подбором усилительных элементов и режима работы, других элементов схемы, а также применением отрицательных обратных связей.

Линейные искажения обусловлены инерционностью транзисторов и действием реактивных элементов, в том числе паразитных емкостей и индуктивностей. Они связаны со скоростью изменения сигнала во времени. Амплитуда сигнала не определяет величину линейных искажений, т.е. как бы мала ни была амплитуда, линейные искажения не исчезают, если скорость изменения сигнала во времени больше или меньше определенной величины. Именно поэтому коэффициенты усиления по напряжению и по току, или коэффициенты преобразования аналоговых устройств являются комплексными величинами, что обусловлено зависимостью этих коэффициентов от скорости изменения сигнала во времени.

Линейные искажения в ЭУ можно оценить, зная искажения синусоидального сигнала, так как сигнал любой формы можно разложить на гармонические составляющие, пользуясь рядами Фурье (для периодических сигналов) или интегралом Фурье (для непериодических сигналов).

График вектора комплексного коэффициента усиления, т.е. кривая, описываемая концом радиуса-вектора \dot{K}_U при изменении частоты f от 0 до ∞ , называется *амплитудно-фазовой характеристикой*.

На практике вместо этой характеристики обычно используют *амплитудно-частотную характеристику* (АЧХ), определяемую зависимостью модуля $M(f)$ коэффициента \dot{K}_U от частоты f (рис. 1.2,а), и *фазочастотную характеристику* (ФЧХ), представляющую собой зависимость фазы $\varphi(f)$ от частоты (рис. 1.2,б).

Для краткой характеристики частотных искажений указываются отдельные параметры: граничные частоты, полоса пропускания, неравномерность АЧХ или отклонение ФЧХ от линейности и т.д.

1. Граничная частота определяется как частота, на которой модуль $M(f)$ уменьшается до определенного значения (например, на 3 дБ, т.е. в $\sqrt{2}$ раза, или до уровня максимальной неравномерности в полосе пропускания). Различают нижнюю f_n и верхнюю f_v граничные частоты. Разность частот $\Delta f_n = f_v - f_n$ называется полосой пропускания ЭУ.

2. При анализе схем различают область низших $f \leq f_{c1}$, средних $f_{c1} \leq f \leq f_{c2}$ и высших $f \geq f_{c2}$ частот (см. рис. 1.2,а).

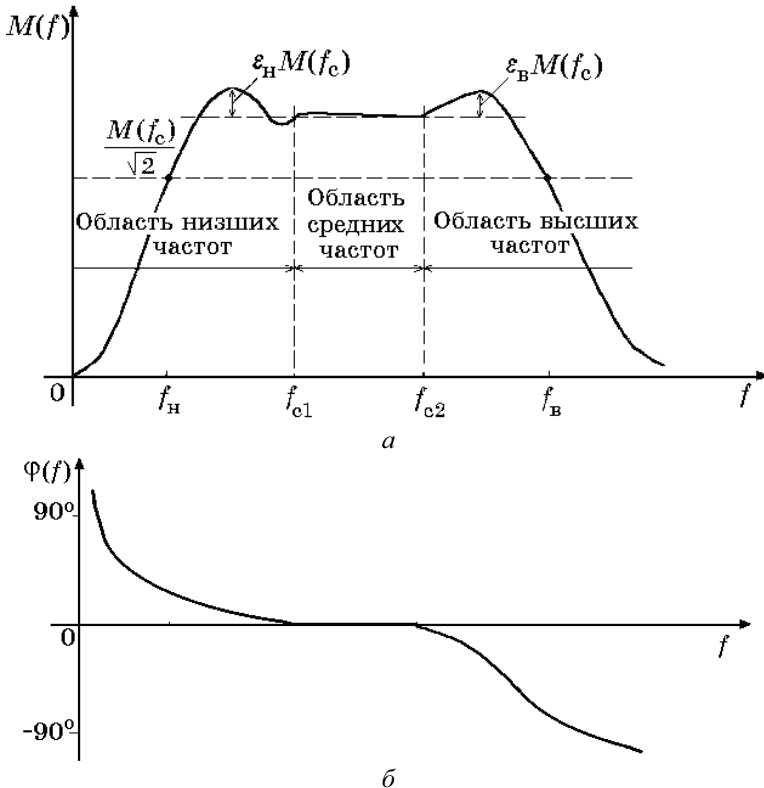


Рис. 1.2. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристики ЭУ

3. Неравномерность АЧХ в полосе пропускания характеризуют *относительным отклонением* АЧХ в областях низших и высших частот от величины в области средних частот (см. ϵ_H и ϵ_B на рис.1.2,а).

Для оценки линейных искажений, возникающих при передаче импульсных сигналов, удобно пользоваться *переходной характеристикой* ЭУ. Переходная характеристика – это реакция усилителя на

идеальный перепад (ступеньку) напряжения или тока. Эту характеристику разбивают на три области:

- область малых времен соответствует области высших частот АЧХ. Продолжительность этой области определяется временем установления выходного импульса после резкого изменения амплитуды входного сигнала;
- область средних времен соответствует области средних частот АЧХ. Она наступает после области малых времен и заканчивается с наступлением области больших времен. В этой области изменения выходного сигнала пренебрежимо малы, поэтому переходная характеристика имеет вид плоской вершины;
- область больших времен – аналог области низших частот, когда происходит заметный спад плоской вершины до полного затухания выходного импульса.

При формировании фронта в области малых времен искажения сигналов, которые появляются при их усилении или преобразовании, характеризуются следующими параметрами (рис. 1.3):

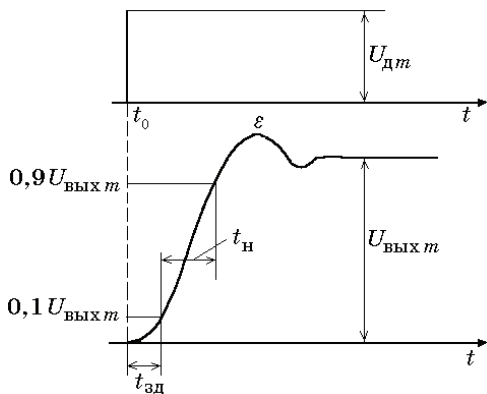


Рис. 1.3. Переходная характеристика ЭУ в области малых времен – реакция на идеальный перепад напряжения амплитудой $U_{дм}$

- временем задержки $t_{зд}$, определяемом как время, прошедшее от момента подачи входного сигнала до момента достижения выходным сигналом определенного уровня его установившегося значения (наиболее часто до уровня $0,1$ от амплитуды выходного сигнала);

- временем нарастания фронта t_n , определяемом как время, в течение которого выходной импульс нарастает от уровня, соответствующего времени задержки, до некоторого уровня, близкого к амплитуде выходного импульса. Наиболее часто уровни, определяющие t_n , выбираются 0,1 и 0,9 от амплитуды выходного импульса;

- относительной величиной выброса ε , представляющей собой отношение превышения выходного сигнала над его установившимся значением к последнему.

Для характеристики искажений выходного импульса в области больших времен вместо переходной характеристики определяют реакцию ЭУ на идеальный прямоугольный импульс с конечной длительностью t_n (рис. 1.4). При этом интересуются следующими параметрами, которыми характеризуется полученная реакция:

- относительным спадом плоской вершины выходного импульса

$$\delta_{t_n} = \frac{U_{\text{Вых}m}(t_n)}{U_{\text{Вых}m}}$$

- относительной амплитудой выбега или выброса

$$\delta_{\text{Выб}} = \frac{U_{\text{Выб}m}}{U_{\text{Вых}m}}$$

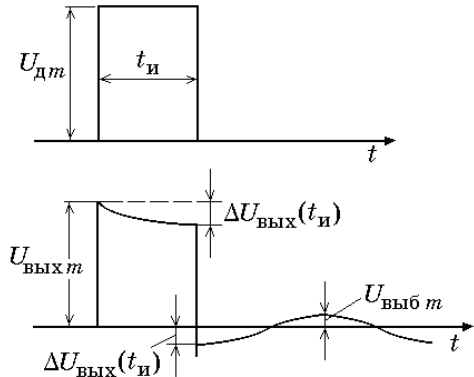


Рис. 1.4. Реакция ЭУ в области больших времен на идеальный прямоугольный импульс длительностью t_n

Искажения импульсов в области больших времен (как и искажения синусоидальных сигналов в области низких частот) обусловлены действием разделительных элементов, которые включаются между усилительными каскадами или блоками для обеспечения нормального рабочего режима по постоянному току. Такую цепь ис-

пользуют и на выходе усилителя для предотвращения передачи постоянной составляющей выходного напряжения ЭУ и ее дрейфа в нагрузку. На рис. 1.5 показана схема с разделительным конденсатором C_p , но в качестве разделительного элемента может использоваться и трансформатор.

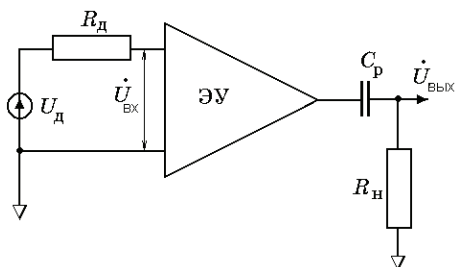


Рис. 1.5. Схема ЭУ с разделительным конденсатором C_p , включенным между его выходом и нагрузкой R_n

В выходном напряжении ЭУ наряду с полезным сигналом, определяемым входным усиливаемым напряжением U_d , всегда имеются напряжения помехи в виде наводок, фона, шума микрофонного эффекта и шума, образуемого статистическими флуктуациями токов и напряжений от своих средних значений. Очевидно, что минимальный уровень усиливаемого сигнала, который может быть достоверно зарегистрирован на выходе ЭУ, лимитируется величиной приведенной к входу сигнала помехи. Поэтому для повышения его чувствительности должны быть приняты меры для снижения уровня помехи.

Наводки появляются от воздействия на ЭУ и образующие его цепи посторонних сигналов и помех. Источниками наводок являются электронные устройства, электродвигатели, генераторы и т.д. Так как наводки появляются из-за паразитных электрических, магнитных, гальванических и других связей цепей ЭУ с источниками наводок, то их величину можно снизить до допустимого уровня удалением ЭУ от источника помех, его экранированием, введением в цепи питания и связей развязывающих элементов и т.д.

Фон представляет собой напряжение в выходной цепи, гармонические составляющие которого имеют частоту, кратную частоте первичного переменного источника тока (например, электрической сети), от которого питается усилитель. Он появляется из-за недоста-

точного сглаживания выпрямленного напряжения источника питания. Эту составляющую уменьшают до допустимого уровня шунтированием выходных зажимов источника питания ЭУ дополнительными конденсаторами большой емкости. Фон может являться результатом наводки в цепях ЭУ электрическими и магнитными полями трансформаторов выпрямителей, сетевых проводов и т.д. Методы борьбы с фоном те же, что и при наводках.

Шумы микрофонного эффекта появляются в выходной цепи при воздействии на ЭУ и его детали механических толчков и вибраций. Микрофонный эффект особенно ярко проявляется в усилителях на электровакуумных лампах. В современных транзисторных ЭУ он может проявляться при наличии входных трансформаторов (в особенности с сердечником из пермаллоя), преобразующих механические колебания в электродвижущую силу вследствие магнитострикционного эффекта. Подобный эффект наблюдается также в усилителях с электромеханическими фильтрами. Для снижения микрофонных шумов следует избегать применения элементов с ярко проявленным микрофонным эффектом в особенности в медицинской аппаратуре, используемой на транспорте.

Шумы, обусловленные беспорядочными (флуктуационными) изменениями токов и напряжений под действием внутренних физических процессов в транзисторах, диодах, резисторах, в отличие от перечисленных выше видов помех принципиально не могут быть исключены. Действие этих шумов, к числу которых относятся тепловой шум, шум токораспределения, дробовой шум, низкочастотный шум генерации–рекомбинации носителей зарядов, ослабляют использованием малошумящих транзисторов и соответствующими мерами при проектировании ЭУ.

1.2. Биполярные и униполярные транзисторы

В качестве усилительных элементов ЭУ применяют транзисторы – полупроводниковые приборы, в которых используются эффекты, обусловленные переносом заряда в твердом теле для преобразова-

[. . .]

тогда как в состоянии логической 1 и логического 0 ИКН перестает усиливать.

Погрешность сравнения входных напряжений, определяемую отклонением выходного напряжения и его дрейфом при работе ИКН в активной области, оценивают теми же параметрами, что и ИОУ, т.е. напряжением сдвига (смещения) $U_{\text{вх.сд}}$; входным током смещения $I_{\text{вх.см}}$; входным током сдвига $I_{\text{вх.сд}}$ и температурными коэффициентами указанных параметров.

Быстродействие ИКН характеризуется временем переключения ИКН, определяемым продолжительностью перехода из одного состояния в другое, и дисперсией этого времени.

Современные ИКН относятся к классу аналого-цифровых интегральных микросхем. Они используются в качестве порогового элемента, составляющего основу большого класса электронных устройств: дискриминаторов амплитуды, детекторов уровня, триггера Шмитта, бистабильных индикаторов и т.д.

Сочетание порогового элемента с формирователем потенциальных уровней 1 и 0 позволяет использовать ИКН в различного рода преобразователях аналоговых сигналов в цифровые. К числу таких устройств относятся аналого-цифровые преобразователи (АЦП), преобразователи временных интервалов в последовательность импульсов и др. Выпускаются ИКН общего назначения, прецизионные и быстродействующие. Они применяются для производства различного рода генераторов импульсов. Их используют в качестве нелинейных усилителей-формирователей.

Контрольные вопросы

1. Какими датчиками пользуются для медицинской диагностики? Укажите их назначение.
2. Составьте структурную схему электронного усилителя и укажите назначения элементов схемы. Какое будет выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, если напряжение датчика $U_{\text{д}} = 0$?
3. Что является причиной появления нелинейных искажений и как можно их уменьшить?

4. Какими параметрами усилителя лимитируются линейные искажения в областях низших и высших частот?
5. Как надо выбирать напряжение на эмиттерном и коллекторном переходах биполярного транзистора, чтобы обеспечить его работу в активной области?
6. Какие схемы обеспечивают усиление напряжения и тока?
7. Почему повторитель напряжения не способен усиливать входное напряжение, а повторитель тока – входной ток?
8. Почему дифференциальный каскад подавляет синфазные сигналы, к числу которых относятся помехи во входных цепях каскада? В каких приборах медицинской диагностики используется эта особенность ДК?
9. Какими средствами обеспечивают требуемый коэффициент и его стабильность в усилителях на ИОУ?
10. В каких усилителях на ИОУ целесообразно использовать последовательную, а в каких – параллельную обратную связь?
11. Какой вид обратной связи надо применять для стабилизации выходного напряжения усилителя на ИОУ: по напряжению или по току?
12. Для чего применяют коррекцию переходных и частотных характеристик усилителей с обратной связью?
13. Чем отличается интегральный компаратор напряжения от интегрального операционного усилителя?