

32.97

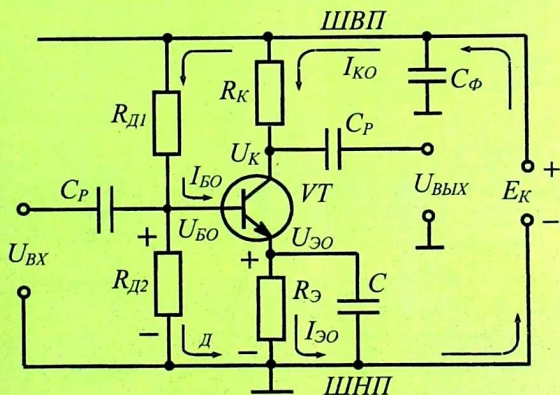
Баимо

450

X17

Р. Н. Халиуллин

## ЭЛЕКТРОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНДУК КҮЧӨТКҮЧ



Учебное пособие для студентов  
физических и технических специальностей

Физикалык жана техникалык адистиктердин  
студенттери үчүн окуу куралы

УДК 621.38  
ББК 32.85 я73  
Х 17

Допущено Министерством образования и науки Кыргызской Республики  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений.

Приказ № 292/1 от 27.04.2011.

Рецензенты: Торобеков Б.Т. – канд. техн. наук, доцент, проректор по  
учебн. работе Кыргызского государственного  
технического университета им. И. Раззакова.

Тешебаев А. – канд. техн. наук, профессор,  
декан энергетического факультета  
Ошского технологического университета.

Усаров А.С. – канд. физ.- мат. наук, доцент кафедры  
экспериментальн. и теоретич. физики ОшГУ.

Халиуллин Р.Н.

X 17 Электронный усилитель. Электрондук күчөткүч:  
Учеб. пособие для студ. физ. и техн. спец. высш. учеб. заведений. /  
Ошск. госуд. ун-т. – г. Ош: 2011. – 80 с., на рус., кырг. яз.

ISBN 978-9967-03-731-1

Пособие ориентировано на формирование у студентов – будущих инженеров  
и учителей физики – основ электронной грамотности, умения читать и понимать  
радиотехнические схемы.

В содержание пособия включены пять видов усилительных каскадов:  
простейший и типовой усилительные каскады, эмиттерный повторитель, простой и  
дифференциальный усилители постоянного тока. Кроме того, включен материал,  
связанный с операционными усилителями и их применением.

Структура и содержание пособия рассчитаны как на аудиторное, так и на  
самостоятельное усвоение студентами основ электронной усилительной техники.  
Методически пособие построено по принципу «от простого – к сложному». С этой  
целью изучение физических принципов работы усилителя начинается с изучения  
азбуки чтения радиотехнических схем с постепенным усложнением материала.  
Предложена простая методика составления эквивалентных схем электронных  
устройств для постоянных и переменных токов и определения путей протекания  
этих токов.

Пособие может использоваться для самостоятельного изучения основ  
электроники.

X 2302030000 - 11

УДК 621.38

ББК 32.85 я73

ISBN 978-9967-03-731-1

© Ошский государственный университет, 2011.

### КИРИШҮҮ

Ар түрдүү радиотехникалык түзүлүштөрдүн принципиалдык схемаларын окуй алуу жана түшүнүү билгичтиги инженер-электронщиктин, ошондой эле маалыматты аралыккаберүү жана иштеп чыгуу менен байланышкан каалаган ийгенердин негизги жана башкы билгичтиги болуп саналат. Андан тышкары радиоэлектрондук түзүлүштөрдө болуп өтүүчү физикалык процесстерди түшүнүү азыркы физика мугалимине жана жаштар менен окуучулардын техникалык чыгармачылык ишинин жетекчисине да керек. Бул билгичтиктер радиоэлектрондук жабдууну оптималдуу пайдаланууга, бул жабдуулардын иштебей калуусунун себептерин бат аныктоого жана тиешелүү оңдоо иштерин жүргүзүүгө жардам беришет.

Радиоэлектрониканы өздөштүрүүдө негизги ачкыч болуп транзистордун жана анын негизинде түзүлгөн электрондук күчөткүчтүн иштөө принциптерин билүү эсептелет. Бул билимдердин базасында ар түрдүү радиоэлектрондук түзүлүштөр: генераторлор, модуляторлор, детекторлор, логикалык, импульстук жана цифралык түзүлүштөр жөнүндө элестөөлөр калыптанат.

Колдонмонун окуу материалы электрондук күчөткүчтү окуп үйрөнүүгө дароо эле эмес, ар түрдүү токтордун агуу жолдорун «көрүү алуу» жана аны ар бир ток үчүн өзүнчө эквиваленттүү схема аркылуу көрсөтүү билгичтигин калыптандыруу менен бара-бара киришүүгө мүмкүндүк берет.

Колдонмодо күчөткүч каскаддардын беш түрү каралган: эң жөнөкөй жана типтүү күчөткүч каскаддар, эмиттердик кайталагыч, турактуу токтун жонокой жана дифференциалдык күчөткүч. Интегралдык технологияларга негизделген жана дифференциалдык күчөткүчү. Интегралдык технологияларга негизделген азыркы электрониканын элементтик базасы менен тааныштыруу максатында колдонмого операциялык күчөткүчтөр жана алардын параметрлери менен байланышкан материал да киргизилген. Ал эми операциялык күчөткүчтөр жана алардын мүмкүнчүлүктөрү жөнүндө бир кыйла тереңирээк элестөөнү калыптандыруу үчүн операциялык күчөткүчтөрдүн колдонулушунун негизги багыттары: сумматорлор, интеграторлор, дифференциаторлор жана компараторлор каралган.

### ВВЕДЕНИЕ

Умение читать и понимать принципиальные схемы различных радиотехнических устройств – является основным и главным умением инженера-электронщика, а также любого инженера, так или иначе связанного с передачей и обработкой информации. Кроме того, понимание физических процессов, протекающих в радиоэлектронных устройствах необходимо современному учителю физики и руководителю техническим творчеством молодежи и школьников. Эти умения помогают оптимально использовать имеющееся радиоэлектронное оборудование, быстро определять причины неисправностей и провести соответствующий ремонт.

Центральным ключом при овладении радиоэлектроникой является знание принципов работы транзистора и электронного усилителя на его основе. На базе этих знаний формируются представления о различных радиоэлектронных устройствах: генераторах, модуляторах, детекторах, логических, аналоговых, импульсных и цифровых устройствах.

Учебный материал пособия позволяет приступить к изучению электронного усилителя не сразу, а постепенно, формируя умение «видеть» пути протекания различных токов и представлять её эквивалентной схемой для каждого тока в отдельности.

Рассмотрены пять видов усилительных каскадов: простейший и типовой усилительные каскады, эмиттерный повторитель, простой и дифференциальный усилитель постоянного тока. С целью познакомиться с элементной базой современной электроники, базирующейся на интегральных технологиях, в пособие также включен материал, связанный с операционными усилителями и их параметрами. А для того, чтобы сформировать более глубокое представление об операционных усилителях и их возможностях, рассмотрены основные направления применения операционных усилителей: сумматоры, интеграторы, дифференциаторы и компараторы.

ОБЩАЯ ФИЗИКА И ЭЛЕКТРИЦИЗМ  
 ФИЗИКА  
 КИТЕПКАНА  
 ИИВ № 964973

4875

9650229

## 1. Как читать радиотехнические схемы?

Сложные радиотехнические схемы состоят из отдельных элементов, электрически соединённых между собой. Это - резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, транзисторы и тому подобные элементы.

Элементы радиосхем делятся на линейные и нелинейные. **Линейными элементами** являются элементы, подчиняющиеся закону Ома, то есть, величина электрического тока, протекающего через элемент прямо пропорциональна приложенному напряжению ( $I \sim U$ ). Название «линейные элементы» они получили потому, что у них график зависимости  $I = f(U)$  представляет собой прямую линию (рис. 1, а).

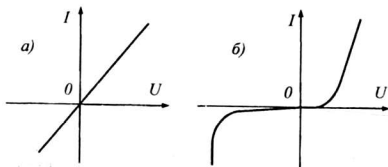


Рис. 1. Вольтамперные характеристики резистора и полупроводникового диода

Цепи, состоящие только из линейных элементов, называются **линейными цепями**. Это цепи, состоящие только из резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, например, колебательный контур.

Для линейных цепей справедлив **принцип суперпозиции**. Он заключается в том, что через любой линейный элемент одновременно могут протекать несколько независимых токов, совершенно не взаимодействуя друг с другом. При этом полный ток через элемент равен алгебраической сумме протекающих через него токов:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

**Нелинейные элементы** имеют сложную зависимость тока от напряжения, и их график представляет собой кривую линию. На рисунке (1, б) представлена вольтамперная характеристика - график зависимости тока от напряжения - для полупроводникового диода.

Цепи, содержащие хотя бы один нелинейный элемент, называются **нелинейными цепями**. Обычно, эти цепи содержат диоды или транзисторы.

## 1. Радиотехникалык схемаларды кантип окуу керек?

Татаал радиотехникалык схемалар өз ара электрдик(жактан) байланышкан айрым элементтерден турушат. Бул - резисторлор, конденсаторлор, индуктивдүүлүк катушкалары, диоддор, транзисторлор жана ушул сыяктуу элементтер.

Радиосхемалардын элементтери сызыктуу жана сызыктуу эмес болуп бөлүнүшөт. **Сызыктуу элементтер** болуп Омдун законуна баш ийген элементтер саналышат, б.а. элемент аркылуу агып өтүп жаткан электр тогунун чоңдугу тиркелген чыңалууга түз пропорциалаш ( $I \sim U$ ). «Сызыктуу элементтер» деген аталышты бул элементтер алардын  $I = f(U)$  көз карандылыгынын графиги түз сызык түрүндө болгондугу үчүн алышкан (1-сүрөт, а).

Сызыктуу гана элементтерден турган чынжырлар **сызыктуу чынжырлар** деп аталышат. Булар жалаң гана резисторлордон, конденсатордон жана индуктивдүүлүк катушкаларынан турган чынжырлар, мисалы, термелүү контуру.

Сызыктуу чынжырлар үчүн **суперпозиция принциби** аткарылат. Ал принцип каалаган сызыктуу элемент аркылуу бир убакытта бири-биринен көз карандысыз болгон бир нече токтор өз ара эч кандай аракеттенишпестен эле агып өтө алаарын билдирет. Мында, элемент аркылуу өтүүчү ток андан агып өтүп жаткан токтордун алгебралык суммасына барабар:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

**Сызыктуу эмес элементтер** токту чыңалуудан болгон татаал көз карандылыгына ээ, жана алардын графиги ийри сызык түрүндө болот. 1-сүрөттө (сүр. 1, б) жарым өткөргүч диоддун вольтампердик мүнөздөмөсү – агып жаткан токту чыңалуудан көз карандылыгынын графиги - көрсөтүлгөн.

Жок дегенде бир сызыктуу эмес элементти камтыган чынжырлар **сызыктуу эмес чынжырлар** деп аталышат. Адатта бул чынжырлар диоддорду же транзисторлорду камтышат.

Мүнөздүү касиеттери боюнча радиотехникада токтордун үч түрүн ажыратышат, алар төмөнкүдөй белгиленет:

= - турактуу ток, жыштыгы нөлгө барабар,  $\omega = 0$ ;

~ - төмөнкү жыштыктагы өзгөрмө токтор, үн жыштыгындагы сигналдар, жыштык герцтерде жана килогерцтерде өлчөнөт,  $\omega > 0$ ;

≡ - жогорку жыштыктагы өзгөрмө токтор, жыштык мегагерцтерде жана гигагерцтерде өлчөнөт,  $\omega \gg 0$ .

По характерным свойствам в радиотехнике различают три вида токов, которые обозначаются:

= - постоянный ток, частота равна нулю,  $\omega = 0$ ;

~ - переменные токи низкой частоты, например, сигналы звуковой частоты, частота измеряется в герцах и килогерцах,  $\omega > 0$ ;

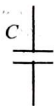
≐ - переменные токи высокой частоты, например, радиосигналы, частота измеряется в мегагерцах и гигагерцах,  $\omega \gg 0$ .

Чтобы разбираться в работе радиотехнических цепей, нужно знать основные свойства элементов, из которых составлена цепь. Для этого достаточно знать свойства **пяти элементов** (трёх линейных и двух нелинейных):



1. **Резистор** - оказывает одинаковое сопротивление, как для постоянного тока, так и для переменных токов любой частоты.

Резистор обладает **активным сопротивлением** -  $R$ , то есть, энергия протекающего электрического тока преобразуется в тепловую и энергия теряется безвозвратно.



2. **Конденсатор** - представляет бесконечное сопротивление

для постоянного тока. В то же время сопротивление конденсатора переменному току зависит от частоты тока: чем ниже частота, тем больше сопротивление конденсатора.

Сопротивление конденсатора переменному току при высоких частотах намного меньше, чем при низких частотах.

Конденсатор обладает **реактивным сопротивлением** -  $X_C$ , это означает, что энергия электрического тока не теряется, она запасается в электрическом поле конденсатора, а затем возвращается обратно, в цепь.



3. **Катушка индуктивности** - для постоянного тока представляет

очень малое сопротивление (активное сопротивление), и оно практически равно нулю. Сопротивление катушки переменному току (реактивное сопротивление) зависит от частоты: чем выше частота переменного тока, тем больше сопротивление катушки.

Сопротивление катушки на высоких частотах во много раз больше сопротивления на низких частотах. Катушка

индуктивности обладает **реактивным сопротивлением** -  $X_L$ , при этом энергия электрического тока не теряется, а запасается в магнитном поле катушки и затем возвращается обратно, в цепь.

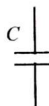
Чтобы сравнивать сопротивления линейных элементов можно воспользоваться формулами вычисления их сопротивлений:

$$R = \rho \frac{l}{S}; \quad X_C = \frac{1}{\omega C}; \quad X_L = \omega L$$

Радиотехникалык чынжырлардын иштөөсүн түшүнүп билүү үчүн чынжырды түзгөн элементтердин негизги касиеттерин билүү зарыл. Бул үчүн **беш элементтин** (үч сызыктуу жана эки сызыктуу эмес элементтердин) касиеттерин билүү жетиштүү:



**1. Резистор** - турактуу ток үчүн да, каалаган жыштыктагы өзгөрмө токтор үчүн да бирдей каршылык көрсөтөт. Резистор  $R$  - активдүү каршылыкка ээ, б.а. агып өткөн электр тогунун энергиясы жылуулук энергиясына өзгөртүлүп түзүлөт жана энергия кайтарымыз жоготулат.

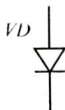


**2. Конденсатор** - турактуу ток үчүн чексиз каршылык көрсөтөт. Ошол эле учурда конденсатордун өзгөрмө токко көрсөткөн каршылыгы токтун жыштыгынан көз каранды болот: жыштык канчалык төмөн болсо конденсатордун каршылыгы ошончолук чоң болот. Конденсатордун өзгөрмө токко көрсөткөн каршылыгы жогорку жыштыктарда төмөнкү жыштыктардагыга караганда алда канча кичине. Конденсатор  $X_C$  - реактивдүү каршылыгына ээ, бул электр тогунун энергиясы жоголбойт, адегенде конденсатордун электр талаасында топтолуп, андан кийин кайрадан чынжырда кайтарылат дегенди билдирет.

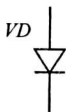
**3. Индуктивдүүлүк катушкасы** - турактуу ток үчүн өтө кичине каршылык (активдүү каршылык) көрсөтөт, жана ал иш жүзүндө нөлгө барабар. Катушканын өзгөрмө токко көрсөткөн каршылыгы (реактивдүү каршылык) ток жыштыгынан көз каранды: өзгөрмө токтун жыштыгы канчалык жогору болсо, катушканын каршылыгы ошончолук чоң болот. Катушканын жогорку жыштыктардагы каршылыгы анын төмөнкү жыштыктардагы каршылыгынан көп эсе чоң. Индуктивдүүлүк катушкасы реактивдүү  $X_L$  каршылыгына ээ, мында, электр тогунун энергиясы жоголбойт, катушканын магнит талаасында топтолот, андан кийин чынжырда кайра кайтарылат.

Сызыктуу элементтердин каршылыктарын салыштыруу үчүн алардын каршылыктарын эсептөөнүн формулаларын пайдалануу болот:

$$R = \rho \frac{l}{S}; \quad X_C = \frac{1}{\omega C}; \quad X_L = \omega L$$



**4. Диоддор** - токту бир багытта өтө жакшы, жана карама-каршы багытта өтө начар өткөрүүчү сызыктуу эмес элементтер. Практикада диод токту бир багытта гана өткөрөт жана башка багытта өткөрбөйт деп эсептешет. Диоддор өзгөрмө токту түзөтүү үчүн, детекторлор, амплитудалык чектегичтер ж.ү.с. катары пайдаланылат.



4. **Диоды** – нелинейные элементы, хорошо пропускают ток в одном направлении, и очень плохо - в противоположном направлении. На практике считают, что диод пропускает ток в одном направлении и не пропускает в другом направлении. Диоды используются для выпрямления переменного тока, в качестве детекторов, амплитудных ограничителей и так далее.



5. **Транзисторы** - также нелинейные элементы, обладают усилительными и переключательными свойствами. В них слабый входной базовый ток управляет большим выходным коллекторным током. Используются в электронных усилителях, в импульсных и цифровых

устройствах.

## 2. Эквивалентные схемы

Принципиальные радиоэлектронные схемы со сложными цепями и множеством элементов с первого взгляда кажутся труднодоступными для понимания принципа работы соответствующего устройства. При анализе радиотехнических цепей большую помощь оказывает умение составлять эквивалентные схемы указанных устройств.

**Эквивалентная схема** – это максимально упрощенная схема, выполняющая заданную функцию и удобную для анализа и расчётов.

Эквивалентная схема создаётся на основе принципиальной (полной) схемы с учетом только тех элементов схемы, которые непосредственно участвуют в рассматриваемых процессах. Это достигается путем исключения элементов, слабо участвующих в анализируемых процессах, то есть, на месте исключаемых элементов устанавливается разрыв цепи (если сопротивление элемента слишком велико) или короткое замыкание (если сопротивление данного элемента крайне мало).

На рисунке 2 приведена простая схема из последовательно и параллельно соединённых резистора, катушки индуктивности и двух конденсаторов разной ёмкости. Схема состоит только из линейных элементов и здесь соблюдается принцип суперпозиции, то есть, если на вход одновременно поданы  $=$ ,  $\sim$  и  $\approx$  токи, они протекают своими независимыми путями. Можно составить эквивалентные схемы для каждого из этих токов.

При составлении эквивалентной схемы для постоянного тока (рис. 3, а) учтено следующее: сопротивление конденсаторов  $C1$  и  $C2$  для постоянного тока бесконечно велико и поэтому для постоянного тока на их месте в схеме цепь разомкнута. В то же время, сопротивление катушки индуктивности для постоянного тока близко к нулю, поэтому





5. **Транзисторлор** - сызыктуу эмес элементтер, алар күчөтүү жана алмаштырып туташтыруу касиеттерине ээ. Аларда алсыз базалык кирүү тогу коллектордук чоң чыгуу тогун башкарат. Электрондук күчөткүчтөрдө, импульстук жана цифралык түзүлүштөрдө пайдаланылат.

## 2. Эквиваленттүү схемалар

Татаал чынжырлары жана көптөгөн элементтери бар принципиалдык радиоэлектрондук схемалар бир караганда тиешелүү түзүлүштүн иштөө принцибин түшүнүү үчүн абдан кыйын сыяктанат. Радиотехникалык чынжырларды анализдөөдө аталган түзүлүштөрдүн эквиваленттүү схемаларын түзө алуу билгичтиги чоң жардам берет.

**Эквиваленттүү схема** - бул берилген функцияны аткаруучу жана анализди, эсептөөлөрдү жүргүзүү үчүн ыңгайлуу болгон максималдык жөнөкөйлөштүрүлгөн схема.

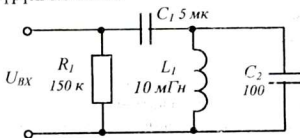


Рис. 2. Схема для разделения токов.

Эквиваленттүү схема каралып жаткан процесстерде тике катышкан элементтерин гана эсепке алынып принципиалдык (толук) схеманын негизинде түзүлөт. Бул анализденип жаткан процесстерге начар катышкан элементтерди чыгарып салуу жолу аркылуу, б.а. чыгарылып салынган элементтердин ордуна чынжыр үзүлүп коюлат (эгерде элементтин каршылыгы өтө чоң болсо) же чукул туюкталат (эгерде элементтин каршылыгы өтө кичине болсо).

2-сүрөттө удаалаш жана жарыш туташтырылган резисторду индуктивдүүлүк катушканы жана сыйымдуулуктары ар башка болгон эки конденсаторду камтыган жөнөкөй схема келтирилген. Схема жалаң гана сызыктуу элементтерден турат жана мында суперпозиция принциби аткарылат, б.а. эгерде кирүүгө бир эле убакта  $=$ ,  $\sim$  жана  $\approx$  токтор берилсе, алар өздөрүнүн көз карандысыз жолдору боюнча агып өтүшөт. Ушул токтордун ар бири үчүн эквиваленттүү схемаларды түзүүгө болот.

Турактуу ток үчүн эквиваленттүү схеманы түзүүдө (3-сүрөт, а) төмөнкүлөр эске алынган:  $C_1$  жана  $C_2$  конденсаторлорунун каршылыгы турактуу ток үчүн чексиз чоң жана ошондуктан схемада

на месте катушки в схеме цепь замкнута. При этом получается простая эквивалентная схема, показывающая, что постоянный ток протекает только через резистор  $R_1$  (рис. 3, б).

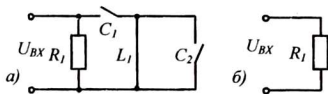


Рис. 3. Эквивалентная схема для постоянного тока.

Аналогично составляются эквивалентные схемы для низкочастотного и высокочастотного переменных токов (рис. 4, 5). Для низкочастотных токов реактивное сопротивление катушки индуктивности составляет несколько десятков омов, что во много раз меньше сопротивления резистора  $R_1$  в 150 килоомов (см. рис. 2). Поэтому на месте резистора  $R_1$  можно установить разрыв цепи. Реактивные сопротивления конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  отличаются более, чем в 100 раз, поэтому на месте конденсатора  $C_1$  устанавливаем замыкание, а на месте  $C_2$  – разрыв цепи (рис. 4, а, б).

Для высокочастотных токов реактивное сопротивление катушки  $L_1$  велико, а реактивное сопротивление конденсатора малой ёмкости  $C_2$  измеряется единицами и десятками омов, поэтому высокочастотный ток протекает в основном через него (рис. 5, а, б).

Умение составлять эквивалентные схемы облегчает чтение радиотехнических схем, и проводить необходимые расчеты. При чтении радиосхем не обязательно строить эквивалентные схемы для каждого типа токов, важно умение увидеть и указать пути протекания токов. Например, на рисунке 6 стрелками показаны пути одновременного протекания токов « = », « ~ », и « ≅ ».

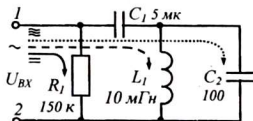


Рис. 6. Контуры токов ВЧ, НЧ и постоянного тока

Обход каждого контура надо начинать от источника соответствующего тока и заканчивать на нём же. На схеме – это выводы « 1 » и « 2 ». Например, « ≅ » ток протекает по цепи: « 1 » –  $C_1$  –  $C_2$  – « 2 ».

конденсаторлордун ордунда чынжыр үзүлүп коюлган. Ошол эле учурда турактуу ток үчүн индуктивдүүлүк катушкасынын каршылыгы нөлгө жакын, ошондуктан схемада катушканын ордунда чынжыр туюкталып коюлган. Мындан турактуу ток  $R1$  резистору аркылуу гапа агып өтүшүн көрсөткөн жөнөкөй эквиваленттик схема алынат (3-сүрөт, б).

Төмөнкү жыштыктагы жана жогорку жыштыктагы өзгөрмө токтор үчүн эквиваленттүү схемалар ушул сыяктуу эле түзүлөт (4-5 - сүрөттөр). Төмөнкү жыштыктагы токтор үчүн индуктивдүүлүк катушкасынын реактивдүү каршылыгы бир нече ондогон омду түзөт, бул  $R1$  резисторунун 150 килоомдук каршылыгынан көп эсе кичине (2-сүрөттү кара). Ошондуктан схемада  $R1$  резисторунун ордунда чынжырдын үзүгүн жайгаштырууга болот.  $C1$  жана  $C2$  конденсаторлорунун реактивдүү каршылыктары 100 эседен көбүрөөк айырмаланышат, ошондуктан  $C1$  конденсаторунун ордунда чукул туюктоону, ал эми  $C2$  нин ордунда – чынжырдын үзүгүн жайгаштырабыз (4-сүрөт, а, б).

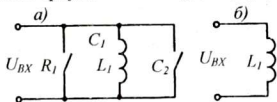


Рис. 4. Эквивалентная схема для низкочастотного переменного тока

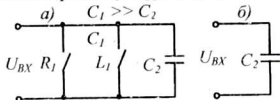


Рис. 5. Эквивалентная схема для высокочастотного переменного тока.

Жогорку жыштыктагы токтор үчүн  $L1$  катушкасынын реактивдүү каршылыгы өтө чоң, ал эми сыйымдуулугу кичине  $C2$  конденсаторунун реактивдүү каршылыгы бирдик жана ондук Ом менен олчонөт, ошондуктан жогорку жыштыктагы ток негизинен ал аркылуу агып өтөт (5-сүрөт, а, б).

Эквиваленттүү схемаларды түзүү билгичтиги радиотехникалык схемаларды окууну жана керектүү эсептоолордү жүргүзүүнү жеңилдетет. Радиосхемаларды окууда токтордун ар бир тиби үчүн эквиваленттүү схемаларды тургузуу зарыл эмес, токтордун агып өтүү жолдорун көрө алуу жана көрсөтө алуу билгичтиги маанилүү. Мисалы 6-сүрөттө « = », « ~ », « ≅ » токторунун бир эле убакта агып өтүү жолдору жебелер менен көрсөтүлгөн.

Ар бир контурду айланып чыгууну тиешелүү токтуң булагынан баштоо жана анын өзүнө келип аяктоо керек. Схемада - бул «1» жана «2» чыгуулары. Мисалы, «≅» тогу «b» –  $C1 - C2 - «2»$  чынжыры боюнча агып өтөт.

### 3. Четырехполюсники

В радиоэлектронике используются такие понятия, как двухполюсник и четырехполюсник. Полюсами являются выводы, которыми элемент присоединяется к схеме. Двухполюсниками являются резисторы, конденсаторы, катушки, диоды и другие простые элементы электрических схем. Примером четырехполюсника является, например, трансформатор.

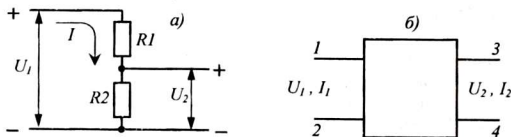


Рис. 7. Делитель напряжения и условное обозначение четырехполюсника

Простейшим четырехполюсником является делитель напряжения (рис. 7, а). Используя закон Ома, можно вывести зависимость выходного напряжения  $U_2$  от входного напряжения  $U_1$ :

$$I = \frac{U_1}{R_1 + R_2}; \quad U_2 = I \cdot R_2; \quad U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_1$$

Название «делитель напряжения» происходит от пропорции:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Основное назначение четырехполюсника – передача энергии (информации) от входа к выходу. Это может быть фильтр, усилитель, преобразователь и тому подобное устройство.

Четырехполюсник изображается в виде «чёрного ящика» с двумя парами выводов (рис. 7, б). Здесь выводы 1-2 служат входом, а выводы 3-4 – выходом.

Состояние четырехполюсника в любой момент времени определяется четырьмя величинами:

$U_1$ - входное напряжение;	}	Управляющие величины
$I_1$ - входной ток;		
$U_2$ - выходное напряжение;	}	Управляемые величины
$I_2$ - выходной ток.		

Зависимости между этими величинами описываются четырьмя параметрами и тремя характеристиками.

Основными параметрами четырехполюсника являются:

### 3. Төрт уюлдуктар

Радиотехникада кош (эки) уюлдук (кош уюлдуу элемент) жана төрт уюлдук (төрт уюлдуу элемент) деген түшүнүктөр пайдаланылат.

Уюлдар болуп элемент схемага туташтырылуучу чыгуулар саналышат.

Кош уюлдуктар болуп электр схемаларынын резисторлору, конденсаторлору, катушкалары, диодлору жана башка жөнөкөй элементтери саналышат. Төрт уюлдуктун мисалы болуп трансформатор эсептелет.

Жөнөкөй төрт уюлдук болуп чыналуу бөлгүчү эсептелет (сүр. 7, а). Омдун законун пайдаланып чыгыш  $U_2$  чыналуунун кириш  $U_1$  чыналуудан көз карандылыгын чыгарса болот:

$$I = \frac{U_1}{R_1 + R_2}; \quad U_2 = I \cdot R_2; \quad U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_1$$

«Чыналуу бөлгүчү» деген ат төмөнкү пропорциядан чыгат:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Төрт уюлдуктун негизги кызматы – энергияны (информацияны) кирүүдөн чыгууга откоруп берүү.

Бул - фильтр, күчөткүч, өзгөртүп түзгүч жана ушул сыяктуу түзүлүш болушу мүмкүн.

Төрт уюлдук эки жуп чыгаруулары (вывод) бар «кара ящик» түрүндө сүрөттөлөт (7-сүрөт, б).

Мында 1-2-чи чыгаруулар кирүү, ал эми 3-4-чыгаруулар чыгуу катары кызмат кылышат.

Төрт уюлдуктун абалы убакыттын каалаган моментинде төрт чоңдук менен аныкталат:

$U_1$ - кирүү чыналуусу;	}	башкаруучу чоңдуктар;
$I_1$ - кирүү тогу;		
$U_2$ - чыгуу чыналуусу;	}	башкарылуучу чоңдуктар.
$I_2$ - чыгуу тогу.		

Ушул чоңдуктардын ортосундагы көз карандылыктар төрт параметр жана үч мүнөздөмө аркылуу баяндалат

Төрт уюлдуктун негизги параметрлери болуп:

1) **жеткирип берүү коэффициенти** (ток боюнча, чыналуу боюнча же кубаттуулук боюнча):

$$K_I = \frac{I_2}{I_1}; \quad K_U = \frac{U_2}{U_1}; \quad K_P = \frac{P_2}{P_1}$$

1) коэффициент передачи (по току, по напряжению или по мощности):  $K_I = \frac{I_2}{I_1}$ ;  $K_U = \frac{U_2}{U_1}$ ;  $K_P = \frac{P_2}{P_1}$

2) коэффициент обратной связи по напряжению или по току:

$$K_{OCU} = \frac{\Delta U_1}{U_2} \quad \text{или} \quad K_{OCI} = \frac{\Delta U_1}{I_2}$$

3) входное сопротивление:  $R_{BX} = \frac{U_1}{I_1}$

4) выходное сопротивление:  $R_{ВЫХ} = \frac{U_2}{I_2}$

Нельзя сказать, что энергия полностью, на все сто процентов, передается от входа к выходу, часть энергии возвращается назад, от выхода к входу.

Такая передача энергии с выхода на вход называется *обратной связью*. Она заключается в возникновении на входе некоторой ЭДС -  $\Delta U_1$ , пропорциональной выходному напряжению или выходному току:

$\Delta U_1 = K_{OCU} \cdot U_2$  или  $\Delta U_1 = K_{OCI} \cdot I_2$ . Здесь  $K_{OCU}$  и  $K_{OCI}$  - коэффициенты обратной связи по напряжению и по току.

Зависимости между входными и выходными величинами невозможно описать аналитически (например, в виде формул), поэтому они представляются в виде графиков, называемых характеристиками. Наиболее часто используются следующие характеристики:

**Входная характеристика**, показывает зависимость входного тока от входного напряжения  $I_1 = f(U_1)$ .

**Выходная характеристика**, показывает зависимость выходного тока от выходного напряжения  $I_2 = f(U_2)$ .

**Переходная характеристика**, показывает зависимость выходного тока от входного напряжения  $I_2 = f(U_1)$ .

Характеристики строятся на основе многократных измерений, при этом один из параметров непрерывно поддерживается постоянным.

В реальных четырёхполюсниках неизбежно возникают искажения сигнала, когда выходной сигнал по форме заметно отличается от входного сигнала. Искажения могут быть связаны с неодинаковой передачей в зависимости от амплитуды и частоты входных сигналов. Эти искажения называются *амплитудными* и *частотными искажениями*.

Искажения, связанные с изменением спектрального состава сигнала, называются *нелинейными искажениями*. Как правило, они

2) **чыңалуу боюнча тескери байланыш коэффициентти:**

$$K_{OC} = \frac{\Delta U_1}{U_2}$$

3) **кирүү каршылыгы:**  $R_{BX} = \frac{U_1}{I_1}$

4) **чыгуу каршылыгы:**  $R_{ВЫХ} = \frac{U_2}{I_2}$

Энергия толугу менен жүз пайызга кирүүдөн чыгууга өткөрүлүп берилет деп айтууга болбойт, энергиянын кайсы бир бөлүгү артка, чыгуудан кирүүгө кайра берилет.

Мындайча энергияны чыгуудан кирүүгү өткөрүлүп берүү **тескери байланыш** деп аталат. Ал кирүүдө чыгуу чыңалуусуна же чыгуу тогуна пропорциялуу кандайдыр бир  $\Delta U_1$  ЭККү пайда болушун билдирет:  $\Delta U_1 = K_{OCU} \cdot U_2$  же  $\Delta U_1 = K_{OC1} \cdot I_2$ . Мында  $K_{OCU}$  жана  $K_{OC1}$  - тескери байланыш коэффициенттери.

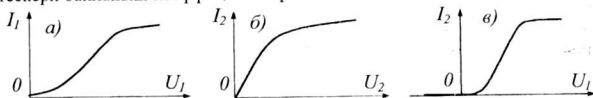


Рис. 8. Входная, выходная и переходная характеристики четырехполюсника.

Кирүү жана чыгуу чоңдуктарынын ортосундагы көз карандылыктарды аналитикалык түрдө (мисалы, формулалар түрүндө) берүү мүмкүн эмес, ошондуктан алар мүнөздөмөлөр деп аталышкан графиктер түрүндө көрсөтүлөт. Төмөнкү мүнөздөмөлөр эң эле көп пайдаланылат:

**Кирүү мүнөздөмөсү**, кирүү тогунун кирүү чыңалуусуна болгон көз карандылыгын көрсөтөт:  $I_1 = f(U_1)$ .

**Чыгуу мүнөздөмөсү**, чыгуу тогунун чыгуу чыңалуусуна болгон көз карандылыгын көрсөтөт:  $I_2 = f(U_2)$ .

**Өтмө** (переходная) **мүнөздөмө**, чыгуу тогунун кирүү чыңалуусунан көз карандылыгын көрсөтөт:  $I_2 = f(U_1)$ .

Мүнөздөмөлөр көп жолу кайталанган өлчөөлөр негизинде гүзүлүшөт, мында параметрлердин бири турактуу болуп сакталат.

Реалдуу төрт уюлдуктарда чыгуу сигналы кирүү сигналынан байкалаарлык айырмаланган кезде сигналдын бузулуусу пайда болот. Бузулуулар кирүү сигналдарынын амплитудасынан жана жыштыгынан болгон көз карандылыктарда өткөрүп берүү бирдей болгондугу менен

возникают в цепях, содержащих нелинейные элементы, например, диоды, транзисторы.

Использование системы параметров позволяет представить четырёхполюсник эквивалентной схемой из двух двухполюсников, в каждом из которых учтено влияние другого двухполюсника, как например, в эквивалентной схеме транзистора (см. рис. 12), где во входном двухполюснике учтена обратная связь от выходного двухполюсника, а во втором – генерирование выходного тока за счет тока в первом двухполюснике.

#### 4. Принцип усиления

Усилитель представляет собой четырёхполюсник, на вход которого подаётся слабый, усиливаемый, сигнал, а с выхода снимается усиленный сигнал. В усилителе выходной сигнал содержит ту же информацию, что и входной сигнал, но при этом выходной сигнал больше, ярче, громче и так далее. Различают три вида электронных усилителей: *усилитель напряжения*, *усилитель тока*, *усилитель мощности*. Соответствующие *коэффициенты усиления*:

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}, \quad K_I = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}}, \quad K_P = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}}$$

Главным в усилителе является *усиление сигнала по мощности*. Например, трансформатор или колебательный контур не являются усилителями, даже, если в них выходное напряжение больше напряжения входного сигнала (повышающий трансформатор, или резонанс напряжений в последовательном контуре). Таким образом, усилителем называется четырёхполюсник, в котором мощность выходного сигнала больше мощности входного сигнала, то есть,  $P_2 > P_1$ .

Здесь не происходит нарушения закона сохранения энергии, всё дело в том, что в усилителе обязательно имеется источник электропитания, например, батарея гальванических элементов, и усиление мощности сигнала происходит за счёт энергии источника питания (рис. 9).



Рис. 9. Принцип усиления



байланышкан. Бул бузулуулар **амплитудалык** жана **жыштыктык бузулуулар** деп аталышат.

Сигналдын спектрдик составынын өзгөрүшү менен байланышкан бузулуулар **сызыктуу эмес бузулуулар** деп аталышат. Бул сызыктуу эмес элементтерди, мисалы, диоддорду, транзисторлорду камтыган чынжырларда орун алат.

Параметрлердин системасын пайдалануу төрт уюлдукту эки кош уюлдуктардан турган эквиваленттик схема түрүндө көрсөтүүгө мүмкүндүк берет, бул кош уюлдуктардын ар биринде башка кош уюлдуктун таасири эске алынган. Мисалы, транзистордун эквиваленттик схемасында кирүү кош уюлдуктун чыгыш кош уюлдуктан болгон тескери байланышы эске алынган (12-сүрөттү караныз).

#### 4 Күчөтүү принциби

Күчөткүч кирүүсүнө алсыз күчөтүүлүчү сигнал берилүүчү, ал эми чыгуусунан күчөтүлгөн сигнал алынуучу төрт уюлдук болуп саналат. Күчөткүчтө чыгуу сигналы кирүү сигналы камтыган эле сигналды камтыйт, бирок мында чыгуу сигналы чоңураак, жарыгыраак, катуураак ж.у.с. Электрондук күчөткүчтөрдүн үч тибин ажыратышат: **чыңалууну күчөткүчү, токту күчөткүчү, кубаттуулукту күчөткүчү.** Тиешелүү **күчөтүү коэффициенттери:**

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}, \quad K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}, \quad K_P = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}$$

Күчөткүчтө башкы болуп сигналдарды кубаттуулук боюнча күчөтүү саналат. Мисалы, трансформатор же термелүү контуру аларда чыгуу чыңалуусу кирүү чыңалуусунан чоң болгон кезде да (жогорулатуучу трансформатор, же удаалаш контурдагы чыңалуунун резонансы) күчөткүч болуп саналышпайт. Ошентип чыгуу сигналынын кубаттуулугу кирүү сигналынын кубаттуулугунан чоң, б.а.  $P_2 > P_1$  болгон төрт уюлдук күчөткүч деп аталат.

Бул жерде энергиянын сакталуу закону бузулбайт, анткени күчөткүчтө сөзсүз түрдө электирдик азыктандыргыч булагы, мисалы, гальваникалык элементтердин батареясы болот, жана сигналдын кубаттуулугунун күчөшү азыктандыргыч булактын энергиясынын эсебинен жүрөт (9-сүрөт).

Ошентип, күчөтүү принциби азыктандыргыч булактын энергиясын күчөтүүлүчү сигналдын энергиясына өзгөртүп түзүүдө турат. Мындайча өзгөртүп түзүү күчөтүүлүчү элемент деп аталган сызыктуу эмес элементтин жардамында гана ишке ашышы мүмкүн. Күчөтүүлүчү элемент болуп мисалы, транзистор, вакуумдук триод, лазер ж.б. приборлор кызмат кыла алат.

ОШ МАНИФЕСТИНИК УМБЕРСИТЕТИ  
КИТЕПКАНА  
ИНВ № 964973

Таким образом, принцип усиления заключается в преобразовании энергии источника питания в энергию усиливаемого сигнала. Такое преобразование возможно с помощью нелинейного элемента, который называется усилительным элементом. Усилительным элементом может служить, например, транзистор, вакуумный триод, лазер и др.

## 5. Транзистор – усилительный элемент

Работа транзистора в качестве усилительного элемента основана на зависимости величины коллекторного тока от величины тока базы:

- если нет базового тока – нет и коллекторного тока,
- если есть базовый ток – есть и коллекторный ток,
- если базовый ток возрастает, то возрастает и коллекторный ток,
- если базовый ток уменьшается, то уменьшается и коллекторный ток.

При этом изменения коллекторного тока в точности повторяют изменения базового тока (рис. 10), но с большей амплитудой, то есть, коллекторный ток в несколько раз больше базового тока ( $I_K > I_B$ ). Это означает, что *слабый базовый ток управляет большим коллекторным током*. В этом и заключается *усилительное свойство транзистора*.

## 6. Схемы включения транзистора

Так как транзистор обладает только тремя выводами, то при включении транзистора в схему в качестве четырёхполюсника, один из выводов транзистора оказывается общим для входа и выхода. При этом возможны три способа включения транзистора в схему (рис. 11).

Это - схема с общим эмиттером (схема ОЭ), схема с общей базой (схема ОБ) и схема с общим коллектором (схема ОК). В каждой схеме включения параметры транзистора, как четырехполюсника, оказываются различными. В таблице 1 приведены основные параметры типового транзистора при разных схемах включения в схему.

Таблица 1. Параметры транзистора в разных схемах включения

	$K_I$	$K_U$	$R_{ВХ}$	$R_{ВЫХ}$
ОЭ	10...100	100...500	10...20 кОм	1...2 кОм
ОБ	меньше 1	10...50	100...200 Ом	200...500 кОм
ОК	100...1000	1	0,1...100 Мом	1...100 Ом

На практике наибольшее применение получила схема ОЭ, которая позволяет осуществить усиление входного сигнала одновременно и по напряжению и по току.

## 5. Транзистор - күчөтүүчү элемент

Транзистордук күчөтүүчү элемент катары иштөөсү коллектордук токту чоңдугунун базанын тогунун чоңдугунан болгон көз карандылыгына негизделген:

- эгерде базалык ток жок болсо, анда коллектордук ток дагы жок,
- эгерде базалык ток бар болсо, анда коллектордук ток дагы бар,
- эгерде базалык ток чоңойсо, анда коллектордук ток дагы чоңойот,
- эгерде базалык ток кичирейсе, анда коллектордук ток дагы кичирейет.

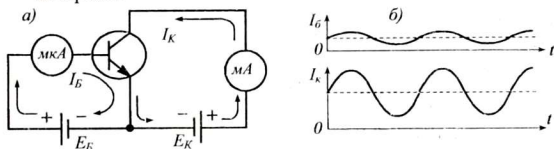


Рис. 10. Базовый и коллекторный токи транзистора

Мында коллектордук токту өзгөрүүсү базалык токту өзгөрүүсүн так өзүндөй кайталайт, бирок чоңураак амплитуда менен (10-сүрөт,б), б.а. коллектордук ток базалык токтон бир нече эсе чоң ( $I_K > I_B$ ). Бул **алсыз базалык ток чоң коллектордук токту башкарат** дегенди билдирет. Транзистордун **күчөтүүчү касиети** мына ушунда болуп саналат.

## 6. Транзисторду бириктирүү схемалары

Транзистор үч чыгарууга ээ болгондуктан аны схемага төрт уюлдук катары бириктирүүдө транзистордун бир чыгаруусу кирүү жана чыгуу үчүн жалпы болот. Мында транзисторду схемага бириктирүүгө үч ыкма менен мүмкүн болот (11- сүрөт).

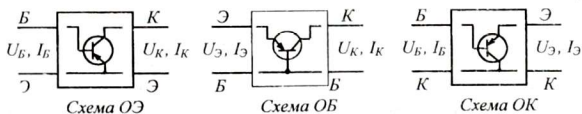


Рис. 11. Схемы включения транзистора

Бул - жалпы эмиттердүү схема (ЖЭ схемасы), жалпы базалуу схема (ЖБ схемасы), жалпы коллектордуу схема (ЖК схемасы).

Основным параметром транзистора в схеме ОЭ является коэффициент передачи по току  $\beta$ . Это коэффициент усиления по току. Его, под названием параметра  $h_{21}$ , обязательно указывают во всех справочниках. Это - отношение изменения выходного тока к вызвавшему его изменению входного тока:  $\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$  при условии  $U_K = \text{const}$ , то есть, когда изменение коллекторного тока -  $\Delta I_K$  обусловлено только изменением тока базы -  $\Delta I_B$ .

## 7. Эквивалентная схема транзистора

Эквивалентная схема транзистора по схеме ОЭ состоит из двух двухполюсников (рис. 12). Эти двухполюсники можно рассматривать отдельно, но с учетом влияния их друг на друга. Эти влияния учтены в системе  $h$ -параметров:

$h_{11}$  - входное сопротивление транзистора;

$h_{12}$  - коэффициент обратной связи по напряжению:

$$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \text{ или } h_{12} = \frac{u_1}{u_2};$$

$h_{21}$  - коэффициент усиления по току,  $\beta$ ;

$h_{22}$  - выходная проводимость.

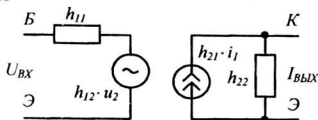


Рис. 12. Эквивалентная схема транзистора по схеме ОЭ.

Влияние выхода транзистора на его вход на эквивалентной схеме отражено включением в первый двухполюсник генератора переменной ЭДС:  $e = h_{12} \cdot u_2$ , а влияние входа на выход - включением в выходную цепь генератора тока:  $i_2 = h_{21} \cdot i_1$ . Это усиленный, коллекторный ток.

Величина параметра  $h_{12}$  близка к нулю ( $h_{12} < 0,001$ ), поэтому им иногда можно пренебречь и не учитывать его. Выходное сопротивление

$$R_{\text{вых}} = \frac{1}{h_{22}}.$$

Использование эквивалентной схемы транзистора, облегчает анализ работы усилителя и упрощает расчет схемы усилителя.

Төрт уюлдук катары транзистордун параметрлери ар бир схема боюнча бириктиргенде ар түрдүү болот. 1-таблицада типтуу транзистордун схемага түрдүүчө бириктиргендеги негизги параметрлери берилген.

Таблица 1. Транзистордун түрдүү бириктирүүлөрдөгү параметрлери

	$K_I$	$K_U$	$R_{BX}$	$R_{ВЫХ}$
ЖЭ	10...100	100...500	10...20 кОм	1...2 кОм
ЖБ	1 ден кичи	10...50	100...200 Ом	200...500 кОм
ЖК	100...1000	1	0,1...100 Мом	1...100 Ом

Иш жүзүндө кирүү сигналын бир эле убакта чыңалуу боюнча жана ток боюнча күчөтүүнү ишке ашырууга мүмкүндүк берген ЖЭ схемасы эң чоң колдонууга ээ.

ЖЭ схемасындагы транзистордун негизги параметри болуп ток боюнча жеткирип берүү коэффициенти  $\beta$  саналат. Бул транзистордун ток боюнча күчөтүү коэффициенти.

Ал  $h_{21}$  параметри деген аталышта бардык сурап-билме китептеринде сөзсүз көрсөтүлөт. Бул  $U_K = \text{const}$ , б.а. коллектордук токтун  $\Delta I_K$  өзгөрүшү бир гана база тогунун  $\Delta I_B$  өзгөрүшү менен шартталган учурда чыгуу тогунун өзгөрүшүнүн аны пайда кылган, кирүү тогунунун өзгөрүшүнө болгон катышы:  $\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$ .

## 7. Транзистордун эквиваленттүү схемасы

ЖЭ схемасы боюнча транзистордун эквиваленттүү схемасы эки эки уюлдуктан турат (12- сүрөт).

Бул эки уюлдуктардын ар бирин, алардын бири-бирине таасирин эсепке алуу менен, өзүнчө, айырым кароого болот, ушул таасирлер  $h$ -параметрлер системасында эсепке алынган:

$h_{11}$  - транзистордун кирүү каршылыгы;

$h_{12}$  - чыңалуу боюнча тескери байланыш коэффициенти:

$$h_{12} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \text{ же } h_{12} = \frac{u_1}{u_2};$$

$h_{21}$  - ток боюнча күчөтүү коэффициенти,  $\beta$ ;

$h_{22}$  - чыгуу өткөрүмдүүлүгү.

Эквиваленттуу схемада транзистордун чыгуусунун анын кирүүсүнө тийгизген таасири биринчи эки уюлдукка өзгөрмө ЭККнүн генераторун туташтыруу аркылуу чагылдырылган:  $e = h_{12} \cdot u_2$ , ал эми

## 8. Режимы работы транзистора

Транзистор может использоваться как усилительный элемент и как электронный переключатель. Всё зависит от установленного режима работы транзистора. Дело в том, что транзистор – нелинейный элемент и его коллекторный ток имеет сложную зависимость от управляющего напряжения базы.

На рисунке 13 приведена переходная вольтамперная характеристика для идеального транзистора, которая описывается составной функцией:

$$I_K = \begin{cases} 0, & \text{если } U_B \leq U_{B1} \\ k \cdot U_B, & \text{если } U_{B1} < U_B < U_{B2} \\ I_{КНАС}, & \text{если } U_B \geq U_{B2} \end{cases}$$

Переходная характеристика имеет три характерных участка (1-2, 2-3, и 3-4), которые соответствуют трём режимам работы транзистора.



Рис. 13. Режимы работы транзистора

1. **Режим отсечки.** Напряжение базы меньше напряжения открывания транзистора ( $U_B \leq U_{B1}$ ), поэтому транзистор полностью закрыт. При этом ток коллектора равен нулю независимо от величины напряжения базы ( $I_K = 0$ ). Участок характеристики 1-2 соответствует режиму отсечки.

2. **Режим насыщения.** Напряжение базы больше напряжения насыщения транзистора ( $U_B \geq U_{B2}$ ), транзистор полностью, до насыщения, открыт. При этом ток коллектора совершенно не зависит от величины напряжения базы и остается постоянным ( $I_K = I_{КНАС} = const$ ). Участок характеристики 3-4 соответствует режиму насыщения.

Режимы отсечки и насыщения используются ограничителями напряжения и электронными ключами.

3. **Активный режим.** При значениях базового напряжения в интервале напряжений  $U_{B1} \dots U_{B2}$  транзистор находится в открытом состоянии. При этом ток коллектора управляется базовым

кирүүнүн чыгууга тийгизген таасири – чыгуу чынжырына токтуу генераторун кошуу аркылуу көрсөтүлгөн:  $i_2 = h_{21} \cdot i_1$ . Бул күчөгүлгөн, коллектордук ток.

$h_{12}$  параметринин чоңдугу нөлгө жакын ( $h_{12} < 0,001$ ), ошондуктан аны эске албастан жана эсепке албай коюуга болот. Транзистордун чыгуу каршылыгы  $R_{\text{вых}} = \frac{1}{h_{22}}$ .

Транзистордун эквиваленттүү схемасын пайдалануу күчөткүчтүн ишин анализдөөнү жеңилдетет жана күчөткүчтүн схемасын эсептөөнү жөнөкөйлөтөт.

## 8. Транзистордун иштөө режимдери

Транзистор күчөтүүчү элемент жана электрондук алмаштырып туташтыргыч катары пайдаланылат.

Баардыгы транзистордун коюлган режиминен көз каранды болот.

Транзистор - сызыктуу эмес элемент жана анын базасынын башкаруучу чыңалуусунан коллектордук тогу татаал көз карандылыкка ээ.

13-сүрөттө идеалдык транзистор үчүн өткөөл вольтампердик мүнөздөмө келтирилген, ал курамдык функция аркылуу берилет:

$$I_K = \begin{cases} 0, \dots \text{ эгер } U_B \leq U_{B1} \\ k \cdot U_B, \text{ эгер } U_{B1} < U_B < U_{B2} \\ I_{\text{КНАС}}, \text{ эгер } U_B \geq U_{B2} \end{cases}$$

Транзистордун үч иштөө режимине туура келген өткөөл мүнөздөмө үч мүнөздүү бөлүктөргө ээ (1-2, 2-3, жана 3-4).

1. **Кесип таштоо режими.** Базанын чыңалуусу транзистордун ачылуу чыңалуусунан кичине болгондуктан ( $U_B \leq U_{B1}$ ), транзистор толугу менен жабык. Мында коллектордун тогу базанын чыңалуусунун чоңдугунан көз карандысыз түрдө нөлгө барабар ( $I_K = 0$ ). Мүнөздөмөнүн 1-2 бөлүгү кесип таштоо (отсечка) режимине тура келет.

2. **Каныгуу режими.** Базанын чыңалуусу транзистордун каныгуу чыңалуусунан чоң болгондо ( $U_B \geq U_{B2}$ ), транзистор толугу менен, каныкканга чейин, ачык. Мында коллектордун тогу базанын чыңалуусунун чоңдугунан таптакыр көз каранды болбойт жана туруктуу бойдон калат ( $I_K = I_{\text{КНАС}} = \text{const}$ ). Мүнөздөмөнүн 3-4 бөлүгү каныгуу режимине туура келет.

Кесип таштоо жана каныгуу режимдери чыңалууну чектегичтерде жана электрондук ачкычтарда пайдаланышат.

напряжением, то есть, изменение коллекторного тока прямо пропорционально изменению базового напряжения:  $\Delta I_K \sim \Delta U_B$ , то есть,  $\Delta I_K = k \cdot \Delta U_B$ .

## 9. Классы усиления

Входной сигнал представляет переменное напряжение (сигнал звука или видеосигнал), которое часть периода имеет положительную полярность, а вторую часть – отрицательную. На рисунке 14 приведена осциллограмма гармонического сигнала  $u = U_m \cos(\omega t)$  с амплитудой  $U_m$  и частотой  $\omega$ .

Соответствующий переменный коллекторный ток транзистора можно найти графически. Для этого график входного напряжения  $u_{ВХ} = f(t)$  располагают таким образом, чтобы ось координат  $t$  временной характеристики входного сигнала оказалась расположенной параллельно оси  $U_B$  переходной характеристики транзистора (рис. 15).

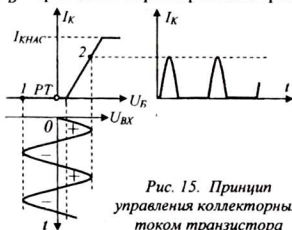


Рис. 15. Принцип управления коллекторным током транзистора

Интервал напряжений, в пределах которого изменяется напряжение базы, называется **рабочим участком**. На рисунке - это участок переходной характеристики между точками 1-2.

Точка характеристики, соответствующая состоянию, когда входное напряжение (напряжение усиливаемого сигнала) равно нулю, называется **рабочей точкой**, на рисунке - это точка РТ.

Положение рабочей точки зависит от значения начального постоянного напряжения базы.

Как видно из рисунка, в установленном режиме  $U_{Б0} = 0$  транзистор большую часть периода закрыт и коллекторный ток возможен только в положительные полупериоды входного сигнала, когда напряжение базы соответствует активному режиму транзистора, то есть попадает на наклонный участок переходной характеристики.

Максимуму входного напряжения соответствует точка 2, а минимуму – точка 1. При этом коллекторный ток имеет форму



3. **Активдуу режим.** Базалык чыңалуунун маанилери  $U_{B1} \dots U_{B2}$  интервалында кезинде транзистор ачык абалда турат. Мында коллектордук тогу базалык чыңалуу тарабынан башкарылат, б. а. коллектордук токтун өзгөрүшү базалык чыңалуунун өзгөрүшүнө түз пропорциялуу:  $\Delta I_K \sim \Delta U_B$ , же  $\Delta I_K = k \cdot \Delta U_B$ .

## 9. Күчөтүү класстары

Кирүү сигналы өзгөрмө чыңалуу (үн сигналы же видео сигналы) болуп саналат, ал термелүү мезгилинин бир бөлүгүндө - оң, ал эми экинчи бөлүгүндө - терс уюлдуулукка ээ.

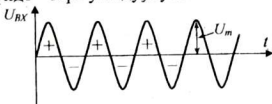


Рис.14. Переменное входное напряжение

14-сүрөттө амплитудасы  $U_m$  жана жыштыгы  $\omega$  болгон гармоникалык  $u = U_m \cos(\omega t)$  сигналынын осциллограммасы келтирилген.

Транзистордогу тиешелүү өзгөрмөлүү коллектордук токтун графика түрүндө табууга болот. Бул үчүн кирүү  $u_{вх} = f(t)$  чыңалуусунун графигин (кирүү сигналын убакыттык мүнөздөмөсүнүн)  $t$  координата огу транзистордун өткөөлдүк мүнөздөмөсүнүн  $U_B$  огуна жарыш болгондой түрдө жайгаштырышат (15-сүрөт).

Базанын чыңалуусунун өзгөрүп жаткан чыңалуу аралыгы **жумушчу участок** деп аталат. Сүрөттө - бул өткөөлдүк мүнөздөмөнүн 1-2- чекиттеринин арасындагы участок.

Кирүү чыңалуу (күчөтүрүүлүчү сигнал чыңалуусу) нөлгө барабар болгон абалга дал келген мүнөздөмөнүн чекити **жумуш чекити** деп аталат, сүрөттө - бул РТ чекити.

Жумушчу чекиттин жайланышы базадагы башталгыч турактуу чыңалуусунан көз каранды.

Сүрөттөн көрүнүп тургандай, коюлган  $U_{B0} = 0$  режимде транзистор мезгилдин көпчүлүк бөлүмүндө жабык, жана коллектордук ток кирүү сигналынын базанын чыңалуусу транзистордун активдуу режимине тура келген оң жарым мезгилдерде гана болушу мүмкүн, башкача айтканда өткөөлдүк мүнөздөмөнүн төмөнкү жанык участкасуна ылайык келет.

Кирүү чыңалуусунун максимумуна - 2 чекит, ал эми минимумуна - өткөөлдүк мүнөздөмөсүнүн 1 чекити туура келет. Мында коллектордук ток импульстар формасына ээ. Жана чыгуу сигналы кирүү

импульсов и выходной сигнал совершенно не похож на входной сигнал, то есть, сигнал усиливается с искажениями.

Для того чтобы сигнал в транзисторе усиливался без искажений, необходимо, чтобы напряжение базы всегда находилось на активном участке переходной характеристики (на наклонном участке).

Следовательно, рабочая точка должна располагаться на середине наклонного участка характеристики, а весь рабочий участок размещаться в пределах наклонного участка характеристики (рис. 16).

Это равносильно попытке управлять потоком воды из крана: для того, чтобы, вращая ручку крана вправо-влево, уменьшать или увеличивать поток воды, нужно, чтобы в исходном состоянии кран был наполовину открыт. При этом можно уменьшать (есть, что уменьшать) или увеличивать поток воды.

Режим работы транзистора, при котором оба полупериода входного сигнала усиливаются одинаково, называют *усилением в классе А*. При этом время открытого состояния транзистора равно периоду  $t_{\text{ОТКР}} = T$ .

Если усиливаются только положительные полупериоды, а отрицательные полупериоды не усиливаются, такой режим называют *усилением в классе В*. При этом время открытого состояния равно половине периода  $t_{\text{ОТКР}} = T / 2$ .

Для этого рабочая точка располагается в точке отсечки коллекторного тока (нижняя точка активного участка).

Различают также *усиление в классе АВ* (рабочая точка у нижней части активного участка) и *в классе С* (рабочая точка левее точки отсечки).

В режиме усиления класса АВ большую часть периода транзистор открыт, то есть, время открытого состояния больше половины периода,  $T / 2 < t_{\text{ОТКР}} < T$ .

В режиме усиления класса С транзистор открыт меньше, чем на полпериода, то есть,  $t_{\text{ОТКР}} < T / 2$ .

Указанные режимы применяются много реже, чем режимы класса А и В. В дальнейшем будем рассматривать усилители, работающие в классе А.

Временные характеристики коллекторного тока при работе транзистора в различных классах усиления (А, АВ, В и С) показаны на рисунке 17. Заштрихованные части соответствуют открытому состоянию транзистора.

Режим работы транзистора устанавливается начальным смещением напряжения базы  $U_{\text{Б0}}$  с помощью отдельного источника постоянного напряжения  $U_{\text{СМ}} = U_{\text{Б0}}$

сигналына таптакыр окшош эмес, башкача айтканда, сигнал бурмаланып күчөтүлөт.

Сигнал транзистордо бузулмаланбай күчөтүлсүн үчүн базанын чыналуусу дайыма өткөөлдүк мүнөздөмөнүн активдуу участогунда (жантык участогунда) болушу зарыл.

Демек, жумушчу чекит мүнөздөмөнүн жантык участогунун борборунда, ал эми жумушчу участок толугу менен жантык участогунун чектеринде жайгашууга тийиш (16-сүрөт).

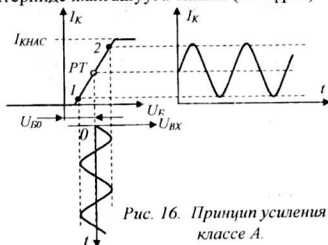


Рис. 16. Принцип усиления в классе А.

Бул крандан куйюлуучу суунун агымын башкаруу аракетинен тең күчтүү: крандын туткасын оңго-солго айландыруу аркылуу суунун агымын кичирейтүү же чоңойтуу үчүн, баштапкы абалында кран жарым жартылай ачык болууга тийиш.

Ушундай болгондо гана суунун агымын кичирейтүү (кичирейтсе турган нерсе бар) же чоңойтуу мүмкүн.

Транзистордун кирүү сигналынын эки жарым мезгили бирдей күчөтүлгөн иштөө режими **А классындагы күчөтүү** деп аталат.

Мында транзистордун ачык абалда болуу убакыты мезгилге барабар  $t_{\text{ОТКР}} = T$ .

Эгерде жалаң оң жарым мезгилдер гана күчөтүлсө, ал эми терс жарым мезгилдер күчөтүлбөсө, мындай режимди **В классындагы күчөтүү** деп аташат.

Мында, транзистор ачык абалдын созулуу убакытысы мезгилдин жарымына барабар  $t_{\text{ОТКР}} = T/2$ .

Бул үчүн жумушчу чекит коллектордук токту кесип таштоо чекитинде жайгашат (активдуу участкактун төмөнкү чекити).

Ошондой эле **АВ классындагы күчөтүүнү** (жумушчу чекит активдуу участкактун төмөнкү бөлүгүндө) жана **С классындагы күчөтүүнү** (жумушчу чекит кесип таштоо чекитинен сол жагында) ажырата алышат.

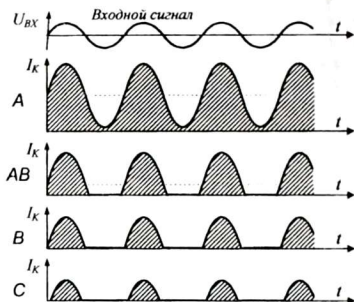


Рис. 17. Классы усиления

## 10. Установка режима работы транзистора

Для того чтобы обеспечить необходимый режим работы транзистора и установить рабочую точку в соответствующее положение, используется источник постоянного напряжения -  $E_B$ , который включается между базой и эмиттером (рис. 18). На рисунке стрелками показаны направления постоянных токов базы  $I_{B0}$  и коллектора  $I_{K0}$ . Помните, что путь постоянного тока начинается от «+  $E$ » и заканчивается на «-  $E$ ».

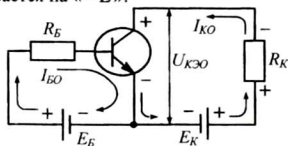


Рис. 18. Установка режима работы транзистора

Базовый ток измеряется десятками и сотнями микроампер, а коллекторный ток - единицами и десятками миллиампер, то есть коллекторный ток примерно в 100-200 раз больше базового тока. Если не учитывать небольшого сопротивления открытого эмиттерного  $p-n$ -перехода ( $r_{БЭ} \approx 100 \dots 200$  Ом), когда  $r_{БЭ} \ll R_B$ , начальный базовый ток можно вычислить, используя закон Ома. Например, если  $E_B = 1,5$  В и  $R_B = 100$  кОм, тогда начальный базовый ток

АВ классындагы режимде транзистор мезгилдин көпчүлүк бөлүгүндө ачык, б.а. ачык абалда болуу убактысы мезгилдин жарымынан чоң  $T/2 < t_{OTKP} < T$ .

С классындагы күчөтүү режиминде транзистор жарым мезгилден азырак убакытта ачык болот, б.а.,  $t_{OTKP} < T/2$ .

Аталган режимдер А жана В класстарындагы режимдерге караганда өтө сейрек колдонулушат. Мындан ары А классында иштөөчү күчөткүчтүрдү карайбыз.

Транзистордун ар түрдүү (А, АВ, В жана С) күчөтүү класстарында иштеген кезиндеги коллектордук тогунун убакыт боюнча мүнөздөмөлөрү 17- сүрөттө көрсөтүлгөн.

Штрихтелген бөлүктөр транзистордун ачык абалына ылайык келишет.

Транзистордун иштөө режими анын базасынын  $U_{BO}$  чыңалуусун  $U_{CM} = U_{BO}$  болгон жылыштыруу чыңалуусу өзүнчө турактуу чыңалуу булагынын жардамында баштапкы жылыштыруу аркылуу аныкталат.

## 10. Транзистордун иштөө режимин уюштуруу

Транзистордун керектүү режимин камсыздоо жана жумушчу чекитин тиешелүү абалга коюу үчүн турактуу  $E_B$  чыңалуусунун булагы пайдаланылат, ал база менен эмиттердин ортосуна бириктирилет (18 сүрөт).

Сүрөттө базанын  $I_{B0}$  жана коллектордун  $I_{K0}$  турактуу токторунун багыттары жебелер аркылуу көрсөтүлгөн.

Турактуу токту жолу «+Е» ден башталып жана «-Е» ден аякташын эсинизден чыгарбаңыз.

Базалык ток ондогон жана жүздөгөн микроампер менен, ал эми коллектордук ток онго чейинки жана ондогон миллиампер менен өлчөнөт б.а. коллектордук ток базалык токтон болжол менен 100-200 эсе чоң.

Эгерде ачык эмиттердик  $p-n$ -откоолдун  $r_{BЭ} \ll R_B$ , кезиндеги анчалык чоң эмес каршылыгын ( $r_{BЭ} \approx 100 \dots 200 \text{ Ом}$ ), эсепке албаса, баштапкы базалык токту Омдун закону боюнча эсептеп чыгууга болот. Мисалы, эгерде  $E_B = 1,5 \text{ В}$  жана  $R_B = 100 \text{ кОм}$ , болсо,

$$I_{B0} = \frac{E_B}{R_B} = \frac{1,5 \text{ В}}{100 \text{ кОм}} = \frac{1,5 \text{ В}}{100 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ А} = 15 \text{ мкА} \text{ болот.}$$

Эгерде баштапкы базалык токту  $I_{B0} = 50 \text{ мкА}$ , болгондой коюу керек болсо, анда  $R_B$  резистордун каршылыгын төмөнкү формула боюнча эсептей алабыз:

$$I_{B0} = \frac{E_B}{R_B} = \frac{1,5 \text{ В}}{100 \text{ кОм}} = \frac{1,5 \text{ В}}{100 \cdot 10^3 \text{ Ом}} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ А} = 15 \text{ мкА}.$$

Если нужно установить начальный базовый ток  $I_{B0} = 50 \text{ мкА}$ , сопротивление резистора  $R_B$  можно вычислить по формуле:

$$R_B = \frac{E_B}{I_{B0}} = \frac{1,5 \text{ В}}{50 \text{ мкА}} = 30 \text{ кОм}$$

Сопротивление коллекторного резистора  $R_K$  обычно устанавливают таким, чтобы через него протекал номинальный коллекторный ток  $I_{K0}$ , который указан в справочных данных по соответствующему транзистору. При этом сопротивление коллекторного резистора  $R_K$  должно быть таким, чтобы на резисторе  $R_K$  терялась примерно половина напряжения источника  $E_K$ , то есть,  $U_R = 0,5E_K$ . Сопротивление резистора  $R_K$  можно рассчитать по формуле:  $R_K = \frac{0,5E_K}{I_{K0}}$ .

Например, при  $E_K = 5 \text{ В}$  и  $I_{K0} = 1,5 \text{ мА}$   $R_K = \frac{0,5 \cdot 5 \text{ В}}{1,5 \text{ мА}} \approx 1,6 \text{ кОм}$

Недостатком приведенной схемы питания транзистора является необходимость использования двух источников ЭДС. На практике питание цепи базы и коллектора осуществляют с помощью одного источника –  $E_K$ , как показано на рисунке 19. Стрелками показаны направления постоянных токов  $I_{B0}$  и  $I_{K0}$ .

Если усилитель содержит два и более транзистора, все транзисторы получают питание от одного источника  $E_K$  (рис. 20). При этом питание транзисторов осуществляется от двух проводников, называемых **шинами**. Шинами обычно называют два подвешенных провода, по которым скользят контакты целой группы троллейбусов, движущихся по одному маршруту.

Потенциал одной шины условно принимается равным нулю и эту шину называют **шиной нулевого потенциала** – ШНП (иногда ее называют просто «**масса**»). При этом потенциалы всех точек схемы измеряются относительно массы – шины нулевого потенциала. Признаком шины нулевого потенциала на схеме является значок «массы» - перевернутая буква Т.

Другая шина, соединённая с положительным выводом источника питания «+  $E_K$ », имеет положительный потенциал и называется **шиной высокого потенциала** – ШВП. На схеме, приведенной на рисунке 20, ШВП имеет потенциал +5 В, а ШНП - 0 В.

$$R_B = \frac{E_B}{I_{BO}} = \frac{1,5 \text{ В}}{50 \text{ мкА}} = 30 \text{ кОм}$$

Коллектордук резистордун  $R_K$  каршылыгын адатта ал аркылуу тиешелүү транзистор бонча сурап-билме китептерде берилген номиналдык коллектордук ток  $I_{KO}$  агып өткөндөй чоңдукка тандап алышат. Мындай коллектордук  $R_K$  резисторунун каршылыгы бул резистордо булактын  $E_K$  чыңалуусунун болжол менен жарымы жоголо тургандай болууга тийиш, б.а.  $U_R = 0,5 E_K$ .  $R_K$  резисторунун каршылыгын  $R_K = \frac{0,5 E_K}{I_{KO}}$  формуласы боюнча эсептөөгө болот.

Мисалы,  $E_K = 5 \text{ В}$  жана  $I_{KO} = 1,5 \text{ мА}$ ,  $R_K = \frac{0,5 \cdot 5 \text{ В}}{1,5 \text{ мА}} \approx 1,6 \text{ кОм}$ .

Транзисторду азыктандыруунун келтирилген схемасынын кемчилиги болуп эки ЭКК булагын пайдалануунун зарылдыгы эсептелет. Практикада базанын жана коллектордун чынжырларын азыктандырууну бир –  $E_K$  булагынын жардамында 19-сүрөттө көрсөтүлгөндөй ишке ашырышат. Жебелер менен турактуу  $I_{BO}$  жана  $I_{KO}$  токторунун багыттары көрсөтүлгөн.

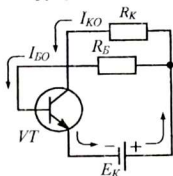


Рис. 19. Питание транзистора от одного источника.

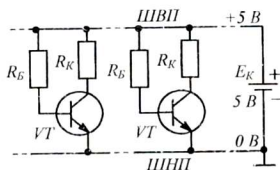


Рис. 20. Питание группы транзисторов от одного источника.

Эгерде күчөткүч эки же андан ашык сандагы транзисторлорду камтыса, бардык транзисторлор бир  $E_K$  булагынан азыктанышат (20-сүрөт). Мында транзисторлордун азыктандыруусу эки **шина** деп аталган өткөргүчтөрдөн камсыз кылынат. Маселен, троллейбустук линияда бир маршрутга кетип жаткан троллейбустардын азыктандыруусу илинип коюлган шиналар деп аталган эки калын өткөргүчтөрдөн аткарылат.

Бир шина жердештирилген жана нөлдүк потенциалга ээ, ошондуктан ал **нолдүк потенциалдык шинасы** – ШИШ деп аталат (кээ учурда аны жонокой эле «масса» деп айтышат). Мында, схеманын бардык чекиттеринин потенциалдары массага – нөлдүк потенциалдуу шинага – салыштырмалуу өлчөнөт.

Цепь и направление базового тока  $I_{B0}$  первого транзистора ( $VT1$ ) таковы:  $+E_K - ШВП - R1 - \text{база} - \text{эмиттер } VT1 - ШНП - -E_K$ .

Аналогично можно показать направления остальных токов.

**Обратите внимание.** В радиотехнической литературе вместо слов «потенциал базы» или «потенциал коллектора» чаще употребляют выражения «напряжение базы» или «напряжение коллектора». Фактически потенциалы всех точек радиосхем измеряются как напряжение между указанной точкой и шиной нулевого потенциала.

### 11. «Золотое правило» транзистора

На рисунке 21 представлена схема, позволяющая проверить особенности изменения токов и напряжений в транзисторе. Не меняя значения напряжения питания коллекторной цепи ( $E_K = const$ ), но, изменяя только входное напряжение  $U_{BX}$ , можно с помощью вольтметров проследить за изменениями напряжений  $U_B, U_K$  на выводах транзистора.

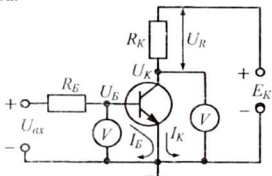


Рис. 21. Токи и напряжения в транзисторе

Если напряжение на входе  $U_{BX}$  увеличить, увеличится напряжение базы  $U_B$  и ток базы  $I_B$ . Возрастание тока базы одновременно вызывает соответствующее возрастание коллекторного тока транзистора  $I_K$ . Коллекторный ток, протекая через резистор  $R_K$ , создаёт на нём падение напряжения:  $U_R = I_K \cdot R_K$ .

Чтобы определить характер изменения коллекторного напряжения, воспользуемся вторым законом Кирхгофа – сумма падений напряжения в замкнутом контуре равна сумме ЭДС, включенных в контур:  $U_K + U_R = E_K$ , то есть  $U_K + I_K \cdot R_K = E_K$ . Отсюда

$$U_K = E_K - I_K \cdot R_K$$

Данное уравнение показывает, что с ростом коллекторного тока напряжение на коллекторе транзистора уменьшается.



Ноль потенциалдуу шинанын белгиси болуп «масса» белгиси, антарылган «Т» тамгасына окшош болгон белги.

Азыктандыруучу булагынын «+Е» оң чыгаруусуна туташкан башка шина оң потенциалга ээ жана **жогорку потенциалдык шинасы** – ЖПШ деп аталат. 20-сүрөттө келтирилген схемада ЖПШ +5 В, ал эми НПШ – 0 В потенциалга ээ.

Биринчи (VT1) транзистордун чынжырындагы базалык  $I_{B0}$  тогунун багыты төмөнкүдөй:

$$+ E_K - \text{ЖПШ} - R_I - \text{база} - \text{эммитер VT1} - \text{НПШ} - - E_K.$$

Башка токтордун багыттарын да ушундай эле көрсөтүүгө болот.

Эскертүү. Радиотехникалык адабияттарында «базанын потенциалы» же «коллектордун потенциалы» деген сөздөрдүн ордуна көбүнчө «базанын чыңалуусу» же «коллектордун чыңалуусу» деген сөздөр колдонулат. Иш жүзүндө радиосхемалардын бардык чекиттеринин потенциалдары көрсөтүлгөн чекит менен нөлдүк потенциалдын шинасынын ортосундагы чыңалуу катары өлчөнүшөт.

## 11. Транзистордун «алтын эрежеси»

21-сүрөттө транзистордогу токтордун жана чыңалуулардын өзгөрүүлөрүнүн өзгөчөлүктөрүн текшерүүгө мүмкүндүк берген схема көрсөтүлгөн. Коллектордук чынжырдын азыктандыруучу чыңалуусунун маанисин өзгөртпөстөн туруп ( $E_K = const$ ), бирок, бир гана кирүү  $U_{BX}$  чыңалуусун өзгөртүп, транзистордун чыгарууларындагы  $U_B, U_K$  чыңалууларынын өзгөрүүлөрүн вольтметрлер жардамы менен байкоого болот.

Эгерде кирүүдөгү  $U_{BX}$  чыңалуу чоңойсо, базанын чыңалуусу  $U_B$  жана базанын тогу  $I_B$  чоңоет. Базанын тогунун өсүшү ошол эле учурда транзистордун  $I_K$  коллектордук тогунун тиешелүү өсүшүн пайда кылат. Коллектордук тогу  $R_K$  резистору аркылуу агып өтүүдө бул резистордо чыңалуунун төмөндөшүн түзөт:  $U_R = I_K \cdot R_K$ .

Коллектордук чыңалуунун өзгөрүшүн аныктоо үчүн Кирхгофтун экинчи законун пайдаланабыз – туюк контурда чыңалуулардын төмөндөшүүлөр суммасы контурга бириккен ЭККторунун суммасына барабар:  $U_K + U_R = E_K$ , б.а  $U_K + I_K \cdot R_K = E_K$ . Мындан:

$$U_K = E_K - I_K \cdot R_K$$

Бул теңдеме коллектордук токтун өсүшү менен транзистордун коллекторундагы чыңалуунун кичирейишин көрсөтөт.

Эгерде, кирүүдөгү чыңалууну кичирейтсе, аны менен бир эле убакта базанын чыңалуусу, базанын тогу жана коллектордук ток кичирейишет, ал эми коллектордук чыңалуу өсөт. Ошентип,

Если теперь напряжение на входе уменьшать, одновременно уменьшится напряжение базы, ток базы и коллекторный ток, а коллекторное напряжение возрастет. Таким образом, *напряжение коллектора транзистора изменяется в противофазе с его коллекторным током.*

*«Золотое правило» транзистора: Изменения коллекторного тока и коллекторного напряжения всегда сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ .*

При этом сопротивление транзистора для переменного тока  $R_i = \frac{\Delta U_K}{\Delta I_K}$  оказывается отрицательным, так как, когда  $\Delta I_K$  положительно, в это же время  $\Delta U_K$  - отрицательно.

Отрицательное сопротивление не означает «охлаждение» транзистора. Оно означает, что транзистор не поглощает энергию переменного тока, а наоборот, вносит энергию в цепь переменного тока. При этом энергия переменного тока возрастает, что подтверждает усилительные свойства транзистора.

## 12. Простейший усилительный каскад

*Усилительным каскадом* называется усилитель, содержащий один усилительный элемент, например, один транзистор. Рассмотрим простейший усилительный каскад на биполярном транзисторе, построенный по схеме с общим эмиттером (рис. 22).

Принцип работы данного усилителя заключается в следующем: напряжение усиливаемого входного сигнала  $U_{BX}$  подается между базой и эмиттером транзистора  $VT$  и вызывает изменение напряжения между базой и эмиттером  $\Delta U_{БЭ} = U_{BX}$ .

Изменение напряжения базы  $\Delta U_{БЭ}$  вызывает соответствующее изменение базового тока  $\Delta I_B$ , а изменение базового тока  $\Delta I_B$  вызывает соответствующее изменение коллекторного тока  $\Delta I_K$ .

Изменяющийся коллекторный ток, протекая через нагрузку транзистора (резистор  $R_K$ ), создает на нём переменное напряжение  $\Delta U_{R_K}$ , которое можно определить по закону Ома:  $\Delta U_{R_K} = \Delta I_K \cdot R_K$ .

Это и есть усиленное выходное напряжение усилителя  $U_{ВЫХ}$ , при этом  $\Delta U_{R_K} > \Delta U_{БЭ}$ , то есть,  $U_{ВЫХ} > U_{BX}$ .

Как известно, транзистор работает и усиливает только тогда, когда через него течет базовый ток. С помощью резистора  $R_B$  устанавливают начальный базовый ток  $I_{\bar{b}0}$  таким, чтобы при любых изменениях входного напряжения базовый ток изменялся около среднего значения  $I_{\bar{b}0} \pm \Delta I_B$  и не ок. зался равным нулю,  $I_{\bar{b}0} \neq 0$ .

**транзистордун коллекторунун чыңалуусу анын коллектордук тогу менен карама-каршы фазада өзгөрөт.**

**Транзистордун «Алтын эрежеси»:** Коллектордук токту жана коллектордук чыңалуунун өзгөрүүлөрү фазасы боюнча дайыма  $180^\circ$  ка жылышкан болот. Мында транзистордун өзгөрмө ток үчүн каршылыгы

$$R_i = \frac{\Delta U_K}{\Delta I_K} \text{ терс болот, анткени } \Delta I_K \text{ оң кезинде } \Delta U_K \text{ терс болот.}$$

Терс каршылык транзистордун «муздашын» билдирбейт. Ал транзистор өзгөрмө токту энергиясын жутпай тургандыгын, тескерисинче, өзгөрмө токту чынжырына энергия бере тургандыгын билдирет. Мындан өзгөрмө токту энергиясы өсөт, бул транзистордун күчөтүүчү касиеттери бар экендигин ырастайт.

## 12. Жөнөкөй күчөткүч каскады

Бир күчөтүүчү элементке, маселен транзисторго, ээ болгон күчөткүч **күчөткүч каскады** деп аталат. Жалпы эмиттер схемасы боюнча биполярдык транзистор негизинде түзүлгөн эң жөнөкөй күчөткүч каскады менен танышайлык (сүр. 22).

Бул күчөткүчтүн иштөө принциби төмөнкүдөй: кирүү сигналдын  $U_{BX}$  чыңалуусу  $VT$  транзистордун база жана эмиттер аралыгына берилет. Ал өзгөрүлмө чыңалуу база-эмиттер аралыгындагы  $\Delta U_{БЭ} = U_{BX}$  чыңалуу өзгөрүшүн пайда кылат.

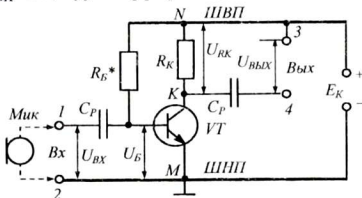


Рис. 22. Усилитель напряжения на биполярном транзисторе

База чыңалуусунун  $\Delta U_{БЭ}$  өзгөрүшү база тогунун тиешелүү  $\Delta I_B$  өзгөрүшүн чакырат, база тогунун өзгөрүшү  $\Delta I_B$  эсс коллектор тогунун  $\Delta I_K$  өзгөрүшүн пайда кылат.

Өзгөрүп жаткан коллектор тогу транзистордун нагрузкасы - резистор  $R_K$  - аркылуу агып, өзгөрүлмө  $\Delta U_{R_K}$  чыңалууну пайда кылат. Ал чыңалууну Омдун закону боюнча тапса болот:

Величина начального базового тока  $I_{Б0}$  устанавливается в зависимости от амплитуды входного сигнала. Чем больше амплитуда входного сигнала  $U_{max}$ , тем больше должен быть начальный базовый ток  $I_{Б0}$ . Поэтому величина сопротивления резистора  $R_B$  для каждого транзистора подбирается экспериментально (об этом свидетельствует «звездочка» -  $R_B^*$ ).

Усиливаемое входное напряжение подается через разделительный конденсатор  $C_p$  между базой и эмиттером транзистора. А усиленное напряжение снимается с нагрузки транзистора (резистора  $R_K$ ), то есть, между коллектором и шиной высокого потенциала (ШВП), и через другой разделительный конденсатор  $C_p$  подается на выходные зажимы «3»-«4».

Разделительные конденсаторы  $C_p$  выполняют следующую роль: они хорошо пропускают полезный переменный ток и не пропускают постоянный ток, то есть, защищают последующие цепи от проникновения высокого постоянного напряжения, например, с базы транзистора на микрофон, подключенный к входу усилителя (см. рис. 22), или с коллектора одного транзистора на базу следующего транзистора (см. рис. 24). Благодаря этому переменные и постоянные токи в схеме оказываются разделенными и независимыми друг от друга.

В схеме можно выделить четыре тока, из них два постоянных тока -  $I_{Б0}$ ,  $I_{К0}$  и два переменных тока -  $i_{BX}$  и  $i_K$ . Источником постоянного базового и коллекторного тока является источник электропитания -  $E_K$ .

Источником переменного тока в базовой цепи является источник входного сигнала, например, микрофон. А вот источником переменного тока в коллекторной цепи является сам транзистор, то есть, переменное напряжение, которое возникает между коллектором и эмиттером в результате изменения коллекторного тока под действием изменяющегося базового тока.

Хотя переменный ток не имеет постоянного направления, условно принято рассматривать цепи переменного тока, обходя их контуры по направлению движения часовой стрелки.

Ниже показаны направления этих токов:

- **постоянный ток базы**  $I_{Б0}$ :  
+  $E_K$  - ШВП -  $R_B$  - база - эмиттер VT - ШНП - -  $E_K$ ;
- **постоянный ток коллектора**  $I_{К0}$ :  
+  $E_K$  - ШВП -  $R_K$  - коллектор - эмиттер VT - ШНП - -  $E_K$ ;
- **переменный входной ток**  $i_{BX}$ .  
точка "1" -  $C_p$  - база - эмиттер VT - ШНП - точка "2";

$$\Delta U_{R_K} = \Delta I_K \cdot R_K.$$

Ошол өзгөрүлмө чыналуу – күчөткүчтүн чыгуу  $U_{B_{B_{LX}}}$  чыналуусу болот. Мында  $\Delta U_{R_K} > \Delta U_{B_{Э}}$ , башкача айтканда, чыгуу чыналуу өзгөрүшү кирүү чыналуу өзгөрүшүнөн чоң:  $U_{B_{LX}} > U_{B_{X}}$ .

Белгилүү болгондой, транзистор, анын базасы аркылуу база тогу агып жатканда гана, иштейт жана күчөтөт.  $R_B$  резистор жардамы менен башталгыч  $I_{B_0}$  база тогунун чоңдугу ошондой мааниге орноштурулат, кирүү чыналуу каалагандай өзгөрүштөрүндө база тогу орточо мааниге салыштырмалуу өзгөрүп  $I_{B_0} \pm \Delta I_B$ , эч качан нөлгө барабар эмес болушу камсыз кылынат -  $I_{B_0} \neq 0$ .

$I_{B_0}$  башталгыч база тогунун чоңдугу кирүү сигналынын амплитудасына карата калыптандырылат. Кирүү сигналынын  $U_{max}$  амплитудасы канчалык чоң болсо, ошончолук башталгыч база тогу  $I_{B_0}$  да чоң болушу зарыл. Ар транзистор үчүн тиешелүү башталгыч база тогу уюштурулат, ошондуктан  $R_B$  резистордун тиешелүү каршылыгы экспериментал жол менен тандалат (ал жолунда «жылдызча» -  $R_B^*$  көрсөтөт).

Күчөтүүрүлүчү кирүү чыналуу транзистордун база жана эмиттер аралыгына ажыраткыч  $C_P$  конденсатор аркылуу берилет. Күчөтүүрүлгөн чыналуу болсо транзистордун нагрузкасынан (резистор  $R_K$ ), алынат, башкача айтканда, коллектор менен жогорку потенциал шинасы аралыктан жана экинчи ажыраткыч  $C_P$  конденсатор аркылуу күчөткүчтүн «3»-«4» чыгуу кысыкчытарына берилет.

$C_P$  ажыраткыч конденсаторлору төмөнкүдөй ролду аткарат: пайдалуу өзгөрүлмө токтун жакшы өткөрүшөт, турактуу токтун – өткөрүшпөйт, башкача айтканда, бир чынжырдан экинчи чынжырга жогорку турактуу чыналуунун өтүшүнө тоскулдук жасайт. Мисалы, транзистордун базасынан кириүүгө туташтырылган микрофонго (22-чи сүрөт) же бир транзистордун коллекторунан кезектеги транзистордун базасына (сүр. 24). Мына ошондуктан схемадагы өзгөрүлмө жана турактуу токтор бири биринен ажыратылышат жана бири биринен көз каранды эмес болуп калышат.

Схема аркылуу бир учурда төрт ток агып жатат. алардын ичинен эки ток -  $I_{B_0}$ ,  $I_{K_0}$  – турактуу токтор жана эки ток -  $i_{B_X}$  жана  $i_{K_X}$  – өзгөрүлмөлүү токтор. Турактуу токтун булагы – электр азыктандыруучу булагы –  $E_K$ .

База чынжырындагы  $i_{B_X}$  өзгөрүлмө токтун булагы болуп кирүү сигналынын чыналуусунун булагы болот, мисалы, микрофон.

– *переменный коллекторный ток  $i_K$ :*

*коллектор –  $R_K$  – ШВП –  $+E_K$  –  $-E_K$  – ШНП – эмиттер.*

Протекая по указанной цепи, переменный коллекторный ток  $i_K$  создает полезное падение напряжения на резисторе  $R_K$ , формируя выходное напряжение усилительного каскада, и безвозвратно теряет часть энергии в виде тепла на внутреннем сопротивлении ( $r_i$ ) источника  $E_K$ .

Для того, чтобы избежать ненужной потери энергии переменного тока, параллельно источнику  $E_K$  включается конденсатор большой ёмкости  $C_\Phi$ . При этом переменный коллекторный ток протекает от ШВП в сторону ШНП не через источник  $E_K$ , а через конденсатор  $C_\Phi$ , который своим малым сопротивлением переменному току как бы накоротко замыкает шину высокого потенциала с шиной нулевого потенциала по переменному току (рис. 23).

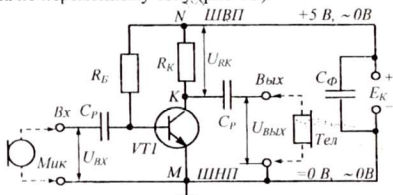


Рис. 23. «Заземление» шины высокого потенциала

Теперь ШВП имеет высокий потенциал по постоянному току и нулевой потенциал по переменному току, то есть, **ШВП через конденсатор  $C_\Phi$  «заземлён» по переменному току.**

Хотя переменное выходное напряжение каскада создается на резисторе  $R_K$  (между точками  $K$  и  $N$ ), однако ввиду того, что шина высокого потенциала всегда «заземлена» по переменному току, безразлично, откуда снимается переменное выходное напряжение: между точками  $K$  и  $N$  или между точками  $K$  и  $M$ .

Первый вариант нежелателен, так как обе точки  $K$  и  $N$  находятся под высоким постоянным напряжением:  $+U_{KO}$  и  $+E_K$ , поэтому на практике в схемах ОЭ (с общим эмиттером) выходным напряжением каскада считают напряжение между коллектором и шиной нулевого потенциала (массой), то есть, между точками  $K$  и  $M$ .

Например, нагрузка усилителя по переменному току – телефон – включен через разделительный конденсатор  $C_\Phi$  между коллектором и

Ал эми транзистор өзү коллектор чынжырында пайда болгон өзгөрүлмө  $i_K$  токтун булагы болуп эсептелет. Башкача айтканда, бул база тогу менен бирге өзгөрүп жаткан коллектор жана эмиттер аралыктагы чыңалуунун өзгөрүшүнөн пайда болот. Төмөндө бул токтордун багыттары көрсөтүлгөн.

Өзгөрүлмө токтуу турактуу багыты жок болсо да, бирок өзгөрүлмө ток чынжырларын анализдегенде шарттуу түрдө өзгөрүлмө ток контурларын саат стрелкасы айланыш багыты менен кабыл алынган.

– турактуу база тогу  $I_{B0}$ :

$$+E_K - \text{ЖПШ} - R_B - \text{база} - \text{эмиттер} VT - \text{НПШ} - -E_K;$$

– турактуу коллектор тогу  $I_{K0}$ :

$$+E_K - \text{ЖПШ} - R_K - \text{база} - \text{эмиттер} VT - \text{НПШ} - -E_K;$$

– өзгөрүлмө кирүү ток  $i_{BX}$ :

$$\text{чекит "1"} - C_P - \text{база} - \text{эмиттер} VT - \text{НПШ} - \text{чекит "2"};$$

– өзгөрүлмө коллектордук ток  $i_K$ :

$$\text{коллектор} - R_K - \text{ЖПШ} - +E_K - -E_K - \text{НПШ} - \text{эмиттер}.$$

Көрсөтүлгөн чынжыр аркылуу агып, өзгөрүлмө  $i_K$  коллектордук ток  $R_K$  резистордо чыңалуу түшүүсүн түзүп, күчөтүү каскаддын чыгуу чыңалуусун калыптандырат, жана  $E_K$  ток булагы аркылуу акканда, анын ( $r_i$ ) ички каршылыгында энергиясынын бөлүтүн кайтуусуз жышуулук түрүндө жоготот.

Өзгөрүлмө ток энергиясын керексиз жоготууга жол койбостук үчүн  $E_K$  ток булагына параллель чоң сыйымдуулукка ээ болгон  $C_\Phi$  (фильтр) конденсатору туташтырылат.

Мында өзгөрүлмө коллектордук ток ЖПШдан НПШ багытына  $E_K$  ток булагы аркылуу эмес,  $C_\Phi$  конденсатору аркылуу агат. Өзгөрүлмө токко кичине каршылык көрсөткөн  $C_\Phi$  конденсатор жогорку потенциал шинасын ноль потенциал шинасы менен өзгөрүлмө ток боюнча *кыска туташтыргандай* болот (сүр. 23).

Эми ЖПШ турактуу ток боюнча жогорку потенциалга ээ, бирок, өзгөрүлмө чыңалуу боюнча анын потенциалы нөлгө барабар, башкача айтканда *ЖПШ конденсатор  $C_\Phi$  аркылуу өзгөрүлмө ток боюнча «жерге туташкан»*.

Каскаддын чыгуу чыңалуусун  $R_K$  резистордо (К жана N чекиттер аралыкта) түзүлсө да, жогорку потенциал шинасы үзгүлтүксүз «жер менен туташкандыктан» чыгуу чыңалууну каалаганча: К жана N чекиттер аралыктан алса болот, же К жана M чекиттери аралыктан, айырмасы жок.

ШНП (см. рис. 23). Такое включение нагрузки удобно при соединении последовательности усилительных каскадов в многокаскадном усилителе (рис. 24).

В схеме трёхкаскадного усилителя (рис. 24) применена стандартная нумерация элементов ( $R1, R2, \dots$ ). Нумерация проводится в порядке «слева направо и сверху вниз».

Обратите внимание на соединение конденсатора фильтра  $C5$ : знак « $\perp$ » означает соединение второго вывода конденсатора  $C5$  с шиной нулевого потенциала, с массой - («заземление»).

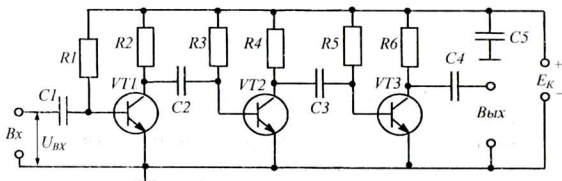


Рис. 24. Схема трехкаскадного усилителя

Рассмотренная выше схема усилительного каскада очень проста и поэтому называется **простейшим усилительным каскадом**.

Однако у простейшего усилительного каскада имеется существенный недостаток - это температурная нестабильность. Дело в том, что удельное сопротивление полупроводников сильно зависит от температуры, поэтому с повышением температуры сопротивление полупроводника уменьшается, возрастает число носителей заряда и соответственно возрастают базовый и коллекторный токи.

Возрастание коллекторного тока согласно закона Джоуля-Ленца -  $Q = I^2 R t$ , вызывает нагрев транзистора и еще большее увеличение тока базы и коллектора. Короче говоря, электрический режим работы транзистора становится неустойчивым и при некоторых условиях, если своевременно не ограничить коллекторный ток, транзистор может даже выйти из строя (сгореть).

### 13. Усиление гармонического сигнала

Чтобы понять, каким образом формируется выходной сигнал усилителя, рассмотрим электрические процессы в усилителе в двух режимах:

- а) в режиме покоя, когда на входе нет сигнала и  $U_{BX} = 0$  В,
- б) в режиме усиления переменного входного напряжения.



Биринчи вариант, эки чекит (А жана N) бирдей  $+U_{KO}$  жана  $+E_K$  жогорку турактуу потенциалдарга ээ болгодуктан, оңойсуз, ошондуктан практикада ЖЭ (жалпы эмиттер) схемаларында чыгуу чыңалуу коллектор менен НППШ аралыктан алынат, башкача айтканда, К менен М чекиттер аралыгынан.

Маселен, 23 сүрөттөгү күчөткүчтүн өзгөрүлмө ток боюнча нагрукасы – телефон -  $C_\Phi$  ажыраткыч конденсатор аркылуу коллектор менен НППШ аралыкка туташтырылган.

Мындай туташтыруу көп каскаддуу күчөткүчтөрдөгү күчөткүч каскаддарды өз ара удаалаш туташтырууга оңой.

24-сүрөттөгү үч каскаддуу күчөткүчтүн элементтери үчүн стандарттык нумерация колдонгон ( $R1, R2, \dots$ ). Нумерация «солдон-оңго жана жогорудан ылдый» иретте өткөрүлөт.

Коңул бургула:  $C5$  фильтр конденсаторунун НППШ менен тууташтырылганы « $\perp$ » белгиси менен көрсөтүлгөн. Бул белги 0 вольт потенциалды көрсөтөт, башкача айтканда, «масса» (НППШ) менен тууташкандыкты – «жерге тууташтыруу».

Көрсөтүлгөн күчөткүч каскадынын схемасы абдан жөнөкөй, ошондуктан мындай каскад *жөнөкөй күчөткүч каскады* деп аталат.

Бирок жөнөкөй күчөткүч каскадынын бир чоң кемчилиги бар – бул күчөткүчтүн параметрлеринин температурага күчтүү көз карандуулугу (термостабилсиздик).

Анын себеби төмөндөгүдөй: жарым өткөргүчтөрдүн салыштырма каршылыгы температурадан күчтүү көз карандуу болгондуктан, жарым өткөргүчтүн температурасы жогорлогондо заряд ташуучулардын саны көбөйөт жана транзистордун база жана коллектор токтору өсө баштайт.

Коллектордук ток жогорулаганда,  $Q = I^2 R t$  Джоуль-Ленц закону боюнча, транзистор ысыйт, анын база жана коллектор токтору кошумча өсөт, ток менен бирге температура да жогорулайт.

Ошондуктан температура өзгөргөндө транзистордун иштөө режими туруксуз, күчөткүчтүн иши начарлайт, же кээ учурларда транзистор ашыкча ток ташыгандыктан кызып - күйүп кектиши мүмкүн. Эгер коллектордук ток өз убагында чектелбесе, транзистор, күйүп, иштен чыгып калышы мүмкүн.

### 13. Гармоникалык сигналды күчөтүү

Күчөткүчтүн чыгуу сигналы кандайча калыптандырылышын түшүнүү үчүн, күчөткүчтөгү электр процесстерди эки режимде карайбыз:

На рисунке 25 приведены осциллограммы токов и напряжений ( $u_{ВХ}$ ,  $i_B$ ,  $i_K$ ,  $u_K$ ,  $u_{ВЫХ}$ ) в простейшем усилительном каскаде (см. рис. 23). Левая часть осциллограмм соответствует режиму покоя, а правая часть – режиму усиления.

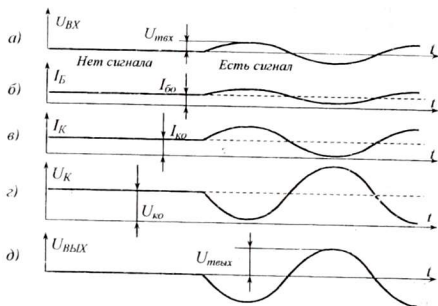


Рис. 25. Токи и напряжения в схеме усилителя

**I. Режим покоя** (левая часть рисунка 25). При отсутствии входного сигнала, когда  $u_{ВХ} = 0$  (рис. 25, а), через базу протекает только начальный постоянный ток базы  $I_{Б0}$  (рис. 25, б). Вследствие этого через транзистор протекает только постоянный коллекторный ток  $I_{К0}$  (рис. 25, в) и на коллекторе сохраняется постоянное напряжение  $U_{К0} = E_K - I_{К0} \cdot R_2$  (рис. 25, г). При этом выходное напряжение усилителя  $u_{ВЫХ}$  равно нулю (рис. 25, д), так как постоянное напряжение  $U_{К0}$  через разделительный конденсатор  $C_P$  на выход не передается.

**II. Режим усиления** (правая часть рисунка 25). При подаче на вход усилителя переменного напряжения  $u_{ВХ}$  (рис. 25, а) напряжение базы, складываясь из двух напряжений  $U_{Б0}$  и  $u_{ВХ}$  ( $U_{БЭ} = U_{Б0} + u_{ВХ}$ ), начинает изменяться относительно уровня  $U_{Б0}$  и базовый ток при этом то возрастает, то уменьшается (рис. 25, б). Соответственно изменяется и коллекторный ток (рис. 25, в), который представляет сумму токов:

$$I_K = I_{К0} + i_K.$$

Коллекторный ток, протекая через резистор  $R_K$  создает на нём одновременно постоянное напряжение  $U_{К0}$  и переменное напряжение  $u_K$ , которое является выходным напряжением усилителя (рис. 25, г).

а) кирүүдө сигнал жок, кирүү чыңалуу  $U_{вх} = 0$  В, болгон тынч абал режиминде,

б) өзгөрмө кирүү чыңалуусун күчөтүү режиминде.

25-сүрөттө эң жөнөкөй күчөткүч каскадындагы (23-сүрөттү кара) токтордун жана чыңалуулардын ( $u_{вх}$ ,  $i_B$ ,  $i_K$ ,  $u_K$ ,  $u_{вых}$ ) осциллограммалары келтирилген. Осциллограммалардын сол жак бөлүгү тынч абал, он жак – күчөтүү режимине туура келет.

I. **Тынч абал режими** (25-сүрөттүн сол жагы).  $u_{вх} = 0$  В болгон, кирүү сигналы жок кезинде (25-сүрөт, а), база аркылуу базанын баштапкы турактуу тогу  $I_{Б0}$  гана агып жатат (25-сүрөт, б). Ошондуктан транзистор аркылуу  $I_{к0}$  турактуу коллектордук ток гана өтөт (25-сүрөт, в) жана коллектордо  $U_{К0} = E_K - I_{К0} \cdot R_2$  турактуу чыңалуусу сакталат (25-сүрөт, г).

Мында күчөткүчтүн чыгуу чыңалуусу  $u_{вых}$  нөлгө барабар (25-сүрөт, д), себеби:  $U_{К0}$  турактуу чыңалуусу ажыратуучу  $C_P$  конденсатору аркылуу чыгууга өтө албайт.

II. **Күчөтүү режими** (25-сүрөттүн он жагы) күчөткүчтүн кирүүсүнө өзгөрмө  $u_{вх}$  чыңалуусун берген кезде (25-сүрөт, а) базанын чыңалуусу эки чыңалуу:  $U_{Б0}$  жана  $u_{вх}$  кошулуп ( $U_{БЭ} = U_{Б0} + u_{вх}$ ) түзгөн чыңалуусу  $U_{Б0}$  денгели салыштырмалуу өзгөрө баштайт жана бул учурда базалык ток бирде чоңоюп, бирде кичирейет (25-сүрөт, б). Тишелүү түрдө коллектордук ток да өзгөрөт (25-сүрөт, в), ал токтордун төмөнкү суммасы болуп саналат:

$$I_K = I_{К0} + i_K.$$

Коллектордук ток  $R_K$  резистору аркылуу агып өткөн кезде, ошол эле учурда бул резистордо  $U_{К0}$  турактуу чыңалуусун жана күчөткүчтүн чыгуу чыңалуусу болуп саналган  $u_K$  өзгөрмө чыңалуусун түзөт (25-сүрөт, г).

$u_K$  өзгөрүлмө чыңалуусу  $C_2$  ажыраткыч конденсатордун жардамында турактуу  $U_{К0}$  түзүүчүсүнөн ажыратылат жана күчөткүчтүн чыгуу кыскачтарына берилет (25-сүрөт, д).

Көңүл бургула, базалык жана коллектордук токтордун өзгөрүүлөрү кирүү чыңалуусунун өзгөрүшү менен бир фазада болот, б.а. алар фазасы боюнча дал келишет. Ал эми коллектордук чыңалуу жана чыгуу чыңалуусу кирүү чыңалуусу менен карама – каршы фазада өзгөрүшөт.

Базанын чыңалуусу жогорулаган кезде коллектордун чыңалуусу төмөндөйт жана тескерисинче, базанын чыңалуусу кичирейгенде коллектордун чыңалуусу өсөт (транзистордун «алтын эрежеси»).

Переменное напряжение  $u_K$  с помощью разделительного конденсатора  $C2$  отделяется от постоянной составляющей  $U_{K0}$  и передается на выходные зажимы усилителя (рис. 25, д).

Обратите внимание, что изменения базового и коллекторного токов происходят в фазе с изменением входного напряжения, то есть, совпадают по фазе. А коллекторное напряжение и выходное напряжение изменяются в противофазе с входным напряжением

Когда напряжение базы повышается, напряжение коллектора уменьшается, и наоборот, когда напряжение базы уменьшается, напряжение коллектора возрастает.

#### 14. Типовой усилительный каскад

Можно предложить два способа устранения температурной нестабильности работы транзисторного усилителя: первый – поместить усилитель в термостат, например в холодильник или термос. Этот путь сложный и дорогостоящий. Второй путь – обеспечить автоматическую температурную стабилизацию путем некоторого усложнения схемы усилительного каскада.

Для автоматической температурной стабилизации используется следующий принцип: при протекании через транзистор коллекторного тока транзистор нагревается, его температура возрастает и увеличивается количество неосновных носителей заряда, создающих в транзисторе дополнительные, неуправляемые токи. При этом через коллекторный  $p-n$ -переход из коллектора в область базы проникают неосновные носители зарядов, которые, складываясь с существующим базовым током через эмиттерный  $p-n$ -переход, вызывают увеличение коллекторного тока. Коллекторный ток возрастает, а вместе с ним и температура транзистора...

Чтобы ограничить коллекторный ток, нужно по мере возрастания коллекторного тока автоматическим путём уменьшать базовый ток. При этом с уменьшением базового тока одновременно будет уменьшаться и коллекторный ток. Такой метод термостабилизации использован в схеме типового усилительного каскада (рис. 26).

Типовой усилительный каскад по сравнению с простейшим усилительным каскадом имеет несколько отличий как по схеме, так и по режиму работы.

**Главное отличие** – это установка начального режима работы транзистора по постоянному току. Если в простейшем усилительном каскаде в исходном состоянии устанавливается начальный постоянный ток базы  $I_{Б0}$ , в типовом усилительном каскаде устанавливается **начальное постоянное напряжение базы  $U_{Б0}$** .

## 14. Типтүү күчөткүч каскады

Транзистордун күчөткүчтүн иштөөсүндөгү температуралык стабилсиздыгы менен күрөшүүнүн эки жолу бар: биринчи -- күчөткүчтү термостатка жайгаштыруу, мисалы холодильниктин же термоступ ичине. Бул жол кымбат жана тагаал. Экинчи жол -- схеманы татаалдаштырып, автоматикалык термостабилизацияны уюштуруу.

Автоматикалык температуралык стабилизацияны уюштуруу үчүн төмөнкү принцип пайдаланылат: транзистор аркылуу коллектордук ток акканда транзистор ысыйт, анын температурасы жогорулайт жана транзистордо башкарылбаган кошумча токторду пайда кылуучу негизги эмес заряд ташуучулардын саны көбөйөт... Мында коллектордук  $p-n$ -өтүү аркылуу коллектордон база областына негизги эмес заряд ташуучулар өтүп калып, база аркылуу агып жаткан база тогу менен кошулуп, коллектордук токту өсүшүнө алып келет. Коллектордук токту өсүшү менен бирге транзистордун температурасы да өсөт...

Андай учурларда коллектордук токту чектөө база тогу автоматикалык жол менен азайтүү аркылуу камсыз кыла болот. Мындан база тогунун азайышы менен бир эле мезгилде коллектордук ток да азаят. Мындай термостабилизация методу типтүү күчөткүч каскаддын схемасында ишке ашырылган (сүр. 26).

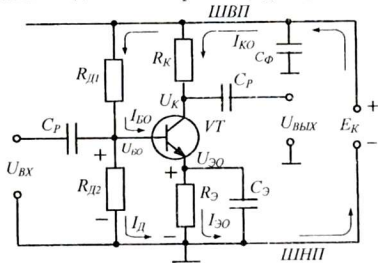


Рис. 26. Схема типowego усилительного каскада

Типтуу күчөткүч каскады жөнөкөй күчөткүч каскадына салыштырганда, иштөө режими жана схемасы боюнча бир канча айырмачылыктарга ээ.

**Башкы айырмачылык** - бул турактуу ток боюнча транзистордун баштапкы иштөө режимин уюштуруу. Эгер жөнөкөй күчөткүч каскадында баштапкы абалда башталгыч турактуу  $I_{Б0}$  база тогу

Если сравнить *схему типового усилительного каскада* со схемой простейшего усилительного каскада (рис. 23), можно выделить *два отличия*:

- применение делителя напряжения  $R_{Д1}R_{Д2}$  для установки начального постоянного напряжения на базе транзистора;
- включение в цепь эмиттера цепочки автоматической температурной стабилизации  $R_ЭC_Э$  для обеспечения постоянного напряжения на эмиттере транзистора.

1. *Начальное постоянное напряжение базы  $U_{Б0}$*  устанавливается с помощью делителя напряжения  $R_{Д1}R_{Д2}$ , построенного на резисторах  $R_{Д1}$  и  $R_{Д2}$ . Ток делителя  $I_{Д}$  протекает по цепи:  $+E_K - ШВП - R_{Д1} - R_{Д2} - ШНП - -E_K$  (см. рис. 26). Постоянный ток базы  $I_{Б0}$  течет по цепи:

$$+E_K - ШВП - R_{Д1} - \text{база} - \text{эмиттер} - НППШ - -E_K$$

Сопротивления резисторов  $R_{Д1}$  и  $R_{Д2}$  подбираются такими, чтобы ток делителя, по крайней мере, был на порядок больше начального тока базы  $I_{Д} > 10 \cdot I_{Б0}$ . Сопротивление резистора  $R_{Д2}$  должно быть много меньше сопротивления открытого  $p-n$ -перехода база-эмиттер ( $R_{Д2} < \tau_{БЭ}$ ). С учетом вышесказанного, величину тока делителя можно вычислить с помощью закона Ома:

$$I_{Д} = \frac{E_K}{R_{Д1} + R_{Д2}}$$

Протекая через резистор  $R_{Д2}$ , этот ток создаёт напряжение, которое устанавливает начальное постоянное напряжение базы:

$$U_{Б0} \approx I_{Д} \cdot R_{Д2} = \frac{R_{Д2}}{R_{Д1} + R_{Д2}} \cdot E_K$$

Отсюда видно, что постоянное напряжение базы не зависит от температуры и остаётся постоянным при любой температуре, то есть,  $U_{Б0} = const$ .

2. Другая особенность схемы типового усилительного каскада – это включение в эмиттерную цепь транзистора *цепочки автоматической температурной стабилизации  $R_ЭC_Э$* .

В процессе работы усилителя в эмиттерной цепи протекают одновременно постоянная и переменная составляющие эмиттерного тока:  $I_Э = I_{Э0} + i_Э$

уюштурулса, типтүү күчөткүч каскадында турактуу  $U_{BO}$  башталгыч база чыңалуусу уюштурулат.

Эгерде типтүү күчөткүч каскадынын схемасын жөнөкөй күчөткүч каскадынын схемасы менен салыштырсак (сүр. 23) эки айырмачылыкты бөлүп көрсөтүүгө болот:

- транзистордун базасында турактуу башталгыч чыңалууну уюштуруу үчүн  $R_{D1}R_{D2}$  чыңалуу бөлгүчү чынжырынын колдонуу;

- транзистордун эмиттериндеги чыңалуунун турактуулугун камсыздоо үчүн эмиттер чынжырына  $R_{C}C_{C}$  автоматтык термостабилизация чынжырынын кошуу.

1. Базадагы башталгыч турактуу  $U_{BO}$  чыңалуу  $R_{D1}$  жана  $R_{D2}$  резисторлорундо коюлган  $R_{D1}R_{D2}$  чыңалуу бөлгүчтүн жардамында уюштурулат.  $I_D$  бөлгүч тогу төмөнкү чынжыр боюнча агат:  $+E_K - \text{ЖПШ} - R_{D1} - R_{D2} - \text{НПШ} - -E_K$  (25-сүрөттү кара). Турактуу база тогу  $I_{BO}$  төмөнкү багытта агат:

$$+E_K - \text{ЖПШ} - R_{D1} - \text{база} - \text{эмиттер} VT - \text{НПШ} - -E_K.$$

$R_{D1}$  жана  $R_{D2}$  резисторлордун каршылыктары, бөлгүчтүн тогу базанын башталгыч тогунаан жок дегенде бир катар чоң  $I_D > 10 \cdot I_{BO}$  боло тургандай тандалат. Бул үчүн  $R_{D2}$  резисторунун каршылыгы ачык база-эмиттер  $p-n$ -өтүүсүнүн каршылыгынаан көп кичине ( $R_{D2} < \tau_{BE}$ ) болушу керек.

Жогоруда айтылгандарды эске алып, бөлгүч тогунун чоңдугун Ом закону жардамында эсептөөгө болот:

$$I_D = \frac{E_K}{R_{D1} + R_{D2}}$$

Бөлгүч тогу резистор  $R_{D2}$  аркылуу агып, башталгыч турактуу база чыңалуусун уюштуруучу чыңалууну түзөт:

$$U_{BO} = I_D \cdot R_{D2} = \frac{R_{D2}}{R_{D1} + R_{D2}} \cdot E_K$$

Мындан көрүнүп турат, базадагы турактуу чыңалуу  $U_{BO}$  каалаган температурада температурага көз каранды болбойт, бирокча айтылганда,  $U_{BO} = const$ .

2) Типтүү күчөткүч каскадынын схемасынын экинчи өзгөчөлүгү - бул транзистордун эмиттердин чынжырына  $R_{C}C_{C}$  автоматтык термостабилизация чынжырынын кошуу.

Напряжение (потенциал) эмиттера  $U_{\mathcal{E}}$  определяется по закону Ома через эмиттерный ток, протекающий через резистор  $R_{\mathcal{E}}$ :  $U_{\mathcal{E}} = I_{\mathcal{E}} \cdot R_{\mathcal{E}}$ , то есть  $U_{\mathcal{E}} = (I_{\mathcal{E}0} + i_{\mathcal{E}}) \cdot R_{\mathcal{E}}$ .

Для того чтобы в процессе усиления через резистор  $R_{\mathcal{E}}$  протекал только постоянный ток  $I_{\mathcal{E}0}$ , и напряжение эмиттера оставалось постоянным:  $U_{\mathcal{E}} = U_{\mathcal{E}0}$ , параллельно резистору  $R_{\mathcal{E}}$  включён шунтирующий конденсатор большой ёмкости -  $C_{\mathcal{E}}$ .

Известно, что сопротивление конденсатора обратно пропорционально его ёмкости, и при большой ёмкости его сопротивление переменному току близко к нулю. Поэтому переменная составляющая эмиттерного тока  $i_{\mathcal{E}}$ , беспрепятственно протекая через конденсатор  $C_{\mathcal{E}}$ , практически не создаёт падения напряжения. С другой стороны, сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно. Поэтому постоянная составляющая эмиттерного тока  $I_{\mathcal{E}0}$  протекает через резистор  $R_{\mathcal{E}}$  и создаёт постоянное напряжение  $U_{\mathcal{E}0}$ :

$$U_{\mathcal{E}0} = I_{\mathcal{E}0} \cdot R_{\mathcal{E}}.$$

Постоянный ток базы  $I_{B0}$  протекает по цепи:  $+E_K - ШВП - R_{Д1} - \text{база} - \text{эмиттер} - R_{\mathcal{E}} - ШНП - -E_K$ . При этом величину постоянного тока базы определяют через напряжение, создаваемое током делителя на резисторе  $R_{Д2}$ .

Если в цепи базы протекает постоянный ток  $I_{B0}$ , то через транзистор протекает также постоянный коллекторный ток  $I_{K0}$ .

Постоянный коллекторный ток  $I_{K0}$  протекает по цепи:  $+E_K - ШВП - R_K - \text{коллектор} - \text{эмиттер} - R_{\mathcal{E}} - ШНП - -E_K$ .

При этом через резистор  $R_{\mathcal{E}}$  одновременно протекают ток базы и ток коллектора, поэтому ток эмиттера равен сумме двух токов:

$$I_{\mathcal{E}0} = I_{B0} + I_{K0}.$$

Учитывая, что коллекторный ток намного больше базового тока, ( $I_K \gg I_B$ ), можно считать, что  $I_{\mathcal{E}0} = I_{K0}$ . Тогда согласно закона Ома

$$U_{\mathcal{E}0} = I_{\mathcal{E}0} \cdot R_{\mathcal{E}} = I_{K0} \cdot R_{\mathcal{E}}.$$

Известно, что электрическое напряжение между двумя точками есть разность потенциалов этих точек, например, напряжение между базой и эмиттером транзистора  $U_{B\mathcal{E}}$  равно разности между потенциалами базы и эмиттера:

$$U_{B\mathcal{E}} = \varphi_B - \varphi_{\mathcal{E}}.$$



Күчөткүч иштеп жатканда эмиттер чынжыры аркылуу бир эле мезгилде эмиттер тогунун турактуу жана өзгөрмө ток түзүүчүлөрү агып жатат:  $I_{\mathcal{E}} = I_{\mathcal{E}0} + i_{\mathcal{E}}$ .

Эмиттердин  $U_{\mathcal{E}}$  чыңалуусу (потенциалы)  $R_{\mathcal{E}}$  резистор аркылуу аккан эмиттердик ток аркылуу Омдун закону боюнча аныкталат:  $U_{\mathcal{E}} = I_{\mathcal{E}} \cdot R_{\mathcal{E}}$ , б.а.  $U_{\mathcal{E}} = (I_{\mathcal{E}0} + i_{\mathcal{E}}) \cdot R_{\mathcal{E}} = U_{\mathcal{E}0} + u_{\mathcal{E}0}$ .

Эмиттердин чыңалуусу  $U_{\mathcal{E}}$  турактуу  $U_{\mathcal{E}} = U_{\mathcal{E}0}$  болуп сакталышы үчүн  $R_{\mathcal{E}}$  резистору аркылуу турактуу эмиттердик тогу  $I_{\mathcal{E}0}$  эле агышы зарыл. Анын үчүн  $R_{\mathcal{E}}$  резисторго параллель чоң сыйымдуулукка ээ болгон  $C_{\mathcal{E}}$  конденсатору туташтырылган.

Бизге белгилүү, өзгөрмө токтор үчүн конденсатордун каршылыгы анын сыйымдуулугуна тескери пропорциялаш. Чоң сыйымдуулукка ээ болгондуктан анын өзгөрмө токтор үчүн каршылыгы нолго жакын болот. Ошондуктан эмиттер тогунун  $i_{\mathcal{E}}$  өзгөрмө түзүүчүсү  $C_{\mathcal{E}}$  конденсатор аркылуу тоскулдуксуз агып өтүп, иш жүзүндө, эч кандай чыңалуунун түшүүсүн түзбөйт. Экинчи жактан, конденсатордун турактуу ток үчүн каршылыгы чексиз. Ошондуктан, эмиттердин тогунун  $I_{\mathcal{E}0}$  турактуу тозүүчүсү  $R_{\mathcal{E}}$  аркылуу агып,  $U_{\mathcal{E}0}$  турактуу чыңалууну түзөт:

$$U_{\mathcal{E}0} = I_{\mathcal{E}0} \cdot R_{\mathcal{E}}.$$

Турактуу база тогу төмөнкү чынжыр аркылуу агат:  $+E_K - \text{ЖПШ} - R_{\mathcal{D}1} - \text{база} - \text{эмиттер} - R_{\mathcal{E}} - \text{НПШ} - -E_K$ . Мында турактуу база тогунун чоңдугу  $R_{\mathcal{D}2}$  резисторунда бөлгүч тогу түзгөн чыңалуу аркылуу аныкталат.

Эгерде база чынжрынан  $I_{B\mathcal{E}}$  турактуу тогу акса, анда транзистор аркылуу да турактуу  $I_{K\mathcal{O}}$  коллектордук ток агат.

Турактуу  $I_{K\mathcal{O}}$  коллектордук токтуң багыты төмөнкүдөй:  $+E_K - \text{ЖПШ} - R_K - \text{коллектор} - \text{эмиттер} - R_{\mathcal{E}} - \text{НПШ} - -E_K$ .

Мында  $R_{\mathcal{E}}$  резистор аркылуу бир мезгилде база тогу жана коллектор тогу агып жатышат, ошондуктан эмиттер тогу база жана коллектор токторунун суммасына барабар:  $I_{\mathcal{E}0} = I_{B\mathcal{E}} + I_{K\mathcal{O}}$

Коллектордук токтуң мааниси база тогунан көпкө чоң экенлигин ( $I_K \gg I_B$ ) эске алып, эмиттердин ток коллектордук токко барабар деп  $I_{\mathcal{E}0} = I_{K\mathcal{O}}$  эсептесек болот. Анда Омдун закону боюнча:

$$U_{\mathcal{E}0} = I_{\mathcal{E}0} \cdot R_{\mathcal{E}} = I_{K\mathcal{O}} \cdot R_{\mathcal{E}}.$$

Белгилүү, электрдик чыңалуу – бул эки чекиттин арасындагы потенциалдар айырмасы, мисалы, транзистордун база жана эмиттердин

В радиотехнических схемах потенциалы точек схемы измеряются как напряжение между выбранной точкой и шиной нулевого потенциала (массой), потенциал которой принят за нуль. Поэтому.

$$U_{БЭ} = U_B - U_Э.$$

Таким образом, постоянное напряжение между базой и эмиттером равно  $U_{БЭ0} = U_{Б0} - U_{Э0}$ , то есть,

$$U_{БЭ0} = U_{Б0} - I_{К0} \cdot R_Э.$$

Из этой формулы видно, что, если с повышением температуры коллекторный ток начинает возрастать, потенциал эмиттера возрастает, и напряжение между базой и эмиттером автоматически уменьшается (обратите внимание на знак «минус» в формуле).

При этом с уменьшением напряжения между базой и эмиттером  $U_{БЭ0}$  начальный постоянный ток базы  $I_{Б0}$  уменьшается и он равен:

$$I_{Б0} = \frac{U_{Б0} - I_{К0} \cdot R_Э}{r_{БЭ}}$$

Таким образом, уменьшение напряжения между базой и эмиттером вызывает уменьшение базового тока, а вместе с ним и коллекторного тока. То есть, происходит автоматическое уменьшение коллекторного тока при возрастании температуры. В этом заключается *принцип температурной стабилизации* работы транзистора.

Принцип работы типового усилительного каскада практически не отличается от работы простейшего усилительного каскада. Входное переменное напряжение  $u_{ВХ}$  через разделительный конденсатор  $C_P$  и шунтирующий конденсатор  $C_Э$  прикладывается к промежутку база-эмиттер транзистора  $VT$  (см. рис. 26). Управляющее напряжение  $U_{БЭ}$  складывается из суммы двух напряжений – постоянного и переменного:  $U_{БЭ} = U_{Б0} + u_{ВХ}$ . В соответствии с этим базовый ток имеет две составляющие: постоянную  $I_{Б0}$  и переменную  $i_B$ , то есть

$$I_B = I_{Б0} + i_B.$$

Коллекторный ток, управляемый базовым током, также содержит два составляющих:  $I_K = I_{К0} + i_K$ .

Протекая через нагрузку транзистора  $R_K$ , коллекторный ток  $I_K = I_{К0} + i_K$  создает на нём одновременно два напряжения: постоянное  $U_{R0}$  и переменное  $u_R$ , при этом напряжение на резисторе  $R_K$  равно сумме двух напряжений:

$$U_R = I_K R_K = (I_{К0} + i_K) \cdot R_K = I_{К0} \cdot R_K + i_K \cdot R_K$$

арасындагы чыңалуу  $U_{БЭ}$  база потенциалы менен эмиттер потенциалдарынын айырмасына барабар:

$$U_{БЭ} = \varphi_B - \varphi_Э.$$

Радиотехникалык схемаларда чекиттеринин потенциалдары тандалган чекит жана потенциалы нөлгө барабар болгон НППШ арасындагы чыңалуу катары өлчөнөт. Ошондуктан база-эмиттер аралыктагы чыңалуу

$$U_{БЭ} = U_B - U_Э.$$

Ошентип база жана эмиттер арасындагы турактуу чыңалуу  $U_{БЭО} = U_{БО} - U_{КО}$ , же

$$U_{БЭО} = U_{БО} - I_{КО} \cdot R_Э.$$

Бул формуладан көрүнүп турат, эгер, мисалы, температуранын жогорулашы менен, транзистор аркылуу аккан коллектордук ток  $I_{КО}$  өсө баштаса, эмиттердин потенциалы жогорулайт, анда база-эмиттер арасындагы турактуу чыңалуу  $U_{БЭО}$  автоматтык түрдө азаят (формуладагы «минус»ка көңүл бургула).

Мында база-эмиттер аралыктагы чыңалуу  $U_{БЭО}$  төмөндөгөндүктөн башталгыч база тогу  $I_{БО}$  азаят, жана анын мааниси

$$I_{БО} = \frac{U_{БО} - I_{КО} \cdot R_Э}{r_{БЭ}}$$

Ошентип, база-эмиттер арасындагы чыңалуунун азайышы база тогунун азайышына алып келет анны менен бирге, база тогу менен башкарылган, коллектордук ток да азаят. Башкача айтканда, температуранын жогорулоосу менен коллектор тогунун автоматтык азаюусу жүрөт.

Транзистордун иштөөсүнүн температуралык стабилизация принциби ушундан турат.

Типтүү күчөткүч каскадынын иштөө принциби негизинен жөнөкөй күчөткүч каскаддын иштөөсүнөн айырмаланбайт. Ошондой эле кирүүгө берилген күчөтө турган өзгөрмөлүү чыңалуу  $u_{ВХ}$  ажыратуучу  $C_P$  конденсатору жана шунттоочу, эмиттердик конденсатору  $C_Э$  аркылуу база-эмиттер аралыгына берилет (26-сүрөттү кара).  $U_{БЭ}$  башкаруучу чыңалуу эки чыңалуунун (турактуу жана өзгөрмө) суммасына барабар  $U_{БЭ} = U_{БО} + u_{ВХ}$ . Буга тиешелүү база тогу эки түзүүчүгө ээ болот: турактуу  $I_{БО}$  жана  $i_B$  өзгөрмө, б.а.

$$I_B = I_{БО} + i_B.$$

Постоянная составляющая коллекторного тока создает на резисторе  $R_K$  постоянное напряжение  $U_{RO} = I_{KO} \cdot R_K$  и ее энергия бесполезно теряется на резисторе в виде тепла.

Переменное напряжение  $u_R = i_K \cdot R_K$  является выходным напряжением усилительного каскада:  $u_{ВЫХ} = i_K \cdot R_K$ . Выходное (переменное) напряжение  $u_{ВЫХ}$  отделяется от постоянной составляющей  $U_{RO}$  с помощью разделительного конденсатора  $C_P$  и подается на выход: на нагрузку усилителя, например, телефон, или на вход следующего усилительного каскада.

Роль конденсатора  $C_\Phi$  остаётся прежней: он *накоротко замыкает шину высокого потенциала* (ШВП) с шиной нулевого потенциала (ШНП) по переменному току. В результате, потенциалы ШВП и ШНП *по переменному току* равны нулю, и поэтому выходное напряжение  $u_{ВЫХ} = i_K \cdot R_K$  можно снимать с промежутка между коллектором и ШВП, но лучше с промежутка между коллектором и шиной нулевого потенциала.

С учетом того, что сопротивление шунтирующего конденсатора  $C_\Phi$  переменному току близко к нулю, фактически выходное напряжение снимается между коллектором и эмиттером.

Если усиления одного усилительного каскада недостаточно, то к выходу одного усилительного каскада подключается вход следующего усилительного каскада. При этом каскады включаются последовательно – один за другим, и в результате образуется многокаскадный усилитель.

На рисунке 27 приведена схема двухкаскадного усилителя.

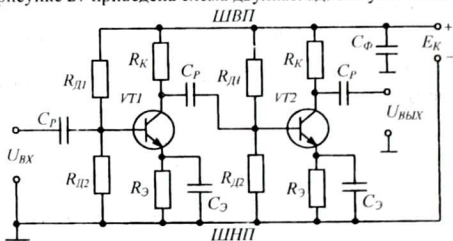


Рис. 27. Двухкаскадный усилитель

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов составляющих каскадов усиления, то есть,  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n$ , где  $n$  – число каскадов усиления.

База тогу менен башкарылуучу коллектор тогу да эки түзүүчүгө ээ болот (турактуу жана өзгөрүлмөлү):  $I_K = I_{KO} + i_K$ .

Транзистордун  $R_K$  нагрузкасы аркылуу аккан  $I_K = I_{KO} + i_K$  коллектордук ток (Омдун закону боюнча) эки чыңалууну түзөт: турактуу чыңалуу  $U_{RO}$  жана өзгөрүлмөлүү  $u_R$ , мында резистордогу чыңалуу эки чыңалуунун суммасына барабар:

$$U_R = I_K R_K = (I_{KO} + i_K) \cdot R_K = I_{KO} R_K + i_K R_K.$$

Коллектордук токту турактуу тузуучусу  $R_K$  резисторунда турактуу  $U_{RO} = I_{KO} R_K$  чыңалуу пайда кылат жана анын энергиясы резистордо жылуулук түрүндө пайдасыз жоголот, б.а. резисторду ысытат.

Коллектордук токту өзгөрүлмөлү түзүүчүсү  $R_K$  резистордо пайда кылган чыңалуусу  $u_R = i_K \cdot R_K$  күчөткүч каскаддын чыгуу чыңалуусу болот:  $u_{ВЫХ} = i_K \cdot R_K$ .

Чыгуу (өзгөрүлмөлүү) чыңалуу  $u_{ВЫХ}$  ажыраткыч  $C_P$  конденсатор жардамы менен турактуу  $U_{RO}$  чыңалуудан ажыратылып чыгууга, күчөткүчтүн нагрузкасына, мисалы, телефонго, же кезектеги күчөткүч каскадынын кирүүсүнө жеткирилет.

Схемадагы  $C_\Phi$  - конденсатордун ролу баштагындай калат, ал жогорку потенциал шинаны (ЖПШ-ны) *өзгөрүлмөлүү ток боюнча* ноль потенциалдуу шина (НПШ) менен *кыска туташтырат*. Натыйжада, ЖПШ жана НПШ шиналардын өзгөрүлмө потенциалдары нөлгө барабар болгондуктан, чыгыш өзгөрүлмөлүү  $u_{ВЫХ} = i_K \cdot R_K$  чыңалууну коллектор менен ЖПШ аралыктан, же коллектор менен НПШ аралыктан алса болот.

$C_3$  шунттоочу конденсатордун өзгөрүлмө токтор үчүн каршылыгы нөлгө жакындыгы эске алынганда, факт жузундо чыгыш чыңалуу транзистордун коллектору менен эмиттеринин арасынан алынат.

Эгерде бир күчөткүч каскадынын күчөтүү коэффициенти жетиштүү болбосо, анда анын чыгуусуна экинчи (кезектеги) күчөткүч каскаддын кирүүсү туташтырылат.

Мында күчөткүч каскаддар удаалаш – бири артынан бири – туташтырылышат жана көп каскаддуу күчөткүч пайда болот. 27 сүрөттө эки каскаддуу күчөткүч схемасы көрсөтүлгөн.

Көп каскаддуу күчөткүчтүн күчөтүү коэффициенти каскаддардын күчөтүү коэффициенттеринин көбөйтүндүсүнө барабар:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n$$

Бул жерде  $n$  – каскаддардын саны.

## 15. Характеристики усилителя

Работа усилителя оценивается способностью одинаково усиливать сигналы, независимо от амплитуды (сильный или слабый сигнал), от частоты (низкочастотный или высокочастотный), отсутствием искажений. Судить о достоинствах и недостатках усилителя можно по его характеристикам. Качество работы усилителя отражается в трех характеристиках: амплитудная, амплитудно-частотная и фазо-частотная.

1. **Амплитудная характеристика** усилителя представляет собой график зависимости коэффициента усиления или амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного напряжения:

$$K = f(U_{m_{вх}}) \quad \text{или} \quad U_{m_{вых}} = f(U_{m_{вх}}).$$

На рисунке 28, а показана типовая амплитудная характеристика усилителя. Левая, прямолинейная, часть характеристики соответствует пропорциональному усилению сигналов  $U_{m_{вых}} = K \cdot U_{m_{вх}}$ , то есть, одинаковое усиление сигналов, независимо от амплитуды. Правая, нелинейная часть, показывает, что при больших амплитудах входного напряжения выходное напряжение не растет, а усиление уменьшается.

2. **Амплитудно-частотная характеристика** показывает зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты усиливаемого сигнала:  $K = f(\omega)$ .

На рисунке 28, б показана типовая амплитудно-частотная характеристика усилителя. Она состоит из трёх участков, соответствующих работе усилителя на низших, средних и высших частотах.

На низших частотах (участок I) усиление недостаточно: это объясняется большим сопротивлением разделительных конденсаторов  $C_p$  на низких частотах.

На высоких частотах (участок III) сказываются паразитные ёмкости  $C_0$  между проводниками, элементами схемы (ёмкость монтажа), эти паразитные ёмкости шунтируют выход усилителя.

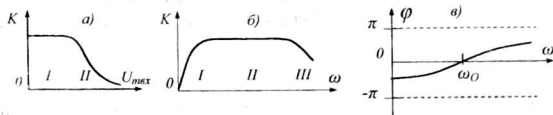


Рис. 28. Амплитудная, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики усилителя.

Хотя ёмкость монтажа составляет всего десятки пикофарад, однако на очень высоких частотах ёмкостное сопротивление

## 15. Күчөткүчтүн мүнөздөмөлөрү

Күчөткүчтүн иштөөсү сигналдарды амплитудасынан (күчтүү же алсыз сигнал), жыштыгынан (төмөнкү жыштыктуу же жогорку жыштыктуу) көз карандысыз түрдө бирдей күчөтүү жөндөмдүүлүгү менен жана бурмалоолордун жоктугу менен бааланат. Мүнөздөмөлөрү боюнча күчөткүчтүн артыкчылыктары жана кемчиликтери жөнүндө сөз кылууга болот: Күчөткүчтүн иштөөсүнүн сапаттуулугу анын үч мүнөздөмөсүндө чагылат, бул амплитудалык, амплитудалык-жыштык жана фазалык-жыштык мүнөздөмөлөр.

1. Күчөткүчтүн **амплитудалык мүнөздөмөсү** бул анын күчөтүү коэффициентинин же чыгуу чыңалуусунун амплитудасынын кирүү чыңалуусунун амплитудасынан болгон  $K = f(U_{m_{ax}})$  же  $U_{m_{вых}} = f(U_{m_{ax}})$  көз карандылыктын графиги. 28-а сүрөттө күчөткүчтүн типтүү амплитудалык мүнөздөмөсү көрсөтүлгөн.

Мүнөздөмөнүн сол жактагы түз сызыктуу бөлүгү сигналдардын пропорциялуу күчөтүлүшүнө туура келет  $U_{m_{вых}} = K \cdot U_{m_{ax}}$ , б.а. сигналдар амплитудасынан көз карандысыз бирдей күчөтүрүлөт.

Оң жактагы сызыктуу эмес бөлүк кирүү чыңалуусунун чоң амплитудаларында чыгуу чыңалуу өспөй калып, күчөтүү азая тургандыгын көрсөтөт.

2. **Амплитудалык-жыштыктык мүнөздөмө** күчөткүчтүн күчөтүү коэффициентинин күчөтүрүүлүчү сигналдын жыштыгынан болгон көз карандылыгын көрсөтөт:  $K = f(\omega)$ .

28, б - сүрөттө күчөткүчтүн типтүү амплитудалык мүнөздөмөсү көрсөтүлгөн. Ал төмөнкү, ортоңку жана жогорку жыштыктарга туура келген үч бөлүктөн турат.

Төмөнкү жыштыктарда (участок I) күчөтүү жетишсиз: ал ажыраткыч  $C_p$  конденсаторлордун каршылыгынын төмөнкү жыштыктарда чоң болуусу менен түшүндүрүлөт.

Жогорку жыштыктарда (участок III) схеманын өткөргүчтөрүнүн жана элементтеринин ортосундагы  $C_o$  мите сыйымдуулуктар (монтаждык сыйымдуулуктар) таасир тийгизишет, алар чыгууну шунтташтырат.

Монтаждын сыйымдуулугу бар болгону ондогон пикофараданы түзгөн болсо да, абдан жогорку жыштыктарда мите сыйымдуулуктарынын каршылыктары нөлгө жакындайт жана алар аркылуу өтүүчү пайдалуу сигнал чыгууга жетпестен туюкталып калат.

Ортоңку жыштыктарда (участок II), каршылыгы чоң, ал эми бөлүүчү конденсаторлордун каршылыгы кичине кезинде, сигналдар алардын жыштыктарынан көз карандысыз түрдө бирдей күчөтүлүшөт.

приближается к нулю и через паразитные емкости полезный сигнал замыкается на массу, не достигая выхода.

На средних частотах (участок II), когда сопротивление паразитных ёмкостей велико, а сопротивление разделительных конденсаторов мало, сигналы усиливаются одинаково, практически независимо от частоты.

**3. Фазо-частотная характеристика** (рис. 28, в) показывает зависимость сдвига фазы выходного сигнала в зависимости от частоты входного сигнала:  $\varphi = f(\omega)$ . Она показывает, что имеющиеся в усилителе ёмкости и индуктивности вызывают сдвиг фазы в зависимости от частоты сигнала. Кроме того, каждый транзистор сдвигает фазу усиливаемого сигнала на  $180^\circ$ .

На приведенной фазо-частотной характеристике для сигнала с частотой  $\omega = \omega_0$  фаза выходного напряжения совпадает с фазой входного напряжения и сдвиг фазы равен нулю.

Фазо-частотные характеристики используются, в основном при расчётах генераторов гармонических сигналов.

## 16. Эмиттерный повторитель

Усилительный каскад, построенный по схеме ОК (с общим коллектором), позволяет реализовать усиление сигналов по току. Это схема *эмиттерного повторителя*.

*Повторителем* он называется потому, что выходной сигнал по напряжению полностью совпадает с входным напряжением, то есть коэффициент усиления по напряжению равен единице ( $K_U = 1$ ).

Кроме того, выходное напряжение совпадает по фазе с входным напряжением, так как согласно «золотого правила транзистора» напряжения базы и эмиттера всегда изменяются в фазе.

Таким образом, выходное напряжение эмиттерного повторителя повторяет входное напряжение не только по амплитуде, но и по фазе.

Схема простого эмиттерного повторителя приведена на рисунке 29. Главная особенность схемы заключается в том, что нагрузка транзистора -  $R_н$  вместо коллектора включена в цепь эмиттера и выходное напряжение снимается не с коллектора, а между эмиттером и шиной нулевого потенциала.

Обратите внимание, что коллектор транзистора напрямую соединён с шиной высокого потенциала, а так как шина высокого потенциала «заземлена» по переменному току через конденсатор фильтра  $C_\phi$ , получается, что коллектор также имеет нулевой потенциал по переменному току и входное напряжение подается между базой и коллектором.



3. **Фазалык-жыштыктык мүнөздөмө** (28-в сүрөт) чыгуу сигналынын фазасынын жылышуусунун көз карандылыгынын кирүү сигналынын жыштыгынан көз карандылыгын көрсөтөт:  $\varphi = f(\omega)$ .

Ал күчөткүчтөгү сыйымдуулуктар жана индуктивдүүлүктөр сигналдын жыштыгынан көз каранды түрдө фазанын жылышуусун пайда кылаарын көрсөтөт.

Андан башка ар бир транзистор күчөттүрүлүүчү сигналдын фазасын  $180^\circ$  ка бурат.

Берилген фазалык-жыштык мүнөздөмөдөгү  $\omega = \omega_0$  болгон сигнал үчүн чыгуу чыңалуусунун фазасы кирүү чыңалуусунун фазасы менен дал келет жана фазанын жылышуусу нөлгө барабар.

Фазалык-жыштык мүнөздөмөлөр негизинде гармоникалык сигналдардын генераторлорун эсептеп чыгууда пайдаланылат.

## 16. Эмиттердик кайталоочу

Жалпы коллектор (ЖК) схемасы негизинде түзүлгөн күчөткүч каскады сигналдарды ток боюнча күчөтө алат. Бул **эмиттердик кайталоочунун** схемасы.

Күчөтүү коэффициенти бирге барабар болуп ( $K_U = 1$ ), чыгуу чыңалуу толук кирүү чыңалууга окшош болгондуктан андай каскад **кайталоочу** деп аталат. Андан тышкары, транзистордун «алтын эрежеси» боюнча, база жана эмиттер чыңалуулары бирдей өзгөргөндүктөн, чыгуу чыңалуу кирүү чыңалуу менен бир фазада өзгөрөт.

Ошентип, эмиттердик кайталоочунун чыгуу чыңалуусу кирүү чыңалууну амплитуда боюнча жана фаза боюнча кайталайт.

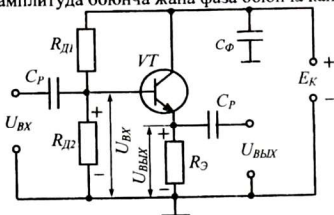


Рис. 29. Схема эмиттерного повторителя

Жөнөкөй эмиттердик кайталоочунун схемасы 29-сүрөттө көрсөтүлгөн. Схеманын негизги өзгөчөлүгү төмөнкүдөй: транзистордун жүгү (нагрузкасы) -  $R_Э$  коллектор чынжырына эмес,

Так как выходное напряжение снимается между эмиттером и ШНП, фактически получается, что выходное напряжение снимается между эмиттером и коллектором. Таким образом, коллектор является общим и для входа и для выхода усилительного каскада (схема ОК).

В этой схеме при отсутствии входного сигнала в цепи базы протекает ток  $I_{Б0}$ , а в цепи эмиттера — ток  $I_{Э0}$ .

При подаче входного переменного напряжения  $u_{ВХ}$  в цепи базы появляется переменная составляющая  $i_{ВХ}$ , которая вызывает переменную составляющую эмиттерного тока  $i_{Э}$ . Переменная составляющая тока эмиттера создаёт на резисторе  $R_{Э}$  переменную составляющую, представляющую собой выходное напряжение  $u_{ВЫХ} = R_{Э} \cdot i_{Э}$ . Это напряжение через разделительный конденсатор  $C_p$  подаётся на выход усилителя.

В эмиттерном повторителе используется глубокая (100-процентная) отрицательная обратная связь. Дело в том, что выходное напряжение, создаваемое на резисторе  $R_{Э}$  целиком приложено к входу.

Теперь к промежутку база-эмиттер приложены два напряжения: входное напряжение  $u_{ВХ}$  и напряжение обратной связи - выходное напряжение  $u_{ВЫХ}$ . Однако это не сумма напряжений, а разность, так как выходное напряжение подаётся на промежуток база-эмиттер в обратной полярности с входным напряжением.

Когда напряжение на входе возрастает, одновременно возрастает и напряжение на эмиттере (полярность этих напряжений на  $R_{Д2}$  и на  $R_{Э}$  показана на рисунке 29). Как видно отсюда, входное напряжение приложено «плюсом» к базе и «минусом» - к эмиттеру, а выходное напряжение, наоборот, приложено «минусом» к базе и «плюсом» - к эмиттеру. Поэтому управляющим напряжением является разность  $u_{ВХ} - u_{ВЫХ}$ .

Однако эта разность не равна нулю, так как транзистор все-таки усиливает, значит,  $u_{ВХ} > u_{ВЫХ}$ . Поэтому коэффициент усиления эмиттерного повторителя по напряжению немного меньше единицы ( $K_U = 0,95...0,99$ ).

Хотя у эмиттерного повторителя коэффициент усиления по напряжению  $K_U < 1$ , но зато обеспечивается высокий коэффициент усиления по току  $K_I \gg 1$  (порядка 1000), при этом достигается высокое значение входного сопротивления  $R_{ВХ}$  и низкое значение выходного сопротивления  $R_{ВЫХ}$ .

Эмиттерный повторитель используется как *согласующий каскад*, связывающий, например, вход усилителя напряжения построенного по

эмиттер чынжырына туташтырылган, чыгуу чыналуу коллектордон эмес, эмиттер жана НПШ (нөл потенциал шинасы) аралыктан алынат.

Көңүл бургула, транзистордун коллектору түз ЖПШ – жогорку потенциал шинасы - менен туташтырылган, бирок ал  $C_\Phi$  фильтр конденсатору аркылуу өзгөрүлмө ток боюнча «жерге туташтырылган» болгондуктан өзгөрүлмө ток боюнча коллектордун потенциалы нөлгө барабар.

Ошентип, кирүү чыналуу база жана коллектор аралыкка берилет, чыгуу чыналуу эмиттер жана НПШ аралыктан алынгандыгын, башкача айтканда, чыгуу чыналуу эмиттер жана коллектор аралыктан алынат деп эсептесе болот. Ошентип, мындай күчөткүч каскаддын кирүүсү жана чыгуусу үчүн коллектор жалпы электрод болот (ЖК-схемасы). Бул схемада кирүү сигнал болбогонда транзистордун база чынжырында  $I_{B0}$ , эмиттер чынжырында -  $I_{E0}$  турактуу, башталгыч токтор агып жатышыт.

Кирүүгө өзгөрүлмө  $u_{BX}$  кирүү чыналуусу берилгенде, база чынжырында өзгөрүлмөлүү  $i_{BX}$  ток пайда болот жана эмиттер чынжырында башкарылган  $i_E$  тогу ага баштайт.

Эмиттердик токтун өзгөрүлмөлүү түзүүчүсү  $R_E$  резисторунда  $u_{BVLX} = R_E \cdot i_E$  өзгөрүлмөлүү чыналуу түзүүчүсүн түзөт. Бул – күчөткүч каскаддын чыгуу чыналуусу. Ал өзгөрүлмөлүү чыгуу чыналуу ажыраткыч  $C_P$  конденсатор аркылуу чыгууга чыгарылат.

Эмиттердик кайталоочуда терең (100-проценттик) тескери байланышуу колдонулат. Мында,  $R_E$  резистордо пайда болгон чыгуу чыналуу толук киришке берилген.

Эми база-эмиттер аралыкка бир учурда эки чыналуу берилген: кирүү чыналуу  $u_{BX}$  жана тескери байланыш чыналуусу – чыгуу чыналуу  $u_{BVLX}$ . Бирок, бул чыналуулардын кошуусу эмес, алардын айырмасы, анын себеби – чыгуу чыналуу база-эмиттер аралыкка тескери уюлдукта берилет.

Кириш чыналуу жогорулаганда, аны менен бирге эмиттердин чыналуусу жогорулайт (ал чыналуулардын  $R_{D2}$  жана  $R_E$  каршылыктардагы уюлдуктары 29 сүрөттө көрсөтүлгөн). Мындан көрүнүп турат: кирүү чыналуу базага «плюс» менен туташтырылган, чыгуу чыналуу болсо – тескери, «минус» менен базага, «плюс» менен эмиттерге туташтырылган. Ошондуктан, башкаруучу чыналуу болуп  $u_{BX} - u_{BVLX}$  айырмасы эсептелет.

Бирок бул айырма нөлгө барабар эмес: транзистор иштеп жаткандыгын себеби -  $u_{BX} > u_{BVLX}$ . Ошондуктан эмиттердик

схеме ОЭ с выходом малоомощного входного источника сигнала или выход этого же усилителя – с мощной низкоомной нагрузкой.

## 17. Усилитель постоянного тока

Рассмотренные выше усилители непригодны для усиления медленно изменяющихся сигналов, частота которых близка к нулю, так как в схеме усилителя имеются разделительные конденсаторы, которые не пропускают постоянный ток и постоянное напряжение.

Если из схемы типового усилительного каскада удалить все конденсаторы (см. рис. 27), в этом случае через входное и выходное устройство начнут протекать неуправляемые постоянные токи, одновременно нарушающие режим работы транзистора.

Чтобы избежать этого, необходимо осуществить выравнивание потенциалов на входных и выходных зажимах усилителя. Это достигается с помощью делителей напряжения  $R1R2$  и  $R7R8$ .

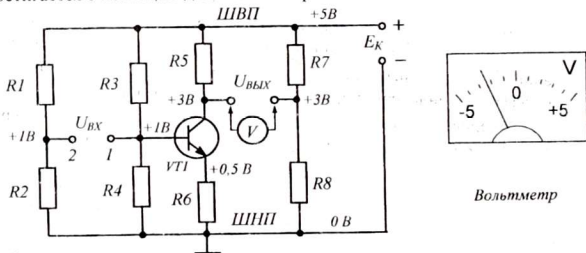


Рис. 30. Усилитель постоянного тока

На рисунке 30 показана схема простого усилителя постоянного тока, где указаны потенциалы отдельных точек схемы, когда на входе нет входного напряжения  $U_{EX} = 0$ .

При этом, даже, если входные (или выходные) зажимы замкнуты, через них не потечёт электрический ток.

Чтобы посмотреть, как работает усилитель, к выходным зажимам можно подключить двухполярный вольтметр (с нулём в середине шкалы, как показано на рисунке 30).

При увеличении выходного напряжения стрелка вольтметра отклоняется вправо, а при уменьшении – влево.

Если на вход усилителя подать положительное напряжение (плюсом к зажиму «1»), при этом напряжение на базе транзистора  $VT1$  возрастает, одновременно возрастает коллекторный ток, а напряжение

каталоочунун чыңалуу боюнча күчөтүү коэффициенти бирден бир аз кичине ( $K_U = 0,95...0,99$ ).

Эмиттердик кайталоочунун чыңалуу боюнча күчөтүү коэффициенти  $K_U < 1$  болсо да, бирок анын ток боюнча күчөтүү коэффициенти абдан жогору  $K_I \gg 1$  (1000 иретинде). Аны менен бирге күчөткүчтүн чоң кирүү  $R_{BX}$  каршылыгы жана төмөн чыгуу  $R_{ВЫХ}$  каршылыгы камсыздырылат.

Эмиттердик кайталоочу *макулдаштыруучу каскад* ордуна колдонулат, маселен, жалпы эмиттер схемасында түзүлгөн чыңалуу күчөткүчтүн кирүүсүн начар чыңалуу булагы чыгуусу менен туташтырууга, же ошол эле күчөткүчтүн чыгуусун күчтүү төмөн каршылыктык нагрузка менен туташтырууга колдонулат.

## 17. Турактуу ток күчөткүчү

Жогорууда каралган күчөткүчтөр жыштыгы нөлгө жакын болгон, акырын өзгөрүүчү сигналдарды күчөтүүгө жараксыз, - анын себеби: күчөткүч схемаларында ажыраткыч конденсаторлор колдонулат. Эсинерде болсо керек, конденсатордун каршылыгы жыштыкка тескери пропорциялаш, жыштык төмөндөгөндө конденсатордун каршылыгы чексиздикке умтулат.

Эгер типтүү күчөткүчтүн схемасынан (сүр. 27 кара) бардык конденсаторлор жоюлуп ташталса, анда кирүү жана чыгуу чынжырларда башкарылбаган турактуу токтор ага баштайт, ошол эле учурда транзистордун режими бузулат. Мындай абалды болтурбоо үчүн, күчөткүчтүн кирүү жана чыгуу кыскачтарындагы потенциалдарын теңдештирүү керек. Бул маселе  $R1R2$  жана  $R7R8$  чыңалуу бөлгүчтөрү менен чечилет (сүр. 30).

30-сүрөттө жөнөкөй турактуу ток күчөткүчүнүн схемасы көрсөтүлгөн, мында схеманын айрым чекиттеринин кирүүдө чыңалуу болбогон  $U_{BX} = 0$ . учурдагы потенциалдары көрсөтүлгөн.

Эгерде кирүү (же чыгуу) кыскачтары озара кыска туташтырылса да, алардын аркылуу электр тогу акпайт.

Күчөткүчтүн иштөөсүн байкоо үчүн чыгуу кыскачтар арасына эки уюлдук вольтметр туташтырылат (мындай вольтметрде нөл шкаланын борборунда жайгашкан).

Чыгуу чыңалуу жогорулаганда вольтметрдин жебеси оңго жылат, чыңалуу төмөндөгөндө – солго.

Эгер кирүүгө оң чыңалуу берилсе (плюс менен «1» кыскачка),  $VT1$  транзистордун базасындагы чыңалуу жогорулайт, аны менен бирге база тогу өсөт, коллектордун чыңалуусу төмөндөйт. Ошондуктан вольтметрдин жебеси солго кыйшаят (чыгуу чыңалуу төмөндөйт).

на коллекторе уменьшается. При этом стрелка вольтметра отклоняется влево (выходное напряжение уменьшается).

Если входное напряжение уменьшается («минус» на зажиме «1»), уменьшается базовый (и коллекторный) ток транзистора  $VT1$ , а напряжение на коллекторе возрастает. При этом стрелка вольтметра отклоняется вправо.

Таким образом, видно, что выходное напряжение изменяется в противофазе с входным напряжением.

То, что усилитель называется усилителем постоянного тока, не означает, что он усиливает только постоянное напряжение.

Усилитель постоянного тока может усиливать любые другие сигналы: и низкочастотные и высокочастотные, так как в схеме нет частотнозависимых элементов (конденсаторов).

Амплитудно-частотная характеристика усилителя постоянного тока представляет собой прямую линию и сходна с амплитудно-частотной характеристикой идеального усилителя (рис. 31).

У усилителя постоянного тока есть серьезный недостаток — нестабильность коэффициента усиления, это «*дрейф нуля*». Даже когда входное напряжение усилителя строго неизменно, стрелка выходного вольтметра не стоит на месте.

Причина заключается в том, что коэффициент усиления усилителя постоянного тока никогда не остаётся постоянным. С течением времени коэффициент усиления непрерывно и беспорядочно изменяется относительно некоторого среднего значения. Это связано с изменением температуры, питающего напряжения и других причин. На рисунке 32 показано изменение выходного напряжения усилителя постоянного тока в течение 5 часов.

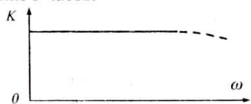


Рис. 31. Амплитудно-частотная характеристика УПТ

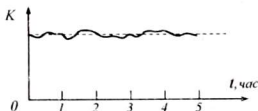


Рис. 32. Дрейф нуля в УПТ

Дрейф нуля носит случайный характер и не зависит от времени и температуры. От дрейфа нуля избавиться нельзя, даже, поместив усилитель в холодильник или термостат.

## 18. Дифференциальный усилитель

Идея нейтрализации дрейфа нуля заключается в использовании двух совершенно одинаковых усилителей, которые содержат

Кируүгө терс чыналуу берилгенде («1» кыскачкы «минус»), VT1 транзистордун база тогу (жана коллектор тогу) азайышат, коллектордо чыналуу жогорулайт. Бул учурда вольтметрдин жебеси онго кыйшат.

Ошентип, чыгуу чыналуу кирүү чыналуунун өзгөрүшүнө карама каршы фазада өзгөрөт.

Мындай күчөткүч турактуу ток күчөткүчү деп аталганы менен, ал бир гана турактуу чыналуу сигналдарды эле күчөтөт деп эсептелбейт. Турактуу ток күчөткүчү каалаган сигналдарды күчөтө алат: схемада жыштыкка көз каранды элементтер (конденсаторлор) болбогондуктан төмөнкү жыштык сигналдар жана жогорку жыштык сигналдар бирдей жакшы күчөттүрүлөт.

Турактуу ток күчөткүчүнүн амплитуда-жыштык мүнөздөмөсү түз сызыктуу, идеалдык күчөткүчтүн мүнөздөмөсүнө окшош (сүр. 31).

Турактуу ток күчөткүчүнүн чоң кемчилиги бар – бул анын күчөтүү коэффициенттин стабилсиздиги – «*нөлдүн дрейфы*». Кируу чыналуу турактуу болгондо да, чыгуудагы вольтметрдин жебеси тынч абалда турбайт.

Анын себеби төмөнкүдөй, турактуу ток күчөткүчүнүн күчөтүү коэффициенти, эч качан турактуу мааниде турбайт. Убакыт агышы менен күчөтүү коэффициент үзгүлтүксүз жана иретсиз кандайдыр орточо мааниге салыштырмалуу өзгөрүп жатат. Бул температура, азыктандыруу чыналуу өзгөрүштөрү жана башка сырткы шарттар өзгөрүшү менен байланышкан.

32 сүрөттө турактуу ток күчөткүчүнүн чыгыш чыналуусунун 5 саат ичиндеги өзгөрүшү көрсөтүлгөн.

Нөлдүн дрейфы убакыттан, температурадан көз карандысыз, кокустук мүнөзгө ээ. Күчөткүчтү муздаткычка же термостатка жайгаштырганда да дрейфтен кутулуп болбойт.

## 18. Дифференциалдык күчөткүч

Нөлдүн дрейфин нейтрализациялоо үчүн төмөнкү идея алынган: мында, эки идеалдуу бири бирине окшош күчөткүчтөрдү колдонуу. Ал үчүн эки бирдей транзисторлор керек.

Андай транзисторлор болуп бир убакытта, бирдей абалда жасалган транзисторлор эсептелет. Эрежедей, бирдей транзисторлорду бир жарым өткөргүч кристаллында өстүрүлгөн транзисторлор арасынан тандап алышат.

Билесинер, океандарда суткасына эки жолу прилив-отлив кубулуштары пайда болот. Аларды суу жанында жашаган кишилер байкайт.

Бирок, кемеде кеткен пассажирлар аны сезбейт. Суу көтөрүлүшү менен бирге кеме көтөрүлөт, ошондуктан суу деңгээлинин өзгөрүшү

совершенно одинаковые транзисторы. Такими транзисторами могут быть транзисторы, изготовленные в одинаковых условиях и в одно и то же время. Как правило, одинаковые транзисторы выбирают среди транзисторов, выращенных на одном кристалле полупроводника.

Известно, что в океане периодически, дважды в сутки, происходят приливы и отливы. Их замечают люди, живущие на берегу океана.

А вот пассажиры, плывущие на корабле, не замечают приливов и отливов. Дело в том, что одновременно с подъёмом уровня воды в океане вместе с водой поднимается и корабль. На берегу это заметно, потому что земля остаётся неподвижной.

На рисунке 33 показаны два симметрично расположенных усилителя постоянного тока, у которых всё одинаково, а транзисторы – близнецы, типа «Асан-Усөн». Считается, что одинаковые транзисторы «дрейфуют» одинаково, и потенциалы в симметричных точках двух одинаковых усилителей в каждый момент времени совпадают.

Выходное напряжение дифференциального усилителя равно разности потенциалов коллекторов двух транзисторов:

$$U_{ВЫХ} = U_{K1} - U_{K2}$$

Отсюда и название усилителя – «дифференциальный усилитель», от слова дифференцировать – различать, отделять, выделять.

Совершенно очевидно, что если потенциалы на входах и выходах усилителя уравновешены, то вольтметр, включённый в качестве нагрузки, показывает ноль (стрелка посередине).

Пока на входах напряжения нет ( $U_{ВХ1} = 0$  и  $U_{ВХ2} = 0$  - входы закорочены), выходное напряжение также равно нулю, так как транзисторы «дрейфуют» одинаково.

Возможны три способа подачи входного напряжения:

1) Входное напряжение подается только на вход 1, а вход 2 при этом закорочен, то есть  $U_{ВХ2} = 0$ .

При увеличении напряжения на входе 1 возрастает базовый ток, а также управляемый им коллекторный ток первого транзистора ( $VT1$ ), напряжение на его коллекторе уменьшается, то есть выходное напряжение уменьшается, стрелка вольтметра отклоняется влево.

2) Входное напряжение подается только на вход 2, а вход 1 при этом закорочен, то есть  $U_{ВХ1} = 0$ .

При увеличении напряжения на входе 2 напряжение на коллекторе транзистора  $VT2$  уменьшается, это означает, что выходное напряжение усилителя возрастает (стрелка вольтметра отклоняется вправо).

3) Входное напряжение подаётся на вход 3, то есть, непосредственно между базами транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ .



билинбейт. Жер кыймылсыз болгондуктан жерде жашагандарга океан денгээлинин өзгөрүшү көрүнүп турат.

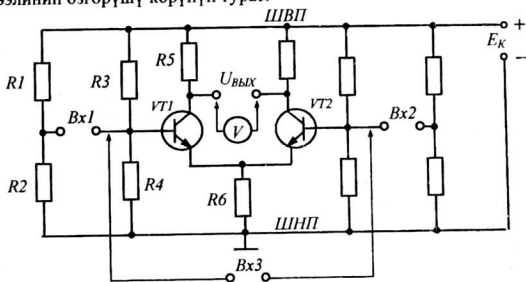


Рис. 33. Дифференциальный усилитель постоянного тока

33 сүрөттөгү эки симметриялуу жайгашкан турактуу ток күчөткүчү көрсөтүлгөн. Алардын бары жогу бирдей, транзисторлор эсе, «Асан-Үсөн» эгиздердей. Бирдей транзисторлор бирдей дрейфке учурайт деп эсептелет, ошондуктан эки бирдей күчөткүчтүн симметриялуу чекиттеринин потенциалдары дал келишет.

Дифференциалдык күчөткүчтүн чыгуу чыңалуусу эки транзистордун коллекторлор потенциалдарынын айырмасына барабар.

$$U_{ВЫХ} = U_{K1} - U_{K2}$$

«Дифференциялоо» сөзү ажыратуу, салыштыруу мааниге ээ болгондуктан мындай күчөткүчтүн аты – «дифференциалдык күчөткүч».

Эгер кирүүлөрдө жана чыгууларда потенциалдар тендештирилген болсо, анда вольтметрдин жебеси сөзсүз шкаланын ортосунда жайганышы керек.

Кирүүлөрдө чыңалуу болбогондо ( $U_{Bx1} = 0$  и  $U_{Bx2} = 0$  - кирүүлөр кыска туташтырылган), транзисторлор бирдей дрейфде болуп, чыгыш чыңалуу да нөлгө барабар болот.

Кирүү чыңалууну күчөткүчкө үч ыкма менен берсе болот:

1) Кирүү чыңалуу биринчи кирүүгө гана берилет, экинчи кирүү кыскачтары кыска туташтырылган, б.а.,  $U_{Bx2} = 0$ .

Биринчи кирүүдөгү чыңалуу жогоруланганда биринчи транзистордун база тогу, жана анын менен башкарылган коллектор тогу өсөт.  $VT1$  транзистордун коллектордук чыңалуусу төмөндөйт, б.а. чыгыш чыңалуу төмөндөйт жана вольтметрдин жебеси солго кыйшаят.

Если входное напряжение возрастает, потенциал базы первого транзистора повышается, а потенциал базы второго транзистора понижается. При этом напряжение на коллекторе первого транзистора понижается, а на коллекторе второго – повышается.

Стрелка вольтметра отклоняется влево, то есть выходное напряжение уменьшается.

Третий способ включения выгодно отличается тем, что отпадает необходимость в двух делителях напряжения  $R1R2$  и  $R10R11$ . При этом коэффициент усиления вдвое больше, чем в первых двух вариантах подачи входного напряжения, так как одновременно и в противофазе работают оба транзистора.

Обратите внимание, что независимо от состояний транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  через резистор  $R6$  непрерывно протекает один и тот же постоянный ток, так как при увеличении коллекторного тока транзистора  $VT1$  одновременно на такую же величину уменьшается коллекторный ток транзистора  $VT2$ .

Это означает, что на резисторе  $R6$  не возникает переменного напряжения отрицательной обратной связи, то есть, нет необходимости в шунтирующем конденсаторе  $C3$ .

## 19. Операционный усилитель

Операционные усилители на базе дифференциальных усилителей первоначально создавались для выполнения математических операций в аналоговых электронно-вычислительных машинах, где в функциях  $y = f(x)$  в качестве переменной величины выбрано электрическое напряжение  $u$ , то есть,  $y = f(u)$ . Это - операции сложения, вычитания, умножения, деления, интегрирования, дифференцирования и так далее.

Операционные усилители выпускаются в виде интегральных микросхем. При этом их принципиальная схема уже не представляет интереса, то есть, с операционным усилителем можно обращаться как с отдельной монтажной единицей, и достаточно знать лишь его общие свойства и параметры.

На рисунке 34 показано условное обозначение операционного усилителя. Он имеет два входа и один выход.

Один вход (он обозначен колечком) называется *инвертирующим входом*. Дело в том, что при подаче сигнала на этот вход выходное напряжение усилителя изменяется в противофазе с входным напряжением.

Другой вход называется *прямым входом*, то есть, при подаче сигнала на прямой вход, выходное напряжение совпадает по фазе с

2) Кируу чыңалуу дифференциалдык күчөткүчтүн экинчи кирүүсүнө гана берилет, биринчи кирүүдүн кыскачтары кыска туташтырылган, б.а.  $U_{BX1} = 0$ .

Экинчи кирүүгө берилген чыңалуу жогорулаганда  $VT2$  транзистордун коллектордук чыңалуусу төмөндөйт, б.а. чыгыш чыңалуу жогорулайт жана вольтметрдин жебеси онго кыйшаят.

3) Кириш чыңалуу дифференциалды күчөткүчтүн үчүнчү киришине берилет, кыскача,  $VT1$  жана  $VT2$  транзисторлордун базаларынын аралыгына берилет.

Эгерде кирүү чыңалуу жогоруласа, анда  $VT1$  транзистордун базасынын потенциалы жогорулайт жана  $VT2$  транзистордун базасынын потенциалы төмөндөйт. Ошол учурда биринчи транзистордун коллекторунун потенциалы төмөндөйт, экинчи транзистордун коллекторунда – жогорулайт. Вольтметрдин жебеси солго кыйшаят - чыгуу чыңалуу төмөндөйт.

Үчүнчү ыкмада чыңалуу бөлгүчтары  $R1R2$  жана  $R1OR11$  керек эмес болуп калат.

Биринчи эки вариантка салыштырганда үчүнчү ыкмада күчөтүү коэффициенти эки эсе чоң. Анын себеби: эки транзистор бир учурда карама каршы фазада иштеп жатышат.

Көңүл бургула,  $VT1$  жана  $VT2$  транзисторлордун абалдарынан көз карандысыз  $R6$  резистор аркылуу үзгүлтүксүз турактуу ток агып жатат. Бир транзистордун тогу азайганда экинчи транзистордун тогу ошончого эле өсөт.

$R6$  резистор аркылуу турактуу ток эле аккандыктан өзгөрүлмө чыңалуу пайда болбойт, ошондуктан күчөткүчтө терс тескери байланыш пайда болбойт. Ошондуктан схемада  $C3$  шунттоочу конденсаторунун кереги жок.

## 19. Операциондук күчөткүч

Биринчи убакытта дифференциалдык күчөткүчтөр негизинде түзүлгөн операциондук күчөткүчтөр аналог электрондук-эсептөө машиналарда математикалык операцияларды аткарууга арналган. Мындай эсептөө машиналарда математикалык  $y = f(x)$  функцияларда көз карандысыз  $x$  өзгөрмө чоңдук ордуна  $u$  электр чыңалуу колдонулат, кыскача,  $y = f(u)$ . Бул – кошуу, кемитүү, көбөйтүү, бөлүү, интегралдоо, дифференциалдоо жана башка математикалык операциялар.

Операциондук күчөткүчтөр интегралдык микросхема түрүндө чыгарылат. Мында, операциондук күчөткүчтүн түзүлүшү жана анын схемасы менен кызыкпаса да болот, аны бөлөк монтаждык бирдик деп

входным напряжением. Причём входы операционного усилителя можно использовать отдельно или совместно.

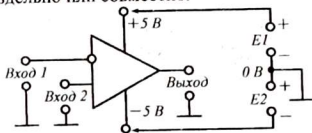


Рис. 34. Обозначение операционного усилителя

Для того, чтобы исключить применение делителей напряжения на входах и выходах, питание операционного усилителя осуществляется от двухполярного источника питания. Для этого два одинаковых источника постоянного тока (например,  $E1 = 5 В$  и  $E2 = 5 В$ ) подключаются к соответствующим внешним выводам операционного усилителя, как это показано на рисунке 34.

Средняя точка соединяется с массой и имеет нулевой потенциал. При этом усилитель может одинаково работать как с положительными, так и отрицательными входными напряжениями.

В дальнейшем, рассматривая схемы на операционных усилителях, мы не будем указывать цепи питания.

**Операционный усилитель** - электронный усилитель с двумя входами, выходное напряжение которого равно разности входных напряжений, умноженной на константу (коэффициент усиления):

$$U_{ВЫХ} = (U_{ВХ1} - U_{ВХ2}) \cdot K_{усил}$$

По своим параметрам и характеристикам операционный усилитель приближается к идеальному усилителю, это:

1. Высокий коэффициент усиления  $K_U = 10^5 \dots 10^6$ . При этом входное напряжение измеряется микровольтами, а выходное - вольтами.
2. Широкая полоса пропускания: от постоянного тока ( $\omega = 0$ ) до бесконечности ( $\omega = \infty$ ). Это означает отсутствие искажений и сдвига фаз.
3. Бесконечно большое входное сопротивление  $R_{ВХ} = 10^6 \dots 10^8$  Ом. Другими словами, входной ток операционного усилителя равен нулю.
4. Очень низкое, практически нулевое, выходное сопротивление  $R_{ВЫХ} = 10 \dots 100$  Ом. При этом всё выходное напряжение усилителя прикладывается к сопротивлению его нагрузки (высокий КИД усилителя).

эсептесе болот, анын жалпы касиеттерин жана параметрлерин билген эле жетиштүү.

34 сүрөттө операцияондук күчөткүчтүн шарттык белгиленishi көрсөтүлгөн. Анын эки кирүүсү жана бир чыгуусу бар.

Биринчи кирүү (ал шакек менен белгиленген) **инверсиялоочу кирүү** деп аталат. Себеби: бул кирүүгө сигнал берилгенде, күчөтүрүлгөн чыгуу чыңалуу тескери фазада өзгөрөт. Кирүү чыңалуу жогорулаганда чыгуу чыңалуу – төмөндөйт.

Экинчи кирүү **түз кирүү** деп аталат, түз кирүүгө сигнал берилгенде, чыгуу чыңалуу фаза боюнча кирүү чыңалуу менен бир фазада өзгөрөт. Операцияондук күчөткүчтүн кирүүлөрүн өзүнчө же бирге колдонсо болот.

Күчөткүчтүн кирүүлөрдө жана чыгууларда чыңалуу бөлгүчтөрдү колдонбос үчүн операцияондук күчөткүчтүн азыктандыруусу эки уюлдук электр азыктандыруу булактан аткарылат.

Ал үчүн бирдей эки турактуу ток булактары (маселен,  $E1 = 5B$  жана  $E2 = 5B$ ) операцияондук күчөткүчтүн тиешелүү сырткы чыгууларына, 34-сүрөттө көрсөтүлгөндөй, туташтырылат. Орточо чекит масса менен туташтырылат жана анын потенциалы нөлгө барабар.

Мындай шартта күчөткүч оң жана терс кирүү чыңалуулар менен бирдей иштей алат.

Кезекте, операцияондук күчөткүчтөрдүн схемаларына караганда, күчөткүчтүн азыктандыруу чынжырларын эске албасак болот.

**Операцияондук күчөткүч** – бул эки кирүүгө ээ болгон электрондук күчөткүч, анын чыгуу чыңалуусу эки кириштеги чыңалуулардын айырмасынын константага (күчөтүү коэффициентке) көбөйтүүсүнө барабар.

$$U_{B\Delta X} = (U_{B\Delta X1} - U_{B\Delta X2}) \cdot K_{усил}$$

Өзүнүн параметрлери жана мүнөздөмөлөрү боюнча операцияондук күчөткүч идеалдуу күчөткүчкө жакын, бул:

1. Бийик күчөтүү коэффициенти  $K_U = 10^5 \dots 10^6$ . Мында кирүү чыңалуу микровольттор менен өлчөлөт, чыгуу чыңалуу - вольттор менен.

2. Кең өткөрүү тилкеси: турактуу токтон баштап ( $\omega = 0$ ), чексизге чейин ( $\omega = \infty$ ). Бул учурда күчөтүлгөн сигналдын бузулуштары жана фаза жылышы жок.

3. Чексиз чоң кирүү каршылыгы:  $R_{B\Delta X} = 10^6 \dots 10^8 \text{ Ом}$ . Башкача сөз менен айтканда, операцияондук күчөткүчтүн кирүү тогу нөлгө барабар.

5. Не боится перегрузок, то есть, допускается подача достаточно больших входных напряжений (единицы и десятки вольт).
6. Отсутствие дрейфа нуля и высокая точность выполнения операций.

Передаточная характеристика операционного усилителя (рис. 35, а) имеет три участка: 1-2, 2-3, 3-4. Усиление происходит в сравнительно узком интервале входных напряжений (милливольты и микровольты) на участке 2-3. На участке 0-3 происходит усиление положительных сигналов, а на участке 0-2 – отрицательных сигналов.

Участки 1-2 и 3-4 соответствуют режиму насыщения, когда выходное напряжение имеет только минимальное (-5 В) или только максимальное (+5 В) значение.

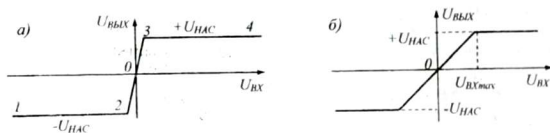


Рис. 35. Передаточная характеристика ОУ

Операционные усилители используются в качестве обычных усилителей путем введения отрицательной обратной связи. При этом коэффициент усиления усилителя уменьшается, а передаточная характеристика растягивается (рис. 35, б).

Чем меньше коэффициент усиления, тем меньше наклон передаточной характеристики.

На основе операционных усилителей можно построить усилитель или устройство, выполняющее математические операции. Среди таких устройств наибольшее применение находят интеграторы, дифференциаторы и компараторы.

## 20. Математическая обработка электрических сигналов

### 20.1. Схема суммирования

С помощью операционного усилителя можно производить сложение напряжений по формуле:  $U_{\text{ВЫХ}} = aU_1 + bU_2 + \dots$

Входные напряжения ( $U_1, U_2, \dots$ ) через соответствующие резисторы  $R_1, R_2, \dots$  подаются на инвертирующий вход операционного усилителя. На рисунке 36 приведена схема сложения двух напряжений.

Поскольку вход усилителя (точка А) является виртуальным нулем, то на основании 1-го закона Кирхгофа при нулевых входных токах идеального ОУ ( $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ ), то есть,  $i_3 = -(i_1 + i_2)$ . Используя

4. Абдан төмөн, практикалык, нөлгө жакын чыгуу каршылык:  $R_{ВЫХ} = 10...100 \text{ Ом}$  ( $R_{ВЫХ} \ll R_{ВХ}$ ). Мында күчөткүчтүн чыгуу чыңалуусу толук анын нагрузкасынын каршылыгына берилет (күчөткүчтүн ПАК жогоруу).

5. Перегрузкалардан коркпойт, күчөткүчтүн кириштерине жетишерлик чоң чыңалуу берсе болот (бир жана он чакты вольт).

6. Дрейфтин жоктугу жана аткарган операциялардын бийик тактыгы.

Операциондук күчөткүчтүн жеткирүү мүнөздөмөсү (сүр. 35, а) үч частоктон турат: 1-2, 2-3, 3-4.

Күчөтүү тар кирүү чыңалуулар (милливольтор жана микровольтор) интервалында 2-3 частогунда аткарылат.

0-3 бөлүгүндө он сигналдар күчөтүрүлөт, 0-2 бөлүгүндө -- терс сигналдар.

1-2 жана 3-4 бөлүктөр -- күчөткүчтүн каныгуу режимине дал келишет, мында күчөткүчтүн чыгуу чыңалуусу же минималдуу (-5 В) же максималдуу (+5 В) мааниге ээ.

Операциондук күчөткүчтөрдү кадимкидей күчөткүч ордуна колдонуу үчүн алар терс тескери байланыш менен камсыз кылынат. Бул учурда күчөткүчтүн күчөтүү коэффициенти төмөндөйт жана анын мүнөздөмөсү кеңеет. Күчөтүү коэффициенти канчалык төмөн болсо, ошончолук мүнөздөмөнүн жантагы (наклоны) аз болот.

Операциондук күчөткүч негизинде сигналдар үстүнөн математикалык операцияларды аткаруучу түзүлүштөрдү уюштурса болот. Андай түзүлүштөр ичинде эң кеңири колдонулгандар интеграторлор, дифференциаторлор жана компараторлор.

## 20. Электр сигналдарды математикалык кайра өзгөртүү

### 20.1. Кошуу схемасы

Операциондук күчөткүчтөр жардамы менен чыңалууларды төмөнкү формула боюнча кошсо болот:  $U_{ВЫХ} = aU_1 + bU_2 + \dots$

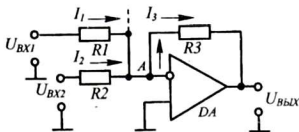


Рис. 36. Сумматор

закон Ома, получим следующее соотношение для выходного напряжения схемы:

$$\frac{U_{ВЫХ}}{R3} = -\left(\frac{U_{ВХ1}}{R1} + \frac{U_{ВХ2}}{R2}\right), \quad U_{ВЫХ} = -\left(\frac{R3}{R1} \cdot U_{ВХ1} + \frac{R3}{R2} \cdot U_{ВХ2}\right);$$

где  $\frac{R3}{R1} = a$ ,  $\frac{R3}{R2} = b$ .

## 20.2. Схема интегрирования

Наиболее важное значение для аналоговой вычислительной техники представляет применение операционных усилителей для реализации операций интегрирования и дифференцирования. На рисунке 37, а приведена схема, реализующая операцию интегрирования электрического сигнала.

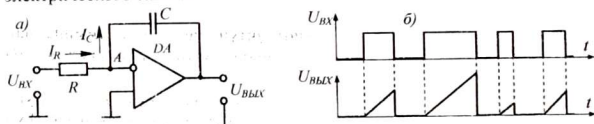


Рис. 37. Схема интегратора, интегрирование прямоугольных импульсов

Как правило, для этого используют инвертирующее включение операционного усилителя. Согласно первому закону Кирхгофа сумма токов через узел (точка А) равна нулю, то есть,  $I_R + I_C + I_{ВХ} = 0$ .

Учитывая, что  $I_{ВХ} \approx 0$ , получим:  $I_R + I_C = 0$ , то есть,  $I_R = -I_C$ . Направления этих токов показаны на рисунке 37.

И так как потенциал точки А равен нулю, выходное напряжение интегратора фактически равно напряжению на конденсаторе:

$$U_{ВЫХ}(t) = U_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I_C(t) dt$$

Учитывая, что  $I_C = -I_R = -\frac{U_{ВХ}}{R}$ , получим, что выходное напряжение схемы пропорционально интегралу от входного напряжения:

$$U_{ВЫХ}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t \left(-\frac{U_{ВХ}(t)}{R}\right) dt = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{ВХ}(t) dt$$

Если подобрать величины R и C так, чтобы  $RC = 1$ , то выходное напряжение интегратора:

$$U_{ВЫХ}(t) = -\int_0^t U_{ВХ}(t) dt$$



Кошулуучу кирүү чыналуулар ( $U_1, U_2, \dots$ ) тиешелүү  $R_1, R_2, \dots$  резисторлор аркылуу операциондук күчөткүчтүн инверсиялоочу кирүүнө берилишет.

36-сүрөттө эки чыналууу кошуучу схемасы келтирилген.

Күчөткүчтүн кирүүсү (чекит А) виртуалдык нөл деп саналгандыктан, Кирхгофтун биринчи закону боюнча (идеалдуу операциондук күчөткүчтүн кирүү тогу жок) А түйүнү үчүн  $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ , башкача айтканда  $i_3 = -(i_1 + i_2)$ . Анын негизинде төмөнкү чыгуу чыналуу үчүн Омдун закону боюнча төмөнкү теңдемени жазса болот:

$$\frac{U_{ВЫХ}}{R_3} = -\left(\frac{U_{ВХ1}}{R_1} + \frac{U_{ВХ2}}{R_2}\right), \quad U_{ВЫХ} = -\left(\frac{R_3}{R_1} \cdot U_{ВХ1} + \frac{R_3}{R_2} \cdot U_{ВХ2}\right);$$

$$\text{бул жерде } \frac{R_3}{R_1} = a, \quad \frac{R_3}{R_2} = b.$$

## 20.2. Интегралдоо схемасы

Аналог эсептөө техника үчүн операциондук күчөткүчтөрдү электр сигналдарды интегралдоо жана дифференциалдоо үчүн колдонуу чоң мааниге ээ. 37, а - сүрөттө электр сигналды интегралдоо операциясын аткаруучунун схемасы берилген.

Эрежедей, анын үчүн операциондук күчөткүчтүн инверсиялоочу кирүүсү колдонулат.

Кирхгофтун биринчи закону боюнча түйүн аркылуу (чекит А) аккан токтордун суммасы нөлгө барабар, башкача айтканда

$$I_R + I_C + I_{ВХ} = 0.$$

$I_{ВХ} \approx 0$  эске алып, теңдемени мындай жазса болот:  $I_R + I_C = 0$ , башкача айтканда,  $I_R = -I_C$ . Бул токтордун багыттары 36-сүрөттө көрсөтүлгөн.

А чекитинин потенциалы нөлгө барабар болгондугун эске алганда, интегратордун чыгуу чыналуусу факт боюнча конденсатордогу чыналууга барабар:

$$U_{ВЫХ}(t) = U_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I_C(t) dt$$

$I_C = -I_R = -\frac{U_{ВХ}}{R}$  эсепке алып, чыгуу чыналуу кирүү чыналуунун интегралына пропорционалдуу деп тапса болот:

$$U_{ВЫХ}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t \left(-\frac{U_{ВХ}(t)}{R}\right) dt = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{ВХ}(t) dt$$

Эгер  $R$  жана  $C$  чоңдуктарын тиешелүү мааниден алып,  $RC = 1$  болуп уюштурулса, анда интегратордун чыгуу чыналуусу:

На рисунке 37, б представлена работа интегратора с прямоугольными входными импульсами. При этом высота выходных импульсов пропорциональна площади импульсов, то есть, длительности импульсов.

### 20.3. Схема дифференцирования

Поменяв местами резистор  $R$  и конденсатор  $C$  в схеме интегратора, получим схему дифференциатора (рис. 38).

Применение первого закона Кирхгофа  $I_C + I_R = 0$  для инвертирующего входа ОУ (узел  $A$ ) в этом случае дает следующее соотношение:  $C \frac{dU_{ВХ}}{dt} + \frac{U_{ВЫХ}}{R} = 0$ , или  $U_{ВЫХ} = -RC \frac{dU_{ВХ}}{dt}$ .

При условии  $RC = 1$  получим:  $U_{ВЫХ} = -\frac{dU_{ВХ}}{dt}$ . Отсюда видно, что выходное напряжение дифференциатора равно первой производной входного сигнала.

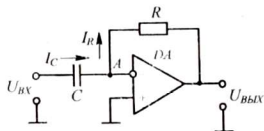


Рис. 38. Дифференциатор

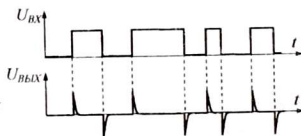


Рис. 39. Дифференцирование сигналов

На рисунке 39 представлен процесс дифференцирования прямоугольных импульсов. Обратите внимание, что первая производная положительна, когда функция возрастает и отрицательна, когда функция убывает, и равна нулю, когда функция постоянна.

## 21. Компараторы

Компаратор - это сравнивающее устройство. Компаратор предназначен для сравнения двух непрерывно изменяющихся сигналов.

Входные сигналы компаратора - это анализируемый сигнал  $U_{ВХ}$  и опорный сигнал  $U_{ОП}$  - сигнал сравнения, а выходной сигнал  $U_{ВЫХ}$  - дискретный (логический) сигнал, (или «1» или «0») содержащий 1 бит информации. Ниже показан механизм формирования выходного сигнала:

$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} U_{ВЫХ}^1 & \text{при } U_{ВХ} - U_{ОП} > 0 \\ U_{ВЫХ}^0 & \text{при } U_{ВХ} - U_{ОП} \leq 0 \end{cases} \quad \text{где } U_{ВЫХ}^0 = 0\text{В}, U_{ВЫХ}^1 = +5\text{В} :$$

$$U_{ВЫХ}(t) = - \int_0^t U_{ВХ}(t) dt$$

37, б - сүрөттө интегратордун тик бурчтук кирүү импульстары менен иштөөсү көрсөтүлгөн. Мында, чыгуу импульстардын бийиктиги кирүү импульстардын аянтына, кыскача, импульстардын узундугуна пропорционалдуу.

### 20.3. Дифференциалдоо схемасы

Дифференциялоо схемасын алуу үчүн интегратордун схемасындагы  $R$  резистору менен  $C$  конденсатордун ордун алмаштыруу жетиштүү (сүр. 38).

Операциондук күчөткүчтүн инверсиялоочу кирүүсү үчүн ( $A$  түйүнү) Кирхгофтун биринчи закону боюнча  $I_C + I_R = 0$  эске алынганда төмөнкү туюнтма пайда болот:

$$C \frac{dU_{ВХ}}{dt} + \frac{U_{ВЫХ}}{R} = 0, \text{ же } U_{ВЫХ} = -RC \frac{dU_{ВХ}}{dt}.$$

$RC = 1$  шарт аткарылганда чыгуу чыңалуу

$$U_{ВЫХ} = - \frac{dU_{ВХ}}{dt}$$

Бул жерден көрүнүп тургандай: чыгуу чыңалуу кирүү чыңалуунун биринчи туундусуна барабар.

39-сүрөттө тик бурчтук импульстарды дифференциялоо процесси көрсөтүлгөн.

Көнүл бургула: туунду он, кирүү чыңалуу жогорулогондо, жана туунду терс – кирүү чыңалуу төмөндөгөндө, жана туунду нөлгө барабар, эгер кирүү чыңалуу турактуу болсо.

## 21. Компараторлор

Компаратор – бул салыштыруучу түзүлүш. Компаратор эки үзгүлтүксүз өзгөрүп жаткан сигналдарды салыштырууга арналган.

Компаратордун кирүү сигналдары – бул анализдөлүүчү сигнал  $U_{ВХ}$  жана таяныч сигнал  $U_{ОП}$  - салыштыруу сигналы, чыгуу чыңалуу  $U_{ВЫХ}$  дискреттуу (логикалык) сигнал (же «1» же «0»). Чыгуу сигнал бир бит информацияга ээ. Төмөндө чыгуу сигнал калыптандыруу механизми көрсөтүлгөн:

$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} U_{ВЫХ}^1 \text{ эгер } U_{ВХ} - U_{ОП} > 0 \\ U_{ВЫХ}^0 \text{ эгер } U_{ВХ} - U_{ОП} \leq 0 \end{cases} \text{ бул жерде } U_{ВЫХ}^0 = 0 \text{ В, } U_{ВЫХ}^1 = +5 \text{ В}$$

40 сүрөттө компаратордун кирүү жана чыгуу сигналдарынын диаграммалары көрсөтүлгөн.

На рисунке 40 показаны диаграммы входных и выходных сигналов компаратора.

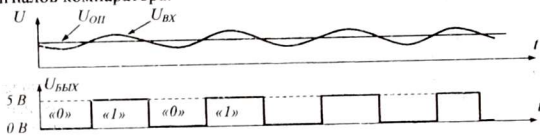


Рис. 40. Работа компаратора

Простейшим компаратором является дифференциальный усилитель с большим коэффициентом усиления, то есть, построенный на основе операционного усилителя.

Хотя в качестве компаратора можно использовать обычный операционный усилитель, выпускаются специальные интегральные схемы, предназначенные для использования в качестве компараторов.

Компараторы играют важную роль при сопряжении аналоговых (линейных) входных сигналов с миром цифровой техники.

Компаратор - это элемент перехода от аналоговых сигналов к цифровым сигналам, поэтому его иногда называют однобитным аналого-цифровым преобразователем. Компаратор можно применить, например, чтобы отслеживать степень разряда аккумулятора по мере его работы. Схема простого сигнализатора представлена на рисунке 41.

С помощью стабилитрона  $VD1$  устанавливается опорное напряжение  $U_{оп}$ , которое всегда постоянно, а напряжение аккумулятора контролируется через делитель напряжения  $R1R2$ .

С помощью переменного резистора  $R2$  входное напряжение  $U_{вх}$  устанавливается на 10-15% больше, чем опорное напряжение. Работа сигнализатора показана на рисунке 42.

В исходном состоянии  $U_{вх} > U_{оп}$ , при этом выходное напряжение операционного усилителя равно нулю ( $U_{вых} = 0$ ). По мере разряда аккумулятора напряжение на его зажимах постепенно снижается и в некоторый момент времени входное напряжение  $U_{вх}$  станет ниже опорного напряжения,  $U_{вх} < U_{оп}$ .

Тогда выходное напряжение компаратора станет равно «1», то есть,  $U_{вых} = E_K = 5\text{ В}$ . При этом загорится светодиод  $VD2$ , сигнализируя, что пора поставить аккумулятор на зарядку.

Жөнөкөй компаратор – бул операциондук күчөткүч негизинде түзүлгөн чоң күчөтүү коэффициентке ээ болгон дифференциалдык күчөткүч. Каалаган дифференциалдык күчөткүчтү компаратор ордуна пайдалануу оной болсо да, бирок компараторлорду колдонуу үчүн атайын интегралдык схемалар чыгарылат.

Компараторлор аналог (сызыктуу) кирүү сигналдарды сандык (цифралык) түзүлүштөр менен байланыштырууда чоң мааниге ээ.

Компаратор – аналог сигналдардан цифралык сигналдарга которуучу элемент, кээ учурда аны бир биттик аналог-цифралык кайра өзгөрткүч деп айтышат.

Компараторду, мисалы, аккумулятордун заряддалган деңгээлин көзөмөлдөө үчүн колдонсо болот. Андай жөнөкөй сигнализатордун схемасы 41 сүрөттө көрсөтүлгөн.

$VD1$  стабилитрондун жардамы менен таянгыч  $U_{ОП}$  чыңалуу уюштурулат. Бул чыңалуу үзгүлтүксүз турактуу деңгээлде сакталат. Аккумулятордун чыңалуусун таянгыч чыңалуу менен салыштыруу үчүн аккумулятордун чыңалуусу  $R1/R2$  чыңалуу бөлгүчү аркылуу көзөмөлдөнөт.  $R2$  өзгөрүлмө резистор жардамы менен таянгыч чыңалуудан 10-15% ке бийик кирүү  $U_{ВХ}$  чыңалуу уюштурулат. Сигнализатордун иштөөсү 42 сүрөттө көрсөтүлгөн.

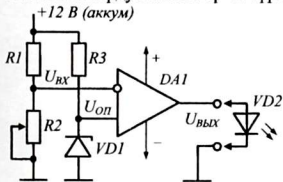


Рис. 41. Компаратор на ОУ

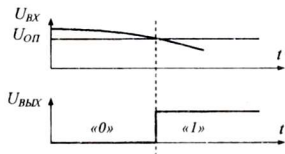


Рис. 42. Работа сигнализатора заряда аккумулятора

Башталгыч абалда кирүү чыңалуу таянгыч чыңалуудан чоң  $U_{ВХ} > U_{ОП}$ , мында операциондук күчөткүчтүн чыгуу чыңалуусу нөлгө барабар ( $U_{ВЫХ} = 0$ ).

Аккумулятор разряддануусу менен бирге анын кыпчыгычтарындагы чыңалуу акырын төмөндөп барат жана кандайдыр убакыттын ичинде компаратордун  $U_{ВХ}$  кирүү чыңалуусу таянгыч чыңалуудан төмөн болуп калат,  $U_{ВХ} < U_{ОП}$ .

Анда компаратордун чыгуу чыңалуусу «1» ге барабар болуп калат, б. а.  $U_{ВЫХ} = E_K = 5 В$ . Мындан светодиод (жарык диод)  $VD2$  жанып, аккумуляторду зарядкага коюуга сигнал берет.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гершензон Е.М., Полянина С.Д. Радиотехника. Учеб. пособие для педвузов. – М.: Просвещение, 1986.
2. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1985.
3. Молчанов А.М., Занадворов П.Н. Курс электротехники и радиотехники. – М.: Высшая школа, 1976.
4. Харченко В.М. Основы электроники. – М.: Энергоиздат, 1982.
5. Основы промышленной электроники / под ред. В.Г.Герасимова. – М.: Высшая школа, 1986.
6. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники. М.: 1986.
7. Халиуллин Р.Н. Лабораторный практикум по радиотехнике и радиоэлектронике. – Ош: 2008.

---

В подготовке и редактировании пособия приняли участие члены кафедры общей физики и методики преподавания физики: Жуманова М., Уметалиева Д., Омаралиева З., Сыдыкова Ш., а также студенты 4-курса Ажимамат к. и Газмагамаева Т.

Спасибо вам, Халиуллин Р.

## Содержание / Мазмун

ВВЕДЕНИЕ / КИРИШУУ .....	3
1. Как читать радиотехнические схемы? <i>Радиотехникалык схемаларды кантип окуу керек?</i> .....	5
2. Эквивалентные схемы. <i>Эквиваленттүү схемалар</i> .....	9
3. Четырехполюсники. <i>Төрт уюлдуктар</i> .....	13
4. Принцип усиления. <i>Күчөтүү принциби</i> .....	17
5. Транзистор – усилительный элемент. <i>Транзистор - күчөтүүчү элемент</i> .....	19
6. Схемы включения транзистора. <i>Транзисторду бириктирүү схемалары</i> .....	19
7. Эквивалентная схема транзистора <i>Транзистордун эквиваленттүү схемасы</i> .....	21
8. Режимы работы транзистора. <i>Транзистордун иштөө режимдери</i> .....	23
9. Классы усиления. <i>Күчөтүү класстары</i> .....	25
10. Установка режима работы транзистора. <i>Транзистордун иштөө режимин уюштуруу</i> .....	29
11. «Золотое правило» транзистора. <i>Транзистордун «алтын эрежеси»</i> .....	33
12. Простейший усилительный каскад. <i>Жөнөкөй күчөткүч каскады</i> .....	35
13. Усиление гармонического сигнала. <i>Гармоникалык сигналды күчөтүү</i> .....	41
14. Типовой усилительный каскад. <i>Типтүү күчөткүч каскады</i> .....	45
15. Характеристики усилителя. <i>Күчөткүчтүн мүнөздөмөлөрү</i> .....	55
16. Эмиттерный повторитель. <i>Эмиттердик кайталоочу</i> .....	57
17. Усилитель постоянного тока. <i>Турактуу ток күчөткүчү</i> .....	61
18. Дифференциальный усилитель. <i>Дифференциалдык күчөткүч</i> .....	63
19. Операционный усилитель. <i>Операциондук күчөткүч</i> .....	67
20. Математическая обработка электрических сигналов. <i>Электр сигналдарды математикалык кайра өзгөртүү</i> .....	71
21. Компараторы. <i>Компараторлор</i> .....	75
Рекомендуемая литература .....	78





964973