



Г. И. Приходько

СЕЛЕКТИВНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

учебное пособие
по специальному
лабораторному практикуму
«Радиоэлектроника»
(специальность 03.03.03 –
«радиофизика»)



УДК 621.375.126(075.8)

ББК 32.846я73

П77

*Печатается по решению кафедры радиофизики
физического факультета Южного федерального университета
(протокол № 19 от 19 февраля 2019 г.)*

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики физического факультета Южного федерального университета
Г. Ф. Заргано;

доктор физико-математических наук, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения *В. Н. Таран*

Приходько, Г. И.

П77

Селективные усилители : учебное пособие по специальному лабораторному практикуму «Радиоэлектроника» (специальность 03.03.03 – «радиофизика») / Г. И. Приходько ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2020. – 108 с.

ISBN 978–5–9275–3181–3

Учебное пособие содержит теоретические основы работы и устройства селективных усилителей, а также рекомендации по выполнению лабораторных работ на учебном стенде и на компьютере по изучению принципа действия, параметров и характеристик усилителей данного типа.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 03.03.03 – «радиофизика» по дисциплинам: радиоэлектроника, квантовая радиофизика и радиофизический практикум.

УДК 621.375.126(075.8)

ББК 32.846я73

ISBN 978–5–9275–3181–3

© Южный федеральный университет, 2020

© Приходько Г. И., 2020

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Структура селективного усилителя	7
2. Электронный усилитель	8
2.1. Принцип построения электронного усилителя	8
2.2. Характеристики и основные параметры электронного усилителя	10
2.3. Схемотехника усилительного каскада	14
2.4. Анализ режима усиления	15
3. Резонансные усилители	18
3.1. Селективный усилительный каскад с параллельным колебательным контуром	19
3.1.1. Резонансный усилительный каскад с параллельным колебательным контуром на биполярном транзисторе . . .	19
3.1.2. Резонансный усилительный каскад с параллельным колебательным контуром на полевом транзисторе	27
3.2. Резонансный усилительный каскад с последовательным колебательным контуром	30
3.3. Каскады со связанными контурами	33
3.4. Параметры резонансного усилителя	36
3.5. Резонансный усилительный каскад высоких частот	39
3.6. Устойчивость резонансного каскада	42
3.7. Методы повышения устойчивости резонансных каскадов .	43
3.8. Каскодные усилители	46
4. Селективные усилители на операционных усилителях	51
5. Селективный усилитель с избирательной цепью отрицательной обратной связи	65
6. Измерение характеристик селективного усилителя	70
6.1. Лабораторная работа на экспериментальном стенде	70
6.1.1. Лабораторная установка	70
6.1.2. Порядок выполнения работы	72
6.1.3. Отчет	75
6.1.4. Контрольные вопросы	75

6.2. Исследование свойств избирательных усилителей в виртуальной лаборатории	77
6.2.1. Лабораторная работа с использованием программы <i>Electronics Workbench</i>	77
Приложения	85
Приложение 1. Расчет параметров и получение характеристик транзисторного резонансного усилителя на биполярном транзисторе	85
Приложение 2. Расчет параметров резонансного одноконтурного усилительного каскада на полевом транзисторе	93
Приложение 3. Электрические фильтры – четырехполюсники	94
Литература	107

1. СТРУКТУРА СЕЛЕКТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Структурная схема селективного усилителя может быть представлена из каскадов, построенных с использованием базового усилительного элемента, согласующих цепей и фильтра. Структурные схемы селективного усилителя в общем упрощенном виде представлены на рисунке 1.

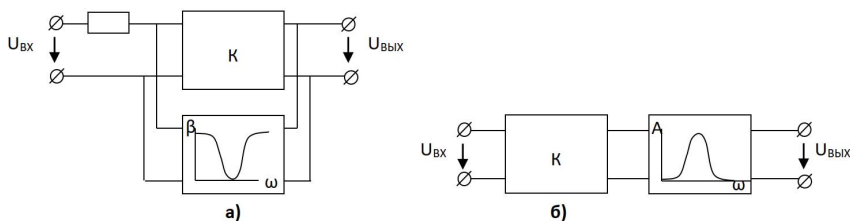


Рис. 1. Схемы избирательных усилителей с фильтром в цепи:
а – обратной связи; б – каскадным фильтром

В качестве усилителя возможно использование любого широкополосного усилителя постоянного тока или усилителя с резистивно-емкостной связью. Частотно-зависимый четырех-полюсник (полосовой фильтр) включается в цепь обратной связи (рис. 1а). Такой фильтр обычно представляет собой цепь, состоящую исключительно из резисторов и конденсаторов, т. е. так называемую RC-цепь. Селективные усилители можно разделить на резонансные, нагрузкой которых является резонансный колебательный контур (частотно-избирательная нагрузка), полосовые, нагрузкой которых в большинстве случаев служит полосовой фильтр, и узкополосные селективные RC-усилители с частотно-зависимой обратной связью.

2. ЭЛЕКТРОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

2.1. Принцип построения электронного усилителя

Минимальная часть схемы усилителя, сохраняющая усиительные свойства, называется каскадом. При значительном разнообразии электрических схем усилительных каскадов (различие состоит в типах используемых транзисторов, их количестве, в режиме работы транзисторов) для усиления электрического сигнала принцип их построения остается единым.

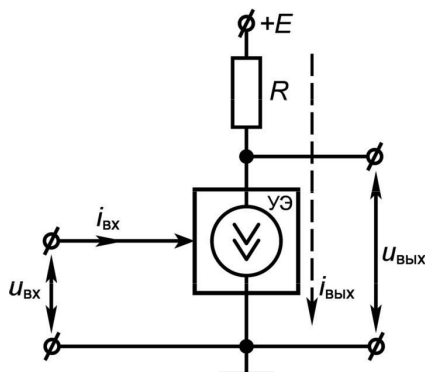


Рис. 2. Функциональная схема усилителя

Функциональная схема представления принципа построения усилительного каскада обязательно включает: источник внешнего питания (E), активный (или усилительный) элемент ($УЭ$) и нагрузку (постоянный резистор R).

Источник питания E подсоединяется одной клеммой (например, «+») к одному электроду резистора, а вторым («-») — к общему проводу (или, как иногда называют, к «общей шине»). Часто общий провод соединяется с электропроводным корпусом реального устройства. Это привело к жаргонным названиям общего провода: «корпус» или «земля». Таким образом, элементы усилительного каскада образуют замкнутую цепь, или контур: $E-R-$

УЭ. Благодаря источнику постоянного напряжения E в рассмотренном контуре может протекать постоянный ток. При отсутствии входного сигнала ($U_{\text{вх}} = 0$) в соответствии со вторым законом Кирхгофа электрическое состояние этой цепи описывается следующим уравнением

$$E = U_{\text{вых}} + i_{\text{вых}} R. \quad (1)$$

Входной сигнал $U_{\text{вх}}$, изменяя сопротивление УЭ, управляет величиной силы тока $i_{\text{вых}}$ – вот в этом и заключается процесс усиления. Изменение величины напряжения на резисторе $U_R = i_{\text{вых}} R$ приводит к изменению величины напряжения на УЭ ($U_{\text{УЭ}} = E - i_{\text{вых}} R$), что происходит как следствие изменения величины силы тока $i_{\text{вых}}$. Колебание $U_{\text{УЭ}}$ рассматривается как выходной сигнал и направляется на нагрузку усилителя $U_{\text{УЭ}} = U_{\text{вых}}$ (потребителю). Выходные ток и напряжение на УЭ значительно превышают входные – их величина определяется величиной E . Таким образом, получается, что мощность выходного сигнала больше мощности входного сигнала. За счет электрической энергии источника питания происходит увеличение мощности сигнала. Таким образом, усиление основано на преобразовании электрической энергии источника постоянного напряжения в энергию выходного сигнала за счет изменения сопротивления УЭ по закону, задаваемому входным сигналом.

Как видно из представленного, главным управляющим элементом функциональной схемы усилительного каскада, благодаря действиям которого происходит модуляция выходного тока и определяется выходное напряжение усилительного каскада, является УЭ. Он представляет собой управляемую резистивность, величина которой и определяет прежде всего выходной ток. Резистивность представляет собой переменный, регулируемый параметр УЭ. Его управление осуществляет управляемый ток $I_{\text{вх}}$ (для биполярного транзистора) либо напряжение $U_{\text{вх}}$ (для полевого транзистора). Разновидность УЭ и его тип выбирают, учитывая характеристики входного и выходного сигналов каскада (прежде всего мощность и спектр). Резистивные свойства УЭ являются определяющими в ограничении верхних частот рабочего диапазона каскада. С увеличением частоты проявляются особенности физических процессов и структуры УЭ (последнее про-

является прежде всего в монтажных емкостных свойствах конструкции).

По причине разнообразия видов электрических сигналов, для которых требуется усиление, и целей их использовании, а также немалого количества элементов, способных исполнять функции усилительных элементов, и различных способов их включения в схему существует значительное разнообразие усилительных каскадов. Перечислим основные их разновидности. По способу подключения электрода к общей шине усилительные каскады различают: схемы с общим инжекционным электродом (общим катодом ОК, общим истоком ОИ, общим эмиттером ОЭ); схемы с общим коллекторным электродом (общим анодом – ОА, общим стоком – ОС, общим коллектором – ОК); схемы с общим управляющим электродом (общей сеткой – ОС, общим затвором – ОЗ, общей базой – ОБ). Термин «общий электрод» в приведенных видах каскадов используется для определения электрода УЭ, соединенного с общим проводом (общей шиной) электрической схемы – проводом, напрямую соединяющим клеммы, к которым подведены входной и выходной сигналы каскада. Используются также такие схемы: схемы с разделенной нагрузкой, каскодные схемы, дифференциальные усилители, схемы с составными транзисторами и др. Обособленное место в этой классификации занимают каскады на операционных усилителях, а также усилители мощности.

Ввиду преобладающего практического использования устройств полупроводниковой электроники, в дальнейшем мы будем рассматривать устройства на транзисторах. Необходимо отметить, что в определенных областях применения вакуумные устройства (состоящие из электронно-вакуумных, ламповых элементов) на сегодняшний день замены не имеют.

2.2. Характеристики и основные параметры электронного усилителя

Под параметрами электронного усилителя понимают определенные числовые значения, а под характеристиками – графики зависимостей одних величин от других.

Основными параметрами усилителей являются:

1) *входные и выходные данные:*

Входные:

номинальное входное напряжение $U_{вх}$, входная мощность $P_{вх} = U_{вх} I_{вх}$, входной ток $I_{вх}$, входное сопротивление $R_{вх}$.

Выходные:

номинальное выходное напряжение $U_{вых}$, выходная мощность $P_{вых} = U_{вых} I_{вых}$, выходной ток $I_{вых}$, выходное сопротивление $R_{вых}$.

Входное и выходное сопротивления – важнейшие параметры усилительных устройств. Их значения должны учитываться при согласовании усилительного устройства как с источником входного сигнала, так и с нагрузкой.

Выходная мощность усилителя – мощность, которая может быть выделена на сопротивлении нагрузки.

2) *коэффициенты усиления* – отношение амплитуды (напряжения или тока) выходного сигнала к амплитуде (напряжения или тока) входного. В зависимости от усиливаемой величины различают следующие коэффициенты усиления:

по напряжению $K_U = U_{вых} / U_{вх}$ по мощности $K_P = P_{вых} / P_{вх} = K_U K_I$;
по току $K_I = I_{вых} / I_{вх}$

Комплексный коэффициент усиления используется для оценки прохождения через усилитель периодического, синусоидального сигнала. Например, комплексный коэффициент усиления по напряжению представляет собой отношение комплексных амплитуд ($U'_{выхл}$ и $U'_{вхл}$) или действующих значений ($U'_{вых}$ и $U'_{вх}$) выходного и входного напряжений:

$$K(j\omega) = \frac{U'_{вых}}{U'_{вх}} = |K_u| e^{j\varphi}, \quad (2)$$

где φ – угол сдвига фазы между выходным и входным напряжениями,

ω – круговая частота входного сигнала. Иногда через $K_u(\omega)$ обозначается модуль комплексного коэффициента усиления $|K_u|$.

Аналогично определяется комплексный коэффициент усиления по току.

Основными характеристиками усилителя являются:

1) *амплитудная характеристика* $U_{вых} = f(U_{вх})$, называемая также *характеристикой вход-выход* (рис. 3).

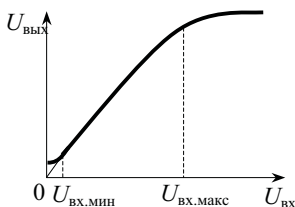


Рис. 3. Амплитудная характеристика

Амплитудная характеристика снимается в установившемся режиме работы усилителя чаще всего при подаче на вход синусоидального на некоторой постоянной частоте, а иногда – медленно изменяющегося сигнала. При $U_{ВХ} < U_{ВХ.МИН}$ выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ определяется собственными помехами и шумами усилителя.

Если $U_{ВХ.МАКС} < U_{ВХ}$, то нелинейные элементы усилителя (например, транзисторы) работают на нелинейных участках характеристик, что обуславливает ограничение амплитуды выходного сигнала и искажение его формы. При работе на этом участке выходной сигнал усилителя содержит гармонические составляющие, отсутствующие во входном сигнале. Говоря иначе, в усиливаемый сигнал вносятся нелинейные искажения.

Рабочим участком амплитудной характеристики является ее практически линейный участок при $U_{ВХ.МИН} < U_{ВХ} < U_{ВХ.МАКС}$.

2) *амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)*, представляющая собой зависимость модуля коэффициента усиления

$K_U(\omega) = |\dot{K}_U(j\omega)|$ от частоты f или $\omega = 2\pi f$ (см. рис. 4);

3) *фазочастотная характеристика (ФЧХ)*, зачастую именуемая просто *фазовой характеристикой*, представляет собой зависимость угла сдвига по фазе выходного сигнала относительно выходного φ от частоты ω (рис. 4);

АЧХ и ФЧХ называются частотными характеристиками усилителя.

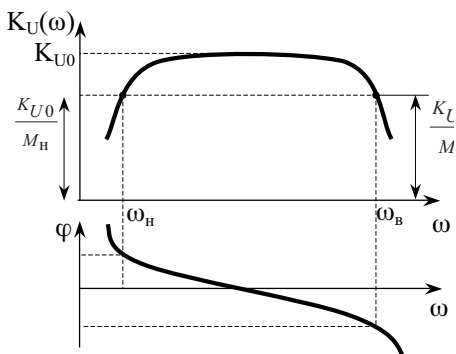


Рис. 4. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики

На рисунке 4 представленная графическая зависимость показывает, что в определенном диапазоне частот модуль коэффициента усиления мало зависит от частоты. Этот частотный интервал называют *областью средних частот* или *полосой пропускания усилителя*. Важной чертой этого диапазона частот является приблизительно линейная зависимость фазы φ от частоты ω . Величина коэффициента усиления K_{U0} вне области средних частот уменьшается. Для количественной оценки диапазона средних частот вводят *границные частоты* (низшую ω_n и высшую ω_b), на которых модуль коэффициента усиления K_U уменьшается по сравнению со значением на средних частотных K_{U0} в M_n и M_b раз соответственно. Зачастую принимают $M_n = M_b = \sqrt{2}$. Величины M_n и M_b называются коэффициентами частотных искажений на произвольной частоте ω .

АЧХ и ФЧХ называются частотными характеристиками усилителя. На рисунке 4 представлена графическая зависимость показывает, что определяют как $M(\omega) = K_{U0}/K_U(\omega)$.

4) *переходная характеристика* – это зависимость выходного напряжения от времени при подаче на вход усилителя ступенчатого скачка напряжения; характеристика используется для оценки прежде всего усилителей импульсных сигналов.

Форма входного сигнала и возможный вид *переходной характеристики* усилителя представлены на рисунке 5. Если выходной сигнал $u_{\text{вых}}(t)$ разделить на амплитуду входного сигнала $U_{\text{вх}}$, то получается так называемая *переходная функция усилителя* $h(t)$.

Форма переходной характеристики может быть разбита на *фронт* – быстро изменяющуюся часть длительностью t_f и *вершину* – часть, изменяющуюся медленно. При этом длительность фронта t оказывается обратно пропорциональна высшей граничной частоте ω_b , т. е. быстродействие усилителя определяет частота ω_b . Низшая граничная частота ω_n связана со спадом вершины выходного импульса: чем больше спад частота ω_n , тем больше спад вершины. Поэтому в усилителе постоянно нет спада вершины.

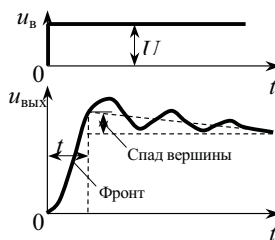


Рис. 5. Переходная характеристика