

Тема 17. Электронные усилители

1. Назначение и классификация усилителей электрических сигналов

В промышленной электронике очень часто возникает необходимость в усилении электрических сигналов, например, при измерениях неэлектрических величин электрическими методами, контроле и автоматизации технологических процессов. Для решения этих задач используют электронные усилители — устройства, которые служат для усиления напряжения, тока или мощности слабых электрических сигналов.

В настоящее время в усилителях широко применяют транзисторы и интегральные микросхемы (ИМС).

Усилители могут быть классифицированы по ряду признаков:

- по роду усилительных элементов (ламповые, транзисторные, на ИМС);
- по роду усиливаемой величины (усилители напряжения, тока и мощности);
- по числу каскадов (одно-, двух- и многокаскадные).

Одним из наиболее важных признаков является *диапазон частот* усиливаемых сигналов, в котором усилитель обеспечивает нормальную работу. По данному признаку различают следующие типы усилителей.

- *Усилители низкой частоты* (УНЧ), которые служат для усиления непрерывных периодических сигналов в диапазоне низких частот (от десятков герц до десятков килогерц).
- *Усилители постоянного тока* (УПТ) предназначены для усиления медленно меняющихся напряжений и токов в диапазоне частот от нуля до некоторой наибольшей частоты.
- *Избирательные усилители*, характеризующие небольшими значениями отношения верхней и нижней частот. Как правило, это усилители высокой частоты (УВЧ).
- *Импульсные*, или *широкополосные*, усилители работают в диапазоне от нескольких килогерц до нескольких десятков мегагерц и используются в устройствах импульсной связи, радиолокации и телевидения.

2. Основные технические характеристики усилителей

Коэффициент усиления в соответствии с видом усиливаемой величины называют коэффициентом усиления по напряжению, току или мощности. Коэффициент усиления показывает, во сколько раз напряжение (ток, мощность) на выходе усилителя больше, чем на входе, и обозначается соответственно K_U (K_I , K_P). Так, коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \quad (17.1)$$

(обычно K_U обозначают просто K).

Для многокаскадного усилителя, структурная схема которого приведена на рис. 17.1, общий коэффициент усиления

$$K = K_1 K_2 \dots K_n,$$

где K_1, K_2, K_n - коэффициент усиления соответствующих каскадов.

Коэффициенты усиления часто выражают в логарифмических единицах - беллах и децибеллах, (1Б= 10 дБ).

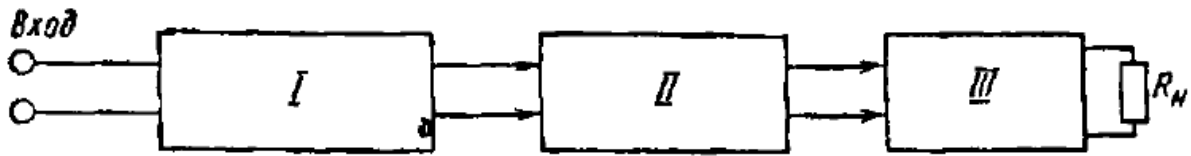


Рис. 17.1. Структурная схема трехкаскадного усилителя

Коэффициент усиления, выраженный в децибеллах,

$$K_{дБ} = 10 \lg \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$$

Общий коэффициент усиления, например, трехкаскадного усилителя в логарифмических единицах

$$K_{дБ} = K_{1дБ} + K_{2дБ} + K_{3дБ}$$

В тех случаях, когда в децибеллах необходимо определить усиление по мощности, применяют формулу

$$K_{PдБ} = 20 \lg \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$$

где числовой множитель появляется потому, что мощность пропорциональна квадрату напряжения. Действительно,

$$K_{PдБ} = 10 \lg \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} = 10 \lg \frac{U_{ВЫХ}^2}{U_{ВХ}^2} = 20 \lg \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$$

Последнее выражение справедливо при равенстве входного и выходного сопротивлений.

Выходная мощность - это мощность, которая развивается на выходном нагрузочном сопротивлении усилителя:

$$P_{ВЫХ} = \frac{U_{ВЫХ}^2}{R_H} = \frac{U_{mВЫХ}^2}{2R_H}$$

Обычно используют значения **номинальной выходной мощности** - наибольшей мощности, развиваемой в нагрузке, при которой искажения не превышают заданных значений.

Коэффициент полезного действия определяется отношением полезной выходной мощности к мощности, потребляемой всеми источниками питания:

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ОБЩ}}}$$

Частотные искажения - это искажения, вызванные различной степенью усиления на различных частотах из-за присутствия в схемах усилителей реактивных элементов (индуктивных катушек и конденсаторов).

Фазовые искажения - это искажения, вызванные нелинейной зависимостью сдвига фазы между входным и выходным напряжениями усилителя от частоты. Причиной этих искажений является присутствие реактивных элементов в схемах усилителя.

Нелинейные искажения возникают из-за нелинейности вольтамперных характеристик усилительных элементов (электронных ламп, транзисторов) и проявляются в искажении формы усиливаемого сигнала.

В промышленной электронике наиболее распространены усилители низкой частоты. В связи с этим рассмотрим работу усилителей НЧ.

Усилитель низкой частоты предназначен для усиления электрических сигналов в некоторой полосе частот, как правило, звуковых (20 Гц – 20 кГц). Об особенностях усилителя можно судить по его амплитудной и частотной характеристикам.

На рис. 17.2 изображена амплитудная характеристика УНЧ $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$.

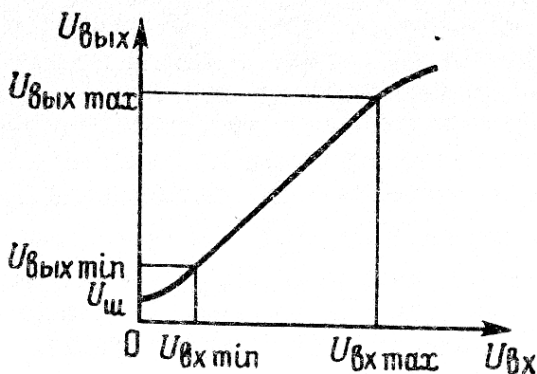


Рис. 17.2. Амплитудная характеристика усилителя

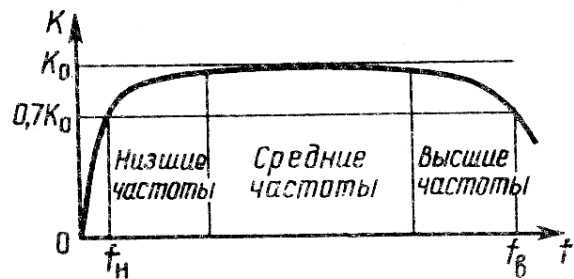


Рис. 17.3. Частотная характеристика усилителя

По ней можно определить **динамический диапазон** $D = \frac{U_{\text{ВЫХ max}}}{U_{\text{ВЫХ min}}}$, где значения $U_{\text{ВЫХ max}}$, $U_{\text{ВЫХ min}}$ ограничивают линейный участок характеристики. Обычно динамический диапазон определяют в децибелах: $D_{\text{дБ}} = 20 \lg D$. Чем больше D , тем выше качество усилителя. Амплитудная характеристика заметно нелинейна при очень малых и очень больших напряжениях входного сигнала. Причём даже при отсутствии входного сигнала на выходе имеется некоторое напряжение, определяемое собственными шумами усилителя. Поэтому очень малым значение $U_{\text{ВЫХ min}}$ выбирать нельзя из-за того, что слабые сигналы будут заглушаться напряжением собственных шумов. при очень больших входных сигналах происходит перегрузка усилительных элементов, что приводит к уменьшению усиления и искажениям усиливаемого сигнала. Поэтому очень

большое значение $U_{Вых\ max}$ также нельзя выбирать. Таким образом, динамический диапазон усилителя ограничен.

На рис. 17.3 изображена частотная характеристика усилителя $K = \varphi(f)$ при $U_{Вх} = const$. Из неё видно, что электрические сигналы проходят через УНЧ с искажениями, причём искажения увеличиваются на самых низших и самых высших рабочих частотах. Это связано с изменением значения сопротивления нагрузки для различных частот.

3. Транзисторный усилительный каскад

Усилители на биполярных транзисторах обычно собирают по схеме с общим эмиттером. Рассмотрим работу такого каскада (рис. 17.2). Один источник питания ($+V$) обеспечивает подачу смещения для переходов база – эмиттер и база – коллектор. Два резистора R_B и R_K используются для распределения напряжения источника питания, обеспечивающего правильную работу каскада.

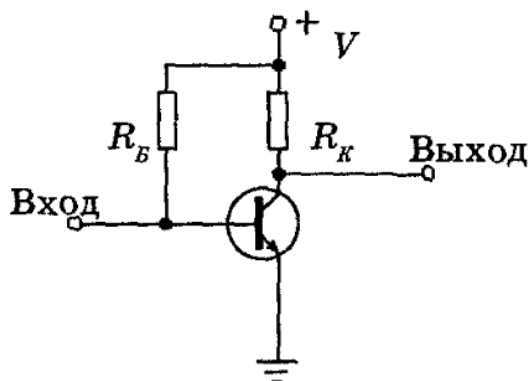


Рис. 17.2. Схема резистивного усилителя с общим эмиттером

Резистор R_B , соединяющий базу с источником питания, управляет величиной тока базы I_{B0} . Ток базы, протекая по резистору R_B , создаёт на нём падение напряжения, составляющее большую часть напряжения источника питания. Меньшая часть этого напряжения падает на переходе база-эмиттер транзистора, обеспечивая правильное прямое смещение.

Напряжение входного сигнала $u_{Вх}$ подают на участок база-эмиттер, что создаёт пульсацию тока базы относительно постоянной составляющей I_{B0} . Изменение тока базы вызывает соответствующее изменение тока коллектора, проходящего по сопротивлению нагрузки R_K . Переменная составляющая тока коллектора создаёт на сопротивлении нагрузки R_K усиленное по амплитуде падение напряжения $u_{Вых}$.

Расчет такого каскада можно произвести графически с использованием приведенных на рис. 17.3 входных и выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ. Если сопротивление нагрузки R_K и напряжение источника E_K заданы, то положение линии нагрузки определяется точками C и D .

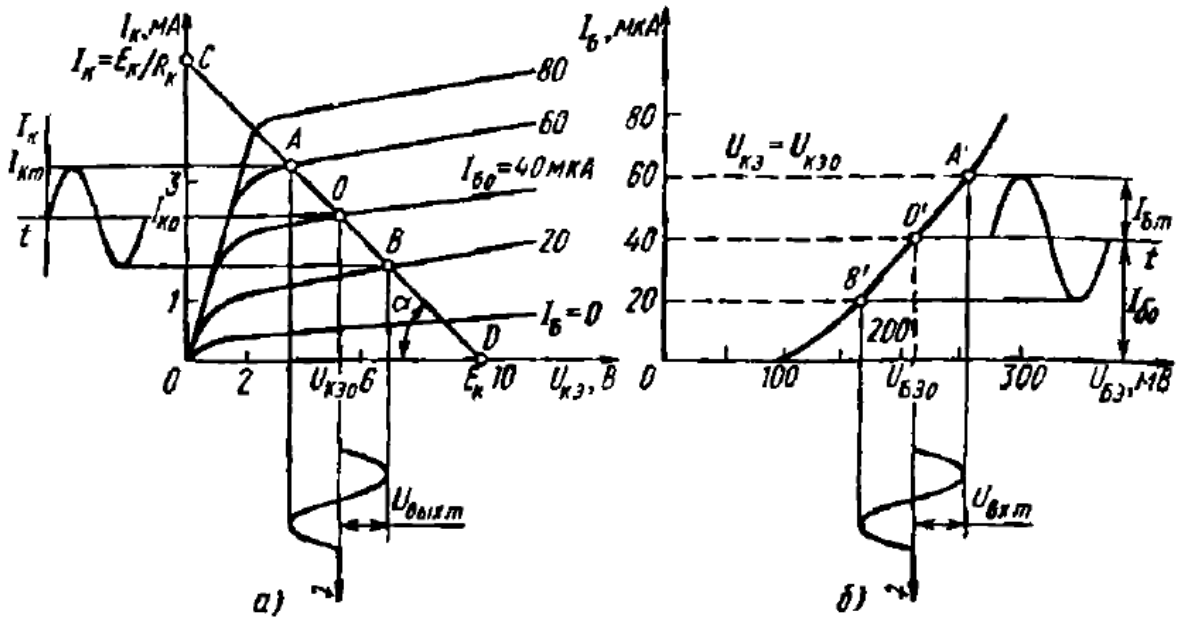


Рис. 17.3. Графический анализ работы схемы с ОЭ

При этом точка D задана значением $E_{к}$, а точка C - током $I_{к} = \frac{E_{к}}{R_{H}}$.

Линия нагрузки CD пересекает семейство выходных характеристик. Выбираем рабочий участок на линии нагрузки так, чтобы искажения сигнала при усилении были минимальны. Для этого точки пересечения линии CD с выходными характеристиками должны находиться в пределах прямолинейных участков последних. Этому требованию соответствует участок AB линии нагрузки.

Рабочая точка при синусоидальном входном сигнале находится в середине этого участка - точка O . Проекция отрезка AO на ось ординат определяет амплитуду коллекторного тока, а проекция того же отрезка на ось абсцисс - амплитуду переменной составляющей коллекторного напряжения. Рабочая точка O определяет ток коллектора $I_{к0}$ и напряжение на коллекторе $U_{кэ0}$, соответствующие режиму покоя.

Кроме того, точка O определяет ток покоя базы $I_{Б0}$, а следовательно, и положение рабочей точки O' на входной характеристике (рис. 17.3, а, б). Точкам A и B выходных характеристик соответствуют точки A' и B' на входной характеристике. Проекция отрезка $A'O'$ на ось абсцисс определяет амплитуду входного сигнала $U_{вх.т}$, при которой будет обеспечен режим минимальных искажений.

Строго говоря, $U_{вх.т}$ необходимо определять по семейству входных характеристик. Но так как входные характеристики при различных значениях напряжения $U_{кэ}$ отличаются незначительно, на практике пользуются входной характеристикой, соответствующей среднему значению $U_{кэ} = U_{кэ0}$.

4. Обратная связь в усилителях

Обратной связью называется такая связь между выходом и входом усилителя, при которой часть энергии усиленного сигнала с его выхода подается на вход.

Различают *положительную и отрицательную обратные связи*. Когда сигнал обратной связи совпадает по фазе и складывается со входным сигналом – имеет место положительная обратная связь (ПОС). Положительную обратную связь, как правило, применяют в генераторных каскадах. Если сигнал обратной связи противоположен по фазе основному входному сигналу и вычитается из него – имеем отрицательную обратную связь (ООС). В усилителях положительная обратная связь обычно является паразитной, а отрицательная применяется довольно часто для компенсации *температурной нестабильности*.

Изменения температуры приводят к изменению проводимости полупроводниковых переходов транзисторов (особенно германиевых). Это приводит к изменению токов смещения и сдвигает рабочую точку транзистора, уменьшая усиление или искажая форму усиливаемого сигнала. Если часть нежелательного выходного сигнала подать на вход цепи, этот сигнал будет противодействовать изменениям в транзисторе.

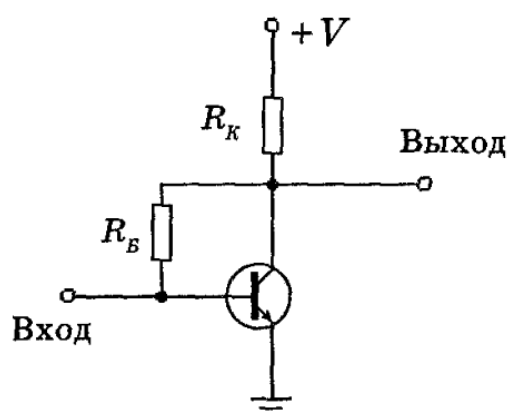


Рис. 17.4. Усилительный каскад а коллекторной ООС.

В цепи, использующей отрицательную обратную связь (рис. 17.4), базовый резистор R_B соединён непосредственно с коллектором транзистора. Если температура увеличивается, ток коллектора и падение напряжения на резисторе R_K также увеличиваются. Напряжение коллектор-эмиттер уменьшается, уменьшая также напряжение, приложенное к R_B . Это уменьшает ток базы, что служит причиной уменьшения тока коллектора. Так работает *коллекторная цепь обратной связи*.

На рис. 17.5 показан другой тип обратной связи – последовательно с эмиттером включён резистор $R_Э$. Резисторы R_B и $R_Э$ и переход транзистора эмиттер-база соединены последовательно с источником питания E_K . Увеличение температуры служит причиной увеличения тока коллектора и эмиттера, при этом увеличивается падение напряжения на резисторе $R_Э$ и уменьшается падение напряжения на резисторе R_B . Ток базы уменьшается, что уменьшает как ток коллектора, так и эмиттера. Поскольку сигнал обратной связи создаётся на эмиттере транзистора, эта цепь называется цепью *эмиттерной обратной связи*.

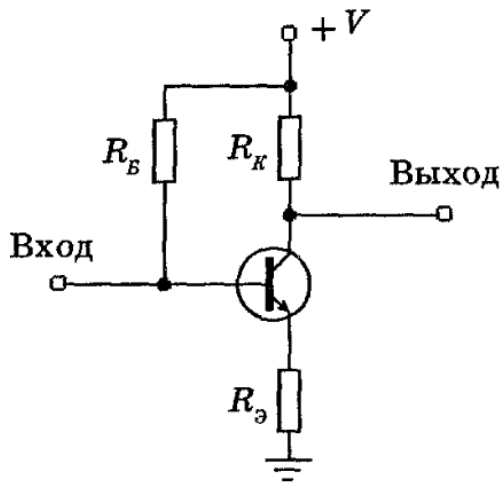


Рис. 17.5. Усилительный каскад с эмиттерной ООС

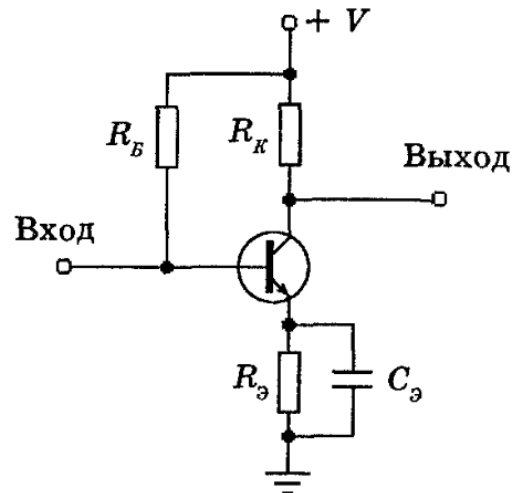


Рис. 17.6. Усилительный каскад с эмиттерной ООС и блокировочным конденсатором

Часть выходного сигнала создаст потерю напряжения на резисторе $R_Э$, и усиление каскада уменьшится. При подсоединении параллельно резистору $R_Э$ *блокировочного конденсатора* $C_Э$ (рис. 17.6) усиливаемый сигнал переменного тока обходит резистор $R_Э$, так как сопротивление конденсатора $C_Э$ переменному току существенно меньше $R_Э$: $\frac{1}{2\pi f C_Э} \ll R_Э$. Таким образом, резистор $R_Э$ обеспечивает отрицательную обратную связь по постоянному току, а конденсатор $C_Э$ позволяет при этом избежать потерь в усилении входного сигнала.

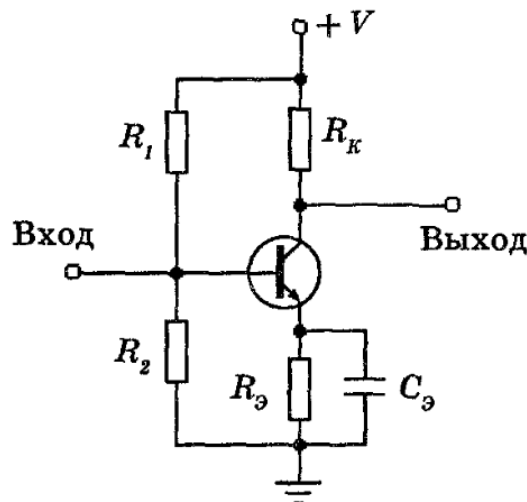


Рис. 17.7. Цепь ООС с делителем напряжения

Наибольшую стабильность обеспечивает *цепь обратной связи с делителем напряжения* (рис. 17.7), которая используется наиболее широко. Здесь резистор $R_Б$ заменяется двумя резисторами, R_1 и R_2 , которые включены последовательно к источнику E_K , образуя делитель напряжения. Цель делителя – обеспечить на базе транзистора постоянное напряжение по отношению к земле. Напряжение на переходе база – эмиттер является разностью двух напряжений – на резисторах

R_2 и R_3 : $U_{БЭ} = U_{R_2} - U_{R_3}$. При увеличении температуры токи коллектора и эмиттера также увеличиваются, и растёт напряжение на R_3 . Уменьшение напряжения $U_{БЭ}$ приводит к уменьшению тока базы, и, следовательно, эмиттера и коллектора.

5. Межкаскадные связи в многокаскадных усилителях

Для получения неискаженной формы и заданной мощности полезного сигнала на выходе усилителя необходимо применять несколько каскадов усиления. Между этими каскадами существуют различные способы связи: через разделительные конденсаторы (емкостная), с помощью трансформаторов (трансформаторная), непосредственная (гальваническая).

В УНЧ широко распространена емкостная связь (рис. 17.8). Напряжение полезного сигнала подают на базу T_1 через разделительный конденсатор C_{P1} . Делитель R_1R_2 определяет напряжение покоя на участке база - эмиттер первого каскада. Цепь $R_{Э1}C_{Э1}$ составляет цепь отрицательной обратной связи по току питания и обеспечивает его стабилизацию. Усиленное по амплитуде напряжение подают через разделительный конденсатор C_{P2} , не пропускающий постоянную составляющую коллекторного напряжения первого каскада на базу транзистора T_2 .

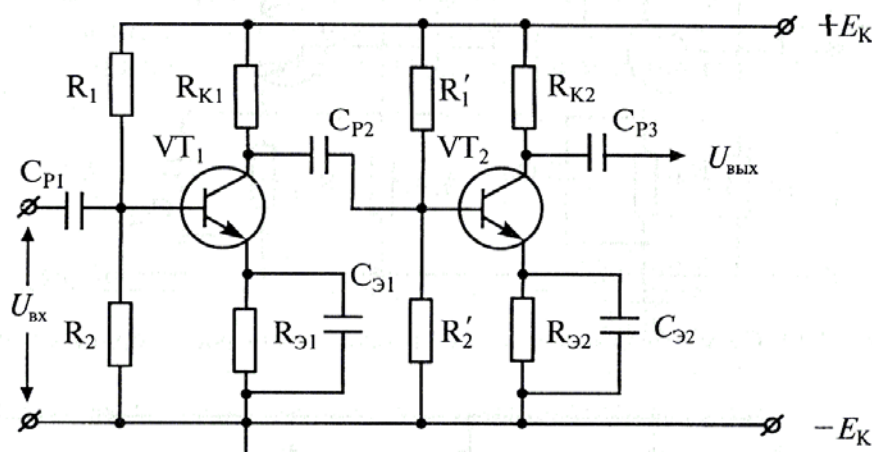


Рис. 17.8. Схема двухкаскадного усилителя с емкостной связью

В данном усилителе оба каскада собраны по схеме с общим эмиттером. Известно, что такая схема характеризуется большим выходным и относительно малым входным сопротивлениями. Таким образом, вход последующего каскада оказывается не согласованным с выходом предыдущего. Для согласования применяют трансформаторную связь, при которой обеспечивается максимально возможная мощность на входе последующего каскада (рис. 17.9).

В ряде устройств автоматического контроля измеряют и регулируют такие величины, как температура, давление, механические напряжения и т.п. Эти неэлектрические величины преобразуют в медленно меняющиеся токи и напряжения с частотой порядка 1 Гц и меньше. Так как усиление таких медленно меняющихся сигналов невозможно с помощью обычных УНЧ с емкостной или трансформаторной связью, применяют специальные усилители с гальванической связью между каскадами – усилители постоянного тока (рис. 17.10).

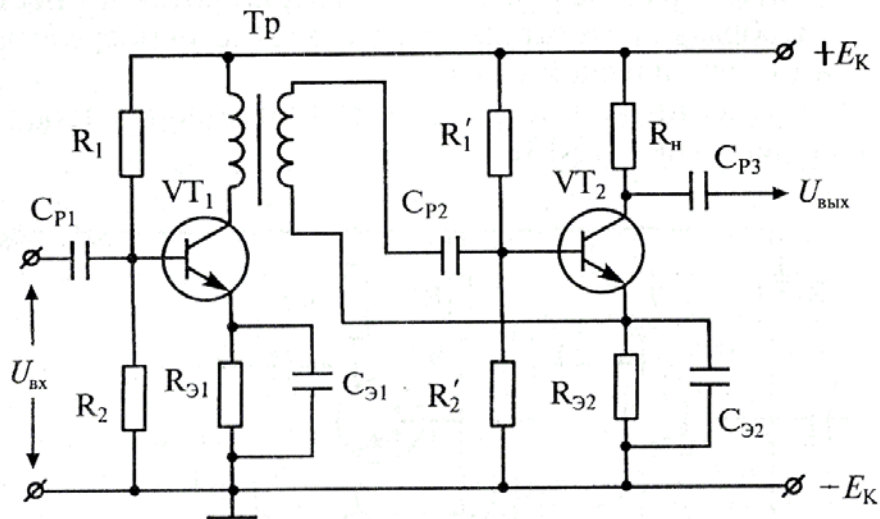


Рис. 17.9. Схема двухкаскадного усилителя с трансформаторной связью

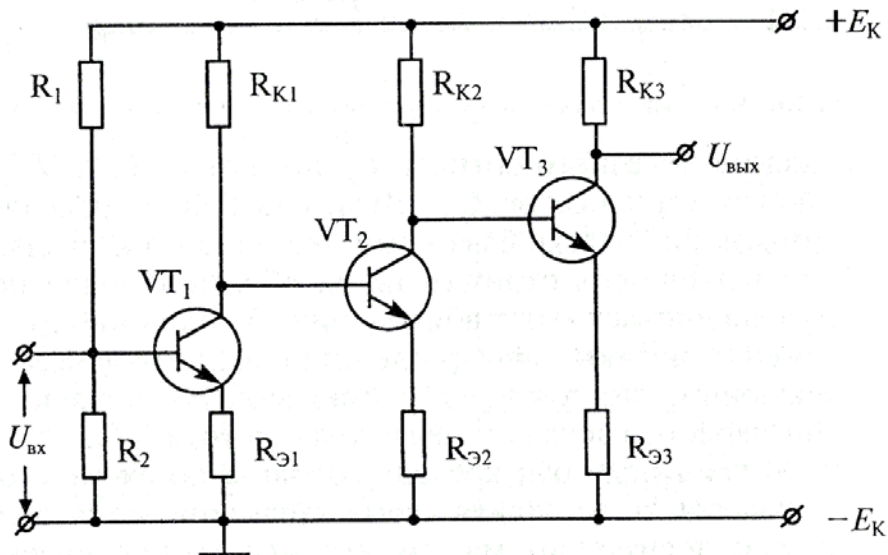


Рис. 17.10. Схема двухкаскадного усилителя с непосредственной (гальванической) связью

Контрольные вопросы

9. Как компенсируются изменения температуры в транзисторном усилителе?
11. Каковы основные способы соединения транзисторных усилителей?
12. Какой метод соединения используется при усилении низкочастотных сигналов и сигналов постоянного тока?