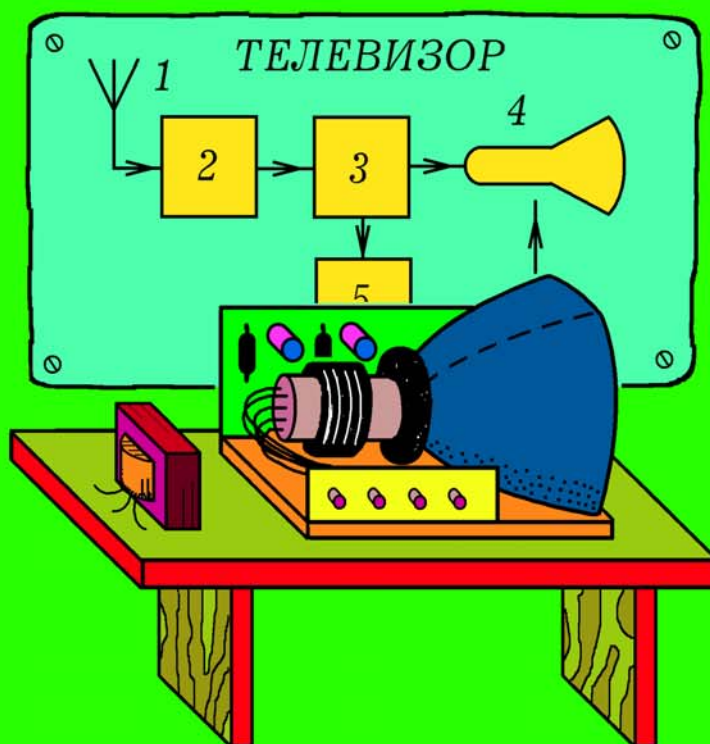


Майер Р.В.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ



курс лекций

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ГОУ ВПО "Глазовский государственный педагогический институт
имени В. Г. Короленко"

Майер Р.В.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Курс лекций

Глазов 2011

УДК 621.382

ББК 32.84

M14

Печатается по решению учебно–методического совета Глазовского государственного педагогического института имени В.Г.Короленко (протокол №1 от 13.05.2011). Рекомендовано к изданию кафедрой ”Автоматизированные системы управления” ГИЭИ ИжГТУ (протокол №2 от 24.03.2011).

Автор: Майер Роберт Валерьевич.

Рецензенты:

А. Г. Русских, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления Глазовского инженерно–экономического института (филиала) ГОУ ВПО ”Ижевский государственный технический университет”.

А. В. Проказов, кандидат физико–математических наук, доцент кафедры физики и дидактики физики ГОУ ВПО ”Глазовский государственный педагогический институт”.

Майер Р.В. Основы электроники. Курс лекций: Учебно–методическое пособие. — Глазов: ГГПИ, 2011. — 80 с.

В учебно–методическом пособии представлены лекции по электронике, читаемые автором в техническом вузе. В них рассмотрены основные элементы электронных цепей, принципы действия электронных устройств: усилителей, генераторов, фильтров, модуляторов. Изложены принципы радио– и телевизионной связи, проанализирована работа телевизионных и радиопередатчиков и приемников. Рассмотрены основы цифровой электроники, работа логических элементов, узлов ЭВМ, различных цифровых приборов. Предназначено для студентов и преподавателей технических вузов.

Посети Web–сайт
” Информационные технологии
и физическое образование”
<http://maier-rv.glazov.net>
<http://komp-model.narod.ru>

© Майер Р.В., 2011

Электроника — довольно обширная область знаний, поэтому изучение курса электроники требует от студентов систематического посещения лекций, выполнения лабораторных исследований, чтения достаточно объемных учебников. Если учесть, что понимание работы многих электронных устройств — объективно сложная задача, то становится понятным желание студентов иметь под рукой небольшое учебное пособие, в котором были бы подробно освещены наиболее важные вопросы по курсу электроники, выносимые на экзамен.

Настоящее учебно–методическое пособие включает в себя содержание лекций по электронике, читаемых автором в рамках курса "Электротехника и электроника" в Глазовском Инженерно–экономическом институте (филиал ИжГТУ). Изучение этой дисциплины занимает важное место в подготовке студентов технического вуза, так как знакомство с основными принципами работы электротехнических и электронных устройств, диодов, транзисторов, операционных усилителей, логических микросхем, а также устройств, собранных на их основе, имеет важное значение для инженерно–технических работников всех отраслей промышленности. На занятиях у студентов формируются знания о функционировании типовых электронных схем и их использовании на практике. Они изучают физическую сущность процессов, происходящих в электронных приборах, приобретают практические навыки работы с электронными устройствами, формируют у себя основы системного инженерного мышления и мировоззрения в области анализа и проектирования электронных устройств.

Содержание лекций по электронике соответствует учебной программе и стандарту, утвержденному Министерством образования и науки РФ. Пособие обсуждалось на кафедре "Автоматизированные системы управления" ГИЭИ ИжГТУ, было утверждено и рекомендовано к изданию (протокол №2 от 24.03.2011). На изучение электроники по специальностям 230102 — "Автоматизированные системы обработки информации и управления" и 151001 — "Технология машиностроения" отводится небольшое количество часов, поэтому автор ограничился рассмотрением наиболее важных вопросов. Студенты знакомятся с элементной базой (диоды, транзисторы, логические элементы), изучают функционирование часто используемых электронных устройств (усилителей, генераторов, модуляторов и т.д.), а также принципы работы сложных электронных приборов и систем (цифровой вольтметр, ЭВМ, системы теле– и радиосвязи). После изучения курса электроники студенты должны в общих чертах понимать способы решения широкого круга технических задач, связанных с формированием и преобразованием сигналов, передачей и хранением информации, управлением различными автоматическими системами.

Майер Р. В.

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

1.1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД. Полупроводник — матери

риал, удельное сопротивление ρ которого больше, чем у металла ($\rho_m = 10^{-6} - 10^{-4}$ Ом·см), но меньше, чем у изолятора ($\rho_d = 10^{11} - 10^{12}$ Ом·см): $\rho_m < \rho < \rho_d$. К полупроводникам относятся германий *Ge*, кремний *Si*, а также некоторые соединения *GaS*, *PbS*, *GaAs*, *Cu₂O*, *CuCl*, *Fe₂O₃* и т.д. При низкой температуре электроны образуют ковалентные связи, свободных электронов нет, сопротивление велико. С ростом температуры часть электронов отрываются от атомов и становятся свободными; при этом образуются **дырки** — вакантные места электронов. Дырки ведут себя как положительно заряженные частицы. Концентрация свободных носителей заряда увеличивается, сопротивление падает. Собственная проводимость полупроводников — **электронно-дырочная**.

Фоторезистор — полупроводниковый резистор, при освещении которого уменьшается его сопротивление. Действие фоторезистора объясняется внутренним фотоэффектом, то есть возникновением электронно-дырочных пар внутри полупроводника при его освещении. Для преобразования изменения температуры в изменение сопротивления используют **терморезистор** — полупроводниковый прибор, сопротивление которого при повышении температуры уменьшается.

В кристалле кремния *Si⁴* каждый атом связан с четырьмя соседними. Если в него ввести донорную примесь мышьяка *As⁵* или фосфора *P⁵* с пятью валентными электронами, то у каждого атома-донора один из электронов станет свободным. Получается **полупроводник n-типа**, у которого основные носители заряда — электроны (n — negative). При введении в чистый кристалл кремния акцепторной примеси индия *In³* или алюминия *Al³* с тремя валентными электронами у каждого атома-акцептора одна связь оказывается незаполненной, и в результате образуется дырка. Получается **полупроводник p-типа**, у которого основные носители заряда — дырки (p — positive).

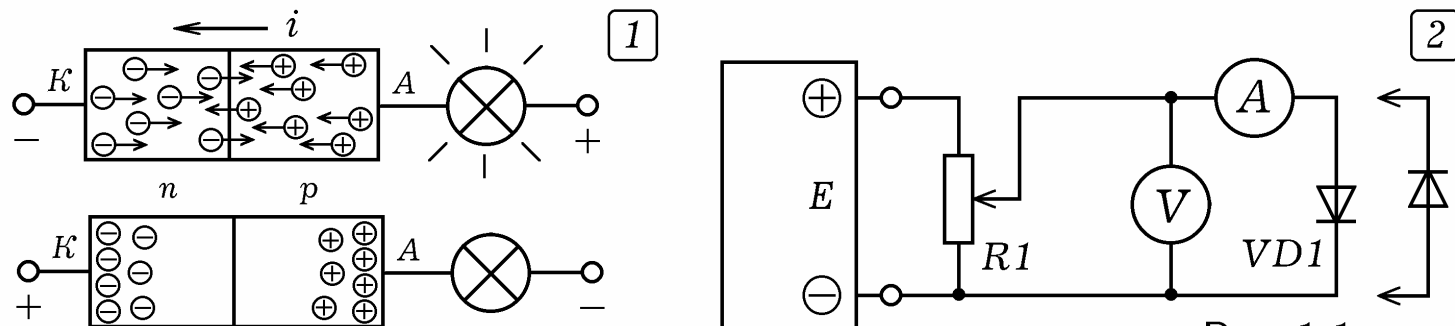


Рис. 1.1.

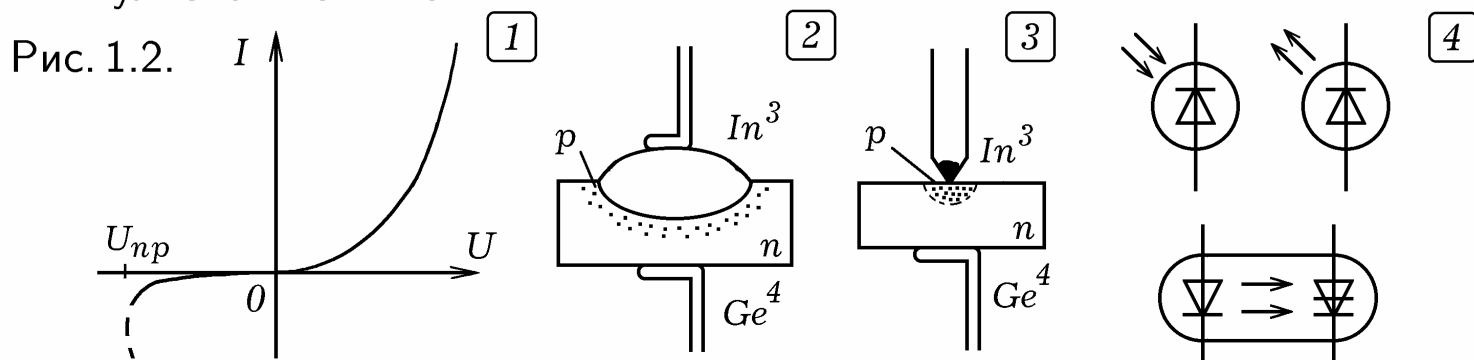
При контакте полупроводников p и n-типа образуется электронно-дырочный переход. Его основное свойство — односторонняя проводимость. При подключении области p (анода) к положительному полюсу источника (прямое включение) электроны и дырки проходят через p-n-переход, по цепи течет ток (рис. 1.1.1). При обратном включении, когда

на анод подается отрицательный потенциал, электроны и дырки удаляются от р–п–перехода, ширина запирающего слоя, обедненного основными носителями заряда, растет. Ток очень мал, обусловлен движением неосновных носителей заряда. При этом ток через р–п–переход равен:

$$I = I_s(e^{eU/kT} - 1),$$

где I_s — ток насыщения, зависящий от свойств р–п–перехода, U — приложенное напряжение, T — абсолютная температура в кельвинах.

Полупроводниковый диод — двухэлектродный электронный прибор с одним р–п–переходом, обладающий односторонней проводимостью. Существуют диоды Шотки, основанные на контакте металл–полупроводник. Чтобы снять вольт–амперную характеристику (ВАХ) диода, используют схему на рис. 1.1.2. Получающаяся ВАХ представлена на рис. 1.2.1. Видно, что в прямом направлении (при $U > 0$) ток достаточно велик, сопротивление диода мало. В обратном направлении (при $U < 0$) диод практически не проводит ток. Если обратное напряжение превысит предельное обратное напряжение $U_{пр}$, то произойдет тепловой пробой, диод выйдет из строя. Различают **плоскостные** и **точечные диоды** (рис. 1.2.2 и 3). Плоскостные диоды выдерживают большие токи и используются в выпрямителях. Их недостаток — высокая паразитная емкость, обусловленная большой площадью р–п–перехода. Точечные диоды рассчитаны на небольшие токи, имеют маленькую паразитную емкость, используются в импульсной технике.



Светодиод — это полупроводниковый прибор с одним р–п–переходом, в котором при протекании тока генерируется излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра. В результате рекомбинации электронов проводимости и дырок вблизи р–п–перехода возникает монохроматическое излучение, спектр которого зависит от свойств полупроводника и количества примесей. **Полупроводниковый инжекционный лазер** состоит из р–п–перехода и оптического резонатора из двух зеркал, в качестве которых используются отполированные грани кристалла полупроводника. При включении р–п–перехода в прямом направлении создается инверсная заселенность, приводящая к излучению света. Оптический резонатор позволяет получить свет с высокой монохроматичностью.

Фотодиод — полупроводниковый прибор с одним р–п–переходом, при освещении которого увеличивается его проводимость. Это обусловлено внутренним фотоэффектом: при поглощении света вблизи р–п–перехода образуются новые дырки и электроны. В **фотодиодном режиме** последовательно с фотодиодом включен источник постоянного напряжения так,

что на катод подается положительный потенциал (обратное включение). Освещение фотодиода вызывает уменьшение его сопротивления, обратный ток растет. В **фотогальваническом режиме** источник отсутствует, при освещении фотодиода на его выводах возникает фотоэдс, то есть он ведет себя как фотоэлемент. Свето- и фотодиод, заключенные в общий корпус, образуют **оптрон**. Он используется для гальванической развязки источника и приемника сигнала.

1.2. ВЫПРЯМИТЕЛИ. Для питания электронных приборов используются источники постоянного напряжения, состоящие из трансформатора, выпрямителя и фильтра. Трансформатор понижает или повышает сетевое напряжение, выпрямитель преобразует его в однополярное пульсирующее напряжение, а фильтр сглаживает пульсации.

Основным элементом выпрямителя является полупроводниковый диод. Он хорошо пропускает ток в прямом направлении (от анода к катоду) и практически не пропускает в обратном. При последовательном включении диода и нагрузки (рис. 1.3.1) по цепи течет пульсирующий ток (рис. 1.4.1), частота пульсаций равна частоте переменного напряжения $f = 50$ Гц. Так как ток через нагрузку течет в течение одного полу- периода, выпрямитель называется **однополупериодным**. На его выходе получается однополярное пульсирующее напряжение, частота пульсаций равна частоте напряжения питания $f = 50$ Гц. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения равна среднему значению за период:

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \frac{U_m}{R} \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{R\omega T} (\cos \frac{\omega T}{2} - \cos 0) = \frac{I_m}{\pi}, \quad U_0 = \frac{U_m}{\pi}.$$

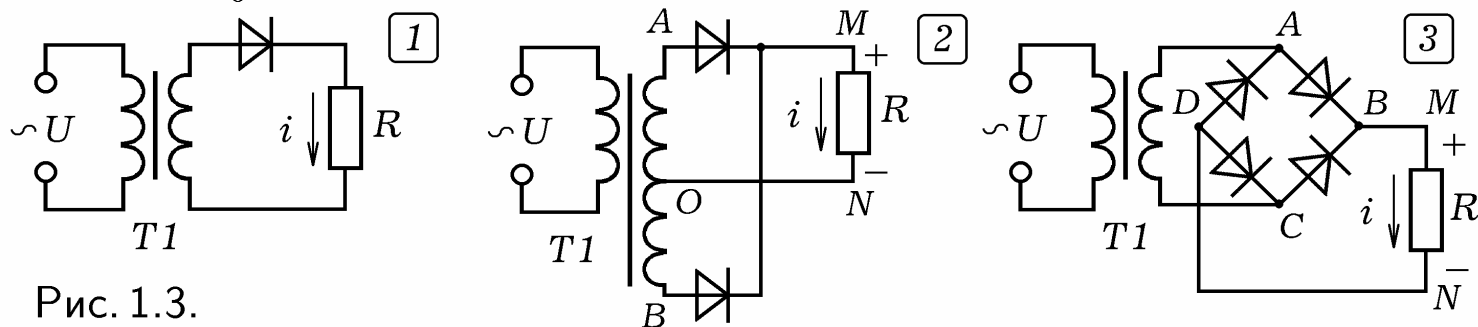


Рис. 1.3.

Наибольшее обратное напряжение, приложенное к диоду, равно U_m . На рис. 1.3.2 представлена схема выпрямителя с общей точкой, осуществляющей **двухполупериодное выпрямление**. Полпериода, когда $\varphi_A > \varphi_B$ ток течет по пути AMNO, а в следующие полпериода, когда $\varphi_A < \varphi_B$ ток течет по пути BMNO. В результате получаются импульсы напряжения с частотой $2f$ (рис. 1.4.2).

На рис. 1.3.3 изображена **мостовая схема выпрямления**. Во время четных полупериодов ($\varphi_A > \varphi_C$) ток течет по пути ABMNDС, а во время нечетных ($\varphi_A < \varphi_C$) — по пути CBMNDА. В обоих случаях ток идет от М к N, выпрямление **двухполупериодное**. Постоянные составляющие выпрямленного тока и напряжения: $I_0 = 2I_m/\pi$, $U_0 = 2U_m/\pi$.

На рис. 1.5.1 изображена схема **трехфазного выпрямителя с общей точкой**. На его выходе получаются импульсы положительной полярности

(рис. 1.4.3) частотой $3f$ длительностью $t_2 - t_1 = T/3$. Среднее значение выпрямленного напряжения равно:

$$U_0 = \frac{1}{T/3} \int_{-T/6}^{T/6} U_m \cos \omega t dt = \frac{3U_m}{\omega T} \left(\sin \frac{\omega T}{6} - \sin \frac{-\omega T}{6} \right) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_m,$$

где U_m — амплитуда фазного напряжения.

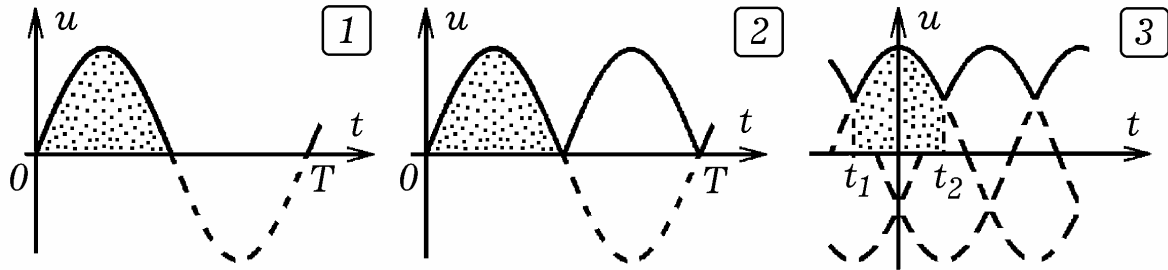


Рис. 1.4.

Мостовая схема трехфазного выпрямителя (схема Ларионова) представлена на рис. 1.5.3. На выходе получают импульсы положительной полярности с частотой $6f$. Постоянная составляющая выпрямленного тока (напряжения) вычисляется аналогично; отличие в том, что длительность импульсов $T/6$ пределы интегрирования $t_1 = -T/12$ и $t_2 = T/12$:

$$U_0 = \frac{1}{T/6} \int_{-T/12}^{T/12} U_m \cos \omega t dt = \frac{6U_m}{\omega T} \left(\sin \frac{\omega T}{12} - \sin \frac{-\omega T}{12} \right) = \frac{3}{\pi} U_m.$$

где U_m — амплитуда линейного напряжения.

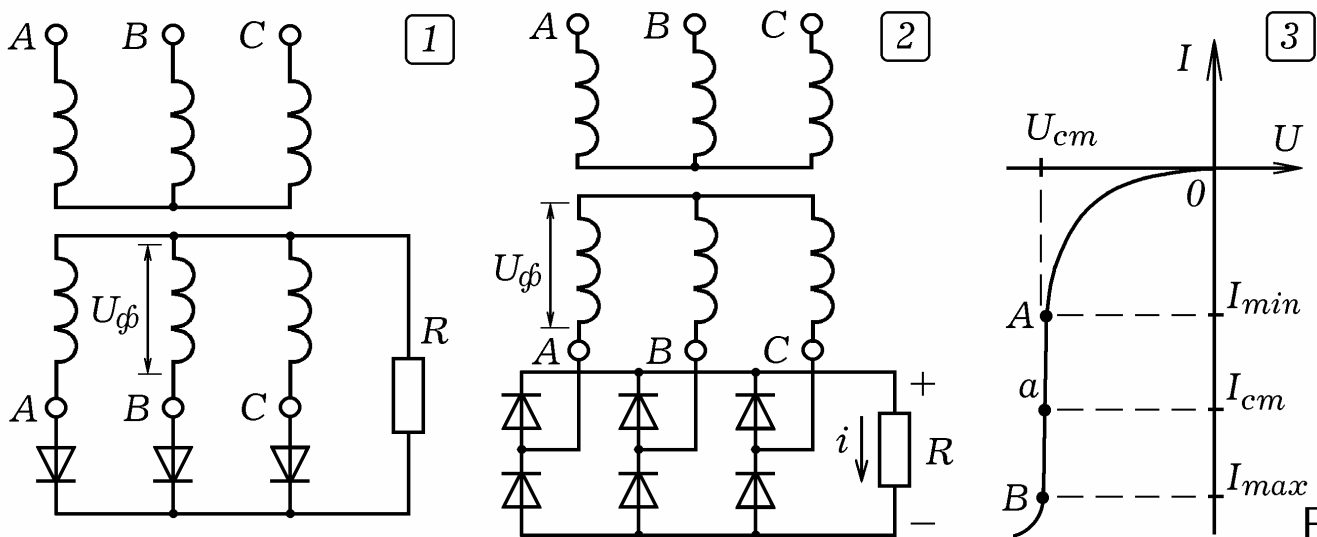


Рис. 1.5.

1.3. СТАБИЛИТРОНЫ, СТАБИСТОРЫ И ВАРИКАПЫ. В идеале напряжение на выходе источника питания не должно зависеть от тока нагрузки. Для создания таких стабилизированных источников питания используются **стабилитроны** — специальные диоды, у которых обратная ветвь ВАХ имеет вертикальный участок АВ (рис. 1.5.3). Схема параметрического стабилизатора напряжения приведена на рис. 1.6.1. Сопротивление ограничивающего резистора R1 выбирается так, чтобы рабочая точка a находилась по середине вертикального участка АВ (рис. 1.5.3). Изменения сопротивления нагрузки R2 вызывает изменение тока через

стабилитрон, но напряжение на нем остается неизменным. Для стабилизации напряжения также используют **стабисторы** — полупроводниковые диоды, у которых прямая ветвь ВАХ имеет вертикальный участок (то есть напряжение не зависит от тока в некоторых пределах).

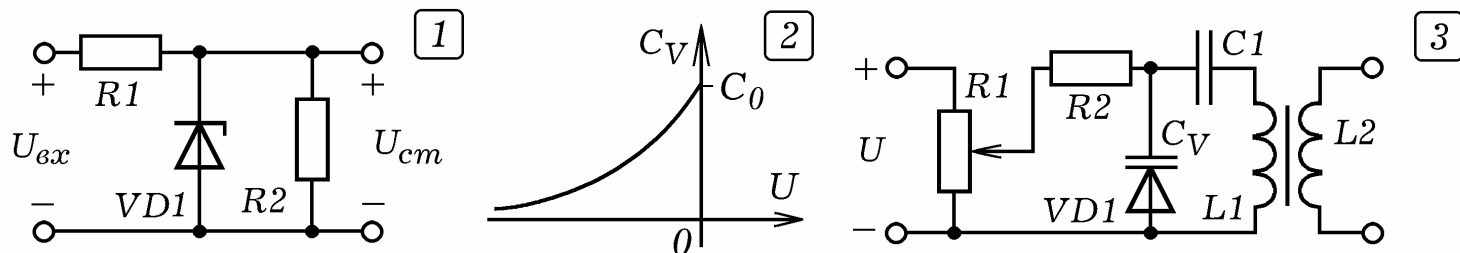


Рис. 1.6.

Варикап — плоскостной диод, работающий как конденсатор, емкость р–п–перехода которого зависит от обратного напряжения (рис. 1.6.2). Если варикап включить в колебательный контур (рис. 1.6.3), то, подавая на него обратное напряжение, можно изменять собственную частоту колебательного контура $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, где $C = C_1 C_V / (C_1 + C_V)$.

1.4. ТИРИСТОРЫ. УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ. Тиристор

— многослойный полупроводниковый прибор типа р–п–р–п с тремя р–п–переходами, обладающий свойствами управляемого вентиля. **Динистор** — это диодный тиристор с двумя выводами (анодом и катодом), которые контактируют с крайними областями монокристалла (рис. 1.7.1 и 2). При подаче на анод (область р) положительного потенциала, возникает электрическое поле так, что р–п–переходы П1 и П3 открыты, а р–п–переход П2 закрыт, так как включен в обратном направлении. Повышение напряжения до $U_{от}$ приводит к электрическому пробое р–п–перехода П2, сопротивление динистора падает, он открывается. Электрический пробой не сопровождается тепловым, — динистор сохраняет свою работоспособность. Чтобы динистор закрылся, напряжение на нем уменьшают до $U_{зак}$.

ВАХ динистора изображена на рис. 1.7.3. Участок ОА соответствует закрытому динистору, участок АВ (с отрицательным сопротивлением) — процессу открывания–закрывания, участок ВС — открытому динистору. Минимальное напряжение $U_{от}$, при котором динистор переходит из закрытого состояния в открытое, называется **напряжением открывания**. Напряжение $U_{зак}$, при котором динистор закрывается, называется **напряжением закрывания**.

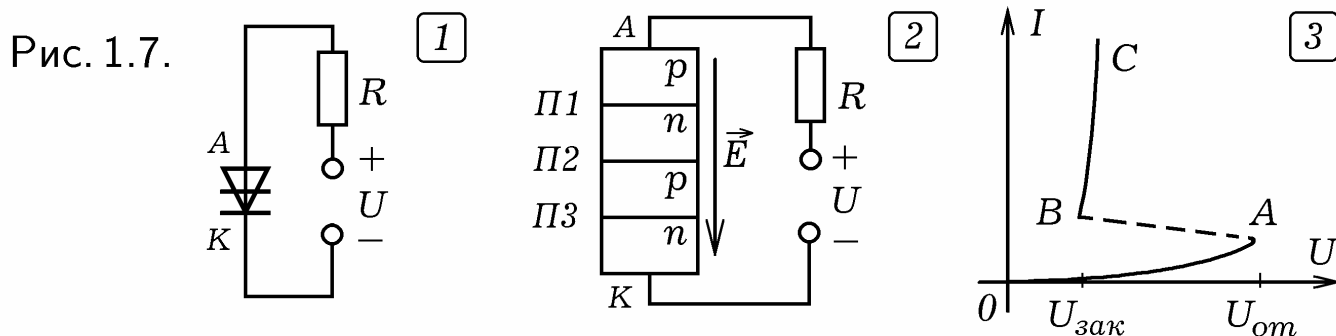
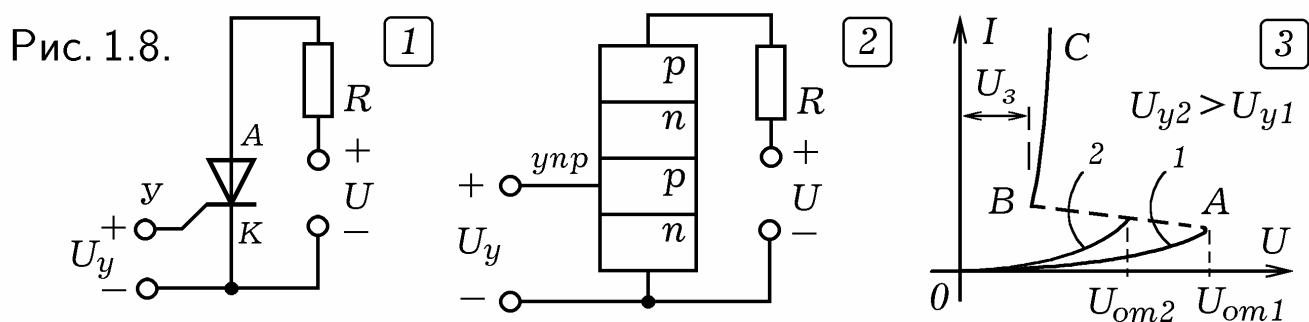


Рис. 1.7.

Тринистор — это триодный тиристор с третьим управляющим электродом, соединенным с одной из промежуточных областей (рис. 1.8.1 и 2). Если на него подать положительный относительно катода потенциал, то

напряжение открывания уменьшается. Схема включения тиристора показана на рис. 1.8.1. Две ВАХ, соответствующие различным управляющим напряжениям, показаны на рис. 1.8.3. Также существуют симметричные тиристоры (симисторы, триаки), которые в открытом состоянии пропускают ток в обоих направлениях.



Однополупериодный управляемый выпрямитель имеет схему, изображенную на рис. 1.9.1. На клеммы A и B подается переменное напряжение частотой $f = 50$ Гц. В течение полупериода, когда $\varphi_A < \varphi_B$, тиристор VD1 закрыт, ток через нагрузку HL1 не течет. В течение следующего полупериода ($\varphi_A > \varphi_B$) по мере роста потенциала точки A растет потенциал точки C, конденсатор C1 заряжается, потенциал анода динистора VD2 растет. Когда он достигает напряжения открывания, динистор открывается и на управляющий электрод тринистора VD1 подается φ_C . Это вызывает открывание тиристора, через нагрузку начинает течь ток до тех пор, пока φ_A не станет равен 0. Тиристор VD1 закрывается, и все повторяется снова. Через нагрузку проходят импульсы тока частотой f , длительность которых регулируется переменным резистором R1. Чем выше подвижный контакт R1, тем быстрее заряжается конденсатор, и тем больше длительность импульсов тока через нагрузку.

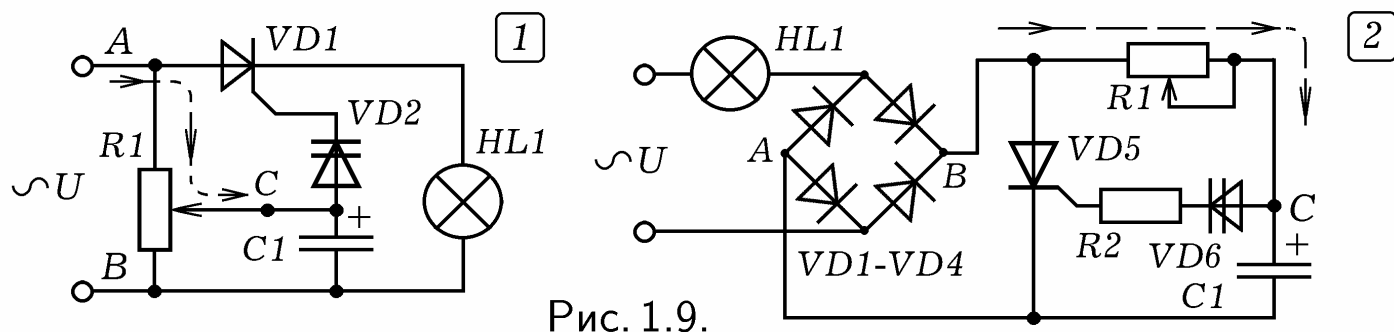


Схема **двухполупериодного тиристорного регулятора мощности** изображена на рис. 1.9.2. Ток через нагрузку HL1 течет тогда, когда диагональ диодного моста AB замкнута через открытый тиристор VD5. Диодный мост осуществляет двухполупериодное выпрямление, потенциал φ_B пульсирует с частотой $2f$ (относительно $\varphi_A = 0$), изменяясь от 0 до $U_m > 0$. Когда φ_B начинает расти, заряжается конденсатор C1 через резистор R1. Когда φ_C достигает напряжения открывания динистора VD6, тот открывается. На управляющем электроде тиристора VD5 появляется положительное напряжение, тиристор тоже открывается. Точки A и B замыкаются, через лампу HL1 проходит ток, пока φ_B не окажется меньше напряжения закрывания тиристора VD5. Чем меньше сопротивление R1, тем быстрее зарядится конденсатор C1, тем раньше откроется тринистор и тем больше длительность импульса тока через нагрузку HL1.

1.5. ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР. Транзистор — полупроводниковый прибор с тремя выводами, у которого входное напряжение управляет током в выходной цепи. **Полевой транзистор** — униполярный полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей заряда (дырок и электронов), протекающих через проводящий канал, управляемый электрическим полем. Он имеет три электрода: **затвор, исток** и **сток**. Из истока (аналог эмиттера) вытекают основные носители заряда, в сток (аналог коллектора) они втекают, а затвор (аналог базы) — управляющий электрод.

Полевой транзистор с управляющим р–п–переходом и объемным каналом n–типа (рис. 1.10.1.) создается методом диффузии и напыления на кристалле *Si* n–типа (подложка). С противоположных сторон кристалла создаются р–п–переходы так, чтобы концентрация дырок в р–области существенно превышала концентрацию электронов в n–области. Для создания затвора, истока и стока соответствующие поверхности кристалла металлизуются. При подаче на затвор отрицательного потенциала дырки притягиваются к затвору, а электроны отталкиваются. В результате толщина запирающего слоя, обедненного основными носителями заряда, растет. Площадь поперечного сечения канала уменьшается, сопротивление исток–сток возрастает, стоковый ток падает. Напряжение, при котором канал перекрывается полностью и ток стока падает до нуля, называется **напряжением отсечки** (рис. 1.11.2). Если необходимо усилить переменный сигнал, то на затвор следует подать **напряжение смещения**, при котором транзистор будет полуоткрыт. Небольшие колебания потенциала затвора приводят к соответствующим колебаниям стокового тока и напряжения на нагрузке.

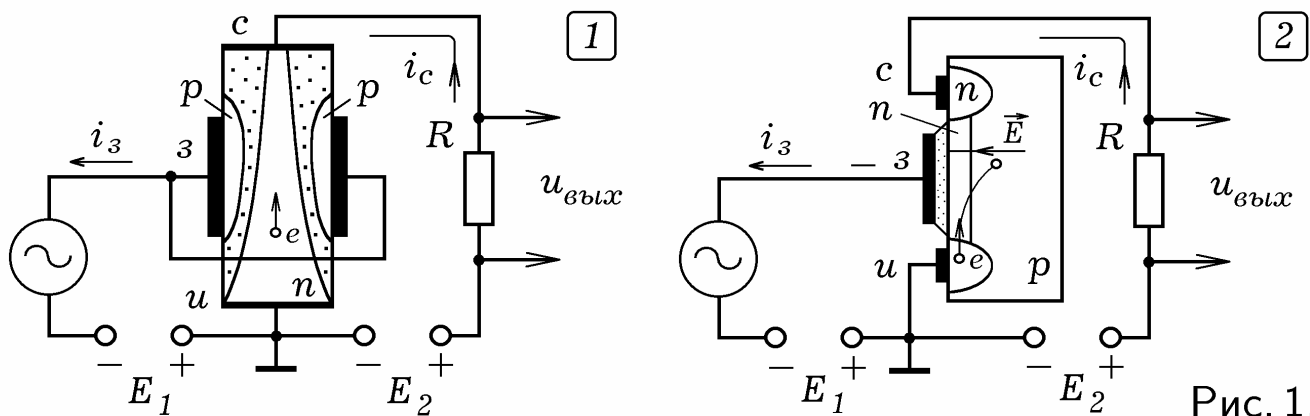


Рис. 1.10.

Транзистор с изолированным затвором типа МДП (металл–диэлектрик–полупроводник) или МОП (металл–оксид–полупроводник) имеет приповерхностный канал (рис. 1.10.2). В слаболегированной пластине *Si* p–типа (подложка) созданы области n–типа: исток, сток и соединяющий их канал. На поверхность канала наносится слой оксида *SiO₂* (или диэлектрика). Поверхность оксида, а также поверхности областей n–типа металлизуются. При подаче на затвор положительного потенциала к поверхности оксида притягиваются электроны, проводимость канала увеличивается, ток стока растет. Если подать отрицательный потенциал, электроны, отталкиваясь от затвора, уходят в глубь кристалла кремния,

где рекомбинируют с дырками. Сопротивление растёт, ток стока падает. МДП–транзисторы со встроенным каналом работают и при положительном и при отрицательном напряжении на затворе. Существуют также транзисторы с индуцированным каналом. Условные обозначения всех видов полевых транзисторов представлены на рис. 1.11.1.

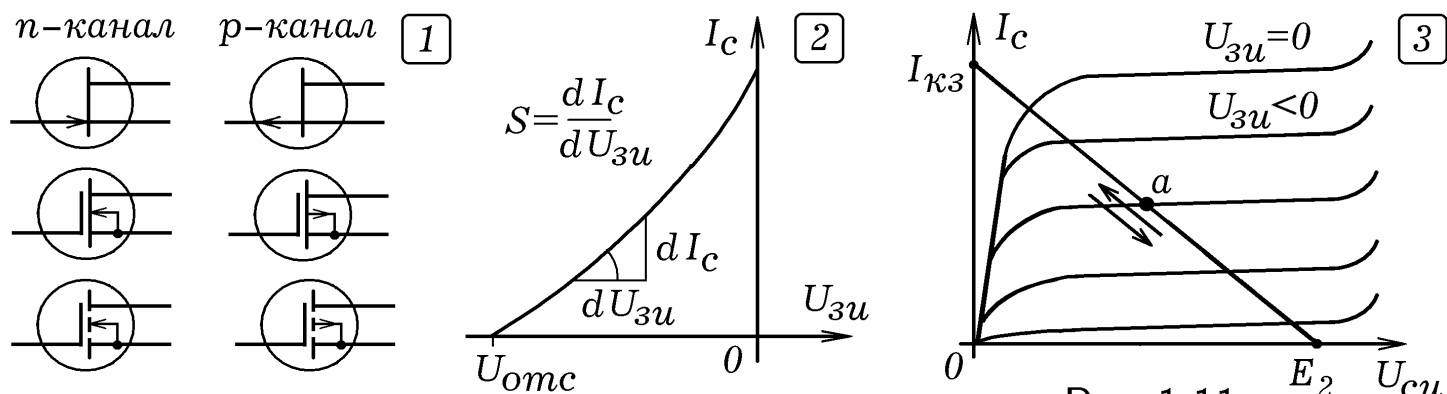


Рис. 1.11.

Стоковый ток является функцией напряжения на затворе и на стоке относительно истока: $I_c = f(U_{зи}, U_{си})$. Семейство **стоко–затворных характеристик** показывает зависимость тока стока от напряжения на затворе при постоянном напряжении на стоке: $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = const$. Каждая характеристика представляет собой возрастающую кривую (рис. 1.11.2.) и характеризуется **крутизной** $S = dI_c/dU_{зи}$. Семейство **выходных характеристик** показывает зависимость $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = const$ (рис. 1.11.3). Горизонтальные участки графиков соответствуют **режиму насыщения** транзистора, в котором он полностью открыт. Рабочая точка *a* скользит по внешней характеристике источника.

Ток стока является функцией напряжения затвор–исток и сток–исток: $I_c = f(U_{зи}, U_{си})$. Дифференцируя это выражение, получаем:

$$dI_c = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} dU_{зи} + \frac{\partial I_c}{\partial U_{си}} dU_{си} = S dU_{зи} + \frac{1}{R_i} dU_{си}.$$

где $S = \partial I_c / \partial U_{зи}$ при $U_{си} = const$ — **крутизна** стоко–затворной характеристики, $R_i = \partial U_{си} / \partial I_c$ при $U_{зи} = const$ — **дифференциальное сопротивление**. Если ток стока остается постоянным ($dI_c = 0$), то $S dU_{зи} = -(1/R_i) dU_{си}$. Отсюда: $S R_i = -dU_{си} / dU_{зи} = \mu_0$, где μ_0 — **статический коэффициент усиления**. Полевой транзистор ведет себя как электронная лампа и описывается соотношением: $\mu_0 = S R_i$.

Полевые транзисторы имеют высокое входное сопротивление: у транзисторов с управляющим р–п–переходом оно составляет 10^9 Ом, а у транзисторов с изолированным затвором типа МОП лежит в интервале $10^{12} - 10^{15}$ Ом. Поэтому они реагируют на статическое электричество.

1.6. БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР. Работа **биполярного транзистора** обусловлена движением основных носителей заряда обоих знаков: отрицательных (электроны) и положительных (дырки). Транзистор имеет два р–п–перехода и три вывода: **база** — управляющий электрод, **эмиттер** — электрод, из которого вытекают основные носители заряда, и **коллектор** — электрод, в который втекают основные носители заряда.

да. Чтобы изготовить транзистор **прямой проводимости** (р–п–р) берут пластину *Si* п–типа и методом диффузии создают на ее противоположных сторонах области типа р, соответствующие эмиттеру и коллектору (рис. 1.12.1). Для подключения выводов поверхности базы, эмиттера и коллектора металлизуют. Аналогично изготавливают транзистор **обратной проводимости** типа п–р–п. Структура транзисторов прямой и обратной проводимости изображена на рис. 1.12.2.

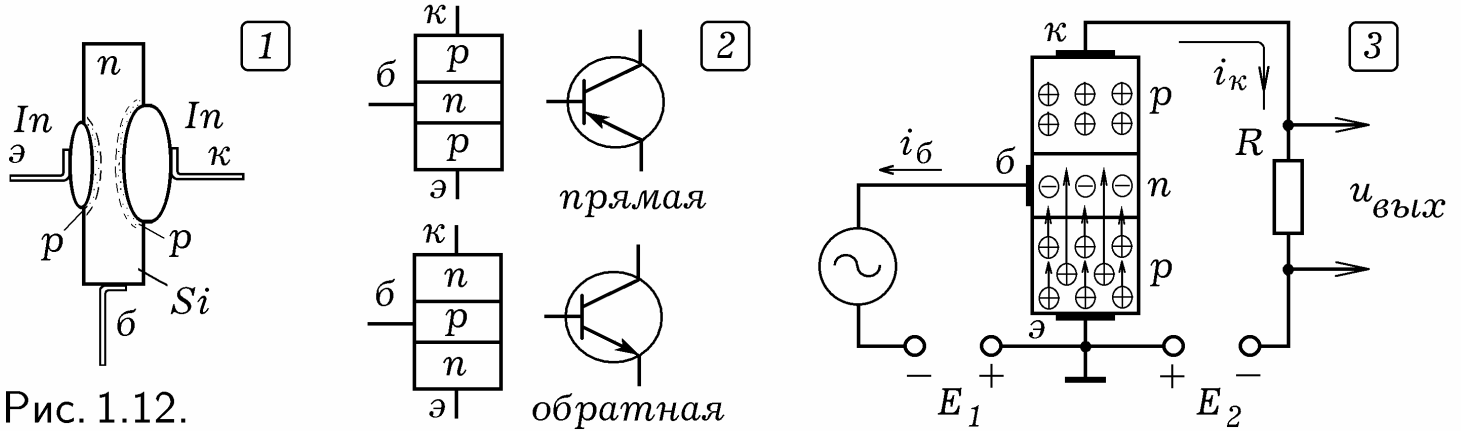


Рис. 1.12.

Схема включения транзистора типа р–п–р с общим эмиттером приведена на рис. 1.12.3. На коллектор подают отрицательный потенциал относительно эмиттера, р–п–переход база–эмиттер открыт, а р–п–переход база–коллектор закрыт, ток через нагрузку мал ($I_k = 0$). При подаче на базу отрицательного потенциала дырки из эмиттера переходят в базу, которая имеет небольшую толщину и невысокую концентрацию электронов. Небольшая часть дырок рекомбинирует с электронами базы, а остальные оказываются вблизи р–п–перехода база–коллектор. Сопротивление этого р–п–перехода падает, коллекторный ток растет. При периодическом изменении потенциала базы происходят соответствующие изменения тока коллектора и напряжения на нагрузке. Параметры цепи подбирают так, чтобы амплитуда колебаний выходного напряжения в десятки раз превышала амплитуду входного. Транзистор типа п–р–п работает аналогично, при его включении следует поменять полярность источников E_1 и E_2 .

Ток эмиттера разветвляется на ток базы и коллектора: $I_э = I_k + I_б$. Дифференциальный коэффициент передачи тока эмиттера равен: $\alpha = \partial I_k / \partial I_э \approx \Delta I_k / \Delta I_э$ при $U_{кэ} = const$. Коэффициент передачи тока базы у схемы ОЭ (коэффициент усиления по току):

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_k}{(1 - \alpha)\Delta I_э} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Так как $I_э \approx I_k$ ($I_б$ мал), то α близко к 1 и $\beta \gg 1$.

Ток коллектора I_k зависит от напряжения на базе $U_{бэ}$ и на коллекторе $U_{кэ}$ относительно эмиттера и выражается функцией: $I_k = f(U_{бэ}, U_{кэ})$. **Входная статическая характеристика** $I_б = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = const$ представляет собой вольт–амперную характеристику р–п–перехода база–эмиттер (рис. 1.13.1). **Выходные статические характеристики** $I_k = f(U_{кэ})$ при различных $U_{бэ} = const$ (рис. 1.13.2) образуют семейство кривых с практически горизонтальными участками, соответствующими **режиму насыщения**, когда транзистор полностью открыт.

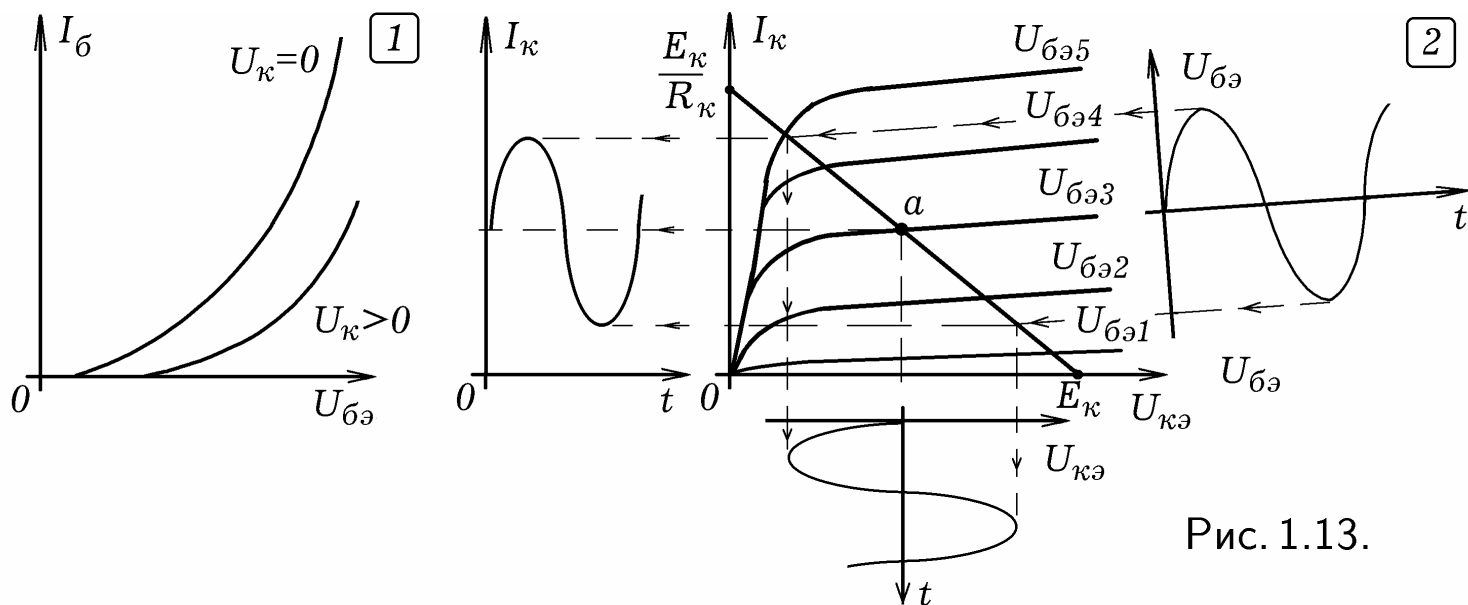


Рис. 1.13.

Чтобы представить работу транзистора в **динамическом режиме**, в семействе выходных статических характеристик строят нагрузочную прямую источника E_2 . Если напряжение $U_{бэ}$ изменяется, то рабочая точка a , характеризующая состояние транзистора, колеблется вдоль нагрузочной прямой, перескакивая с одной выходной характеристики на другую (рис. 1.13.2). В результате выходное напряжение на коллекторе $U_{кэ}$ будет изменяться в противофазе с входным напряжением на базе $U_{бэ}$.

1.7. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА. Рассмотрим динамическую характеристику управления транзистора $I_к = f(U_{бэ})$ (рис. 1.14.1). Режим работы транзистора зависит от напряжения смещения $U_{см}$, — постоянной составляющей напряжения на базе, обуславливающей положение рабочей точки a на характеристике управления. В **режиме А** ток в выходной цепи протекает в течение всего периода изменения $U_{бэ}$. При этом напряжение смещения должно превышать амплитуду $U_{бэ}$ (рис. 1.14.1). Транзистор не вносит нелинейных искажений (форма выходного сигнала такая же как у входного), но он потребляет много энергии, так как полупроводник открыт при отсутствии входного сигнала (в состоянии покоя).

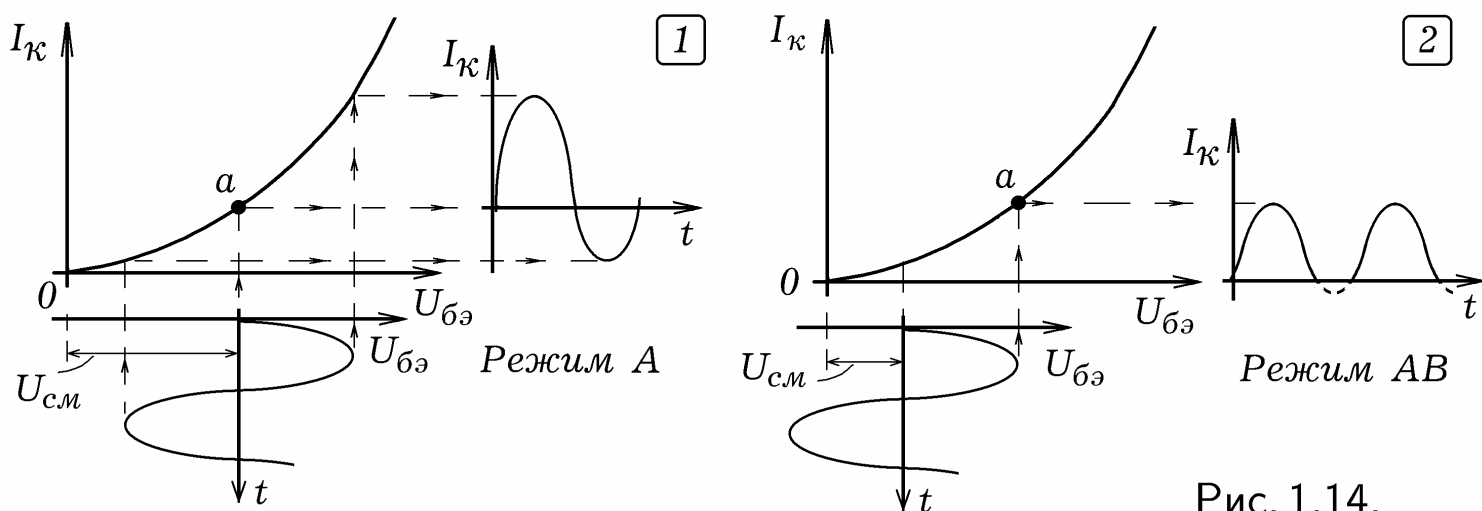


Рис. 1.14.

В **режиме В** напряжение смещения на базе близко к нулю, поэтому ток в выходной цепи протекает только в течение половины периода входного сигнала $U_{бэ}$. Так как в состоянии покоя транзистор закрыт, он в

потребляет меньше энергии. Форма выходного сигнала не совпадает с формой входного, имеют место **нелинейные искажения**. Промежуточным между режимами А и В является **режим АВ**, при котором ток в выходной цепи протекает в течение времени, большем половины периода $U_{бэ}$ (рис. 1.14.2). В **режиме С** ток в выходной цепи протекает в течение времени, меньшем половины периода входного сигнала $U_{бэ}$. В **режиме D** (импульсный режим) транзистор находится либо в состоянии **насыщения**, то есть полностью открыт, либо в состоянии **отсечки**, когда он полностью закрыт.

Транзистор, включенный по схеме с ОЭ, можно рассматривать как четырехполюсник (рис. 1.15.1), который характеризуется входными и выходными напряжениями и токами. Из них только две величины являются независимыми: задав входное и выходное напряжения, получим вполне определенные входной и выходной токи. В качестве независимых переменных выберем входной ток $I_1 = I_б$, и выходное напряжение $U_2 = U_{кэ}$. Тогда входное напряжение $U_1 = U_{бэ}$ и выходной ток $I_2 = I_к$ равны: $U_1 = f_1(I_1, U_2)$, $I_2 = f_2(I_1, U_2)$. Полные дифференциалы этих функций равны:

$$dU_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2, \quad \Delta U_1 = \frac{\partial U_1}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} \Delta U_2,$$

$$dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2, \quad \Delta I_2 = \frac{\partial I_2}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} \Delta U_2.$$

Итак, для малых сигналов: $U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2$, $I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2$, где $h_{11} = \partial U_1 / \partial I_1$ при $U_2 = const$ — входное сопротивление транзистора при его короткозамкнутом выходе для переменного тока, $h_{12} = \partial U_1 / \partial U_2$ при $I_1 = const$ — коэффициент обратной связи по переменному току и напряжению, $h_{21} = \partial I_2 / \partial I_1$ при $U_2 = const$, — коэффициент передачи тока при короткозамкнутом по переменному току выходе, $h_{22} = \partial I_2 / \partial U_2$ при $I_1 = const$, — выходная проводимость транзистора при разомкнутом для переменного тока входе.

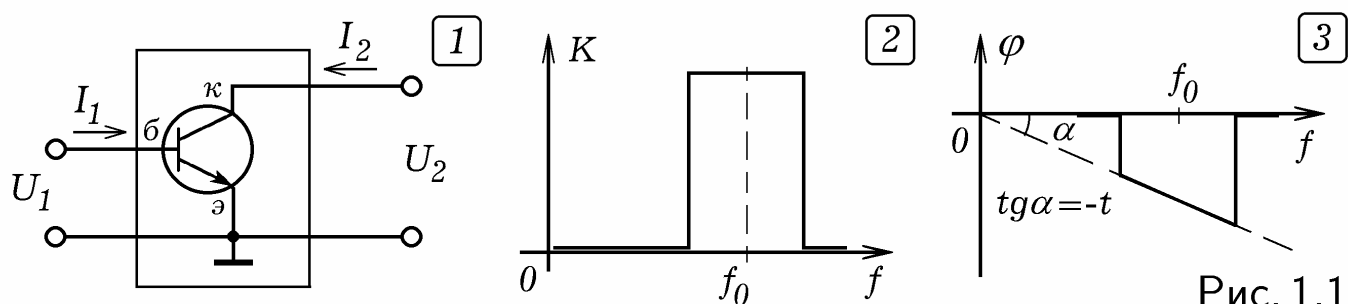


Рис. 1.15.

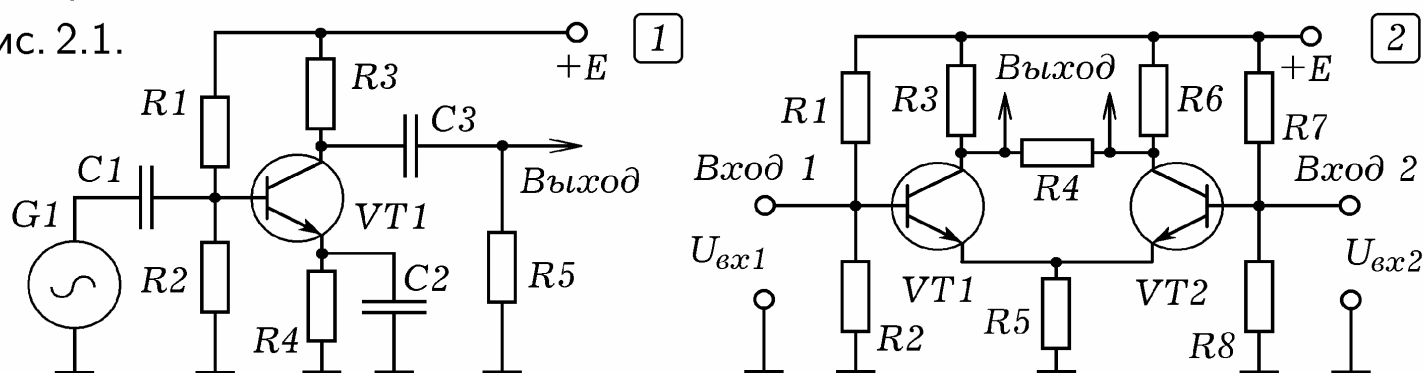
2. УСИЛИТЕЛИ, ГЕНЕРАТОРЫ, ФИЛЬТРЫ

2.1. ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ. Для увеличения амплитуды сигнала используются усилители. В качестве усиливающего элемента применяют электронные лампы, биполярные и полевые транзисторы, операционные усилители. Коэффициент передачи усилителя $K = U_{вых} / U_{вх}$ называется **коэффициентом усиления** по напряжению. При последовательном соединении усилительных каскадов их коэффициенты усиления

ния перемножаются: $K = K_1 K_2 K_3 \dots$. Коэффициент усиления мощности равен произведению коэффициентов усиления по напряжению и по току: $K_P = K_U K_I = U_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} I_{\text{ВХ}}$. Если усилитель линейный, то коэффициент усиления не зависит от частоты, амплитуда всех гармоник сигнала увеличивается в равное количество раз и сигнал сохраняет свою форму, то есть происходят **линейные искажения**. На рис. 1.15.2 и 3 приведены П-образная амплитудо-частотная и линейная фазо-частотная характеристики линейного усилителя, передающего сигналы в интервале $f_0 \pm \Delta f$ без искажений формы. В случае, когда коэффициент усиления зависит от частоты, или усилитель достигает режима насыщения, усиливаемый сигнал изменяет свою форму, имеют место **нелинейные искажения**.

Резисторный усилитель (рис. 2.1.1) содержит транзистор VT1, включенный по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Конденсаторы C1 и C3 разделительные, пропускают переменную составляющую сигнала. Делитель на R1 и R2 создает на базе транзистора необходимое напряжение смещения, задавая режим его работы. Чтобы исключить нелинейные искажения, транзистор должен быть полуоткрыт (режим А). При увеличении потенциала на базе транзистор n-p-n-типа открывается, сопротивление между коллектором и эмиттером падает, напряжение на выходе уменьшается. При уменьшении потенциала все происходит наоборот. Сдвиг фаз между входным и выходным сигналами равен π .

Рис. 2.1.



Резистор R4 необходим для температурной стабилизации работы усилителя: если температура растет, ток коллектора увеличивается. Это вызывает рост напряжения на R4, что приводит к уменьшению напряжения $U_{\text{бэ}}$ база-эмиттер. В результате коллекторный ток $I_{\text{к}}$ стабилизируется. Чтобы на работу транзистора не влияла переменная составляющая тока $I_{\text{к}}$, резистор R4 шунтируют конденсатором C2 (рис. 2.1.1).

Дифференциальный усилитель усиливает разность входных напряжений. Он имеет два входа и два усилительных каскада (рис. 2.1.2). Транзистор VT1 усиливает сигнал, поступающий на вход 1, а транзистор VT2 — сигнал, поступающий на вход 2. Выходное напряжение, снимаемое с резистора нагрузки R4, равно разности потенциалов на коллекторах транзисторов: $U_{\text{к1}}, U_{\text{к2}}$: $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{к2}} - U_{\text{к1}} = k(U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}})$.

Резонансный усилитель отличается тем, что в качестве нагрузки содержит параллельный колебательный контур или два контура, связанных индуктивной связью (рис. 2.2.1). В этом случае коэффициент усиления сильно зависит от частоты: усиливаются сигналы, частота которых находится внутри полосы пропускания контура.

Однотактный усилитель мощности содержит трансформатор, первичная обмотка которого включена в цепь коллектора, а ко вторичной подсоединена нагрузка (рис. 2.2.2). В рассмотренных выше схемах транзистор работает в режиме А, то есть его рабочая точка — в середине линейного участка характеристики управления $I_k = I_k(U_{бэ})$. Их общий недостаток состоит в том, что в состоянии покоя (при отсутствии входного сигнала) транзистор полуоткрыт и через цепь коллектора течет ток, батарея питания разряжается, КПД оказывается невысок.

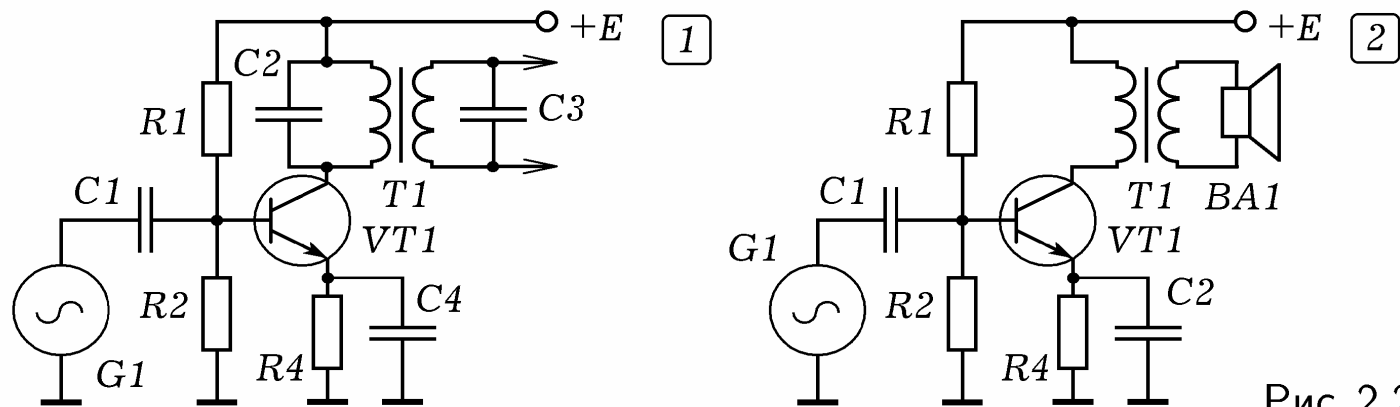


Рис. 2.2.

Двухтактный усилитель состоит из двух транзисторов, работающих в режиме В. В состоянии покоя транзисторы закрыты, а при поступлении на вход синусоидального сигнала поочередно открываются (рис. 2.3.1). Когда потенциал входа φ_A положительный, диод VD1 и транзистор VT1 закрыты, транзистор VT2 открывается и потенциал φ_B его коллектора уменьшается (точка В соединяется с общим). При подаче на вход отрицательного потенциала ($\varphi_A < 0$) транзистор VT2 закрывается, а диод VD1 открывается и потенциал базы VT1 уменьшается. Это приводит к открыванию VT1, потенциал φ_B его эмиттера растет (точка В соединяется с +E). Конденсаторы C1 и C2 разделительные, они пропускают только переменную составляющую сигнала.

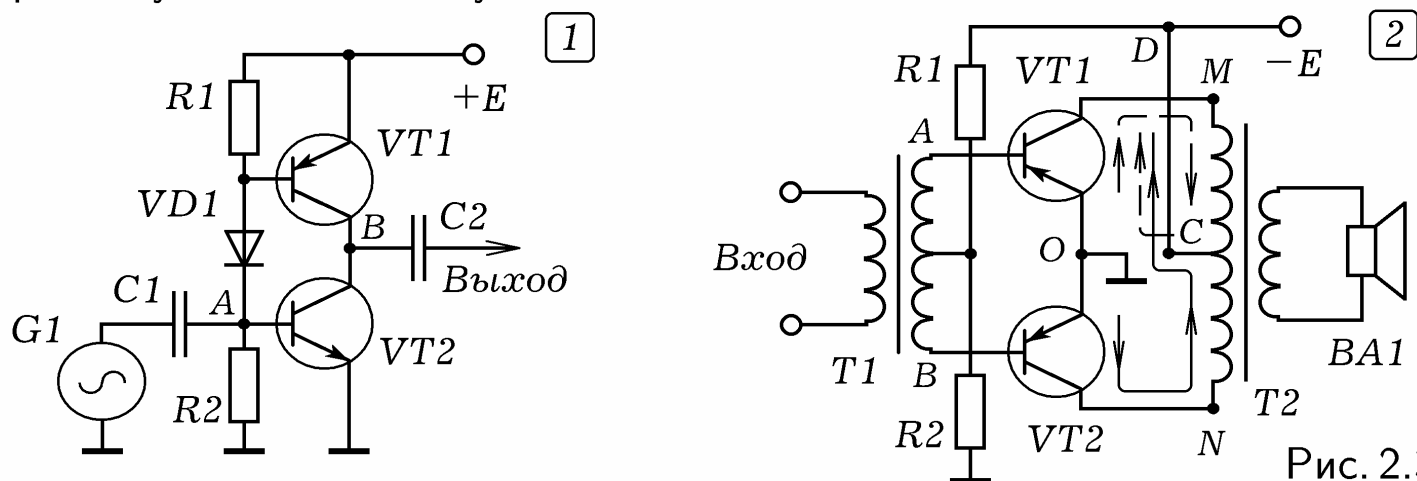


Рис. 2.3.

Схема **двухтактного усилителя мощности** изображена на рис. 2.3.2. Резисторы R1 и R2 образуют делитель напряжения, который создает необходимое напряжение смещения на базе транзисторов VT1 и VT2, работающих в режиме В. При отсутствии входного сигнала транзисторы закрыты. При подаче на вход переменного напряжения потенциалы баз транзисторов изменяются. В течение нечетных полупериодов, когда потенциал базы VT1 положительный ($\varphi_A > 0$), а потенциал базы VT2 от-

рицательный ($\varphi_B < 0$), VT1 закрыт, а VT2 открывается. При этом ток течет по пути ONCD, показанному стрелкой. В течение четных полупериодов ($\varphi_A < 0$, $\varphi_B > 0$) открывается транзистор VT1, а VT2 закрыт, ток течет по пути OMCD, показанному пунктирной стрелкой.

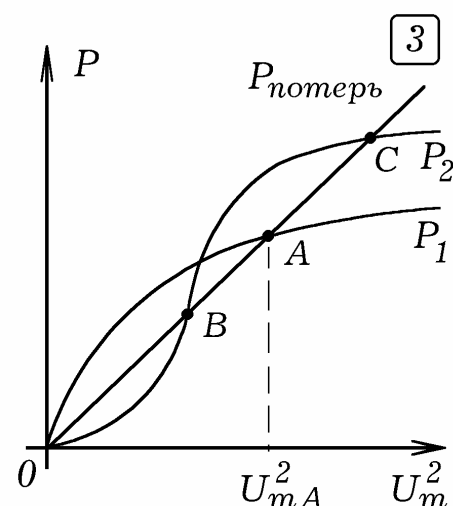
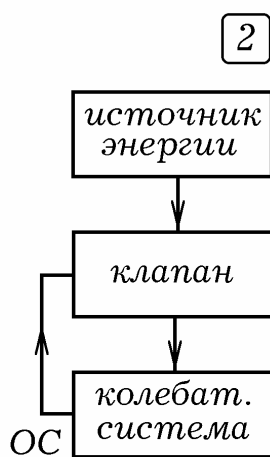
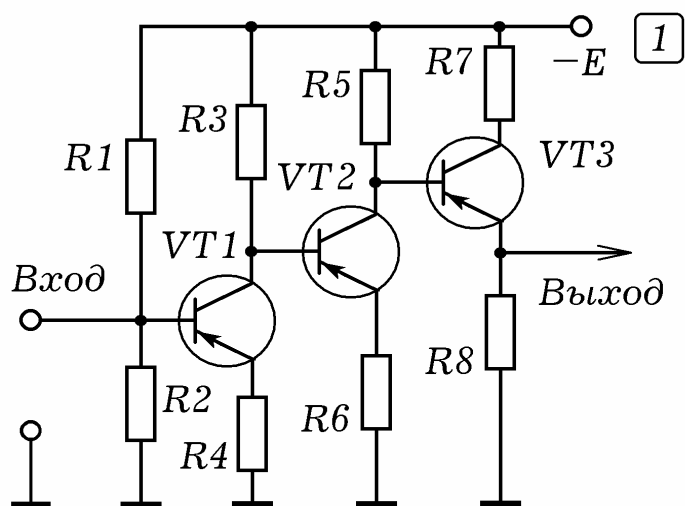


Рис. 2.4.

Для усиления медленных изменений однополярного напряжения используется усилитель постоянного тока (рис. 2.4.1), отличающийся отсутствием разделительных конденсаторов. При подаче на вход положительного потенциала VT1 закрывается, потенциал базы VT2 становится более отрицательным и он открывается, что приводит к закрыванию VT3. Ток через резистор R8, а значит и напряжение на нем уменьшаются.

2.2. ГЕНЕРАТОРЫ КОЛЕБАНИЙ. Автогенератор электрических колебаний преобразует энергию источника постоянного тока в энергию переменного тока (напряжения) требуемой формы. Различают генераторы синусоидальных колебаний и релаксационные генераторы импульсов (прямоугольных, треугольных и т.д.). **Генератор синусоидальных колебаний** состоит из источника энергии, колебательной системы и клапана, управляемого через обратную связь (рис. 2.4.2). Колебания, происходящие в колебательной системе, периодически открывают клапан и тот пропускает порцию энергии от источника. Мощность потерь $P_{\text{потерь}}$ пропорциональна квадрату амплитуды U_m^2 (рис. 2.4.3). У **систем с мягким возбуждением** зависимость вносимой в колебательную систему мощности от U_m^2 имеет вид $P_1(U_m^2)$. При включении амплитуда колебаний повышается от 0 до U_{mA}^2 , при которой $P_{\text{потерь}} = P_1$, а затем остается постоянной. График $P_2(U_m^2)$ соответствует **системам с жестким возбуждением**, — при включении они не самовозбуждаются. Для возникновения автоколебаний их необходимо "подтолкнуть".

Генератор синусоидальных колебаний можно создать из усилителя и цепи обратной связи, через которую часть выходного сигнала подается на вход (рис. 2.5.1). Если выходной сигнал подается на вход в фазе с входным, то есть **обратная связь положительная (ПОС)**, то происходит самовозбуждение системы, амплитуда колебаний возрастает до тех пор, пока потери за период не уравниваются притоком энергии от источника. Если **обратная связь отрицательная (ООС)**, то есть выходной сигнал пода-

ется на вход усилителя в противофазе, то он ослабляет входной сигнал. Снижается коэффициент усиления, повышается устойчивость системы, становится сложнее перевести усилитель в режим самовозбуждения.

Коэффициенты передачи усилителя $\dot{K}_u = K_u e^{j\varphi_K}$ и цепи обратной связи $\dot{B}_u = B_u e^{j\varphi_B}$ зависят от частоты. Генератор вырабатывает колебания на частотах, для которых выполняются **условия генерации**: 1. **Условие баланса фаз**: суммарный сдвиг фаз, который приобретает сигнал при прохождении через усилитель и цепь обратной связи должен быть кратен 2π : $\varphi_K + \varphi_B = 2\pi k$, k — целое. 2. **Условие баланса амплитуд**: произведение комплексов коэффициента усиления усилителя \dot{K}_u и коэффициента передачи цепи обратной связи \dot{B}_u по модулю равно 1: $|\dot{K}_u \cdot \dot{B}_u| = 1$.

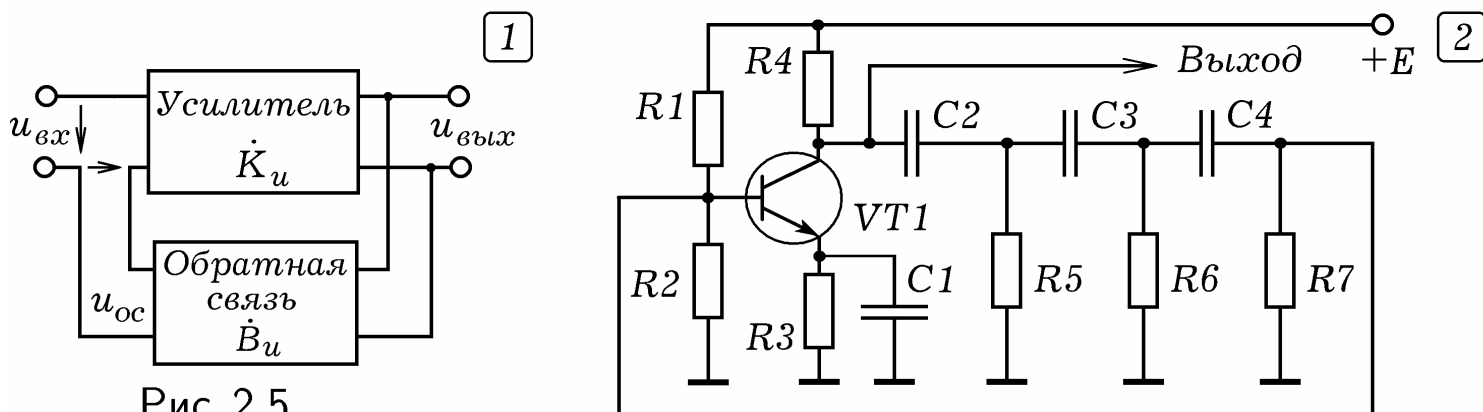


Рис. 2.5.

Коэффициенты усиления усилителя без обратной связи и с обратной связью соответственно равны:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{m, \text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{m, \text{ВХ}} + \dot{U}_{m, \text{ОС}}}, \quad \dot{K}_{\text{ОС}} = \frac{\dot{U}_{m, \text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{m, \text{ВХ}}}, \quad \text{где } \dot{B}_u = \frac{\dot{U}_{m, \text{ОС}}}{\dot{U}_{m, \text{ВЫХ}}}.$$

$$\frac{1}{\dot{K}} = \frac{\dot{U}_{m, \text{ВХ}}}{\dot{U}_{m, \text{ВЫХ}}} + \frac{\dot{U}_{m, \text{ОС}}}{\dot{U}_{m, \text{ВЫХ}}} = \frac{1}{\dot{K}_{\text{ОС}}} + \dot{B}_u, \quad \dot{K}_{\text{ОС}} = \frac{1}{1/\dot{K} - \dot{B}_u} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{K}\dot{B}_u}.$$

При положительной ОС произведение $\dot{B}_u \dot{K}$ — положительное действительное число. Если $\dot{K}\dot{B}_u < 1$, то усилитель не самовозбуждается, его коэффициент усиления $K_{+ос} > K$. При $\dot{K}\dot{B}_u \geq 1$ усилитель самовозбуждается, превращаясь в генератор. Если ОС отрицательная, то $\dot{B}_u \dot{K} < 0$ и $K_{-ос} < K$.

RC-генератор с резистивно-емкостной цепью ПОС состоит из усилительного каскада на одном транзисторе, охваченный ПОС из фазовращающей цепочки из трех Г-образных RC-фильтров (рис. 2.5.1). Транзистор включен по схеме с ОЭ и вносит сдвиг фаз π . Генератор вырабатывает синусоидальные колебания на частоте, для которой каждая RC-цепь создает сдвиг фаз $\pi/3$ (в сумме π) и выполняется баланс амплитуд.

LC-генератор представляет собой резонансный усилитель на одном транзисторе, охваченный положительной обратной связью (рис. 2.6.1). В цепи коллектора имеется колебательный контур с собственной частотой $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$. На одном сердечнике с катушкой индуктивности L1 рас-

положена катушка связи $L_{св}$, напряжение с нее подается на вход усилителя (базу транзистора $VT1$). При правильном включении катушки связи обратная связь получается положительной: когда ток через катушку $L1$ направлен вниз по схеме, на базе $VT1$ появляется отрицательный потенциал. При этом транзистор открывается, сопротивление между коллектором и эмиттером падает. Часть обмотки AB катушки $L1$ оказывается подключенной к источнику так, что ток источника усиливает ток, возникающий при перезарядке конденсатора. В следующие полпериода, когда ток через катушку $L1$ течет вверх по схеме, на базе $VT1$ появляется положительный потенциал, транзистор закрывается и т.д. Генератор вырабатывает синусоидальные колебания с частотой ω_0 .

Симметричный мультивибратор (рис. 2.6.2) представляет собой двухкаскадный усилитель, выход которого соединен с входом. Каждый транзистор поворачивает фазу на π , поэтому баланс фаз выполняется для всех частот. На выходе получается последовательность прямоугольных импульсов, частота которых тем выше, чем меньше емкость конденсаторов $C1, C2$ и сопротивление резисторов $R2, R3$. Если на базу одного из транзисторов подать отрицательный потенциал, то он будет все время закрыт, генерация прекратится.

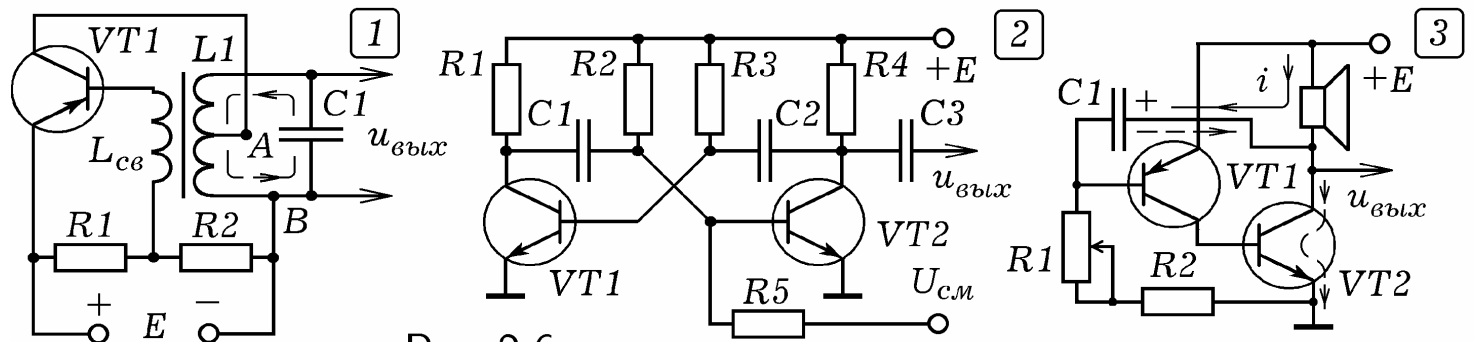


Рис. 2.6.

Схема **несимметричного мультивибратора** представлена на рис. 2.6.3. При включении конденсатор $C1$ заряжается через динамик, резисторы $R1$ и $R2$. При этом течет ток i , показанный стрелкой, потенциал базы $VT1$ уменьшается. Когда на базе $VT1$ возникает отрицательный относительно эмиттера потенциал, транзистор $VT1$ открывается, сопротивление между коллектором и эмиттером падает. База транзистора $VT2$ оказывается соединенной с положительным полюсом источника, транзистор $VT2$ открывается, и его сопротивление между коллектором и эмиттером падает. В результате через динамик, коллектор и эмиттер открытого $VT2$ течет ток, конденсатор $C1$ разряжается через резисторы $R1, R2$ и транзистор $VT2$. Потенциал базы $VT1$ увеличивается, транзистор закрывается, вызывая закрывание транзистора $VT2$. После этого конденсатор $C1$ снова заряжается, все повторяется снова. Частота генерируемых импульсов обратно пропорциональна времени заряда конденсатора $\tau = (R_1 + R_2)C_1$. При увеличении сопротивления $R1$ частота щелчков динамика уменьшается.

Простейший **генератор линейно-импульсного (пилообразного) напряжения** может быть собран из тиристора (динистора или тринистора), резистора и конденсатора (рис. 2.7.1). Тринистор отличается от динисто-

ра наличием управляющего электрода. При включении тиристор закрыт, конденсатор C_1 медленно заряжается от источника питания через резистор R_1 . Напряжение на конденсаторе растет до напряжения открывания тиристора. Когда тиристор открывается, его сопротивление резко падает, и конденсатор быстро разряжается через него. При уменьшении анодного напряжения до напряжения закрывания тиристор закрывается, после чего все повторяется снова. Время заряда $\tau = R_1 C_1$, поэтому при увеличении R_1 и C_1 частота колебаний уменьшается. С ростом напряжения питания частота генерируемых импульсов увеличивается. Если использовать тринистор, то при подаче на управляющий электрод положительного относительно катода потенциала, напряжение открывания уменьшается, частота формируемых импульсов растет.

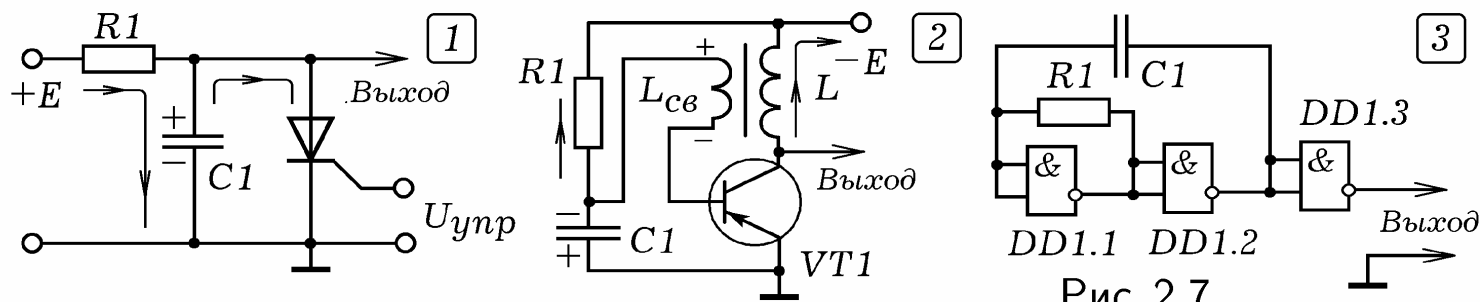


Рис. 2.7.

Блокинг-генератор — это релаксационный генератор с сильной трансформаторной обратной связью, вырабатывающий последовательность кратковременных импульсов, разделенных достаточно большим промежутком времени (рис. 2.7.2). При включении конденсатор C_1 начинает заряжаться через резистор R_1 , на базе появляется отрицательный потенциал. Транзистор VT_1 открывается, через катушку L начинает течь ток. В результате в катушке связи $L_{св}$ возникает напряжение и при правильном ее включении потенциал базы VT_1 становится еще отрицательнее. Транзистор открывается еще сильнее до тех пор, пока система не войдет в насыщение. Через резистор R_1 и открытый транзистор конденсатор C_1 начинает разряжаться. Так как коллекторный ток перестает изменяться, то напряжение на катушке связи становится равным нулю и транзистор закрывается. Конденсатор C_1 снова начинает заряжаться, потенциал базы транзистора уменьшается и т.д.

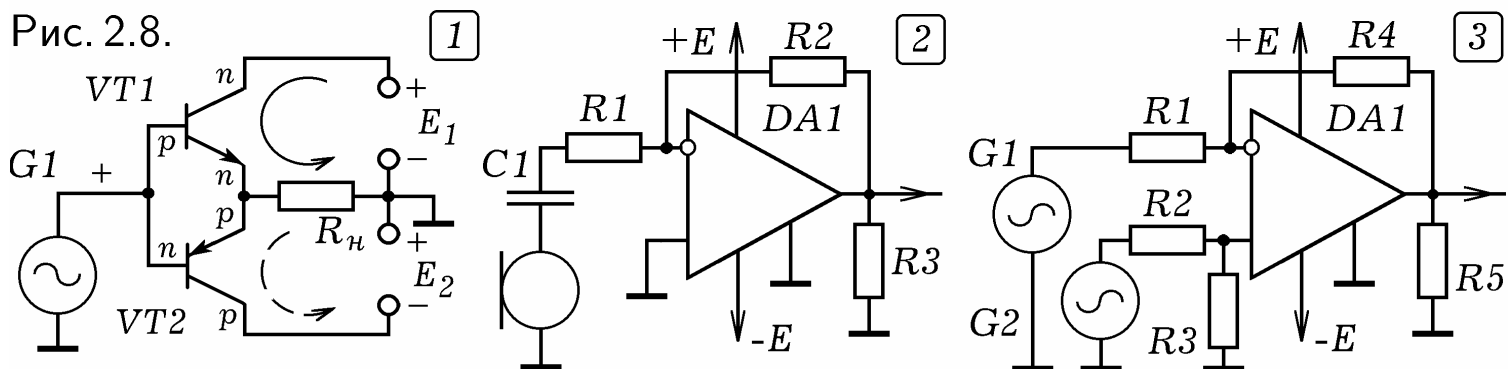
В цифровой технике используется **генератор прямоугольных импульсов** на логических элементах (рис. 2.7.3). Каждый элемент инвертирует импульс, изменяя фазу колебаний на π . Частота генерируемых импульсов тем больше, чем меньше сопротивление R и емкость C .

2.3. ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ. В аналоговых ЭВМ используют **операционный усилитель (ОУ)** — усилитель постоянного тока с высоким коэффициентом передачи постоянного напряжения и большим входным сопротивлением. Интегральные ОУ имеют коэффициент усиления по напряжению от 500 до 50000, входные токи $10 - 10^{-3}$ мкА. На базе ОУ возможно создание аналоговой ЭВМ, работающей с плавно изменяющимся напряжением и осуществляющей решение соответствующего дифференциального или интегрального уравнения. В зависимости от вида уравнения собирают схему АЭВМ, содержащую сумматоры, вычитатели,

умножители, дифференциаторы, интеграторы, осуществляющие соответствующие операции над входным сигналом. Перечисленные выше блоки могут быть созданы с помощью резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности, однако использование ОУ позволяет получить более точные результаты.

ОУ имеет два входа (**инвертирующий** и **неинвертирующий**) и один выход, на котором получается усиленная разность входных сигналов: $U_{\text{вых}} = K_u(U_{\text{неинв}} - U_{\text{инв}})$. При подаче на инвертирующий вход переменного напряжения на выходе получают усиленные колебания той же частоты, сдвинутые по фазе на π . ОУ содержит дифференциальный усилитель, схема которого аналогична изображенной на рис. 2.1.2, и выходной каскад (рис. 2.8.1). При подаче положительного потенциала на базы транзисторов VT1 и VT2, работающих в режиме В, VT1 открывается, а VT2 закрывается. Если на входе отрицательный потенциал, то открывается VT2, VT1 закрывается, ток через нагрузку $R_{\text{срм}}$ течет в противоположную сторону.

Рис. 2.8.



Чтобы из ОУ получить усилитель, необходимо на инвертирующий вход подать усиливаемый сигнал, а второй вход соединить с общим проводом (рис. 2.8.2). Резистор R_2 соединяет выход ОУ с его инвертирующим входом и образует цепь отрицательной обратной связи. Коэффициент усиления ОУ равен $K_u = R_2/R_1$. Схема включения ОУ как дифференциального усилителя приведена на (рис. 2.8.3); на его выходе получается усиленная разность входных сигналов.

Рассмотрим схему сумматора аналоговых сигналов с тремя входами (рис. 2.9.1). Выходное напряжение равно

$$U_{\text{вых}} = \left(\frac{R_5}{R_1} U_1 + \frac{R_5}{R_2} U_2 + \frac{R_5}{R_3} U_3 \right),$$

где U_1, U_2, U_3 — напряжения на входах сумматора. Если $R_1 = R_2 = R_3$, то на выходе $U_{\text{вых}} = (R_5/R_1)(U_1 + U_2 + U_3)$. **Интегратор** состоит из ОУ, в цепи обратной связи которого находится конденсатор (рис. 2.9.2). При подаче на его вход последовательности импульсов конденсатор накапливает заряд, потенциал инвертирующего входа растет, выходное напряжение изменяется пропорционально интегралу от входного напряжения по времени:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{k_1}{R_1 C_1} \int_0^t U_{\text{вх}}(t) dt.$$

Если резистор R_1 и конденсатор C_1 поменять местами, получится **дифференциатор**. На его выходе получается напряжение, пропорциональное производной от входного напряжения по времени:

$$U_{\text{вых}} = -k_2 R_1 C_1 \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}.$$

Для того чтобы получить RC -генератор синусоидальных колебаний необходимо подать сигнал с выхода ОУ на его неинвертирующий вход через **мост Вина** (рис. 2.9.3). Зависимость коэффициента передачи моста Вина от частоты похожа на резонансную кривую: она имеет максимум на частоте $\omega = 1/RC$, где $R = R_2 = R_4$, $C = C_1 = C_2$. Цепь положительной обратной связи хорошо пропускает колебания этой частоты, сильно ослабляя колебания других частот. В результате на выходе ОУ генерируется синусоидальный сигнал с частотой $\omega = 1/RC$.

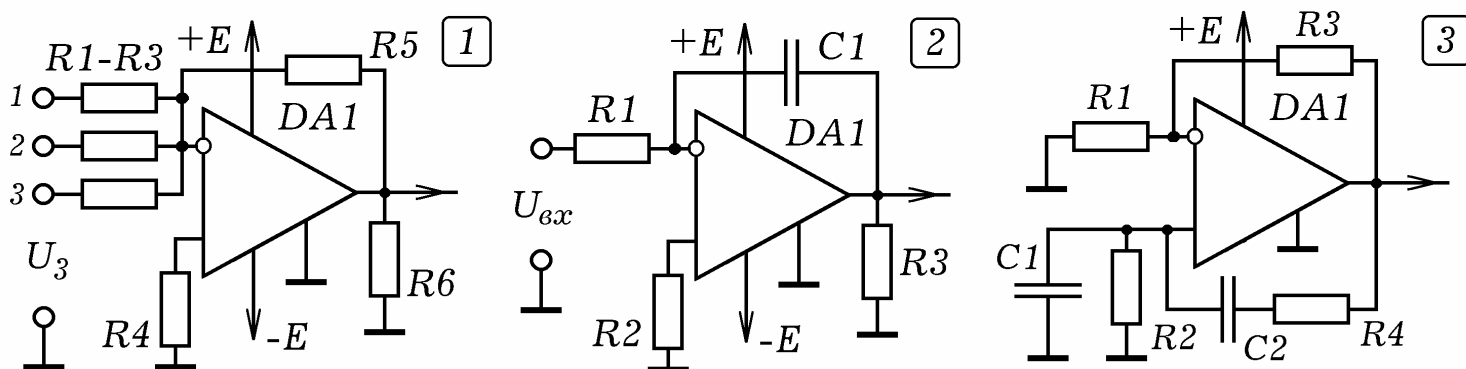


Рис. 2.9.

2.4. ФИЛЬТРЫ. Пассивный четырехполюсник, составленный из резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и других элементов, предназначенный для разделения электрических колебаний различных частот называется **фильтром**. Различают **помехоподавляющие, сглаживающие** и **резонансные** фильтры. Последние делятся на фильтры верхних частот, нижних частот, полосовые и заградительные. Комплексный коэффициент передачи фильтра по напряжению равен отношению комплексов выходного \dot{U}_2 и входного \dot{U}_1 напряжений:

$$\dot{K}(\omega) = \dot{U}_2 / \dot{U}_1 = K(\omega) e^{j\varphi}, \quad K(\omega) = |\dot{K}(\omega)| = U_2 / U_1.$$

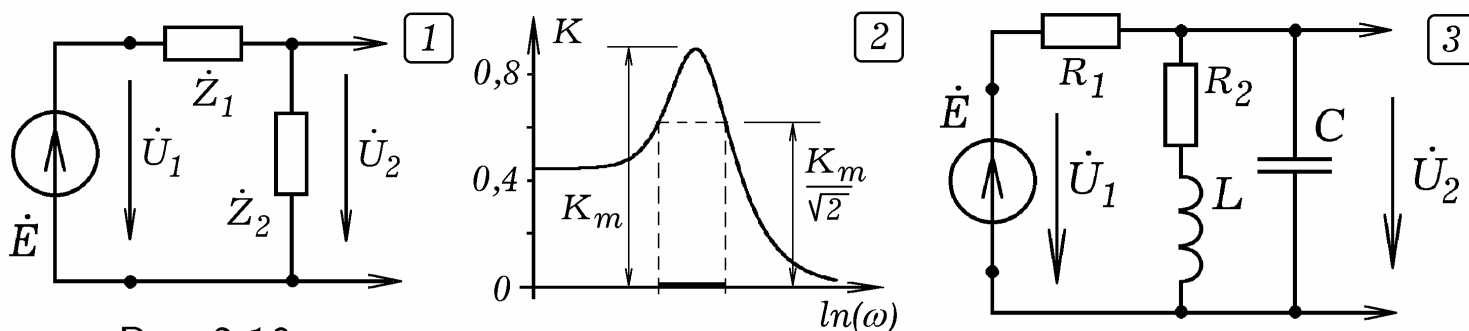


Рис. 2.10.

Г-образный фильтр состоит из двух последовательно соединенных ветвей с импедансами \dot{Z}_1 и \dot{Z}_2 , на которые подается входное напряжение \dot{U}_1 (рис. 2.10.1). Его коэффициент передачи равен:

$$\dot{K}(\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{I}\dot{Z}_2}{\dot{I}(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)} = \frac{1}{1 + \dot{Z}_1/\dot{Z}_2}, \quad K(\omega) = |\dot{K}(\omega)|.$$

При этом ток через нагрузку, подключенную параллельно \dot{Z}_2 считается пренебрежимо малым. **Полоса пропускания фильтра** — это диапазон частот, на границах которого коэффициент передачи фильтра в $\sqrt{2}$ раз меньше максимального (рис. 2.10.2).

Рассмотрим Г-образный фильтр из резистора R1 и параллельного колебательного контура, содержащего последовательно соединенные резистор R2, катушку индуктивности L, параллельно которым подключен конденсатор C (рис. 2.10.3). Импеданс колебательного контура:

$$\dot{Z}_2 = \frac{(R_2 + j\omega L)(-j/\omega C)}{R_2 + j\omega L - j/\omega C}.$$

Вблизи резонансной частоты импеданс параллельного колебательного контура, а вместе с ним и модуль коэффициента передачи максимальны (рис. 2.10.2). Полоса пропускания показана толстой линией.

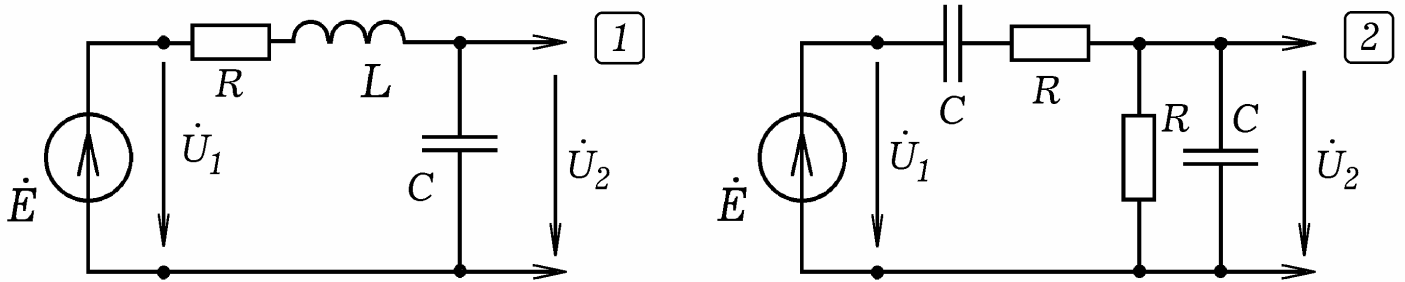


Рис. 2.11.

Рассмотрим другой фильтр, состоящий из активно-индуктивного и емкостного элементов (рис. 2.11.1). Импедансы ветвей фильтра и коэффициент передачи:

$$\dot{K} = \frac{1}{1 + (R + j\omega L)/(-j/\omega C)} = \frac{1}{1 + \omega^2 LC + j\omega RC}.$$

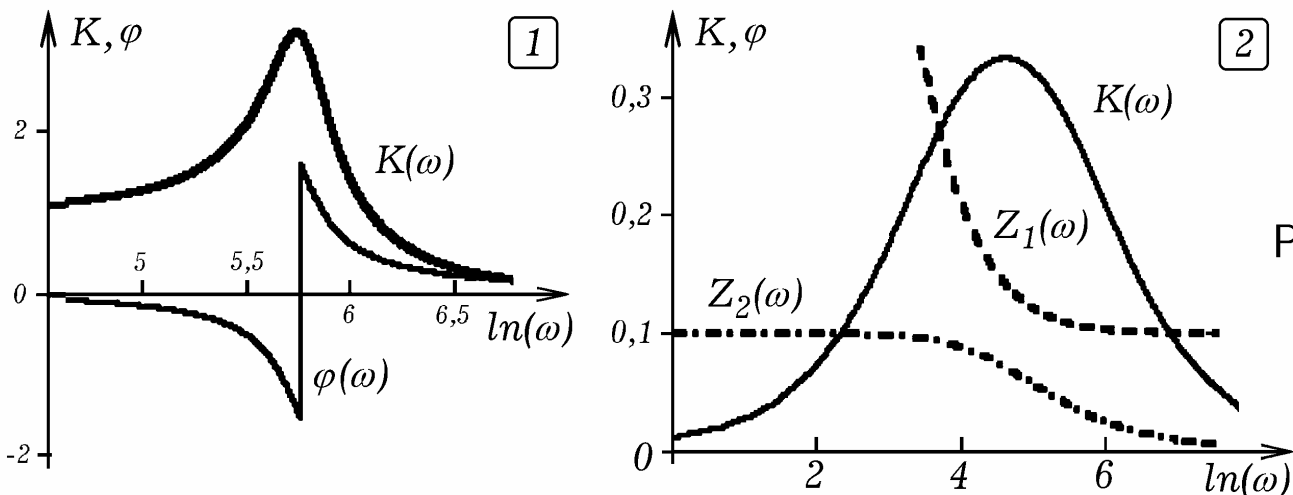


Рис. 2.12.

Графики зависимости коэффициента передачи от частоты $K = K(\omega)$ и сдвига фаз от частоты $\varphi = \varphi(\omega)$ показаны на рис. 2.12.1.

Изучим частотную зависимость коэффициента передачи **моста Вина**, представляющего собой Г-образный фильтр, обе ветви которого содержат последовательно и параллельно соединенные резистор и конденсатор (рис. 2.11.2). Импедансы ветвей моста Вина и его коэффициент передачи равны:

$$\dot{Z}_1 = R - \frac{j}{\omega C}, \quad \dot{Z}_2 = \frac{R(-j/\omega C)}{R - j/\omega C}, \quad \dot{K} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - 1/(\omega RC))}.$$

Графики зависимостей $K = K(\ln(\omega))$, $Z_1 = Z_1(\ln(\omega))$, $Z_2 = Z_2(\ln(\omega))$ построены на рис. 2.12.2.

В идеале полосовой фильтр должен иметь П-образную характеристику $K = K(\omega)$, и линейную характеристику $\varphi = \varphi(\omega)$ (рис. 1.15.2 и 3). Для получения П-образной зависимости $K = K(\omega)$ применяют индуктивно связанные контуры, представляющие собой два колебательных контура, катушки индуктивности которых находятся на одном сердечнике (рис. 2.13.1). График зависимости $K = K(\omega)$ изображен на рис. 2.13.2.

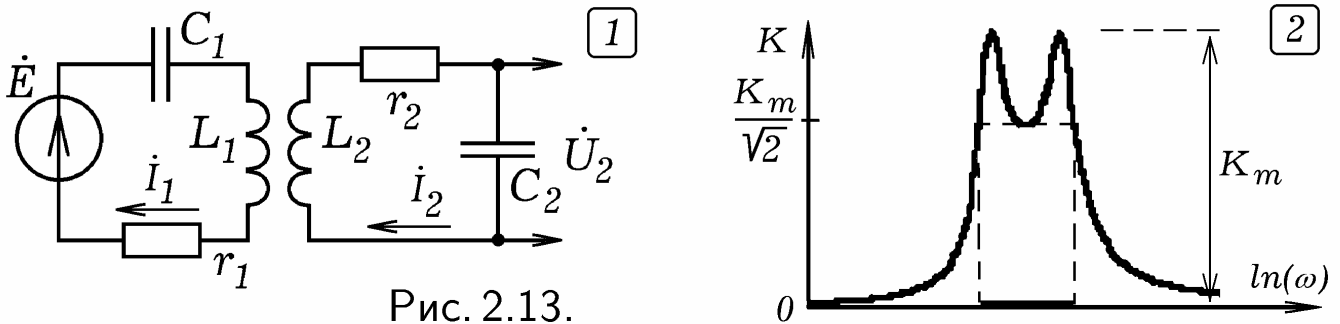


Рис. 2.13.

Чтобы сгладить пульсации выпрямленного напряжения используют сглаживающие фильтры. **Индуктивный фильтр** состоит из катушки индуктивности, включенной последовательно с нагрузкой (рис. 2.14.1). Величина L должна быть такой, что $X_L = \omega L \gg R$. Тогда катушка оказывает большое индуктивное сопротивление переменной составляющей тока, пропуская его постоянную составляющую. **Емкостный фильтр** состоит из конденсатора, включенного параллельно нагрузке (рис. 2.14.2). Емкость конденсатора C должна быть настолько большой, что $X_C = 1/\omega C \ll R$. При этом конденсатор шунтирует нагрузку по переменной составляющей тока, пропуская ее через себя. Постоянный ток идет через нагрузку. **П-образный фильтр** состоит из двух конденсаторов и катушки индуктивности (рис. 2.14.3).

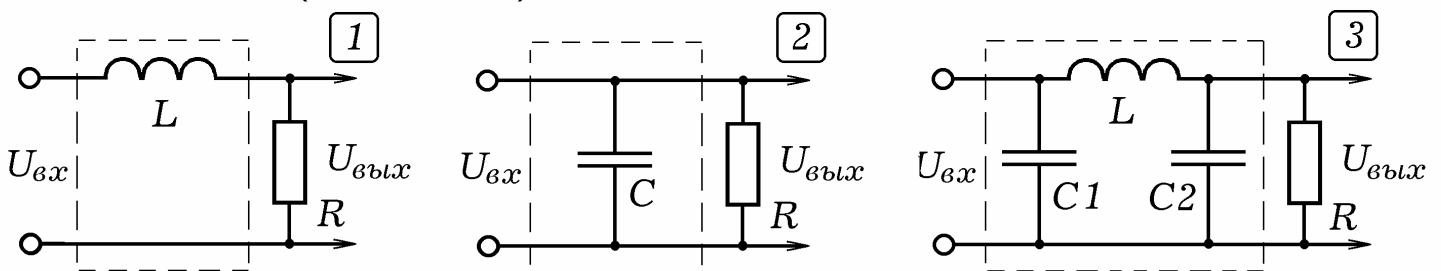


Рис. 2.14.

2.5. ИНТЕГРИРУЮЩИЕ И ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ ЦЕПИ.

Последовательно соединим резистор, конденсатор и подключим их к генератору импульсов. Напряжение на конденсаторе (рис. 2.15.1) пропорционально интегралу от входного напряжения $u_{вх}$. Если выходное напряжение

$u_{\text{ВЫХ}}$ снимать с резистора (рис. 2.15.2), то оно оказывается пропорциональным производной от входного напряжения $u_{\text{ВХ}}$ по времени.

Рассмотрим **интегрирующую цепь**, на которую поступают импульсы напряжения с частотой ω (рис. 2.15.1). По второму закону Кирхгофа $u_{\text{ВХ}}(t) = u_R + u_C = iR + q/C$. Если частота достаточно велика ($\omega \gg 1/RC$), то емкостным сопротивлением можно пренебречь: $u_{\text{ВХ}}(t) \approx iR$ и $i = u_{\text{ВХ}}(t)/R$. Выходное напряжение равно:

$$u_{\text{ВЫХ}} = u_C = \frac{1}{C} \int \frac{u_{\text{ВХ}}}{R} dt = \frac{1}{RC} \int u_{\text{ВХ}} dt.$$

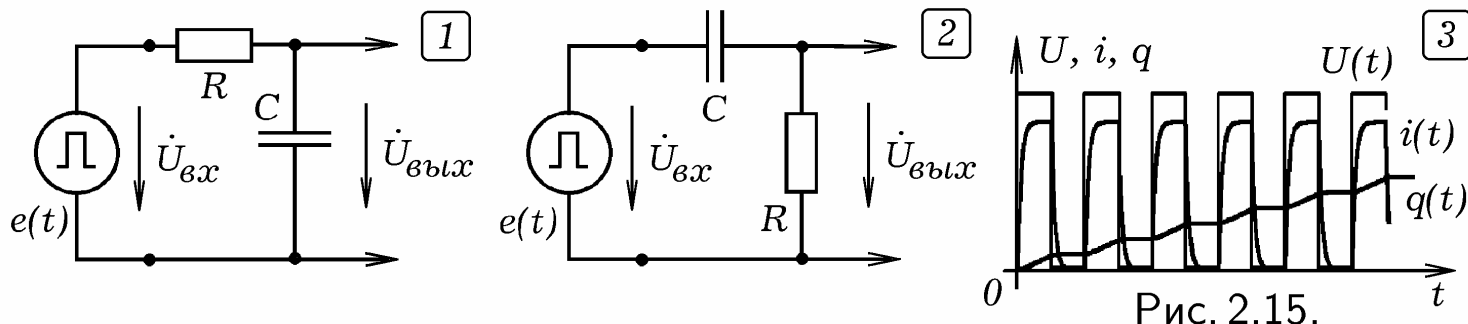


Рис. 2.15.

Коэффициент передачи интегрирующей цепи

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC}.$$

При поступлении на вход интегрирующей цепи прямоугольных импульсов, заряд конденсатора q и выходное напряжение $u_{\text{ВЫХ}} = q/C$ растут пропорционально числу импульсов (рис. 2.15.3).

Проанализируем **дифференцирующую цепь** (рис. 2.15.2). По второму закону Кирхгофа $u_{\text{ВХ}}(t) = u_R + u_C = iR + q/C$. Если частота достаточно мала ($\omega \ll 1/RC$), то сопротивлением R можно пренебречь: $u_{\text{ВХ}}(t) \approx q/C$ и $i = dq/dt = C du_{\text{ВХ}}/dt$. Выходное напряжение равно:

$$u_{\text{ВЫХ}} = u_R = iR = RC \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Дифференцирующая цепь имеет коэффициент передачи

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{R}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + 1/j\omega CR}.$$

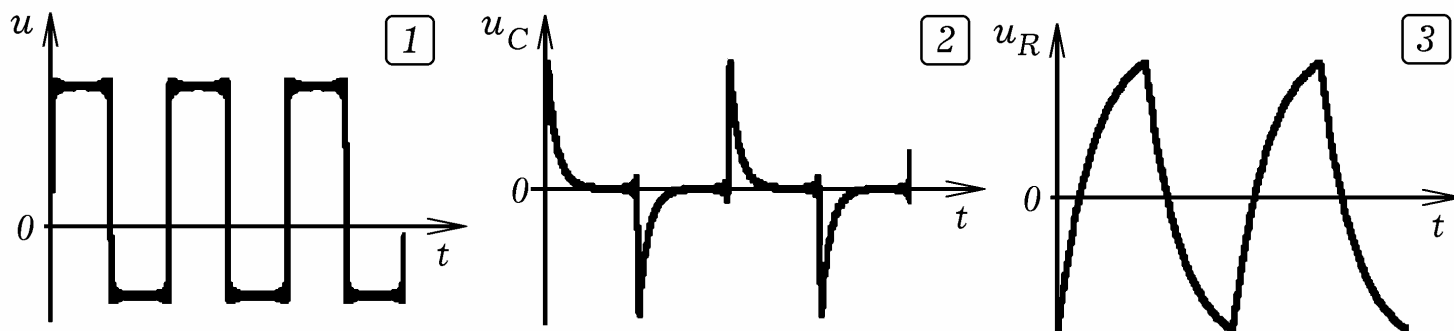


Рис. 2.16.

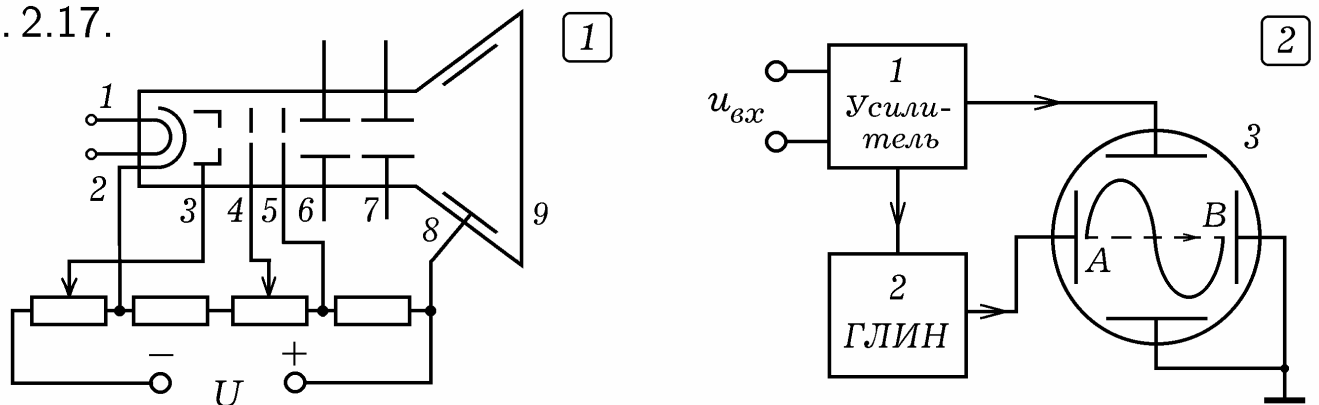
При подаче прямоугольных импульсов (рис. 2.16.1) на дифференцирующую и интегрирующую цепи напряжение на их выходах изменяется так, как показано на рис. 2.16.2 и 2.16.3 соответственно.

2.6. СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ.

Для обработки информации необходимо уметь ее сохранять. Для этого применяются запоминающие устройства (ЗУ), способные записывать и сохранять аналоговые и цифровые сигналы. Кроме того, в электронных приборах широко используются устройства отображения информации: различные индикаторы, мониторы, дисплеи. Познакомимся с принципами регистрации и отображения сигналов.

Устройства записи аналоговой информации подразделяются на следующие классы: **1. Приборы прямого преобразования:** входной сигнал непосредственно воздействует на регистрирующий орган (осциллограф, магнитофон). **2. Приборы со следящим преобразованием:** на регистрирующий орган воздействует не входной сигнал, а рассогласование между входным и вспомогательным (компенсирующим) сигналом (устройство, поворачивающее телескоп вслед за движением звезды по небесной сфере); **3. Приборы развертывающего преобразования:** компенсирующий сигнал с высокой частотой периодически изменяется во всем диапазоне, и в момент совпадения компенсирующего сигнала со входным, формируется импульс, который поступает на регистрирующий орган. Существуют три группы способов регистрации сигнала: 1) нанесение слоя вещества (самописец); 2) деформация или снятие слоя вещества (звукозапись на грампластинку); 3) изменение состояния вещества носителя (фотобумага, лазерный диск, магнитная пленка).

Рис. 2.17.



Осциллографический метод регистрации сигналов позволяет получить **осциллограмму** — график зависимости напряжения от времени. При этом используется **электронно-лучевая трубка (ЭЛТ)** — стеклянный вакуумированный баллон 9 с экраном, который изнутри покрыт люминофором (рис. 2.17.1). В задней части ЭЛТ имеется электронный прожектор, состоящий из нити накала 1, катода 2, управляющего (модулирующего) электрода 3, двух анодов 4 и 5 с отверстием в центре. Для фокусировки электронного пучка изменяют потенциал анода 4. Управление движением электронного пучка осуществляется с помощью вертикально и горизонтально отклоняющих пластин 6 и 7. Вертикально отклоняющие пластины расположены горизонтально, а горизонтально отклоняющие — вертикально. На аквадаг 8 подается положительный потенциал; на нем оседают электроны, отраженные от экраном.

Электронный осциллограф состоит из усилителя 1, генератора

линейно-импульсного (пилообразного) напряжения 2 и электронно-лучевой трубки 3 (рис. 2.17.2). Генератор вырабатывает пилообразное напряжение, которое подается на горизонтально отклоняющие пластины. При этом электронный луч равномерно перемещается слева направо, затем быстро возвращается обратно. Исследуемый сигнал $u = u(t)$ усиливается и подается на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. В результате на горизонтальное равномерное движение луча накладываются колебания по вертикали, происходящие в такт с колебаниями исследуемого напряжения. На экране ЭЛТ получается график $u = u(t)$.

Измеритель частотных характеристик (рис. 2.18.1) позволяет исследовать зависимость коэффициента передачи цепи $K = U_{m2}/U_{m1}$ от частоты. Сигнал с генератора линейно-импульсного напряжения (ГЛИН) 1 подается на управляющий вход генератора качающейся частоты (ГКЧ) 2 и на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ 5. ГКЧ вырабатывает колебания постоянной амплитуды U_{m1} , частота которых медленно возрастает пропорционально времени от f_1 до f_2 , резко уменьшается до f_1 , затем снова равномерно возрастает до f_2 и т.д. Исследуемая цепь 3 пропускает колебания определенных частот на вход выпрямителя 4, который преобразует их в постоянное напряжение, пропорциональное U_{m2} , и подает его на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ 5. Луч на экране ЭЛТ вырисовывает кривую $K = K(f)$.

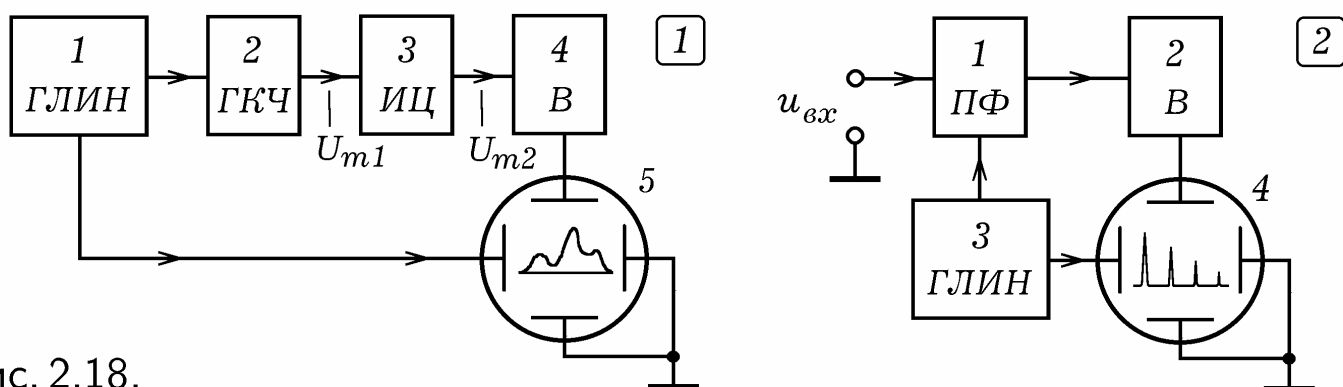


Рис. 2.18.

Анализатор спектра (рис. 2.18.2) используется для спектрального анализа негармонического сигнала $u(t)$, определения амплитуды гармоник U_{mi} , где $i = 1, 2, \dots$. Исследуемый сигнал $u(t)$ подается на перестраиваемый фильтр (ПФ) 1, пропускающий колебания определенной частоты f . Генератор линейно-импульсного напряжения (ГЛИН) 3 управляет фильтром ПФ, перестраивая его частоту пропускания f так, чтобы она медленно увеличивалась от f_1 до f_2 пропорционально времени, затем резко уменьшалась до f_1 , снова равномерно возрастала до f_2 и т.д. Сигнал с ГЛИН подается на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ. Колебания с выхода ПФ преобразуются выпрямителем 2 в постоянное напряжение, которое подается на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ 4. При совпадении частоты f пропускания ПФ с частотами первой, второй и следующих гармоник на выпрямитель поступают колебания соответствующей амплитуды. На экране получается амплитудо-частотный спектр сигнала $u_{вх}(t)$.

3. ПРИНЦИПЫ РАДИО- И ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СВЯЗИ

3.1. РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ СВЯЗИ. Способ передачи информации зависит от уровня технического прогресса. Различают проводную связь (информация переносится импульсом тока), радиосвязь (посредством радиоволн) и оптическую связь (с помощью световых волн). Для передачи сообщений, закодированных азбукой Морзе, используют **телеграфную связь**, для передачи звуков — **телефонную связь**, для передачи изображений **телевизионную** или **видеосвязь**.

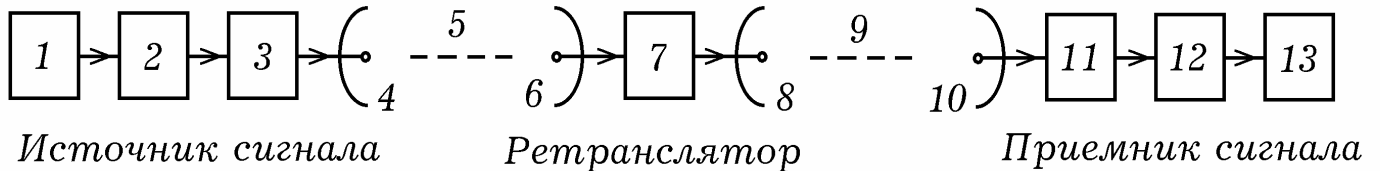


Рис. 3.1.

В общем случае **система передачи информации** состоит из источника сигналов, линии связи, ретранслятора, приемника сигналов (рис. 3.1). Источник сигналов включает в себя датчик 1, преобразователь 2, усилитель 3, передающее устройство 4 (антенна, светоизлучающий элемент). Ретранслятор состоит из приемного устройства 6 (антенна, фотодатчик), усилителя 7 и передающего устройства 8. Приемник сигналов имеет приемное устройство 10, усилитель 11, дешифратор 12, устройство вывода информации 13 (динамик, дисплей). Каналом связи 5 и 9 могут являться провода, передающие электрический сигнал, окружающее пространство, по которым распространяются радиоволны, прозрачная среда или оптоволоконный кабель, передающие световые сигналы.

Рассмотрим передачу сообщений (сигналов) по проводам. Информационная система при этом состоит из передающего устройства, линии связи (двух проводников), и приемного устройства. В простейшем случае передающим устройством является источник напряжения и ключ, а принимающим — лампочка или звонок. С помощью азбуки Морзе или аналогичного способа кодирования букв и их сочетаний можно передать закодированное сообщение. При этом используются цифровые сигналы, связь называется **телеграфной**.

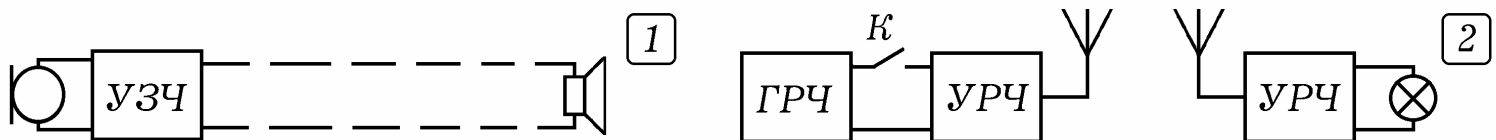


Рис. 3.2.

Позже телеграфные аппараты были усовершенствованы до **телетайпов** содержащих клавиатуру, печатающий механизм и устройство, осуществляющее автоматическое кодирование и декодирование сообщений. При отправке телеграммы пользователь набирает текст на клавиатуре, телетайп осуществляет кодирование сообщения и выдает цифровой сигнал в линию связи. Телетайп, принимающий сообщение, автоматически декодирует поступающий сигнал и печатает текст на листе бумаги.

Телефонная проводная связь реализуется с помощью микрофона, усилителя, двухпроводной линии связи и динамика или телефона. Микрофон преобразует звуковые колебания в колебания напряжения. Получающийся при этом аналоговый сигнал усиливается усилителем и посылается в линию связи. Динамик осуществляет преобразование электрических колебаний в звуковые.

Оптическая связь заключается в передаче информации с помощью света через прозрачную среду или по световоду. *Телеграфная оптическая связь* — передаваемое сообщение кодируется с помощью азбуки Морзе (точка–тире) или аналогичным способом и представляется в виде последовательности электрических импульсов. Передающее устройство имеет светоизлучающий элемент, посылающий световые импульсы на фотоэлемент удаленного приемника. На выходе фотоэлемента появляются импульсы напряжения, которые усиливаются, декодируются и поступают на регистрирующее устройство.

Телефонная оптическая связь может быть организована следующим образом. Сигнал с микрофона усиливается и подается на устройство, модулирующее световой пучок так, чтобы его интенсивность изменялась в такт со звуковыми колебаниями, несущими информацию. Этот световой пучок освещает фотоэлемент приемника, который преобразует изменения интенсивности в соответствующие изменения напряжения. Сигнал демодулируется, усиливается и подается на динамик.

Система радиопередачи включает в себя одну или несколько радиопередающих станций и радиоприемник. Если низкочастотный сигнал с микрофона усилить и подать на антенну, то осуществить передачу радиосообщения на достаточно большое расстояние не удастся потому, что: 1) электромагнитные волны звуковой частоты (ниже 20 кГц) плохо излучаются, так как интенсивность радиоволны пропорциональна четвертой степени частоты; 2) при наличии двух или более передатчиков сигналы будут глушить друг друга, отфильтровать их невозможно.

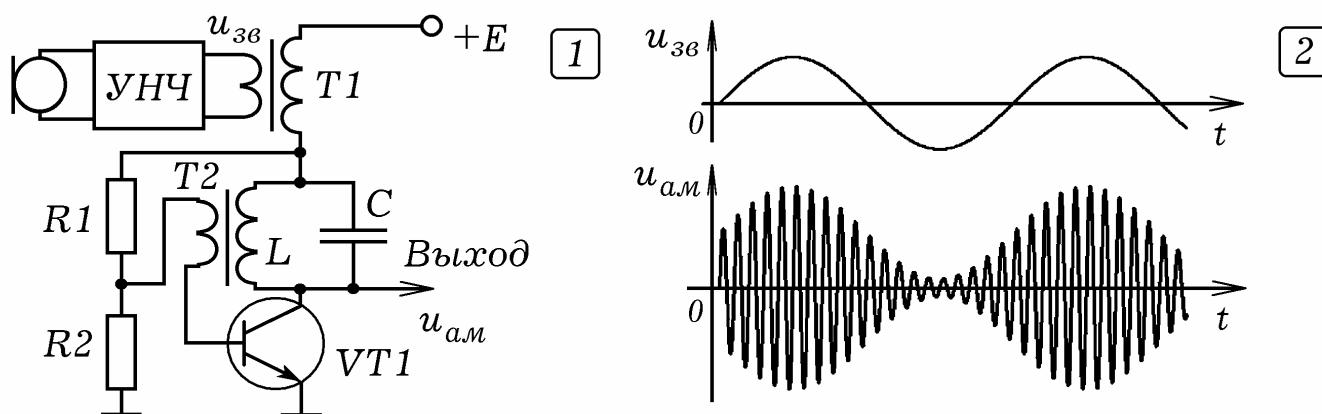


Рис. 3.3.

Поэтому используется **принцип частотного разделения**: каждая радиостанция работает на своей несущей частоте f_n . В передатчике низкочастотный сигнал с микрофона накладывается на колебания высокой частоты f_n . В результате модуляции происходят изменения амплитуды или частоты высокочастотных колебаний в такт с низкочастотными. Эти высокочастотные колебания усиливаются и излучаются антенной в про-

странство. Антенна радиоприемника воспринимает сигналы от всех радиостанций. С помощью резонансного фильтра выделяются колебания определенной частоты, на которой работает данный передатчик. С помощью детектора осуществляется детектирование — процесс, обратный модуляции, то есть выделение низкочастотного сигнала из модулированного сигнала высокой частоты.

3.2. МОДУЛЯЦИЯ. Наложение сигнала, несущего информацию, на колебания высокой частоты называется модуляцией. В результате **амплитудной модуляции** происходит изменение амплитуды несущих колебаний высокой частоты в соответствии с низкочастотным сигналом, который переносит информацию. **Коллекторная модуляция** осуществляется с помощью схемы на рис. 3.3.1. **Модулятор** представляет собой генератор колебаний, работающий на высокой частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Последовательно с источником включена вторичная обмотка трансформатора Т1. На его первичную обмотку подается низкочастотный сигнал (например, гармонические колебания звуковой частоты). Так как амплитуда колебаний на выходе генератора с ростом потенциала точки А увеличивается, то в результате получают высокочастотные колебания, амплитуда которых изменяется в такт с модулирующим сигналом (рис. 3.3.2).

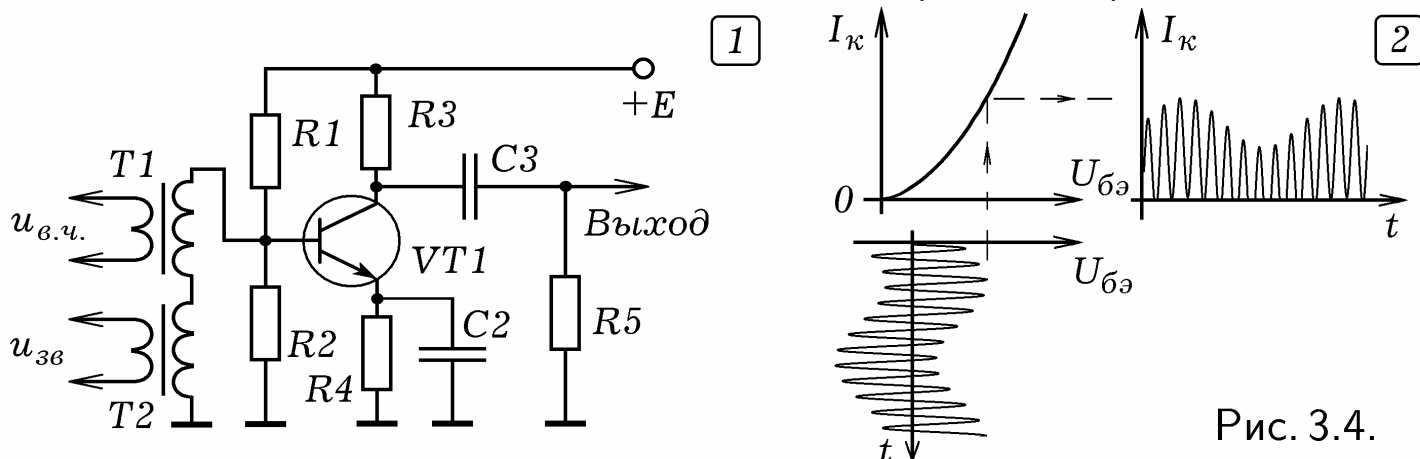


Рис. 3.4.

Схема, позволяющая осуществить **базовую модуляцию**, изображена на рис. 3.4.1. Высокочастотные несущие колебания и низкочастотный сигнал, передающий информацию, подаются на первичные обмотки трансформаторов Т1 и Т2. Их вторичные обмотки соединены последовательно, поэтому на базу транзистора поступает результат сложения двух колебаний, частоты которых сильно отличаются. Напряжение смещения, задаваемое резисторами R1 и R2, подобрано так, чтобы на выходе транзистора получалась последовательность импульсов, амплитуда которых изменяется в такт с низкочастотными колебаниями. Это хорошо видно из рис. 3.4.2, на котором показана управляющая характеристика транзистора $I_k = f(U_{бэ})$, входной и выходной сигналы.

Пусть несущие колебания описываются функцией: $u(t) = U_m \cos \omega_0 t$, а модулирующий низкочастотный сигнал: $u_c(t) = U_{mc} \cos \Omega t$, где $\Omega < \omega_0$. При амплитудной модуляции низкочастотный сигнал воздействует на амплитуду несущих колебаний так, что она изменяется по закону:

$$U_m(t) = U_0 + u_c(t) = U_0(1 + m \cos \Omega t), \text{ где}$$

$$m = \frac{kU_{mc}}{U_0} = \frac{U_{m,max} - U_{m,min}}{U_{m,max} + U_{m,min}} \text{ — коэффициент модуляции.}$$

Амплитудно-модулированные колебания описываются уравнением:

$$u_{AM}(t) = U_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t, \quad (\Omega < \omega_0).$$

$$u_{AM}(t) = U_0 \cos \omega_0 t + 0,5mU_0 \cos(\omega_0 - \Omega)t + 0,5mU_0 \cos(\omega_0 + \Omega)t.$$

Их спектр состоит из трех гармонических составляющих с несущей частотой ω_0 , боковыми частотами $\omega_0 - \Omega$, $\omega_0 + \Omega$ и амплитудами U_0 и $0,5mU_0$. Если модулирующий сигнал не является гармоническим, то его раскладывают в ряд Фурье:

$$u_c(t) = \sum_{i=1}^N U_{ci} \cos(\Omega_i t + \varphi_i).$$

Тогда амплитудно-модулированный сигнал описывается функцией:

$$u_{AM}(t) = U_0(1 + m \sum_{i=1}^N U_{ci} \cos(\Omega_i t + \varphi_i)) \cos \omega_0 t.$$

Для **частотной модуляции** используют **варикап** — полупроводниковый прибор с одним р-п-переходом, емкость которого зависит от обратного напряжения. Варикап включают в колебательный контур генератора высокочастотных колебаний. При подаче на варикап низкочастотного модулирующего напряжения $u_c(t) = U_{mc} \cos \Omega t$ происходят соответствующие изменения частоты колебаний на выходе генератора:

$$\omega(t) = \omega_0 + k u_c(t) = \omega_0 + k U_{mc} \cos \Omega t = \omega_0 + \Delta \omega \cos \Omega t.$$

где $\Delta \omega$ — девиация (максимальное отклонение) частоты. Частотно-модулированный сигнал имеет более высокую помехоустойчивость по сравнению с амплитудно-модулированным сигналом. Так же существуют фазовая, широтно-импульсная, частотно-импульсная модуляции.

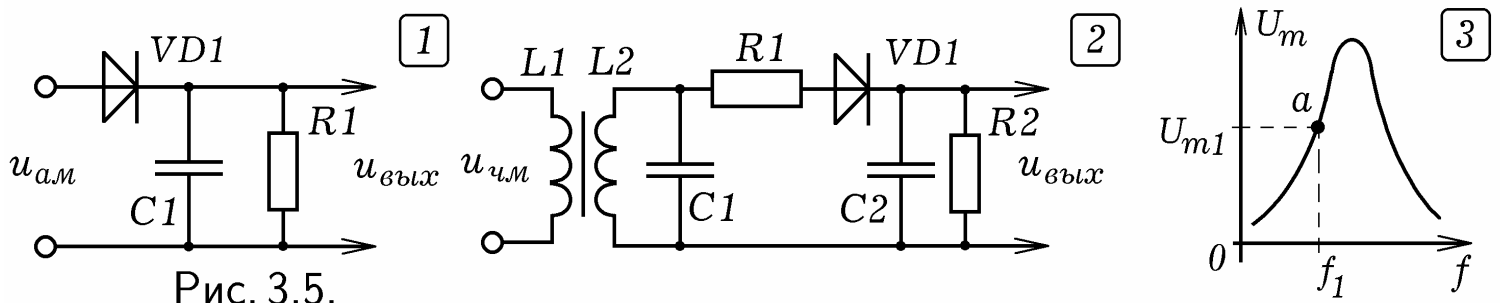


Рис. 3.5.

3.3. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ. Процесс, обратный модуляции, в результате которого из модулированного сигнала выделяется сигнал, несущий информацию, называется **детектированием**. Простейший **амплитудный детектор** представляет собой полупроводниковый диод и параллельно соединенные резистор и конденсатор (рис. 3.5.1). Диод пропускает ток только от анода к катоду и как бы обрезает отрицательную половину амплитудно-модулированного сигнала. Конденсатор выполняет роль

фильтра, шунтируя резистор по переменной составляющей высокой частоты. Переменный ток идет через конденсатор, а через резистор течет медленно изменяющийся ток. На нем возникает напряжение, форма которого повторяет модулирующий низкочастотный сигнал.

Частотный детектор (рис. 3.5.2) состоит из параллельного колебательного контура на L_2 и C_1 , преобразующего изменения частоты в изменения амплитуды колебаний, и амплитудного детектора (VD_1, C_2, R_2). Собственная частота контура должна несколько отличаться от средней частоты частотно-модулированного сигнала так, чтобы соответствующая ей рабочая точка a находилась на прямолинейном участке резонансной кривой контура (рис. 3.5.3). Тогда увеличение частоты сигнала приведет к росту амплитуды, а уменьшение частоты — к уменьшению амплитуды колебаний напряжения, снимаемого с колебательного контура. В результате частотно-модулированный сигнал преобразуется в амплитудно-модулированный сигнал, который подается на амплитудный детектор, который выделяет низкочастотный сигнал, несущий информацию.

3.4. РАДИОПЕРЕДАТЧИК И РАДИОПРИЕМНИК. **Радиопередатчик** состоит из микрофона 1, усилителя звуковой частоты 2, генератора колебаний несущей частоты 3, модулятора 4, усилителя радиочастоты 5 и излучающей антенны 6 (рис. 3.6.1). Низкочастотный сигнал с микрофона усиливается услителем звуковой частоты и смешивается в модуляторе с высокочастотными колебаниями, вырабатываемыми генератором. Получающийся амплитудно-модулированный сигнал усиливается УРЧ и излучается антенной. Каждый радиопередатчик работает на своей уникальной частоте несущих колебаний. Весь частотный диапазон разбит на 4 поддиапазона: длинные (километровые) волны ДВ (λ от 10^3 до 10^4 м); средние (гектометровые) волны СВ (λ от 10^2 до 10^3 м); короткие (декаметровые) волны КВ (λ от 10 до 10^2 м); ультракороткие (метровые) волны УКВ (λ от 1 до 10 м). Иногда выделяют дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны.

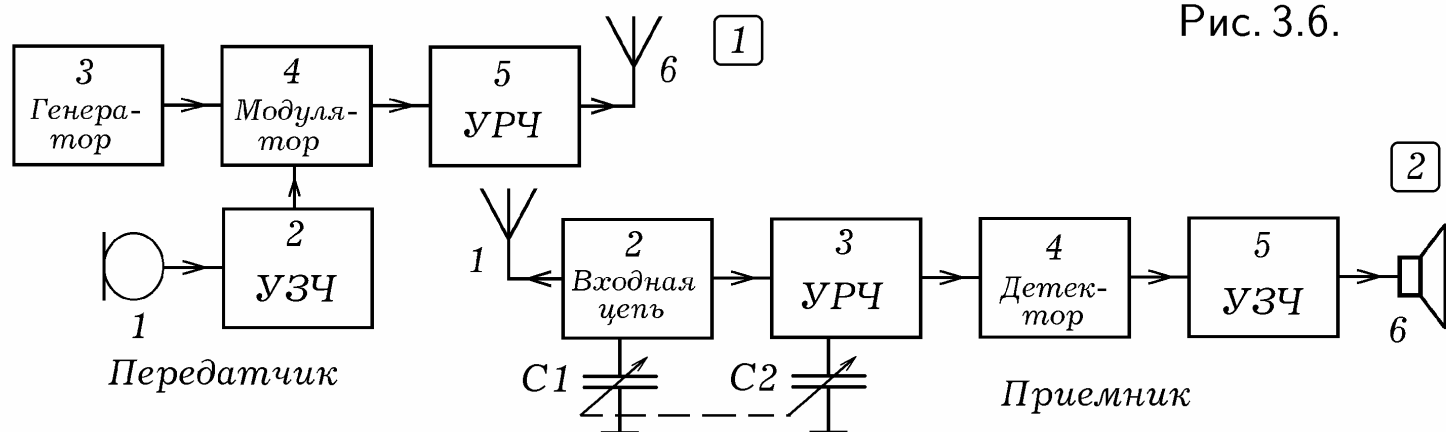


Рис. 3.6.

Радиоприемник прямого усиления состоит из приемной антенны 1, входной цепи 2, усилителя радиочастоты 3, детектора 4, усилителя звуковой частоты 5, динамика 6 (рис. 3.6.2). Радиоволны, достигнув антенны, вызывают вынужденные колебания электронов, в ней возникает высокочастотный ток. Входная цепь содержит регулируемый резонансный фильтр, пропускающий колебания узкого диапазона частот, что позволя-

ет настроить приемник на частоту, соответствующую тому или иному радиопередатчику. Сигнал усиливается УРЧ и поступает на детектор. В результате детектирования происходит выделение из модулированного высокочастотного сигнала низкочастотных колебаний, которые несут информацию. Эти колебания усиливаются УЗЧ и подаются на динамик.

Принципиальная схема транзисторного **радиоприемника прямого усиления** приведена на рис. 3.7.1. Входная цепь содержит параллельный колебательный контур с конденсатором переменной емкости C_1 , позволяющим настраивать радиоприемник на ту или иную радиостанцию. На транзисторах VT_1 и VT_2 собраны однокаскадные усилители радиочастоты и звуковой частоты. Детектирование амплитудно-модулированного сигнала осуществляется с помощью диода VD_1 . На рис. 3.7.2 представлена схема **детекторного приемника**.

Недостатки приемника прямого усиления: 1) низкая чувствительность (при повышении коэффициента усиления в перенастраиваемом по частоте усилителе возникает самовозбуждение); 2) чувствительность сильно зависит от частоты; 3) частоты близких станций не различаются; на высоких частотах приемник теряет избирательные свойства и не ловит радиостанции в КВ и УКВ диапазонах; 4) АЧХ резонансного усилителя с одним колебательным контуром далека от П-образной формы.

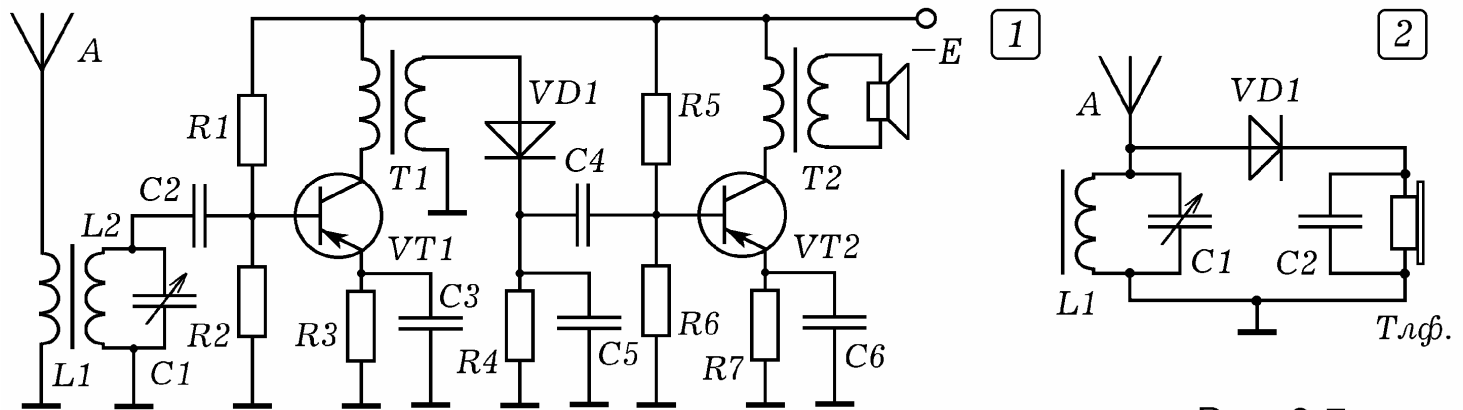


Рис. 3.7.

3.5. ПРИЕМНИК-СУПЕРГЕТЕРОДИН. Основными недостатками приемника прямого усиления являются плохая избирательная способность и невысокая чувствительность, сильно зависящая от частоты. Из-за этого он не может работать в диапазоне коротких волн. От перечисленных недостатков свободен более сложный **приемник-супергетеродин**.

Представим себе, что колебания несущей частоты f_n , воспринимаемые приемной антенной, преобразуются в колебания промежуточной частоты $f_{пч}$, которые поступают в усилитель промежуточной частоты УПЧ, имеющий высокий коэффициент усиления и очень узкую полосу пропускания. Такое преобразование осуществляется путем смешивания воспринимаемых колебаний несущей частоты f_n с колебаниями гетеродина (генератора регулируемой частоты), имеющими частоту f_r .

В результате наложения двух колебаний с частотами f_n , f_r получаются биения с частотой $|f_n - f_r|$. Пусть две станции работают на частотах $f_{n1} = 30,2$ МГц и $f_{n2} = 30,5$ МГц, относительная расстройка составляет $\Delta f/f = |f_{n2} - f_{n1}|/f_{n1} = |30,5 - 30,2|/30,2 \approx 0,01$ то есть 1 %. Поло-

са пропускания колебательного контура 2–5 %, поэтому он не сможет их отфильтровать. Приемник прямого усиления усилит оба сигнала; один из них будет помехой для другого.

Пусть в супергетеродине принимаемые антенной сигналы с частотами $f_{н1}$ и $f_{н2}$ смешиваются с колебаниями гетеродина с частотой $f_{г} = 30$ МГц. В результате получаются колебания $f'_1 = 0,2$ МГц и $f'_2 = 0,5$ МГц, их относительная расстройка $\Delta f/f = |f'_2 - f'_1|/f_{ср} = |0,5 - 0,2|/0,35 \approx 0,9$ то есть около 90 %. Такие колебания могут быть легко отфильтрованы.

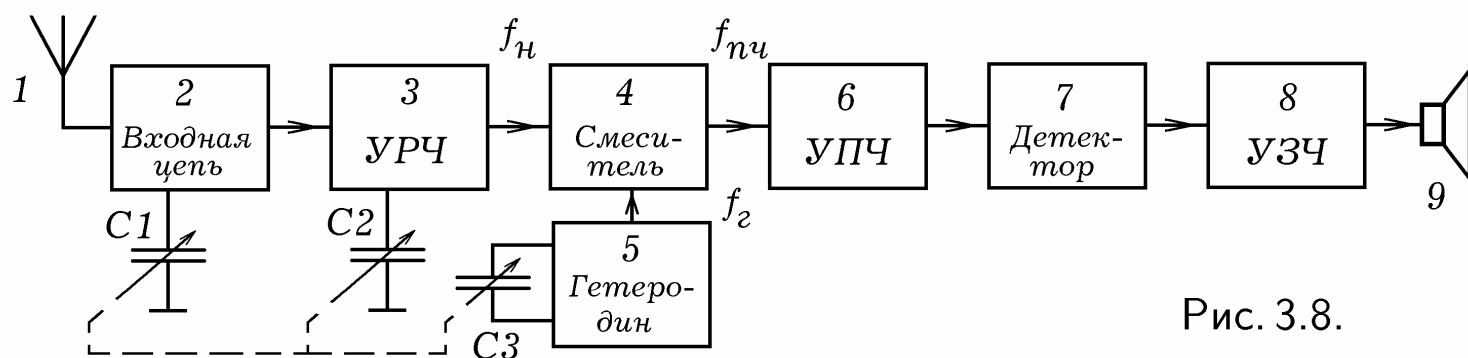


Рис. 3.8.

Блок-схема **приемника-супергетеродина** изображена на рис. 3.8. Сигналы с антенны 1 проходят через входную цепь 2, усиливаются усилителем радиочастоты 3 и поступают в смеситель 4, в котором они складываются с колебаниями гетеродина 5 регулируемой частоты $f_{г}$. В результате сложения колебаний с частотой несущей $f_{н}$ и колебаний с частотой $f_{г}$ получаются биения частотой $|f_{н} - f_{г}|$. Они поступают на вход усилителя промежуточной частоты 6, который имеет высокий коэффициент усиления на промежуточной частоте $f_{пч}$ и острую АЧХ.

Таким образом, через УПЧ проходит сигнал с частотой $f_{пч}$, который несет информацию от радиостанции работающей на такой частоте $f_{н}$, что $|f_{г} - f_{н}| = f_{пч}$. Настройка супергетеродина на другую радиостанцию осуществляется путем регулировки частоты гетеродина (изменяется емкость и индуктивность его колебательного контура). Сигнал, усиленный УПЧ, подается на детектор 7. После детектирования получают низкочастотные колебания, которые поступают на усилитель звуковой частоты 8 с динамиком 9 на выходе.

Преимущества приемника-супергетеродина: 1) высокая избирательная способность; 2) так как УПЧ работает на фиксированной частоте, то в качестве фильтра с П-образной характеристикой можно использовать связанные контуры; 3) при фиксированной частоте сигнала легче повысить коэффициент усиления без самовозбуждения УРЧ и УПЧ; 4) чувствительность не зависит от несущей частоты.

Основные недостатки приемника-супергетеродина состоят в следующем: 1. Существуют две радиостанции с частотами $f'_н = f_{г} - f_{пч}$ и $f''_н = f_{г} + f_{пч} = f'_н + 2f_{пч}$, удовлетворяющие условию $|f_{г} - f_{н}| = f_{пч}$; сигналы от них проходят через УПЧ. Сигнал с частотой $f''_н$ называется **зеркальной помехой**, он подавляется резонансными фильтрами во входной цепи и УРЧ. Чтобы $f'_н$ и $f''_н$ сильно отличались, промежуточная частота $f_{пч}$ должна быть достаточно большой. 2. Если частота сигнала

от радиостанции равна промежуточной частоте, то УПЧ его тоже усилит и он создаст **помеху прямого прохождения**. Чтобы этого избежать, во входной цепи приемника ставят заградительный фильтр–пробку, который не пропускает колебания промежуточной частоты. Кроме того, промежуточная частота выбирается в окне между диапазонами ДВ и СВ (на ней радиостанции не работают) и составляет 465 кГц.



Рис. 3.9.

3.6. ПРИНЦИПЫ ТЕЛЕВИДЕНИЯ. Телевидение — передача изображения движущихся объектов на большое расстояние. Представим себе источник сигнала — двумерную матрицу светочувствительных элементов 3, на которые с помощью объектива 2 проецируется изображение движущегося предмета 1 (рис. 3.9). Каждый светочувствительный элемент соединен отдельным каналом связи 4 с соответствующим светоизлучающим элементом приемника 5. При перемещении изображения объекта по светочувствительной матрице и сигналы передаются на приемник.

Для передачи черно–белого изображения не очень высокого качества, например, разрешением 640×480 , необходимо $640 \cdot 480 \approx 3 \cdot 10^5$ каналов связи. Такой параллельный способ передачи информации представляет определенные технические трудности и экономически не выгоден. Поэтому используют один канал связи, к которому последовательно ”подключают” соответствующие светочувствительный и светоизлучающий элементы, расположенные на источнике и приемнике телевизионного сигнала. При таком последовательном способе передачи информации реализуется **принцип временного разделения канала связи**.

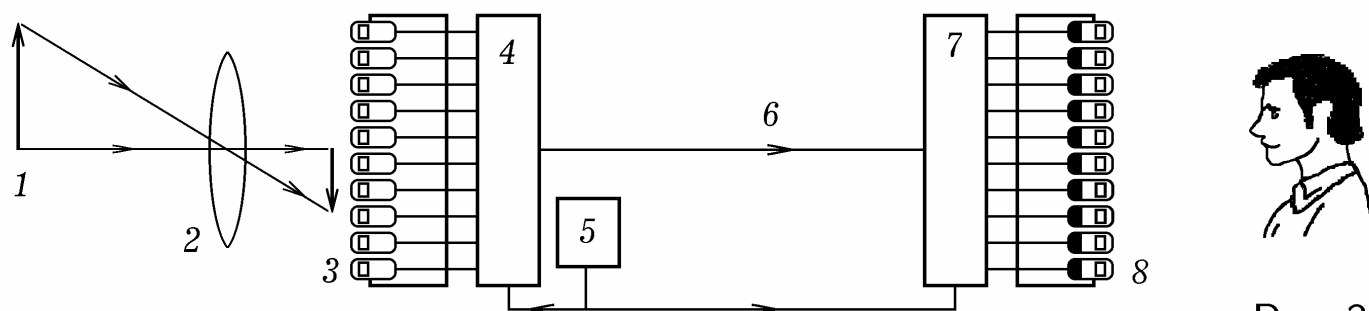


Рис. 3.10.

Итак, для передачи изображения движущихся объектов используется матрица светочувствительных элементов 3, мультиплексор 4, канал связи 6, демультиплексор 7, матрица светоизлучающих элементов 8, а также генератор тактовых импульсов 5, синхронизирующий работу мультиплексора и демультиплексора (рис. 3.10). Генератор вырабатывает тактовые импульсы, которые подсчитываются счетчиками и подаются на адресные входы мультиплексора и демультиплексора (п. 4.8). В результате про-

исходит коммутация соответствующих светочувствительного и светоизлучающего элементов через канал связи. Частота переключений должна быть такой, чтобы время передачи одного кадра было бы не более $1/25$ с, — в этом случае человек не заметит смены кадров. Рассмотренная схема реализуется в цифровом телевидении, при передаче изображения по компьютерной сети с помощью Web-камеры, при записи изображения в цифровых фото- и видеокамере.

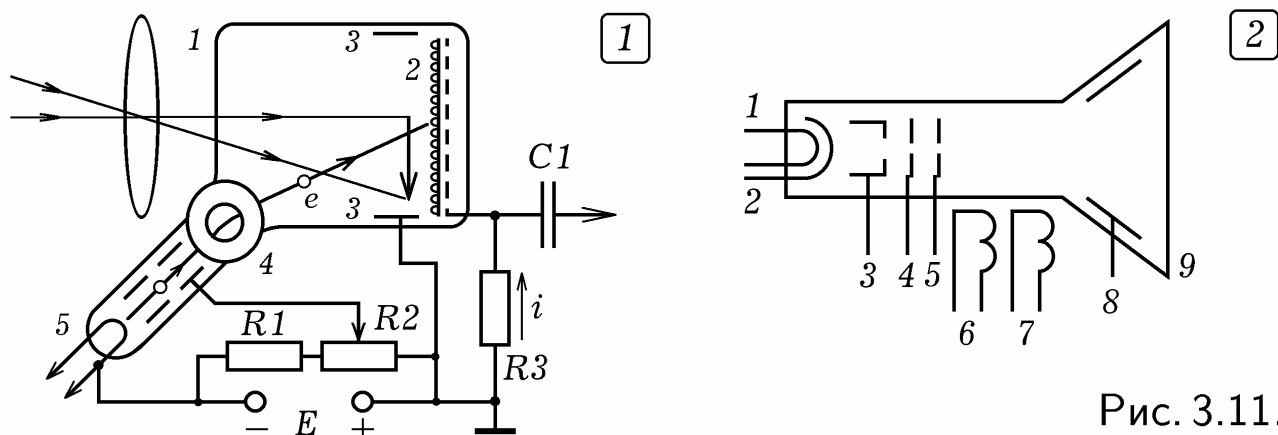


Рис. 3.11.

3.7. ИКОНОСКОП. ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ СИГНАЛ. Передача изображения может быть разложена на три процесса: 1) анализ изображения, то есть его преобразование в видеосигнал (в телевизионном передатчике); 2) передача сигнала по каналу связи; 3) синтез изображения, то есть его получение из электрического сигнала (в приемнике).

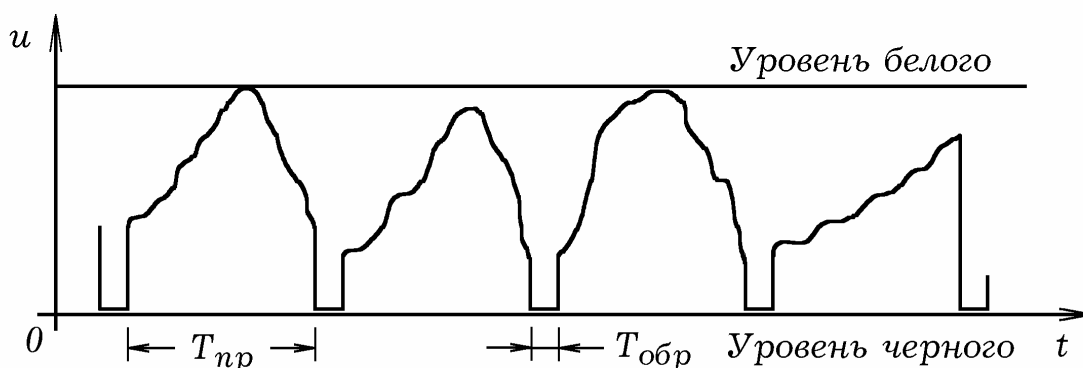


Рис. 3.12.

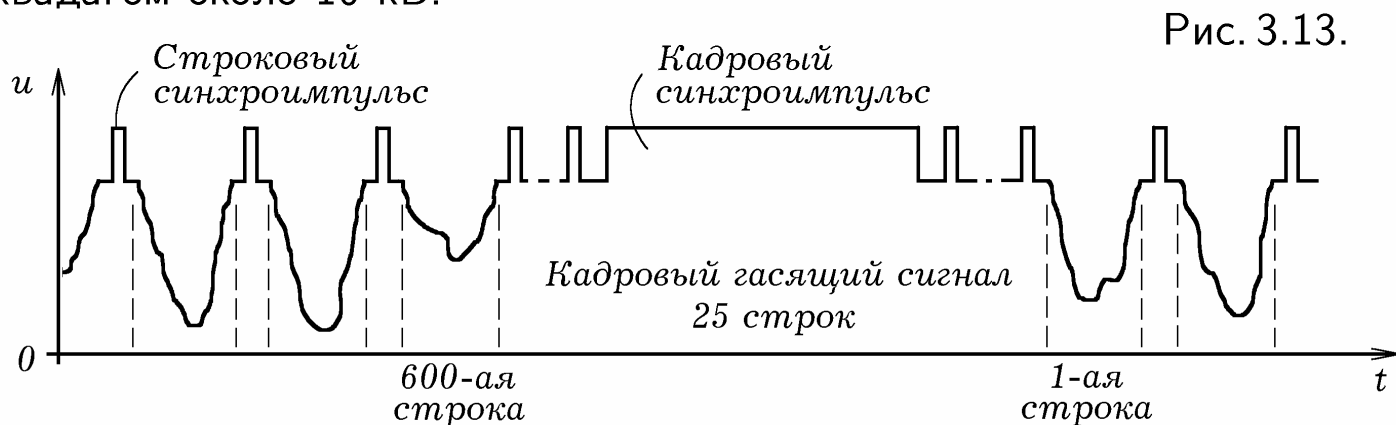
Для преобразования изображения движущегося предмета в последовательность электрических сигналов используются **передающие телевизионные трубки** (икonosкоп, ортикон, видикон и т.д.). **Иконоскоп** состоит из вакуумированного стеклянного баллона 1, сигнальной пластины 2, коллектора 3, магнитной отклоняющей системы 4, электронного прожектора 5 (рис. 3.11.1). Сигнальная пластина выполнена из слюды, на одну сторону которой нанесен слой металла, а на другую — мелкие зерна цезия (металл с малой работой выхода электронов). С помощью объектива изображение предмета фокусируется на сигнальную пластину. Происходит фотоэффект, свет выбивает из зерен электроны, при этом они заряжаются положительно. На сигнальной пластине образуется потенциальный (зарядовый) рельеф, она "запоминает" изображение предмета.

Электронный прожектор посылает электронный пучок, который под действием управляющего магнитного поля вычерчивает на сигнальной пластине **растр** — систему горизонтальных строк. Если зерно освеще-

но, то оно заряжено положительно и захватывает электроны, — через резистор нагрузки течет ток. Для удаления медленных электронов, появляющихся вблизи сигнальной пластины 2 вследствие попадания в нее электронного пучка используется положительно заряженный коллектор 3.

На рис. 3.12 изображена осциллограмма **видеосигнала**, формирующегося на резисторе нагрузки. Пока электронный луч движется в прямом направлении (время T_n), на выходе трубки возникает напряжение, пропорциональное распределению освещенности вдоль соответствующей строки. В течение времени обратного движения луча $T_{обр}$ напряжение обращается в ноль. В результате однократного сканирования всего кадра возникает последовательность N_y импульсов (N_y — число строк), форма которых характеризует распределение освещенности внутри него. **Полный управляющий телевизионный сигнал** включает в себя видеосигнал, строковые и кадровые синхроимпульсы (рис. 3.13). После модуляции получается **телевизионный радиосигнал** (рис. 3.14.1), он и излучается антенной.

Для получения из видеосигнала изображения используется **кинескоп**, в котором управление электронным пучком осуществляется с помощью магнитного поля (рис. 3.11.2). Он состоит из стеклянного вакуумированного баллона 9, нити накала 1, катода 2, модулирующего электрода 3, анода 4, фокусирующего электрода 5, обмоток вертикального и горизонтального отклонения 6 и 7. Внутренняя поверхность баллона вблизи экрана металлизирована и соединена с аквадагом 8. Напряжение между катодом и аквадагом около 10 кВ.



3.8. ПАРАМЕТРЫ ТЕЛЕВИЗИОННОГО СИГНАЛА. В системе телевизионного вещания реализуется принцип частотного разделения. По каналу связи (окружающему пространству) одновременно передается несколько сигналов от различных телевизионных станций, работающих на разных несущих частотах. Переключая телевизионный канал, мы настраиваем телевизор на частоту, соответствующую требуемой телевизионной станции. В **телевизионном передатчике** электронный луч вычерчивает растр, сканируя светочувствительный экран передающей телевизионной трубки, на который проецируется изображение предмета. Считанная информация об освещенности различных точек кадра передается последовательно (принцип временного разделения). В **телевизионном приемнике** электронный луч приемной телевизионной трубки вычерчивает аналогичный растр, изменяя свою "яркость" и формируя изображение. Чтобы синхронизировать работу передающей и принимающей телевизионных

трубок, передаваемый сигнал несет в себе синхроимпульсы строчной и кадровой разверток.

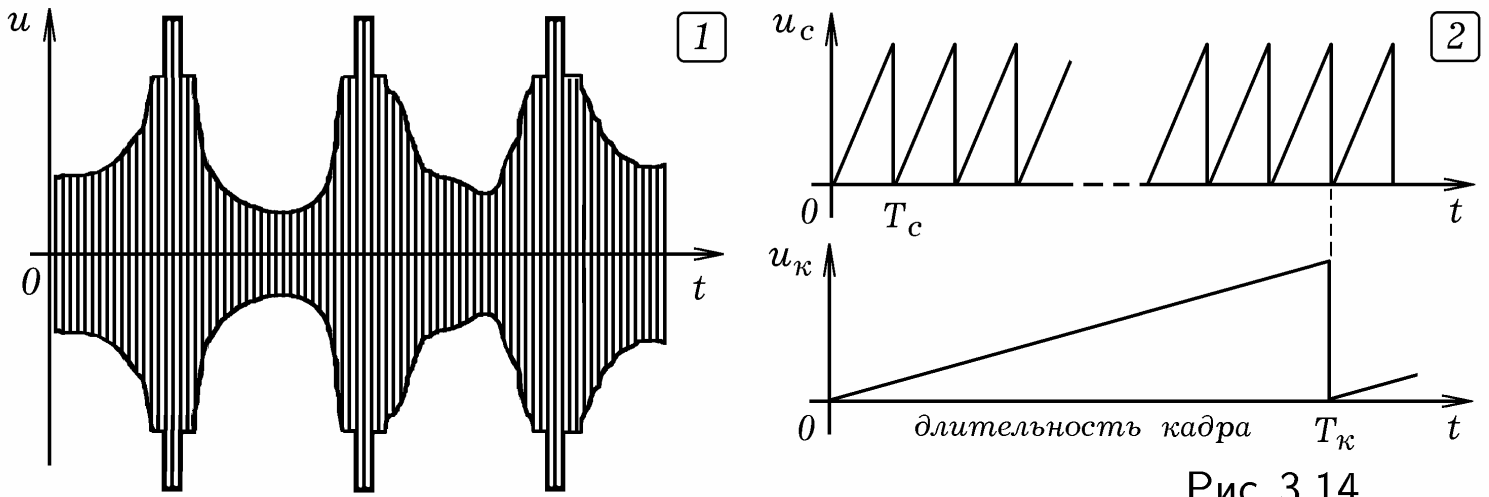


Рис. 3.14.

Пропорции экрана телевизора, его разрешение, частота кадровой развертки, цветовые характеристики определяются физиологическими особенностями человека. В стандарте, принятом в СССР, отношение сторон экрана составляло $a/b = 4/3$, число строк (элементов изображения по вертикали) $N_y = 625$, количество элементов по горизонтали $N_x = (4/3) \cdot 625 \approx 830$. Общее количество элементов $N_{эл} = N_x \cdot N_y = (4/3) \cdot 625^2 \approx 521000$. Человеческий глаз в силу своей инерционности перестает замечать смену кадров при частоте $f_k = 25$ Гц. Частота генератора строковой развертки $f_{стр} = 25 \cdot 625 = 15625$ Гц (рис. 3.14.2).

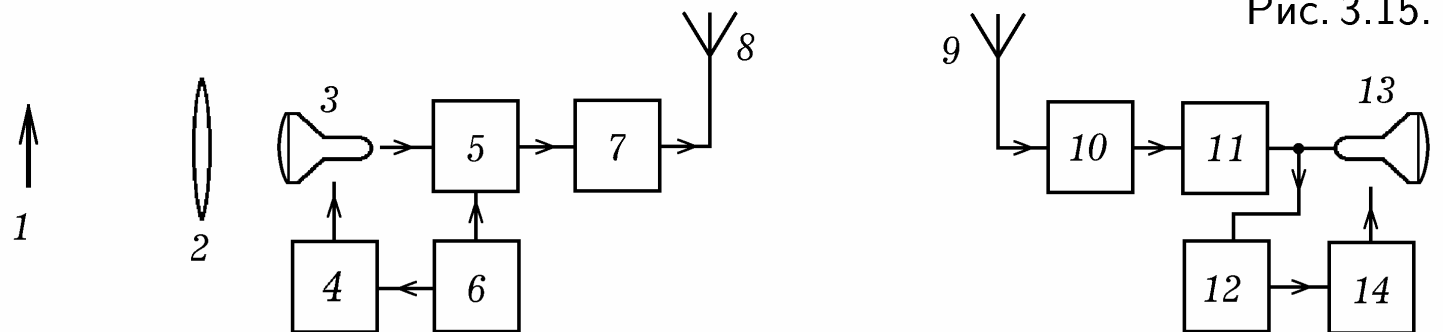


Рис. 3.15.

Рассчитаем наименьшую и наибольшую частоты видеосигнала для ЧБ телевизора. Наименьшей частоте соответствует ситуация, при которой верхняя половина экрана, допустим, белая, а нижняя — черная. Тогда $F_{min} = f_k = 25$ Гц. Максимальной частоте соответствует чередование белого элемента с черным, поэтому: $F_{max} = 0,5 f_k N_{эл} = 0,5 \cdot 25 \cdot 521000 = 6,5 \cdot 10^6$ Гц. По теореме Котельникова, чтобы закодировать видеосигнал с частотой 6,5 МГц, частота несущей должна быть не менее чем в 2 раза выше и составлять 13 МГц. В России сигнал звукового сопровождения модулируется по частоте. Частота несущей звукового сигнала превышает частоту несущей изображения на 6,5 МГц.

3.9. ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ПЕРЕДАТЧИК И ПРИЕМНИК. Передатчик телевизионного изображения (рис. 3.15) состоит из передающей ЭЛТ 3, на которую с помощью объектива 2 проецируется изображение предмета 1, генератора развертки 4, видеоусилителя 5, синхрогенерато-

ра 6, радиопередатчика 7 и передающей антенны 8. Синхροгенератор 6 выработывает синхроимпульсы кадровой и строчной разверток, которые синхронизируют работу генератора развертки 4 и поступают в видеоусилитель 5, где они смешиваются с видеосигналом. Получается полный управляющий телевизионный сигнал, включающий в себя видеосигнал (сигнал яркости), в который введены строчные и кадровые импульсы для гашения обратного хода электронного луча в кинескопе в процессе телевизионной развертки (рис. 3.13). Синхроимпульсы находятся выше уровня гашения. В телевизионном передатчике 7 (рис. 3.15) осуществляется амплитудная модуляция колебаний несущей частоты полным управляющим сигналом. Получается телевизионный радиосигнал, — высокочастотные колебания, амплитуда которых изменяется в такт с полным управляющим сигналом (рис. 3.14.1). Он подается на передающую антенну.

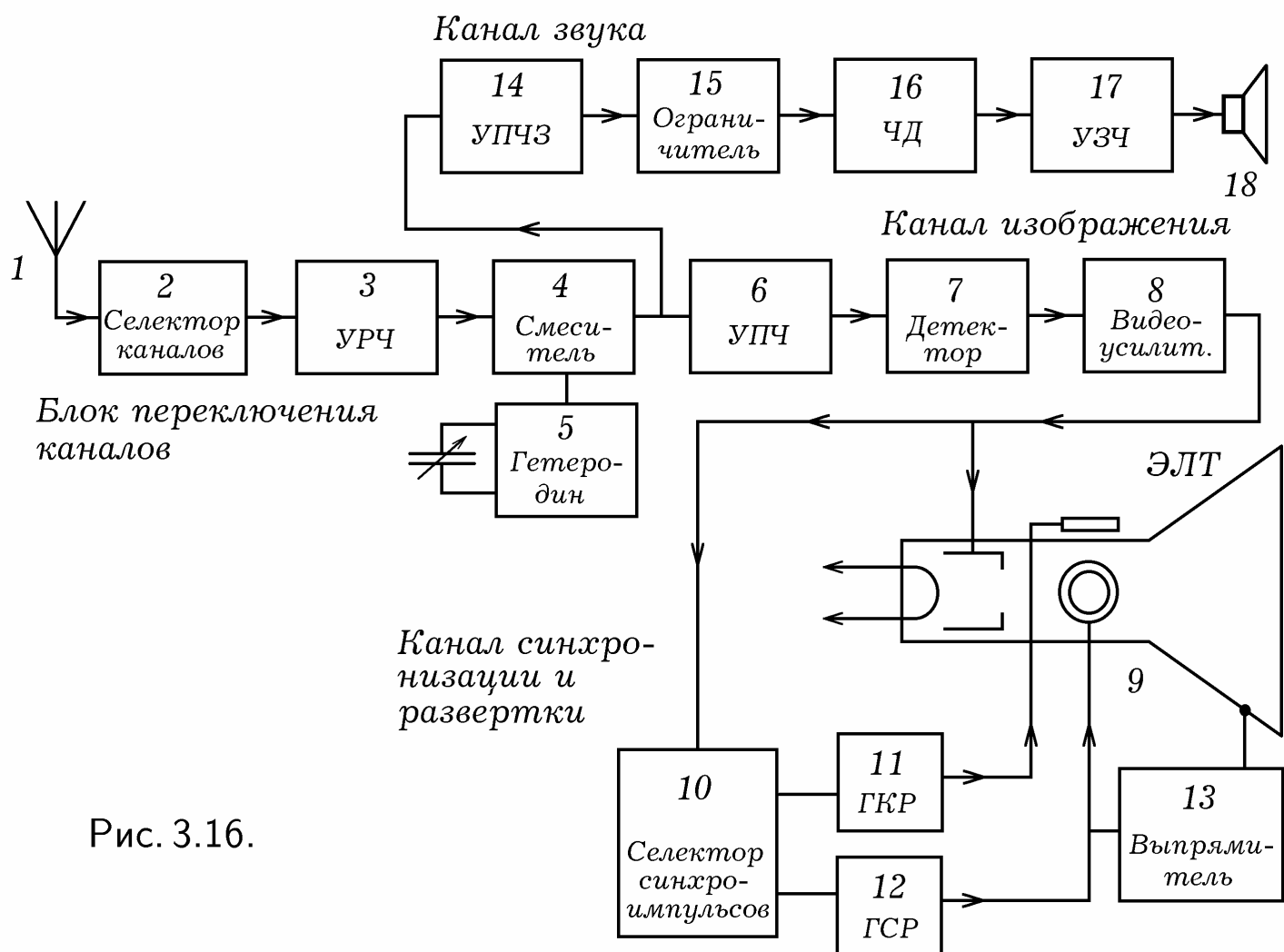


Рис. 3.16.

Когда радиоволна достигает приемной антенны 9 телевизионного приемника (рис. 3.15), на ее выходе возникает телевизионный радиосигнал. В приемнике-супергетеродине 10 принимаемые колебания преобразуются в колебания промежуточной частоты (около 35 МГц) с последующим детектированием. В результате выделяется полный управляющий сигнал, который подается в видеоусилитель 11. Видеосигнал подается на приемную телевизионную трубку 13 — кинескоп. Синхроимпульсы поступают в блок синхронизации 12, который управляет работой генератора строчной и кадровой развертки 14, вырабатывающего пилообразные напряжения с частотами f_c и f_k (рис. 3.14.2).

На рис. 3.16 приведена подробная блок-схема телевизионного приемника. Выделяют блок переключения каналов (селектор каналов 2, усилитель радиочастоты 3, гетеродин 5, смеситель 4), канал изображения (усилитель промежуточной частоты изображения 6, амплитудный детектор 7, видеоусилитель 8, кинескоп 9), блок синхронизации и развертки (селектор синхроимпульсов 10, генератор кадровой развертки 11, генератор строчной развертки 12), канал звука (усилитель промежуточной частоты звука 14, амплитудный ограничитель 15, частотный детектор 16, усилитель звуковой частоты 17, динамик 18). Выпрямитель 13 преобразует импульсы строчной развертки в постоянное высокое напряжение.

3.10. ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ. Согласно трехкомпонентной цветовой модели RGB любой цвет может быть получен путем смешивания трех основных цветов: красного, зеленого и синего, взятых в соответствующих отношениях. Поэтому чтобы передать цветное изображение предмета необходимо получить его красную, зеленую и синюю составляющие, закодировать их с помощью электрических сигналов и послать по каналу связи. Представим себе иконоскоп, перед которым вращается диск, разделенный на три сектора: красный, зеленый, синий. Частота вращения диска должна быть синхронизирована с частотой кадровой развертки так, чтобы один кадр нес информацию о красной составляющей изображения, второй — о зеленой, третий — о синей и т.д.

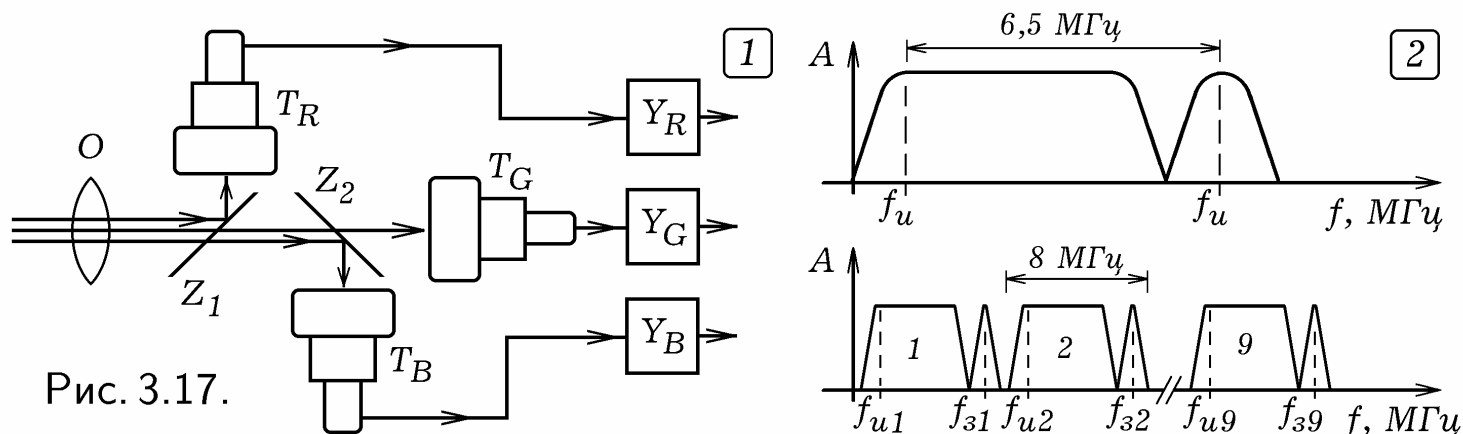


Рис. 3.17.

Передающая цветная телевизионная камера (рис. 3.17.1) имеет два дихроических зеркала и три передающие трубки T_R , T_G , T_B . Зеркало Z_1 отражает красный свет в трубку T_R , зеркало Z_2 отражает синий свет в трубку T_B , зеленая составляющая изображения проецируется на трубку T_G . На выходах усилителей Y_R , Y_G , Y_B получают три видеосигнала, соответствующие красной, зеленой и синей составляющим изображения.

В России, Франции, странах Восточной Европы используется система SECAM (SEquentiel Couleur A Memoire), в странах Западной Европы, Африке, Азии и Китае — PAL (Phase Alternation Line), в США, Канаде и Японии — NTSC (National Television System Color). В системе SECAM передающая телевизионная трубка формирует сигнал яркости $Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B$ и еще два цвето-разностных сигнала $U = R - Y$ и $V = B - Y$ (красный минус яркостный и синий минус яркостный). Эти сигналы смешиваются с синхронизирующими и гасящими импульсами, в результате чего получается полный цветовой телевизион-

ный сигнал, который поступает в модулятор. На его выходе получается телевизионный радиосигнал, который передается посредством радиоволн. В телевизионном приемнике происходит преобразование этих трех сигналов в четыре сигнала: яркостный, красный, зеленый и синий: $R = Y + U$, $B = Y + V$, $G = Y - 0,509U - 0,194V$. Сигнал изображения занимает полосу частот от 50 Гц до 6 МГц, на звуковой сигнал отводится 0,5 МГц (рис. 3.17.2). На один телевизионный канал приходится 8 МГц.

Цветной кинескоп (рис. 3.18.1) состоит из стеклянного баллона 1, трех электронных прожекторов 4, на модуляторы которых подаются сигналы, несущие информацию о красной, зеленой и синей составляющих изображения, а на общую цепь катодов — яркостный сигнал. Внутри кинескопа параллельно экрану установлена **тенева маска** 2 — система струн или пластина с отверстиями. Управление электронным пучком осуществляется с помощью магнитного поля обмоток 3. Для создания осесимметричного ускоряющего поля и удаления электронов вблизи экрана используется аквадаг 5.

Экран разбит на пиксели, имеющие три сегмента (рис. 3.18.2). При попадании на них электронного луча сегменты светятся красным, зеленым и синим цветами. Три электронных луча проходят через одно отверстие в маске 1, а затем расходятся, попадая в соответствующий сегмент экрана 2 (рис. 3.18.3). Изменяя величину модулирующих сигналов, подаваемых на электронные прожекторы, можно регулировать соотношение уровня красного, зеленого и синего цветов и изменять цвет пикселя. Электронные лучи вместе отклоняются магнитным полем обмоток вертикального и горизонтального отклонения. При этом они последовательно переходят от одного отверстия маски к другому, вычерчивая растр. Видеосигнал управляет яркостью этих лучей, формируя цветное изображение.

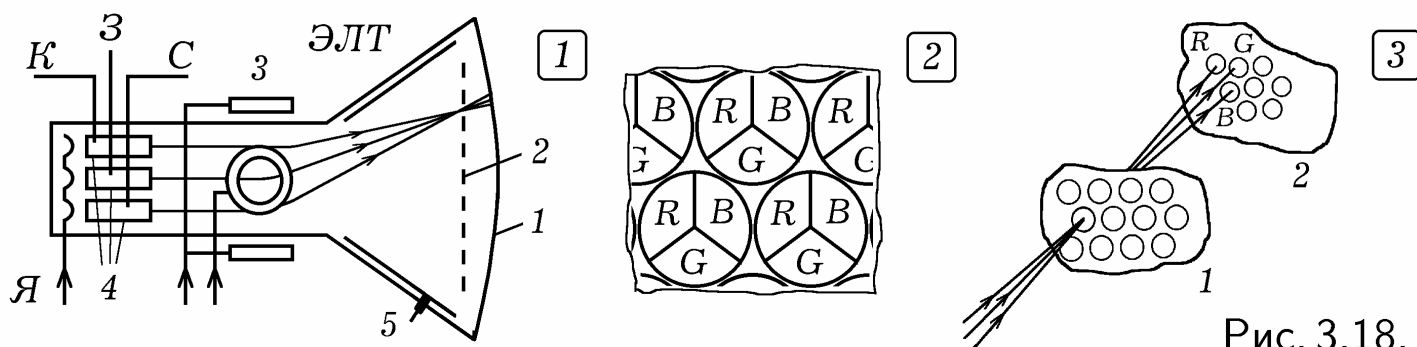


Рис. 3.18.

В настоящее время вместо передающих телевизионных трубок используются цифровые видеокамеры, содержащие двумерную фото-ПЗС матрицу, которая оцифровывает изображение, формируя видеосигнал. Широкое распространение получили телевизоры с жидкокристаллическими мониторами. Видеосигнал с помощью видеомagneитофона может быть записан на магнитофонную ленту. Если звуковой сигнал содержит до 10^4 бит в секунду, то видеосигнал — до 10^7 бит в секунду. Записывающие и воспроизводящие головки видеомagneитофона укреплены на диске, который наклонен по отношению к ленте и быстро вращается. В результате на движущейся магнитной ленте образуются наклонные дорожки с записанной информацией.