

Учреждение образования  
«Белорусский государственный педагогический университет  
имени Максима Танка»

Факультет физико-математический  
Кафедра информатики и методики преподавания информатики

СОГЛАСОВАНО

И.о. заведующего кафедрой  
С.В. Вабищевич  
26 июля 2017 г.



СОГЛАСОВАНО

Декан факультета  
С.И. Василец  
24.05 2017 г.

(рег. № 24-2-180 от 28.06 2017 г.)

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

«Физическая электроника (раздел «Радиоэлектроника»)»

Для специальности 1–02 05 04 Физика и техническое творчество

Составители: М.А. Вилькоцкий, доктор физ.-мат. наук, профессор  
В.В. Юргульский, старший преподаватель

Рассмотрено и утверждено

на заседании Совета БГПУ 26 июня 2017 г. протокол № 10

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА .....                        | 3  |
| ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ .....                         | 4  |
| РАЗДЕЛ 2. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА .....                   | 4  |
| Тема 2.1. Радиотехнические цепи. ....              | 4  |
| Тема 2.2 Колебательный контур. ....                | 12 |
| Тема 2.3 Полупроводниковые приборы. ....           | 16 |
| Тема 2.4 Электронные усилители. ....               | 24 |
| Тема 2.5. Интегральные микросхемы. ....            | 38 |
| Тема 2.6. Генерация гармонических колебаний. ....  | 44 |
| Тема 2.7. Нелинейные преобразования сигналов. .... | 49 |
| Тема 2.8. Радиоприемные устройства. ....           | 58 |
| Тема 2.9. Основы телевидения. ....                 | 63 |
| <i>ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</i> .....                   | 72 |
| РАЗДЕЛ 2. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА .....                   | 72 |
| Тема 2.1. Радиотехнические цепи. ....              | 72 |
| Тема 2.2. Колебательный контур. ....               | 72 |
| Тема 2.3. Полупроводниковые приборы. ....          | 73 |
| Тема 2.4. Электронные усилители. ....              | 73 |
| Тема 2.5. Интегральные микросхемы. ....            | 73 |
| Тема 2.6. Генерация гармонических колебаний. ....  | 74 |
| Тема 2.7. Нелинейные преобразования сигналов. .... | 74 |
| Тема 2.8. Радиоприемные устройства. ....           | 74 |
| Тема 2.9. Основы телевидения. ....                 | 75 |
| РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ .....                       | 76 |
| РАЗДЕЛ 2. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА .....                   | 76 |
| ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ .....                       | 78 |

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебно-методический комплекс (УМК) по учебной дисциплине «Физическая электроника» предназначен для студентов, обучающихся по специальности 1-02 05 02 «Физика и информатика».

Цель УМК – формирование профессиональных компетенций в области электроники, необходимых для будущей профессиональной деятельности.

Использование УМК позволит преподавателю: сформировать у студентов знания физических законов, на которых основана работа электронных устройств; об условных графических обозначениях электронных элементов применяемых в электрических схемах физических принципов работы электронных устройств и процессов, протекающих в них.

На основании УМК студенты могут сформировать умения: по составлению и анализу режимов работы электронных схем, измерению их параметров; моделированию на компьютере электронных схем и измерению их параметров с использованием пакета анализа электронных схем Micro-Cap; выбору аппаратуры и контрольно-измерительным прибором для проведения измерений; использованию инновационных технологий для решения типовых профессиональных задач учителя физики и информатики.

В УМК описаны: способы проектирования электро- и радиотехнических цепей с использованием современных компьютерных программ; приемы использования электронных приборов в профессиональной деятельности будущего учителя физики.

Теоретический раздел УМК содержит материалы для теоретического изучения дисциплины в объеме, установленном учебным планом по специальности 1-02 05 02 Физика и информатика.

Практический раздел УМК содержит материалы для проведения лабораторных занятий и организовывается в соответствии с учебным планом.

Раздел контроля знаний УМК содержит материалы текущей и итоговой аттестации, позволяющие определить соответствие результатов учебной деятельности обучающихся требованиям образовательных стандартов высшего образования и учебно-программной документации образовательных программ высшего образования.

Вспомогательный раздел УМК содержит элементы учебно-программной документации образовательной программы высшего образования.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

### РАЗДЕЛ 2. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

#### Тема 2.1. Радиотехнические цепи.

*История развития и области применения радиоэлектроники. Основные элементы цепей и их классификация.*

*Избирательные четырехполюсники. Классификация фильтров. Анализ фильтров нижних и верхних частот методом комплексных амплитуд. Полосовые и заграждающие фильтры.*

Под словом радио понимается все, что связано с электрической передачей сигналов, звука, музыки, изображения без помощи проводной линии.

*Радио* – это собирательное название ряда областей науки и техники (радиотехника и электроника), связанных с передачей и преобразованием информации на основе использования радиочастотных электромагнитных колебаний и волн.

*Радиотехника* — наука об электромагнитных колебаниях и волнах радиодиапазона, методах их генерации, усиления, излучения, преобразования, приема, а также отрасль техники, реализующая применение электромагнитных колебаний и волн в радиосвязи, телевидении, радиолокации и т. д.

*Электроника*—наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и методах создания электронных приборов и устройств, в которых используется движение заряженных частиц в вакууме, газе и твердом теле, и одновременно область техники, связанная с созданием приборов и устройств для преобразования электромагнитной энергии.

Термин «радиоэлектроника» появился в 50-е гг.

*Радиоэлектроника* — область науки и техники, решающая задачи передачи информации посредством электромагнитных волн и ее хранения, преобразования и распределения.

Современная *радиоэлектроника* тесно связана с физикой твердого тела и появилась в результате поисков способов использования электрических явлений для передачи информации.

Изобретателем радио считаются Попов и Маркони, которые вели одновременно исследования в области радио.

Открытию радио способствовали ряд открытий в физике. Перечислим основные из них:

1. 1831 – открытие законов электромагнитной индукции (Фарадей);
2. 1864 – создание теории электромагнитного поля и электромагнитных волн (Максвелл);
3. 1888 – экспериментально получены электромагнитные волны (Герц);

4. конец XVIII века – обнаружено изменение сопротивления железного порошка под действием магнитного поля (Брандли);
5. 1883 – угольная нить + платиновый электрод (Эдисон);
6. 1895 (7 мая) на заседании физического отделения физико – химического общества в Петербурге был продемонстрирован первый в мире прототип радиоприемника;
7. 1896 – Попов осуществил радиопередачу “Генрих Герц” между двумя зданиями
8. 1897 – осуществлена радиосвязь между Кронштадтом и кораблем на расстоянии 640 м.;
9. 1899 – осуществлена двусторонняя радиосвязь между двумя кораблями на расстоянии 40 км.;
10. 1899 – Маркони (около 1000 км);
11. 1900 – в Версале золотая медаль Попову за приемник на международной выставке средств связи;
12. 1904 – двухэлектродная лампа (Флеменг);
13. 1906 – трехэлектродная лампа (Фостер) (амер.);
14. 1915 – кенотрон (Лангмюр) (амер.);
15. 1918 – Нижегородская радиотехническая лаборатория (Бонч-Бруевич). Созданы мощные радиолампы;
16. 1922 – первая в СССР радиостанция “Малый Коминтерн”, мощность 12 кВт.
17. 1924 – первая радиостанция в Минске.
18. 1934 – “Большой Коминтерн”, мощность 120 кВт.
19. 1932 – рождение телевидения.
20. 1948 – транзисторы (Бардир, Браттейн, Шокли). 1956 – нобелевская премия.
21. 1960 – микросхемы создал Роберт Нойс (ИМС, БИС, СБИС). Была освоена технология создания микросхем с высокой интеграцией.
22. 1971 – корпорация Intel объявила о создании первого в мире микропроцессора 4004, предназначенного для программируемого калькулятора. Затем появились процессоры 8008, 8080, 80286, 80386, 80486, Pentium
23. Радиолокация.
24. Космическая связь.
25. Интернет.

Электронные осциллографы используются для измерения электрических параметров сигналов и наблюдения за их формой.

В электронно-лучевой трубке:

- 1 – катод (источник свободных электронов);
- 2 – управляющий электрод (регулировка яркости осциллограммы);
- 3 – первый анод и 4 – второй анод (для фокусировки осциллограммы и начального ускорения электронов);
- 4 – вертикально-отклоняющие пластины;

5 – горизонтально-отклоняющие пластины.

Назначение потенциометров:

- R3 – регулятор смещения луча по вертикали;
- R4 – регулятор смещения луча по горизонтали;
- R5 – регулятор яркости;
- R6 – регулятор фокусировки электронного луча.

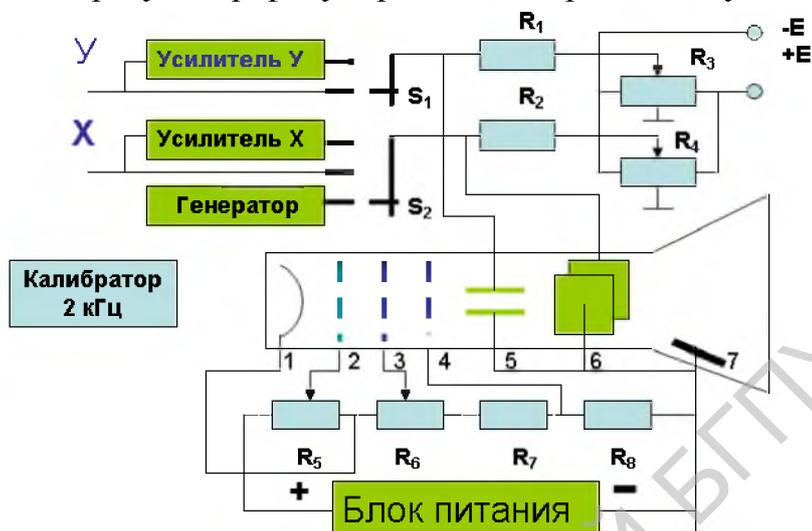


Рис. 2.1.1

Все элементы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), или радиодетали, можно разделить на две группы: *активные* и *пассивные*.

*Активные* - элементы, осуществляющие преобразование электрических сигналов с одновременным увеличением их мощности (биполярные и полевые транзисторы, тиристоры, и некоторые другие).

*Пассивные* - элементы в которых преобразование сигналов происходит без увеличения или даже с частичной потерей их мощности. В зависимости от выполняемых функций пассивные элементы подразделяются на следующие группы: *резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, переключатели, соединители* и т. д.

Резисторы – элементы электрической цепи, обладающие активным сопротивлением.

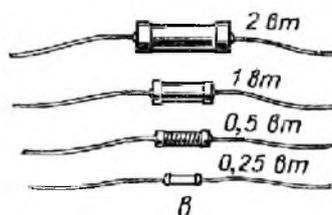


Рис. 2.1.2

*Параметры резисторов:*

- номинальное сопротивление;
- допуск отклонения от номинального сопротивления (классом точности);
- номинальная мощность рассеяния;

- предельное рабочее напряжение.

*Номинальное сопротивление* указывается на корпусе резистора отечественного производства цифрами, а допустимое отклонение сопротивления — цифрой со знаком процентов или без него или римскими цифрами I или II, соответствующими классу точности (I класс —  $\pm 5\%$ , II класс —  $\pm 10\%$  и III класс —  $\pm 20\%$ ). Если класс точности не указан, значит, резистор изготовлен по III классу точности.

На резисторах других странах, номинальное сопротивление обозначается на корпусе резистора цветными метками — поясками (черный цвет соответствует цифре 0, коричневый — 1, красный — 2, оранжевый — 3, желтый — 4, зеленый — 5, синий — 6, фиолетовый — 7, серый — 8, белый — 9); цифры цветов двух первых поясков обозначают величину сопротивления, цифра цвета третьего пояaska определяет число нулей. Четвертый поясок обозначает класс точности сопротивления (золотой означает точность  $\pm 5\%$ , серебряный —  $\pm 10\%$ , отсутствие пояaska —  $\pm 20\%$ ).

*Номинальная мощность рассеяния* - наибольшая (предельная) мощность, выделяющаяся на резисторе, при которой он может длительное время надежно работать. Мощность может быть подсчитана по формуле

$$P = \frac{U^2}{R} \text{ или } P = I^2 R \quad (1.1)$$

где  $P$  — мощность рассеяния, Вт;

$U$  — напряжение, В;

$R$  — сопротивление резистора, Ом;

$I$  — ток, проходящий по резистору, А.

При выборе резистора его номинальная мощность должна быть выше мощности рассеяния, определенной по приведенной формуле, на 20—40%.

*Предельное рабочее напряжение* - напряжение, при котором резистор надежно работает.

$$U = \sqrt{P_{\text{ном}} R_{\text{ном}}} \quad (1.2)$$

где  $U$  — допустимое напряжение на резисторе, В;

$P_{\text{ном}}$  — номинальная мощность рассеяния, Вт;

$R_{\text{ном}}$  — номинальное сопротивление резистора, Ом.

На схемах применяется сокращенное обозначение номиналов резисторов. Например, **R<sub>3</sub> 10**. R<sub>3</sub> — обозначает порядковый номер резистора в схеме, т.е. третий; 10 — величина сопротивления в Омах (Ом). Если за цифрой записана буква К (10к) — кило омы (кОм); М (10М) — мега омы (МОм).

На резисторах номиналы обозначаются следующим образом. Буква Е — омы, К — кило омы, М — мега омы. Например, 5Е — 5 Ом; 5Е2 — 5,2 Ом; 5к — 5 кОм; 5к2 — 5,2 кОм; 5М — 5 МОм; 5М2 — 5,2 МОм.

Конденсаторы - система изолированных друг от друга проводников-обкладок.

По материалу диэлектрика между обкладками конденсаторы подразделяются на бумажные, электролитические, слюдяные, пленочные, стеклоэмалевые, керамические, вакуумные и воздушные.

*Параметры конденсаторов:*

- номинальная емкость, которая тем больше, чем больше поверхность обкладок конденсатора и чем меньше расстояние между ними (Фарада);
- класс точности;
- номинальное рабочее напряжение;
- температурный коэффициент емкости (ТКЕ);
- пробивное напряжение.

На схемах принято сокращенное обозначение номиналов конденсаторов. Например, С<sub>7</sub> 12. С<sub>7</sub> – обозначает порядковый номер конденсатора в схеме, т.е. седьмой; 12 – величина емкости в пикофарадах (пФ). Если за цифрой записана буква н (10н) – нано Фарады (нФ); мк (10мк) или пФ (10пф).

На конденсаторах номиналы обозначаются следующим образом. Буква п – пико Фарады, н – нано Фарады, мк – микро Фарады. Например, 5п – 5 пФ; 5п2 – 5,2 пФ; 5н – 5 нФ; 5н2 – 5,2 нФ; 5м – 5 мкФ; 5,2м – 5,2 мкФ.

В обозначении электролитических конденсаторов на схемах первое обозначение указывает на емкость конденсатора, второе – на рабочее напряжение. Например, С5 10,0х25. Порядковый номер конденсатора 5, емкость конденсатора 10 мкФ, рабочее напряжение 25 В.

**Катушки индуктивности.** Катушкой индуктивности называют радиодеталь, имеющую спиральную обмотку и способную концентрировать переменное магнитное поле. В отличие от резисторов и конденсаторов катушки индуктивности являются нестандартными деталями, и их конструкция определяется назначением конкретного устройства.



Рис. 2.1.3

При введении в катушку сердечника из магнитных материалов (феррит, альсифер, карбонильное железо, магнетит) ее индуктивность увеличивается. Это свойство позволяет уменьшить число витков в катушке для получения требуемой индуктивности, что особенно важно при применении ее в длинноволновом и средневолновом диапазонах, когда нужна большая индуктивность. Погружая сердечник в катушку на разную глубину, изменяют ее индуктивность.

Часто электрическую цепь или ее часть представляют в виде абстрактного устройства с двумя входными и двумя выходными зажимами. Такое устройство называется *четыреполюсником*.

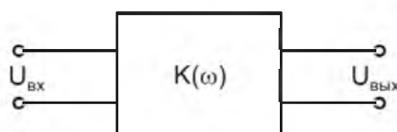


Рис. 2.1.4

Передаточные свойства линейного четырехполюсника при гармонических напряжениях характеризуются комплексным коэффициентом передачи:

$$\hat{E}_u(\omega) = \frac{U_{2m}}{U_{1m}} \quad (2.1)$$

Определим  $\hat{E}_u(\omega)$  в общем виде. Схема четырехполюсника в общем виде:

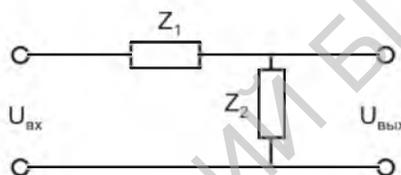


Рис. 2.1.5

По закону Ома:  $U_{\text{вх}} = I(Z_1 + Z_2) = IZ_1 + IZ_2$  (2.2). Но

$$IZ_2 = U_{\text{вых}}; \text{ откуда } I = \frac{U_{\text{вых}}}{Z_2}.$$

Подставляя значение тока в формулу (2.2) имеем:  $U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}}}{Z_2}(Z_1 + Z_2)$  (2.3).

Исходя из уравнения (2.1)

$$\hat{K} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.4)$$

В общем случае величина  $K_u(\omega)$  зависит от частоты напряжения  $\omega$ .  $K_u(\omega)$  - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) четырехполюсника.

*Полосой пропускания четырехполюсника* наз. полосу частот входного напряжения, в пределах которой на выход четырехполюсника передается не менее половины подводимой к нему мощности. Так как мощность пропорциональна квадрату амплитуды напряжения, в пределах полосы пропускания коэффициент передачи четырехполюсника по напряжению  $K_u(\omega)$  должен иметь значение не менее  $1/\sqrt{2} \approx 0,707$  от своего максимального

значения. Частота  $\omega_{zp}$ , при которой  $K_u(\omega_{zp}) \geq \frac{1}{\sqrt{2}} K_{u \max}(\omega)$ , называется *граничной частотой* полосы пропускания.

Условное обозначение:



Схема фильтра:

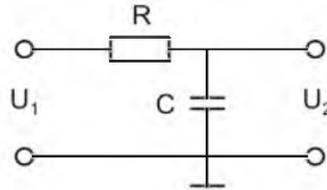


Рис. 2.1.6

Комплексный коэффициент передачи

$$\dot{K}_u(\omega) = \frac{\dot{U}_{2m}}{\dot{U}_{1m}} = \frac{\dot{I}_m Z_2}{\dot{I}_m (R + Z_2)} = \frac{Z_2}{R + Z_2} \quad (2.6)$$

Модуль комплексного коэффициента передачи равен

$$K_u(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} \quad (2.9)$$

Графически:

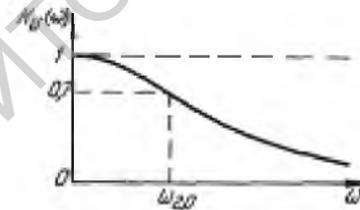


Рис. 2.1.7

При прохождении гармонического сигнала через данный четырехполюсник с увеличением частоты сопротивление конденсатора  $C$  уменьшается, а, следовательно, напряжение на выходе четырехполюсника также уменьшается.

Такой фильтр может быть создан в виде с последовательно включенным резистором  $R$  и катушкой  $L$ .

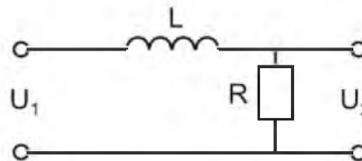


Рис. 2.1.8

Комплексный коэффициент передачи четырехполюсника запишется в виде

$$\dot{K}_u(\omega) = \frac{R}{R + j\omega L} \quad (2.11)$$

Отсюда модуль комплексного коэффициента передачи

$$K_u(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}} \quad (2.12)$$

Условное обозначение:



Схема:

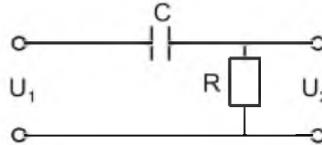


Рис. 2.1.9

Комплексный коэффициент передачи для цепи

$$\dot{K}_u(\omega) = \frac{\dot{U}_{2m}}{\dot{U}_{1m}} = \frac{Z_2}{R + Z_2} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (2.15)$$

Выражение для модуля коэффициента передачи имеет вид

$$K_u(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{R\omega C}\right)^2}} \quad (2.16)$$

С увеличением частоты входного напряжения емкостное сопротивление конденсатора  $C$  уменьшается, что приведет к увеличению падения напряжения на резисторе  $R$ .

$AЧХ$  фильтра верхних частот

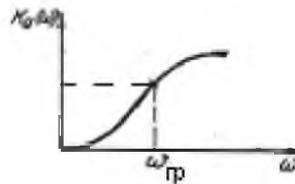


Рис. 2.1.10

Граничная частота этого фильтра определяется по формуле, аналогичной уравнению для нахождения  $\omega_{гр}$  фильтра нижних частот:

$$\omega_{гр} = \frac{1}{RC}.$$

Напряжение для фильтра верхних частот  $u_2$  опережает напряжение  $u_1$ .

Условное обозначение:



Предназначены для выделения определенной полосы частот спектра и подавления мешающих сигналов вне этой полосы и состоит из двух последовательно соединенных фильтров верхних и нижних частот.

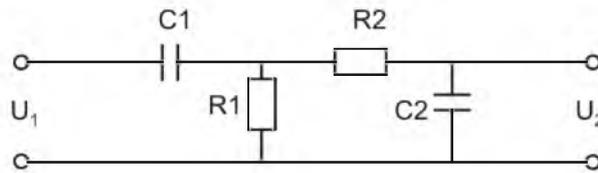


Рис. 2.1.11

Модуль коэффициента передачи полосового фильтра  $K = K_1 \cdot K_2$ .

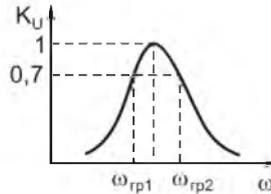


Рис. 2.1.12

Такие фильтры имеют две граничные частоты  $\omega_{зп1}$  и  $\omega_{зп2}$ , между которыми лежит полоса пропускания.

## Тема 2.2 Колебательный контур.

*Собственные колебания в контуре. Затухание колебаний в контуре. Волновое сопротивление, полоса пропускания и добротность контура. Вынужденные колебания в контуре. Фильтрующие свойства последовательного и параллельного контуров.*

Если источник (с малым внутренним сопротивлением) включен последовательно с элементами контура  $L$ ,  $C$ ,  $R$ , то такая цепь называется последовательным колебательным контуром.

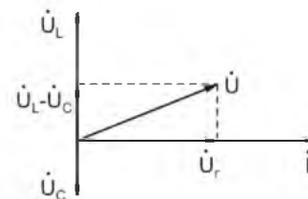
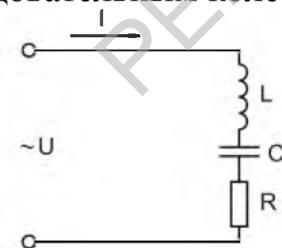


Рис. 2.2.1

При подключении внешнего источника частота колебаний в контуре определяется частотой напряжения источника. Поэтому такие колебания называются *вынужденными*.

Протекающий в контуре переменный ток создает падение напряжения на индуктивном, емкостном и активном сопротивлениях. Сдвиг этих напряжений относительно тока показан на векторных диаграммах (рис. 4.3, б). Напряжение на активном сопротивлении  $U_R$  совпадает по фазе с током, на индуктивном сопротивлении  $U_L$  опережает ток на угол  $\pi/2$ , а на емкостном

сопротивления  $U_c$  отстает от тока на такой же угол  $\pi/2$ . Вектор напряжения, на зажимах источника  $\bar{U}$ , равен геометрической сумме векторов  $\bar{U}_L - \bar{U}_c$  и  $U_R$ .

В зависимости от соотношения модулей векторов  $\bar{U}_L$  и  $\bar{U}_c$  контур может иметь результирующее сопротивление индуктивного (б) или емкостного (в) характера.

Полное сопротивление последовательного контура:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

В комплексной форме сопротивление последовательного контура

$$\dot{Z} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = |Z|e^{i\varphi}$$

Амплитудное значение тока

$$I_m = \frac{U_m}{|Z|} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

где:  $U_m$  — амплитуда напряжения источника;  $\omega$  — угловая частота напряжения источника.

Полученное выражение называют уравнением резонансной кривой или законом Ома для цепи переменного тока.

При  $X_L = X_C$  имеет место резонанс. При резонансе  $I_m = \frac{U_m}{R}$ , так как  $X_L = X_C$ , то  $U_L = U_c$  и контур оказывает источнику сопротивление только активного характера.

Отношение  $\frac{U_L}{U} = \frac{I_m X_L}{I_m R} = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{\rho}{R} = Q$ , т. е. при резонансе

напряжение на индуктивном сопротивлении в  $Q$  раз превышает напряжение источника, а так как добротность контуров, применяемых в радиотехнике, большая, то напряжение на катушке может в 100 раз превысить напряжение источника.

Аналогично  $\frac{U_c}{U} = \frac{1}{\omega C R} = \frac{\rho}{R} = Q$

Резонанс в последовательном колебательном контуре называется резонансом напряжений.

График зависимости полного сопротивления  $Z$  от частоты имеет вид:

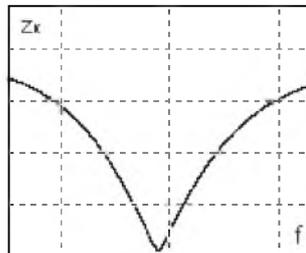


Рис. 2.2.2

График зависимости тока в контуре от частоты питающего напряжения называется резонансной кривой

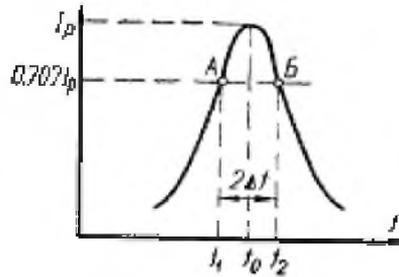


Рис. 2.2.3

При подключении источника (с большим внутренним сопротивлением) параллельно элементам колебательного контура образуется параллельный колебательный контур. Схема параллельного колебательного контура представлена на (рис.2.2.4).



Рис.2.2.4

Векторная диаграмма, соответствующая данной схеме, приведена на рис. рядом. Из-за активного сопротивления в индуктивной ветви угол сдвига фаз  $\varphi$  между  $U$  и  $I_L$  становится меньше, чем  $\frac{\pi}{2}$ , поэтому результирующий ток в контуре  $I_0$  определяется геометрическим суммированием векторов  $I_c$  и  $I_L$ . С другой стороны вектор  $I_0$  можно разложить на две составляющие: реактивную  $I_c - I_{Lp}$  и активную  $I_{La}$ . Ток в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме векторов результирующего реактивного тока  $I_c - I_{Lp}$  и активной составляющей тока  $I_{La}$ . При определенных значениях величин  $X_c$ ,  $X_L$  и  $R$  ток  $I_0$  может совпасть по фазе с напряжением  $U$ . Это происходит, когда емкостный ток  $I_c$  равен реактивной составляющей тока в индуктивной ветви  $I_L$ .

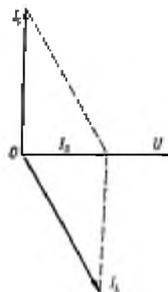


Рис.2.2.5.

Равенство  $I_c = I_L$  возможно только при условии равенства проводимостей  $b_c$  и  $b_{Lp}$ .

При резонансе колебательный контур по отношению к источнику подобен активному сопротивлению.

Резонанс наступает при частоте  $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx \omega_0$

При резонансе отношение токов  $\frac{I_{La}}{I_L} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2}}$

Как правило  $R \ll \omega_0 L$ , тогда  $\frac{I_{La}}{I_L} \approx \frac{R}{\omega_0 L}$

При резонансе  $I_{La} = I_0$ , поэтому  $\frac{I_0}{I_L} \approx \frac{R}{\omega_0 L}$ , т. к.  $\frac{\omega_0 L}{R} = Q$ , то  $\frac{I_0}{I_L} \approx \frac{1}{Q}$  т. е.

ток в неразветвленной части цепи при резонансе в  $Q$  раз меньше тока в контуре. Резонанс в параллельном колебательном контуре называется *резонансом токов*.

Сопротивление параллельного контура  $Z = \frac{(R + j\omega L)(\frac{1}{j\omega C})}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$  (4.19)

Т. к.  $R \ll j\omega L$  и при резонансе  $\omega L = \frac{1}{\omega C} = \rho$ , то  $Z_p = \frac{j\omega L \frac{1}{j\omega C}}{R} = \frac{L}{CR} = \frac{\rho^2}{R}$

При расстройке параллельного контура его сопротивление уменьшается, ток  $I_0$  возрастает, а контурный ток убывает. В этом случае контур оказывает источнику сопротивление, состоящее из активной и реактивной составляющих. Если  $\omega$  источника больше  $\omega_0$  (частота собственных колебаний контура), то сопротивление емкостной ветви уменьшается, а индуктивной возрастает, то контур оказывает источнику *сопротивление емкостного характера*. Если наоборот, то сопротивление контура носит индуктивный характер.

На (рис. 2.2.6) приведены резонансные характеристики параллельного контура.

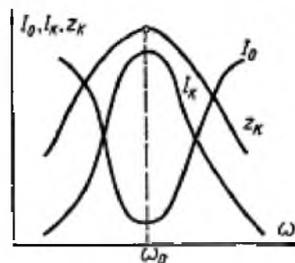


Рис.2.2.6.

Кривые  $I_k = f(\omega)$  и  $I_0 = f(\omega)$  соответствуют законам изменения контурного тока и тока в неразветвленной части цепи при изменении частоты питающего напряжения. Кривая  $Z_k = f(\omega)$  показывает закон изменения сопротивления параллельного контура при его расстройке.

*Изменение активного сопротивления контура влияет на форму резонансной кривой: при увеличении  $R$  она становится более полой, а при уменьшении  $R$  — более крутой*

### **Тема 2.3 Полупроводниковые приборы.**

*Полевые транзисторы. Типы полевых транзисторов. Статические характеристики и параметры. Работа полевого транзистора с нагрузкой. Биполярные транзисторы. Принцип работы. Статические входные и выходные характеристики. Параметры транзистора. Физическая эквивалентная схема транзистора. Работа транзистора с нагрузкой. Малосигнальные параметры. Маркировка полупроводниковых приборов.*

К полупроводникам относят вещества, которые по своему удельному сопротивлению занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Характерной чертой полупроводников - сильная зависимость их сопротивления от температуры и концентрации примесей.

Энергетические уровни, образованные валентными электронами, называют валентной зоной. Все валентные электроны прочно связаны с атомами, поэтому п/п является идеальным изолятором (диэлектриком). С ростом температуры электроны отрываются и становятся «свободными». Энергетические уровни свободных электронов – ЗП. Свободные электроны могут перемещаться по полупроводнику и участвовать в образовании электрического тока. Образование свободных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне называют генерацией подвижных носителей заряда, или генерацией пар электрон — дырка.

Если п/п подключить к источнику напряжения, то свободные электроны под действием поля будут двигаться в сторону положительного полюса, а дырки – отрицательного, создавая электрический ток. Т.о. в полупроводнике электрический ток включает две составляющие: электронную и дырочную. Дырке условно соответствует положительный единичный заряд, равный заряду электрона.

Основными материалами при изготовлении полупроводниковых приборов являются элементы IV группы периодической системы Менделеева. Чаще всего используются германий (Ge), кремний (Si), селен (Se), теллур (Te). С повышением температуры сопротивление их уменьшается.

Между атомами в кристалле полупроводника существуют ковалентные связи - связь образуемая за счет вращения двух электронов, принадлежащих двум рядом расположенным атомам, по одной общей орбите (германий и кремний - 4 валентные).

При введении в германий атома III группы таблицы Менделеева (индий, галлий) одна из ковалентных связей окажется незаполненной электроном. В этом случае ковалентная связь будет испытывать недостаток в электронах. Возникает дырочная проводимость.

Энергетическая диаграмма примесного полупроводника  $p$ -типа показана на (рис.1).

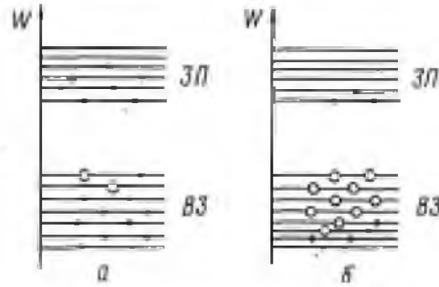


Рис. 2.3.1

Примеси, которые обеспечивают электронную проводимость, называются донорными, а примеси, которые обеспечивают дырочную проводимость – акцепторными.

### Электронно – дырочный переход.

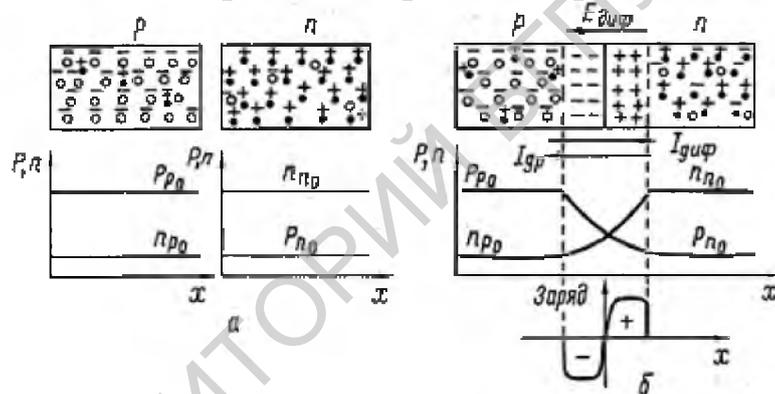


Рис. 2.3.2

Рассмотрим структуру, состоящую из  $p/n$   $p$ - и  $n$ -типа. В состоянии равновесия заряды скомпенсированы и  $p/n$  является электрически нейтральным.

Вследствие соединения  $p$ - и  $n$  областей будет происходить диффузия основных носителей через границу между  $p$ - и  $n$ -областями, создавая электрический ток. Его называют диффузионным и направлен он из  $p$ - в  $n$ -область.

Наличие зарядов противоположных знаков на границе  $p$ - и  $n$ -областей приводит к появлению между областями контактной разности потенциалов и электрического поля, названного диффузионным  $E_{диф}$ , которое в дальнейшем препятствует диффузии основных носителей (возникает потенциальный барьер). Помимо *диффузного* тока основных носителей наблюдается *дрейфовый* ток неосновных носителей, направленный из  $n$ -области в  $p$ -область. Без подключения внешнего источника с течением времени диффузионный ток полностью компенсируется дрейфовым током и результирующий ток равен нулю.

При *прямом включении* электронно-дырочного перехода (рис.2.3.3)

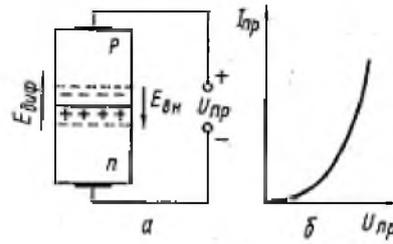


Рис. 2.3.3

диффузионное поле  $p$ - $n$ -перехода будет частично скомпенсировано полем внешнего источника, увеличится количество основных носителей, проникающих в противоположные области и ток диффузии станет преобладать над током дрейфа. Чем больше приложенное к  $p$ - $n$ -переходу прямое напряжение, тем больше прямой ток.

При обратном включении электронно-дырочного перехода (рис.2.3.4)

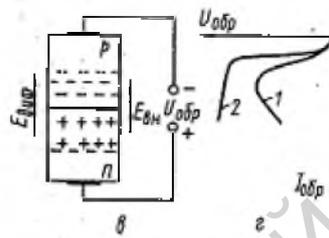


Рис. 2.3.4

ситуация противоположная. Так как обратный ток образован неосновными подвижными носителями заряда  $p$ - и  $n$ -областей, концентрация которых очень мала, то обратный ток значительно меньше прямого тока и мало зависит от величины обратного напряжения. При некотором значении обратного напряжения происходит пробой  $p$ - $n$ -перехода, вследствие которого резко увеличивается обратный ток. Пробой может быть тепловым (кривая 1), при котором кристалл разрушается или электрическим (кривая 2), т.е. обратимым.

На (рис.2.3.5) показана полная вольт-амперная характеристика (ВАХ) электронно-дырочного перехода для  $Ge$  и  $Si$ .

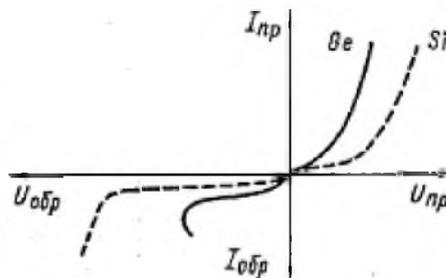


Рис.2.3.5.

Различие характеристик связано с шириной запрещенной зоны (у  $Si$ -шире).

Ход вольт-амперной характеристики зависит от температуры (увеличение числа свободных носителей в зоне проводимости).

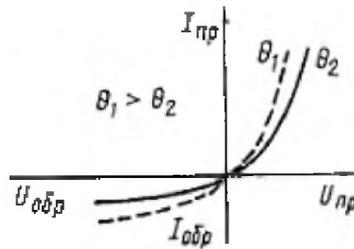


Рис.2.3.6.

$p-n$  - переходы используются в полупроводниковых диодах. Диоды бывают разных типов.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока в постоянный. Основные параметры диодов:

- допустимое напряжение на прямом и обратном токе;
- допустимый прямой и обратный ток.

Выпрямительные диоды бывают плоскостные и точечные. Плоскостные (площадь  $p-n$  - перехода достаточно большая) используются для выпрямления большого переменного тока в постоянный, а точечные с малой площадью  $p-n$  - перехода - для выпрямления малых токов или детектирования радиосигналов (могут работать на больших частотах). Выпрямление переменного напряжения (тока) с помощью диода иллюстрируется на рис.2.3.7

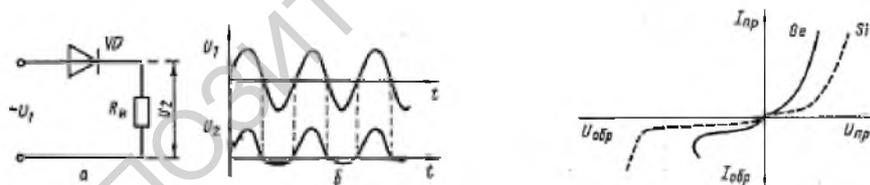


Рис. 2.3.7.

Для увеличения выпрямленного тока диоды соединяют параллельно (причем  $nI_{пр} > I_{выпр}$ ), для увеличения выпрямленного напряжения - последовательно (причем  $nU_{обр} > U_{выпр}$ ).

Для получения выпрямленного напряжения используется один полупериод входного напряжения, поэтому такой выпрямитель называется однополупериодным. Недосток - разброс параметров. Детекторы работают на частотах  $f = 10^{10} - 10^{11}$  Гц.

Стабилитроны -  $n/n$  диоды, используемые для стабилизации напряжения источника тока при изменении величины нагрузки. Для работы используется участок обратной ветви вольт-амперной характеристики в области электрического пробоя. В этом случае при изменении тока, протекающего через стабилитрон, от  $I_{ст.мин}$  до  $I_{ст.макс}$  напряжение на нем почти не изменяется.

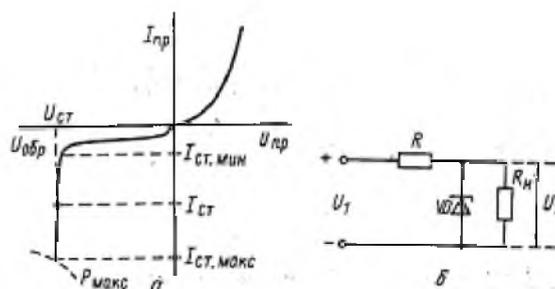


Рис. 2.3.8.

Стабилизируют напряжения примерно от 3,5 В и выше. Качество работы стабилитрона характеризуется динамическим сопротивлением:

$$R_{\text{д}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}$$

Стабисторы - для стабилизации напряжения порядка 1В. У них используется не обратная, а прямая ветвь вольт-амперной характеристики, их включают не в обратном, как стабилитроны, а в прямом направлении.

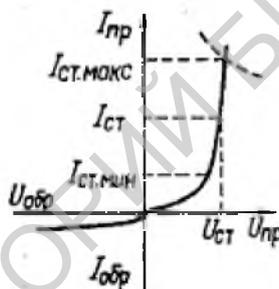


Рис. 2.3.9.

У диода р-п переход обладает определенной величиной емкости. С увеличением обратного напряжения ширина р-п перехода увеличивается. Это приводит к уменьшению емкости перехода. Полупроводниковые диоды, которые используют этот эффект называются *варикапами*.

Отношение  $K_{\text{п}} = C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$  называется коэффициентом перекрытия емкости варикапа. Варикапы используются для автоматической подстройки частоты.

Кристалл биполярного транзистора содержит две области *n/n* проводимостью одного типа, разделенного тонким слоем *n/n* электропроводностью противоположного типа. Среднюю область называют базой (Б). Область с которой база образует прямой переход называется эмиттером (Э), а область с которой база образует обратный переход называется коллектором (К). К каждой области припаивают металлические выводы для включения транзистора в электрическую цепь.

В зависимости от *способа подключения р-п-переходов транзистора к внешним источникам питания он может работать в режиме отсечки, насыщения или активном режиме.*

*Режим отсечки* - эмиттерный и коллекторный *р-п-переходы* подключены к внешним источникам в обратном направлении

*Режим насыщения* - эмиттерный и коллекторный *p-n*-переходы подключены к внешним источникам в прямом направлении.

Эти режимы используются при работе транзисторов в импульсных схемах и в режиме переключения

*Активный режим* - эмиттерный переход включается в прямом, а коллекторный - в обратном направлениях. Применяется для усиления сигналов.

На (рис 2.3.10) показано подключение источников тока транзистора типа *p-n-p*.

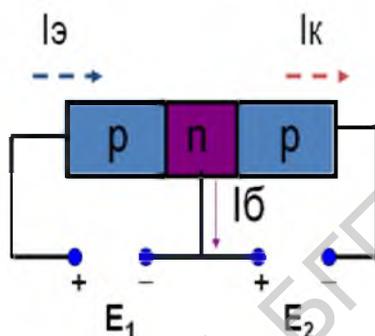


Рис.2.3.10.

Различают три способа включения транзистора: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ), и с общим коллектором (ОК).

Схема *p-n-p* с ОБ:

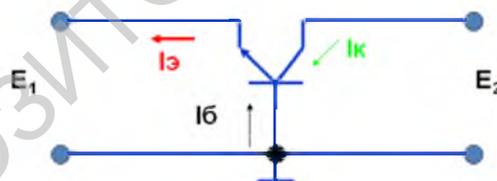


Рис.2.3.11

Каждая из трех схем имеет свой собственный коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}$$

Для схемы с общей базой коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha$  равен

:

$$K_i(\text{ОБ}) = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}} = \alpha$$

Схема *p-n-p* с ОЭ:

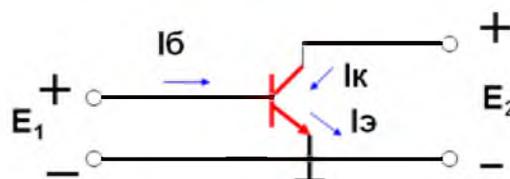


Рис. 2.3.12

Коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером ( $\beta$ )

$$\beta = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} \text{ при } U_{\text{кэ}} = \text{const.}$$

$$\beta = 10 \div 100.$$

равен:

Схема  $n-p-n$  с ОК:

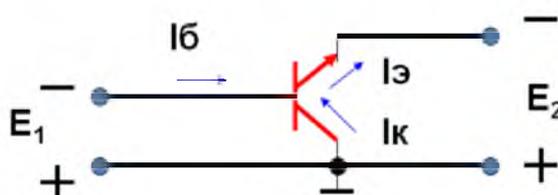


Рис.2.3.13

Коэффициент передачи по току для схемы с общим коллектором  $K_i$  равен:

$$K_i(OK) = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_b + \Delta I_c}{\Delta I_b} = 1 + \beta.$$

Установим связь между  $\alpha$  и  $\beta$ :

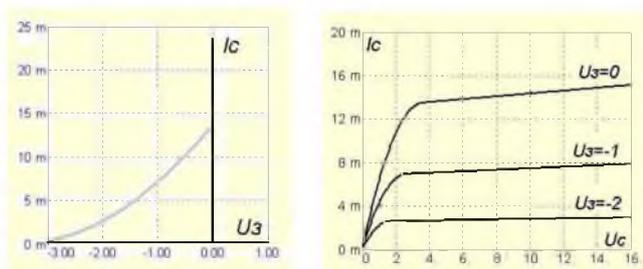
$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta};$$

Основой транзистора является полупроводниковый канал с  $n$  – или  $p$  – проводимостью, у которого имеется два электрода *Исток* и *Сток*. Сечение канала примерно в 20 – 50 раз больше глубины объёмного заряда  $p-n$ -перехода и составляет 2-5мкм. На электроды канала подается напряжение 5 – 30В, которое в несколько раз превышает напряжение ( $U_{НАС}$ ), создающее ток насыщения канала ( $I_{НАС}$ ). По длине канала наносится слой полупроводника с противоположной полупроводниковой проводимостью. Электрод от этого полупроводника называется *Затвор*. Вдоль канала образуется  $p-n$ -переход.

*Принцип работы полевого транзистора:* при подаче на затвор относительно любого вывода от канала обратного напряжения для  $p-n$ -перехода увеличивается глубина объёмного заряда  $p-n$ -перехода. Основные носители заряда проводимости канала не могут войти в зону объёмного заряда  $p-n$ -перехода, поскольку на них действует отталкивающее поле  $p-n$ -перехода. Это приводит к уменьшению сечения канала и соответственному уменьшению тока насыщения канала. Обратное напряжение на затворе в несколько вольт может увеличить глубину объёмного заряда на всё сечение канала, что приведет к полной отсутствию его проводимости. Таким образом при нулевом напряжении на затворе проводимость канала максимальна, а при увеличении запирающего напряжении проводимость канала уменьшается. На рисунке показана схема подачи напряжений на электроды полевого транзистора с  $n$ -каналом. Затвор - входной электрод, сток – выходной электрод, исток – общий электрод.

*Недостаток* - наличие входного тока затвора по величине равного обратному току  $p$ - $n$ -перехода, что обуславливает величину входного сопротивления транзисторов в несколько сот КОм.

Статические характеристики: стоко–затворная (входная)  $U_{си} - const$ , стоковая (выходная)  $U_{зи} - const$ .



Для увеличения входного сопротивления транзисторов до сотен Мом, проводимость канала управляется электрическим полем затвора, который отделяется от полупроводникового канала тонкой диэлектрической пленкой двуокиси кремния  $SiO_2$ . Такие полевые транзисторы называются соответственно МДП (металл – диэлектрик - полупроводник) и МОП (металл – окись – полупроводник) транзисторами.

МДП-, или МОП-транзисторы могут быть с индуцированным и со встроенным каналами.

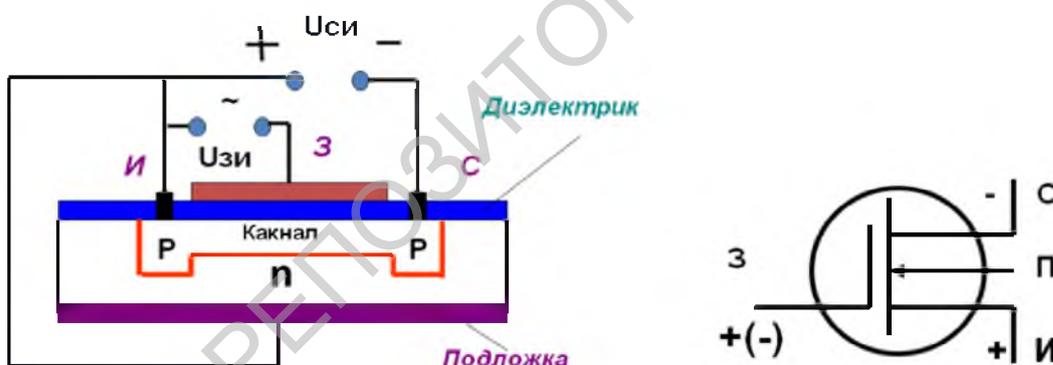


Рис.2.3.15

*Принцип работы:*  $p$ -область стока и истока отделены друг от друга  $n$ -областью подложки и образуют с ней два встречно включенных  $p$ - $n$ -перехода. Поэтому независимо от полярности напряжения  $U_{си}$  один из  $p$ - $n$ -переходов всегда оказывается закрытым. Для того чтобы в этой цепи стал протекать ток, необходимо на затвор подать отрицательное напряжение. Под действием электрического поля, возникшего в подложке у поверхности под затвором, свободные электроны начинают двигаться вглубь подложки. При некотором значении отрицательного напряжения  $U_{зи}$  у поверхности подложки дырок будет больше, чем оставшихся электронов. Произойдет инверсия типа электропроводности приповерхностного слоя под затвором, т. е. в приповерхностном слое образуется область с электропроводностью  $p$ -типа, называемая каналом, соединяющая сток и исток. Толщина канала

зависит от величины напряжения  $U_{зи}$ . Изменяя  $U_{зи}$ , приложенное к затвору, можно регулировать толщину канала, т. е. сопротивление участка между стоком и истоком, и ток в цепи источника  $U_{си}$ .

### Тема 2.4 Электронные усилители.

*Классификация усилителей по назначению. Основные характеристики (коэффициент передачи, амплитудно-частотная характеристика, коэффициент частотных и нелинейных искажений, динамический диапазон). Режимы работы усилительных элементов.*

*Усилители напряжения. Аperiodический усилитель на транзисторах. Принципиальная схема аperiodического усилителя. Способы автоматической подачи напряжения смещения для полевого и биполярного транзистора. Эмиттерная и коллекторная температурная стабилизация. Резонансный усилитель. Схемы межкаскадных связей. Усилители мощности. Однотактный усилитель мощности. Фазоинверсный каскад. Двухтактный усилитель мощности.*

Электронный усилитель - устройство, преобразующее маломощный электрический сигнал на входе в сигнал большей мощности на выходе с минимальными искажениями формы.

По функциональному назначению электронные усилители делятся на: 1. Постоянного тока. 2. Переменного тока: а) звуковой частоты (20 - 20000 Гц); б) высокой частоты (100 кГц - 50 МГц); в) видеочастоты (50 Гц - 6 МГц).

Усиление мощности сигнала осуществляется за счет потребления усилителем энергии от дополнительного источника, называемого источником питания. Т.О. усилитель - устройство, входной сигнал которого управляет преобразованием энергии источника питания в энергию выходного сигнала. Выходной электрический сигнал усилителя поступает на устройство, называемое потребителем или нагрузкой.

Нелинейные - элементы, у которых сопротивление зависит от тока и напряжения (транзисторы).

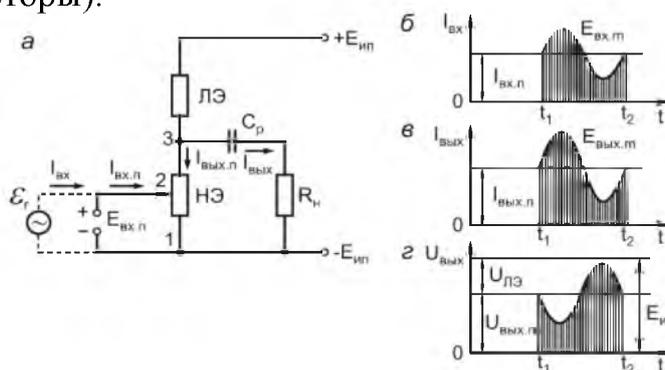


Рис.2.4.1

Рассмотрим принцип действия усилителя. Пусть ко входным зажимам 1—2 НЭ (рис.2.4.1а) подключен источник постоянной ЭДС  $E_{\text{вх.п.}}$ , который называют источником начального смещения или покоя входной цепи. Под действием его во входной цепи ( $E_{\text{вх.п.}}$ -НЭ,- $E_{\text{вх.п.}}$ ) будет протекать постоянный ток  $I_{\text{вх.п.}}$ , начального смещения или покоя (интервал времени  $0 — t_1$  на рис.1б). Так как  $E_{\text{вх.п.}} = \text{const}$ , то сопротивление НЭ будет постоянным.

НЭ включен последовательно с ЛЭ в цепь мощного источника питания  $E_{\text{и.п.}}$ , поэтому через ЛЭ и НЭ будет протекать постоянный ток  $I_{\text{вых.п.}}$ , (рис. 1в). Цепь ( $+E_{\text{и.п.}}$ -ЛЭ-НЭ-  $E_{\text{и.п.}}$ ) - называется главной (выходной) цепью усилителя.

Обычно  $E_{\text{и.п.}} > E_{\text{вх.п.}}$ , поэтому  $I_{\text{вых.п.}} \gg I_{\text{вх.п.}}$ . При этом напряжение распределяется между ЛЭ и НЭ прямо пропорционально их сопротивлениям (рис. 1г). Ток  $I_{\text{вых.п.}}$  и напряжение  $U_{\text{вых.п.}}$  называются соответственно током и напряжением начального смещения (или покоя) в выходной цепи.

Подключив параллельно или последовательно источнику  $E_{\text{вх.п.}}$  источник переменной ЭДС  $e_r$  (генератор усиливаемого сигнала), получим ток во входной цепи  $I_{\text{вх.п.}} + I_r$ . Во входной цепи возникает переменная составляющая тока. На (рис. 2.4.1б), (интервал времени  $t_1 — t_2$ ) показан характер изменения входного тока (заштрихованная площадь), когда  $e_r$  изменяется по синусоидальному закону.

Переменное напряжение  $e_r$  модулирует сопротивление НЭ, а следовательно, и ток в главной цепи усилителя, но его значение будет больше тока входной цепи, т.е. в выходной цепи появляется переменная составляющая напряжения (рис. 1г).

Если параллельно НЭ (зажимы 1—3) через конденсатор  $C_p$  подключить нагрузку  $R_H$  то через нее будет протекать только переменный ток, обусловленный переменной составляющей напряжения на НЭ.

Коэффициент усиления или коэффициент передачи - отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного в установившемся режиме при гармоническом входном сигнале. Сигнал может описываться напряжением, током или мощностью, поэтому различают:

$$\text{коэффициент усиления по напряжению: } K_U = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{\Delta U_{\text{вых.м}}}{\Delta U_{\text{вх.м}}};$$

$$\text{коэффициент усиления по току; } K_I = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_{\text{вых.м}}}{\Delta I_{\text{вх.м}}}$$

$$\text{коэффициент усиления по мощности: } K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{вых}} U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}} U_{\text{вх}}} = K_I K_U -$$

отношение переменной мощности, выделяющейся в нагрузке, к мощности входного сигнала.

Из трех коэффициентов усиления всегда  $K_p > 1$ , иначе сигнал не усиливается. Это возможно, если:  $K_U > 1, K_I > 1$ ;  $K_U > 1, K_I < 1$  или  $K_U < 1, K_I > 1$ .

В зависимости от этого говорят об усилении напряжения или тока.

Установлено, что между звуковой энергией и громкостью звука, воспринимаемого человеческим ухом, существует логарифмическая

зависимость. Поэтому коэффициенты усиления (S) часто определяют в децибелах (мощность пропорциональна квадрату напряжения):

$$S_i = 20 \lg K_i; S_u = 20 \lg K_u; S_p = 10 \lg K_p.$$

Для многокаскадных усилителей коэффициент усиления определяется произведением коэффициентов усиления отдельных каскадов, выраженных в абсолютных единицах(раз) или суммой коэффициентов усиления, выраженных в децибелах.

Входным  $R_{вх}$  и выходным  $R_{вых}$  сопротивлением усилителя называют соответственно сопротивление со стороны входных и выходных зажимов.

КПД – отношение выходной мощности, отдаваемой усилителем в нагрузку, к общей мощности, потребляемой от источника питания

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_o},$$

т.е  $\eta$  показывает, какая часть мощности источника питания преобразуется в переменный сигнал. Значение  $\eta$  существенно зависит от выбора начального смещения.

Чувствительность – напряжение, которое нужно подать на вход усилителя, чтобы получить на выходе заданную мощность.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя - зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты.

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) усилителя - зависимость фазы выходного сигнала от частоты.

Амплитудная характеристика (АХ) - зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$ . В силу нелинейных свойств транзисторов эта характеристика имеет участок насыщения. По АХ можно определить рабочий участок, где будет минимальное искажение формы выходного сигнала.

При работе усилителя коэффициент усиления на различных частотах может отличаться, что приводит к частотным искажениям. Для определения частотных искажений пользуются частотной характеристикой, которая представляет собой зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемых колебаний.

Коэффициент частотных искажений  $M = K_o/K$ . При отсутствии частотных искажений  $M=1$ . Подъем частотной характеристики соответствует  $M<1$ , а завал –  $M>1$ .

Фазовые искажения – результат фазовых сдвигов, вносимых усилителем, для составляющих разных частот сложного сигнала.

На рис.2 показано сложное напряжение, состоящее из первой, второй и третьей гармоник.

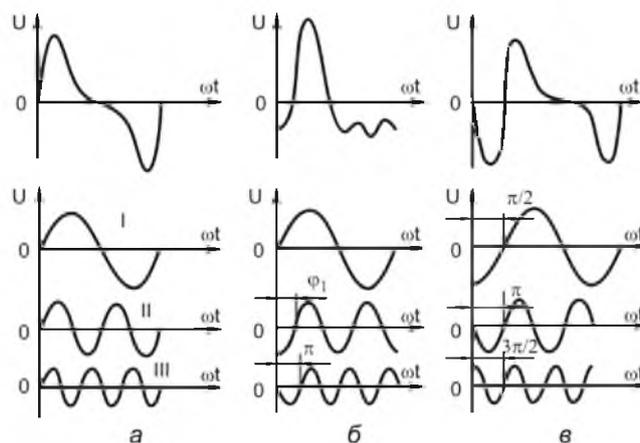


Рис.2.4.2

Фазовые искажения отсутствуют, если начальные фазы отдельных составляющих напряжения не изменяются или угол сдвига фаз пропорционален частоте передаваемого сигнала.

Нелинейные искажения - искажения, связанные с появлением в спектре сложного колебания новых составляющих, возникающих в усилителе при использовании нелинейного участка характеристики усилительного элемента.

На (рис.3а) показана входная характеристика транзистора. На базу подано постоянное отрицательное напряжение (напряжение смещения) и переменное синусоидальное напряжение (рис. 3б).

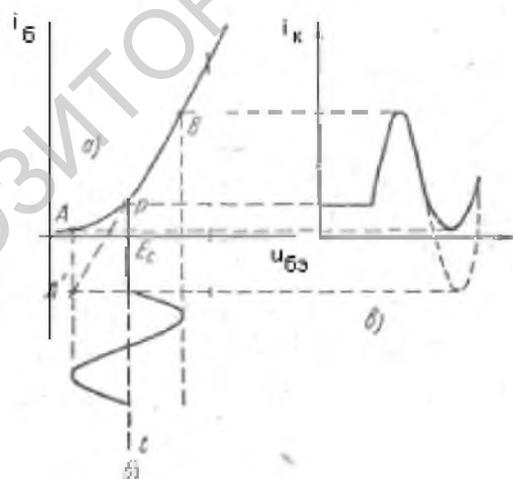


Рис.2.4.3

Пусть характеристика транзистора имеет вид прямой линии А'РВ. Тогда синусоидальному изменению напряжения на базе соответствует синусоидальное изменение коллекторного тока (пунктирная кривая на (рис.2.4.3в)). Но в действительности характеристика транзистора имеет вид кривой АРВ. Поэтому синусоидальному изменению напряжения на базе соответствует несинусоидальное изменение коллекторного тока (сплошная кривая на (рис.2.4.3в)).

Для построения входных и промежуточных каскадов многокаскадных усилителей чаще всего используются схемы с ОЭ коллекторной нагрузкой которых является резистор (рис.3).

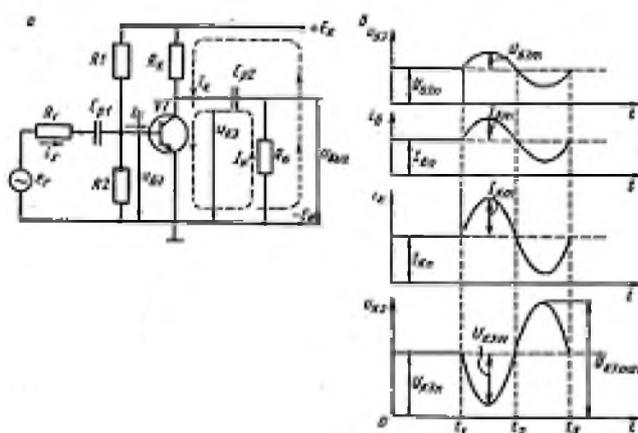


Рис.2.4.4

Для этой схемы коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности больше единицы.

Источник питания  $E_K$ , резистор  $R_K$  и транзистор  $VT$  – главная цепь усилителя. Приемник усиленного сигнала  $R_H$  через разделительный конденсатор  $C_{p2}$  подключен к коллектору и эмиттеру  $VT$  — выходная цепь усилителя.

Генератор усиливаемого сигнала  $e_T$  подключен к базе и эмиттеру транзистора через разделительный конденсатор  $C_{p1}$ . Резистор  $R_T$  – внутреннее сопротивление генератора. Цепь  $e_T, R_T, C_{p1}$  база — эмиттер транзистора — это входная цепь усилителя. Эмиттер – общая точка для входной и выходной цепей (ОЭ).

Делитель напряжения на резисторах  $R_1, R_2$  создает режим начального смещения на базе транзистора, т. Е. падение напряжения на резисторе  $R_2$  выполняет ту же роль, что источник  $E_{вх.п}$  в схеме рис.1.

Работа схемы с помощью временных диаграмм представлена на (рис.2) рядом. В интервале времени  $0—t_1$  при  $e_T = 0$  в базовой цепи протекает постоянный ток  $I_{Бп}$ , определяемый напряжением  $U_{Бэп}$ . Ток в коллекторной цепи транзистора также постоянный и связан с током базы через коэффициент передачи транзистора по току  $\beta$  следующим образом:  $I_{Кп} = \beta I_{Бп}$ .

Интервал  $0—t_1$  – режим покоя. Если на вход усилителя подан переменный сигнал  $e_T = U_m \sin \omega t$ , то в течение положительного полупериода (интервал  $t_1 — t_2$ ) эмиттерный переход транзистора смещается в прямом направлении, что вызовет приращение тока базы, а следовательно, и коллекторного тока. Увеличивается падение напряжения на резисторе  $R_K$  и уменьшается напряжение между коллектором и эмиттером транзистора  $U_{КЭ}$ . В течение отрицательного полупериода (интервал  $t_3 — t_4$ ) ситуация обратная.

Из рассмотренного видно, что при увеличении входного напряжения напряжение на нагрузке уменьшается, и наоборот.

Режим работы подобной схемы усилителя мы рассмотрели на предыдущей лекции и получили набор выходных характеристик транзистора, состоящий из двух, а здесь приведем для четырех зависимостей  $i_K = f(u_{КЭ})$  снятых при различных значениях базового тока  $I_{Б1}, I_{Б2}, I_{Б3}, I_{Б4}$ , (рис.2.4.5)

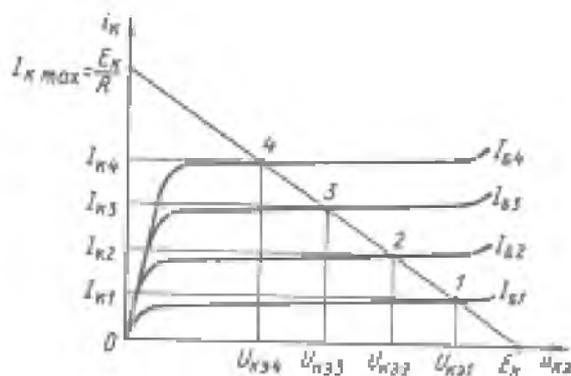


Рис.2.4.5

Как отмечалось, при изменении управляющего тока базы транзистора рабочая точка перемещается по нагрузочной прямой, при этом изменяются ток коллектора  $i_k$  и падение напряжения на транзисторе  $u_{кэ}$ . Например, при изменении тока базы на величину  $\Delta I_{\delta} = I_{\delta 4} - I_{\delta 1}$ , рабочая точка перемещается из положения 1 в положение 4. Приращения коллекторных тока и напряжения соответственно равны  $\Delta I_k = I_{к4} - I_{к1}$ ,  $\Delta U_{кэ} = U_{кэ4} - U_{кэ1}$

При поступлении на вход каскада постоянного сигнала  $I_{\delta 0}$  и гармонического сигнала амплитудой  $I_{\delta m}$  рабочая точка перемещается по нагрузочной прямой относительно точки покоя  $O$ , соответствующей постоянной составляющей входного тока  $I_{\delta 0}$  (рис.6). Амплитуды переменных тока  $I_{km}$  и напряжения  $U_{кмт}$  определяются по максимальному отклонению рабочей точки от положения покоя  $O$ . Режим работы каскада при подаче на его вход переменного сигнала называется динамическим.

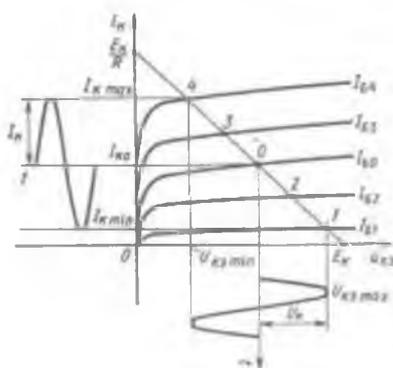


Рис.2.4.6

Причиной неравномерности частотной характеристики во всем диапазоне частот является наличие в схеме реактивных элементов, сопротивление которых зависит от частоты. Это разделительные конденсаторы  $C_{p1}, C_{p2}$  междуэлектродные емкости транзистора  $C_k$  и емкость монтажа  $C_m$ . В области нижних частот (обычно от 50 до 200  $гц$ ) «завал» характеристики объясняется влиянием разделительных конденсаторов

$C_{p1}, C_{p2}$ . С понижением частоты емкостное сопротивление и падение напряжения на конденсаторах возрастают, а падение напряжения на сопротивлении  $R_n$  уменьшается, т.е. уменьшаются выходное напряжение и коэффициент усиления.

В области верхних частот (обычно от 3000 до 10000 Гц) начинает сказываться влияние емкости  $C_m$ . По мере увеличения частоты сопротивление этой емкости уменьшается вместе с этим уменьшается и общее сопротивление включенных параллельно сопротивлений  $R_k, R_n$  и емкости  $C_m$  (между  $R_k$  и  $C_{p2}$  на землю). Чем меньше емкостное сопротивление ( $x_c = \frac{1}{C_k \omega}$ ), тем больше его шунтирующее действие. Это приводит к уменьшению выходного напряжения. Соответственно уменьшается и коэффициент усиления.

В области средних частот (обычно от 200 до 3000 Гц) в схеме можно не учитывать влияние емкостей  $C_{p1}, C_{p2}$  и  $C_m$ , так как сопротивление емкостей  $C_{p1}, C_{p2}$  по сравнению с сопротивлением  $R_n$ , с которым они соединены последовательно, малы, а сопротивление емкости  $C_m$  на средних частотах больше сопротивления  $R_n$  с которым она соединена параллельно.

Режимы работы усилителя определяются положением рабочей точки на динамической характеристике.

Различают следующие режимы работы транзистора:  $A, B, AB,$  и  $C$ .

Режим А. В этом режиме рабочая точка выбирается на прямолинейном участке характеристики транзистора, за пределы которого входное напряжение практически не выходит, нелинейные искажения минимальны ( $K_n = 3—6\%$ ), а амплитуда переменной составляющей коллекторного тока  $I_{ма}$  всегда меньше тока покоя  $I_0$  и примерно равна постоянной составляющей.

Этот режим самый неэкономичный, так как транзистор используется не полностью ( $\eta = 20—30\%$ ).

Максимальная амплитуда коллекторного тока  $I_{km}$  ограничивается допустимыми нелинейными искажениями и, как показывает графический анализ каскада ОЭ на (рис. 10), всегда меньше значения  $I_{ко}$ . Из (рис.2.4.7) видно также, что максимальная амплитуда коллекторного (выходного) напряжения меньше половины напряжения источника питания, т.е.

$$U_{кэ.т} = U_{вых.т} < E_k / 2$$

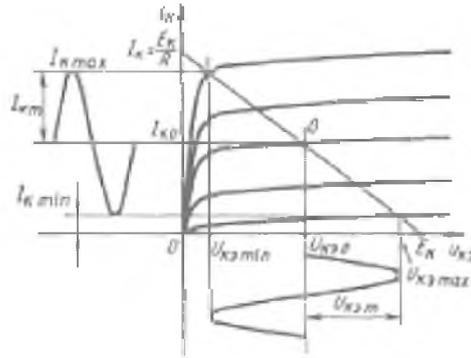


Рис.2.4.7

Поэтому режим класса *A* применяется в усилителях напряжения и усилителях малой мощности.

Режим *B*. Коллекторный ток протекает через транзистор в течение половины периода. При этом рабочая точка выбирается на нижнем сгибе характеристики транзистора—ток покоя равен нулю или очень мал (рис.2.4.8).

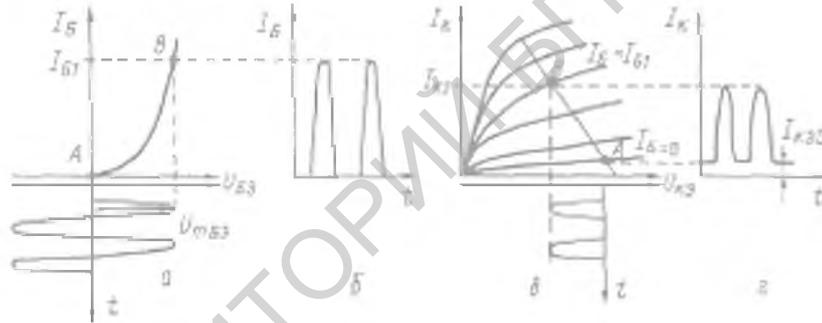


Рис.2.4.8

В результате уменьшаются постоянная составляющая коллекторного тока и, следовательно, мощность, расходуемая от источника коллекторного питания. Поэтому этот режим является более экономичным, чем предыдущий ( $\eta=65—70\%$ ), но увеличиваются нелинейные искажения(35—50%). Режим *B* применяется в усилителях большой мощности (сотни ватт и более).

Режим *AB*. Является промежуточным между режимами классов *A* и *B* (рис.2.4.8). Рабочая точка выбирается ближе к нижнему сгибу характеристики.

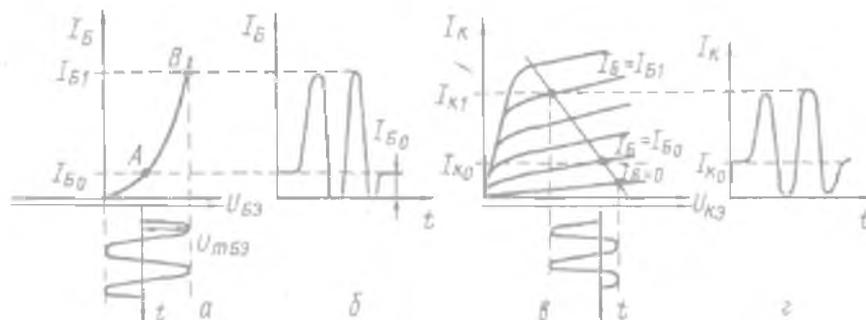


Рис.2.4.9

Режим *AB* более экономичен, чем режим *A* ( $\eta=45-50\%$ ).

Режим класса *AB* применяется в усилителях средней мощности (десятки ватт).

Режим класса *C* характеризуется тем, что рабочая точка находится левее точки запираания транзистора. При этом по сравнению с режимом класса *B* ток  $I_0$  оказывается еще меньше, в результате чего  $\eta = 75\text{—}80\%$ , однако нелинейные искажения так велики, что он практически непригоден для использования в УНЧ.

При повышении температуры окружающей среды ток транзистора увеличивается и его характеристики смещаются вверх (рис.). Основной причиной возрастания коллекторного тока является увеличение обратного тока, протекающего между базой и коллектором при неизменном положении нагрузочной прямой  $U_{кэ} = E_k - I_k R_k$ , поскольку величины  $E_k$  и  $R_k$  остаются прежними. Смещение характеристик приведет к смещению рабочей точки *A*, уменьшению размаха выходного напряжения и искажению его формы.

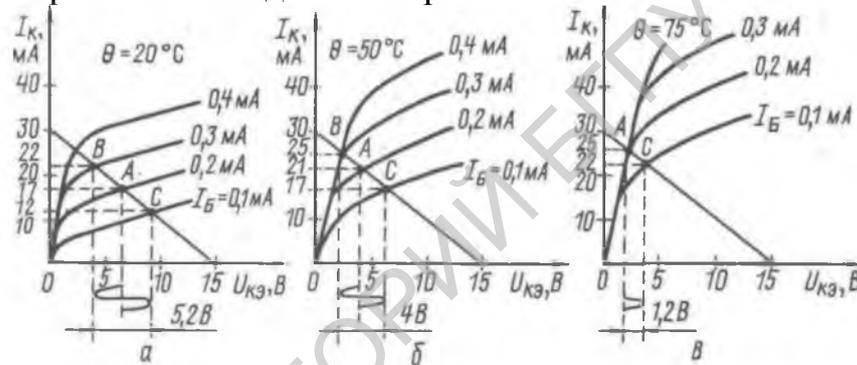


Рис.2.4.10

Эмиттерная стабилизация. Эмиттерная стабилизация заключается в использовании в усилителе обратной связи по постоянному току (рис.2.4.10а). В схему с общим эмиттером добавлен дополнительный резистор  $R_3$  в цепи эмиттера. Ток эмиттера, протекая через резистор  $R_3$ , создает на нем падение напряжения  $U_{R_3} = I_3 R_3$ . Напряжение эмиттерного перехода  $U_{эб} = U_{R_2} = U_{R_3} + U_{АЭ_0}$ . С увеличением тока эмиттера повышается напряжение  $U_{R_3}$ , а напряжение  $U_{R_2}$  практически не

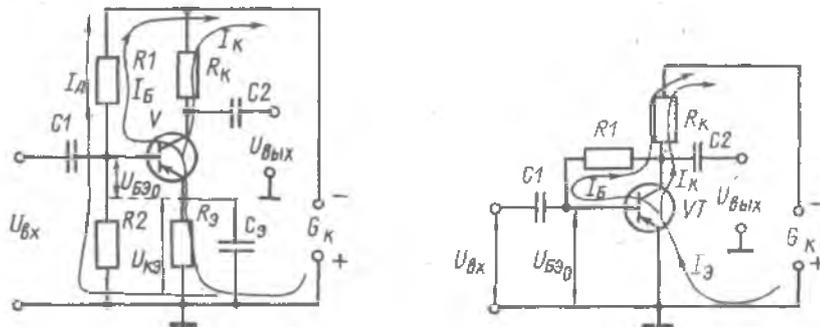


Рис.2.4.11

изменяется. Это приводит к уменьшению напряжения на эмиттерном переходе  $U_{АЭ_0}$ , что вызывает уменьшение тока, протекающего через транзистор.

Напряжение на резисторе  $R_3$  называют напряжением отрицательной обратной связи ( $OOC$ ), а резистор  $R_3$  — резистором  $OOC$ , или резистором температурной стабилизации (термостабилизации).

Следует отметить, что переменная составляющая коллекторного тока при подаче на вход переменного напряжения протекает через оба резистора ( $R_2$  и  $R_3$ ). Переменное напряжение на  $R_3$ , совпадающее по фазе с входным напряжением, уменьшает переменное напряжение на эмиттерном переходе  $U_{ax} - U_{R_3}$ , что вызывает уменьшение коэффициента усиления усилителя. Для отсечения переменной составляющей параллельно резистору  $R_3$  включают конденсатор  $C_3$ . Этот конденсатор должен иметь большую емкость, чтобы его сопротивление переменному току было во много раз меньше сопротивления резистора  $R_3$ .

Коллекторная стабилизация (рис.2.4.11б) Увеличение токов при повышении температуры вызовет увеличения падения напряжения на  $R_2$ , а это приведет к уменьшению напряжения на коллекторе, т.к.  $U_c = E_c - I_c R_c$ . Резистор  $R_1$  подключен между базой и коллектором, поэтому ток базы при снижении напряжения коллектора также будет уменьшаться  $I_b = U_{кз} / R_1$ , что вызовет уменьшение токов коллектора и эмиттера.

Полная схема резонансного усилителя приведена на (рис. 2.4.12.а)

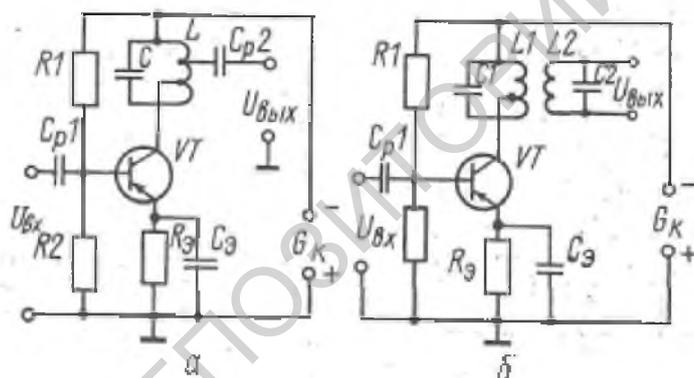


Рис.2.4.12

В нем в качестве нагрузки используется параллельный колебательный контур. Подбором  $C$  и  $L$  контур настраиваем на частоту усиливаемого сигнала. Для этой частоты сопротивление контура наибольшее, поэтому усиливается лишь напряжение одной частоты, а напряжения других частот подавляются. (лекция 3).

Так как выходное сопротивление транзистора мало, применяется не полное, а частичное включение контура в коллекторную цепь (рис.2.4.12). При этом уменьшается шунтирование контура коллекторной цепью транзистора, т. е. уменьшается влияние коллекторной цепи транзистора на качество контура (его добротность) и улучшается качество работы усилителя. С этой же целью на нагрузку подается не все напряжение колебательного контура, а лишь часть его.

Трансформаторные усилители мощности предназначены для получения максимальной мощности переменного тока в нагрузке усилителя при заданной амплитуде входного напряжения и допустимых искажениях

выходного напряжения. Усилители мощности могут выполняться по одноконтурной и двухконтурной схемам.

Одноконтурный усилитель. В коллекторную цепь транзистора включается первичная обмотка трансформатора (рис. 2.4.13). Из-за малого сопротивления этой обмотки постоянному току (единицы или несколько десятков ом) в режиме покоя (т. е. нет переменного входного сигнала), напряжение коллектора практически равно напряжению —  $E_k$ .

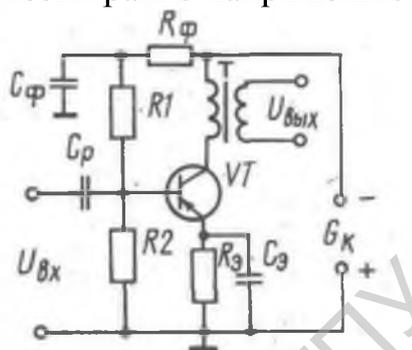


Рис.2.4.13

Переменное входное напряжение создает переменную составляющую коллекторного тока и магнитный поток в сердечнике трансформатора. Под действием магнитного потока в обмотках трансформатора наводятся переменные ЭДС с частотой сигнала первичной обмотки. Со вторичной обмотки переменное напряжение подается к нагрузке. КПД такого усилителя больше чем резисторного.

Недостатки: большие габариты и вес; уменьшение коэффициента усиления на низких частотах (меньших 50 Гц), низкий КПД (до 30%).

Двухконтурный усилитель. Содержит два одноконтурных усилителя, работающих на общую нагрузку и имеющих общий источник питания (рис.2.4.14).

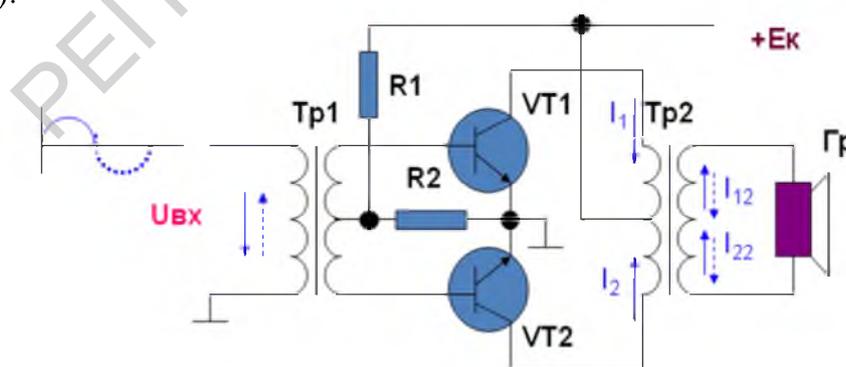


Рис.2.4.14

Источники усиливаемого сигнала подключаются к базовым цепям транзисторов через входной трансформатор Tr1, вторичная обмотка которого состоит из двух одинаковых секций. Средняя точка вторичной обмотки трансформатора подключена через резистор R2, к эмиттерам трансформаторов и минусу источника питания.

Первичная обмотка выходного трансформатора Tr2 также состоит из двух одинаковых секций. Коллекторная цепь транзистора VT1 подключена к

верхней секции а транзистора VT2 – к нижней. Средняя точка первичной обмотки соединена с полюсом источника питания. Относительно источника питания  $E_k$  транзисторы включены параллельно.

Транзисторы работают в режиме Б. Временные диаграммы тока и напряжения (рис. 2.4.15). Интервал времени  $0-t_1$  - в цепях усилителя протекают незначительные постоянные токи смещения, величиной которых можно пренебречь.

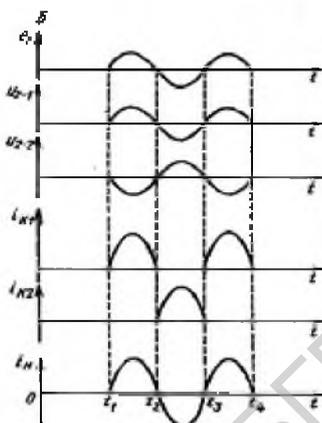


Рис.2.4.15

Первый полупериод (интервал  $t_1-t_2$ ) напряжения в обмотках входного трансформатора направлены вниз, вторичного - вверх. Потенциал базы транзистора VT1 будет положительный (тр-р открыт), а базы транзистора VT2 – отрицательный (закрыт). В верхнем контуре выходной цепи ( $+E_k$ , TP2, VT1,  $-E_k$ ) будет протекать ток против часовой стрелки. Во второй полупериод (интервал  $t_2-t_3$ ) напряжение в обмотках входного трансформатора изменит направление на противоположное (стрелка вверх). Закроется транзистор VT1 и откроется VT2. Выходной ток будет протекать в нижнем контуре по часовой стрелке.

В результате во вторичной обмотке трансформатора TP2 и через нагрузку  $\Gamma_p$  будет протекать переменный ток. Транзисторы работают поочередно – название схемы «двухтактная» (КПД~70%).

Рассмотрим схему с одним источником питания и транзисторной различной проводимостью: VT1 n-p-n-типа, а VT2 p-n-p-типа. (рис.2.4.16).

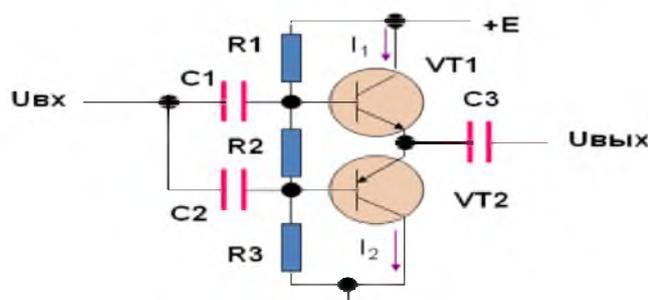


Рис.2.4.16

Нагрузка включается между эмиттерами и общим проводом или между эмиттерами и положительным полюсом источника питания. Напряжение

смещения для каждого транзистора подбирается равным  $\frac{E}{2}$  и обеспечивает работу в режиме В или АВ, поэтому при отсутствии входного сигнала транзисторы закрыты и ток нагрузки равен нулю.

При воздействии входного сигнала схема работает так же, как и предыдущая (рис.7), т.е. в течение положительного полупериода открыт транзистор VT1, а в отрицательный полупериод – VT2. Направление токов показано на рисунке.

*Обратной связью (ОС)* называется процесс передачи энергии из выходной цепи усилителя во входную. Различают внутреннюю ОС (свойства усилительных элементов) и внешнюю.

Внешняя ОС организуется путем введения в схему специальных цепей. Замкнутый контур, образованный цепью ОС и частью схемы усилителя, к которой ОС подключена, называется петлей ОС.

*Коэффициент передачи  $\beta$*  показывает, какая часть выходного напряжения передается на вход усилителя, т.е.  $\beta = U_{oc} / U_{вых}$ .

Когда  $U_{oc}$  пропорционально напряжению на нагрузке  $U_{вых}$  (рис. 10 а, в), то имеет место ОС по напряжению.

Когда  $U_{oc}$  пропорционально току нагрузки, то это ОС по току (рис. 10 б, г).

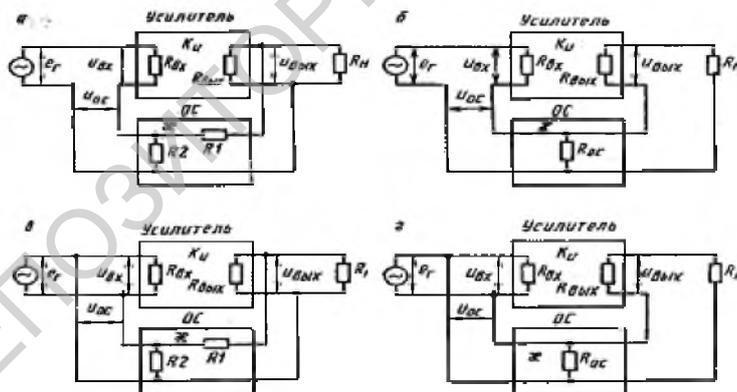


Рис.2.4.1717

По способу передачи энергии через ОС во входную цепь усилителя по отношению ко входному сигналу различают последовательную (рис. 2.4.17, а,б) и параллельную (рис. 2.4.17, в, г) ОС. Таким образом, в зависимости о схемы подключения ОС к выходу и входу усилителя можно выделить четыре схемы ОС: последовательная по напряжению, последовательная по току; параллельная по напряжению, параллельная по току.

Сигнал ОС, поступающий на вход усилителя, может складываться с усиливаемым сигналом (*положительная ОС*) или вычитаться из него (*отрицательная ОС*). В усилителях применяется только *отрицательная ОС*.

Рассмотрим последовательную отрицательной ОС по напряжению (рис. 2.4.17, а).

Для этой схемы можно записать  $u_{ex} = e_{г} - u_{oc}$  или  $e_{г} = u_{ex} + u_{oc}$

Общий коэффициент усиления схемы по напряжению с учетом ОС

$$K_{U_{oc}} = \frac{u_{вых}}{u_{вх} + u_{oc}}$$

Учитывая соотношения:

$$u_{вых} = K_U u_{вх} \text{ и } u_{oc} = \beta u_{вых} = \beta K_U u_{вх}$$

Получим:

$$K_{U_{oc}} = \frac{K_U}{1 + \beta K_U}$$

Выражение показывает, что *ОС* уменьшает коэффициент усиления системы, но в то же время она стабилизирует численное значение коэффициента усиления в более широком диапазоне частот.

Если коэффициент усиления усилителя очень большой, ( $K_U \rightarrow \infty$ ), то

$$K_{U_{oc}} = \frac{1}{\beta}.$$

В этом случае говорят о глубокой *ОС*.

Можно показать, что *отрицательная ОС* увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивления.

Применение *отрицательной ОС* позволяет уменьшить влияние внутренних помех на искажение формы усиливаемого сигнала (рис.11); амплитудно-частотная характеристика идет ровнее, полоса пропускания становится шире.

В резисторных усилителях она осуществляется с помощью переходных (разделительных) конденсаторов  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$  и  $C_{p3}$  (рис.2.4.18).

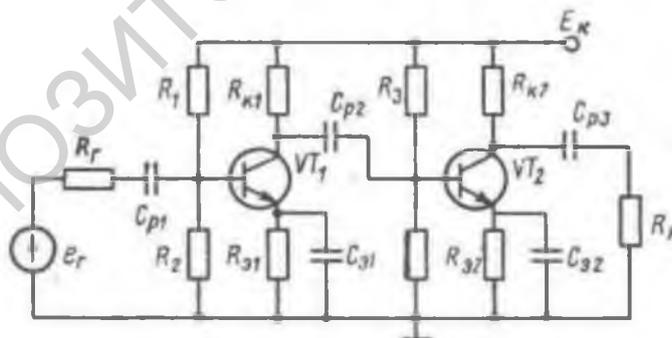


Рис.2.4.18

Конденсаторы  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$  и  $C_{p3}$  обеспечивают развязку каскадов по постоянному току и в то же время не оказывают заметного влияния на прохождение переменной составляющей входного сигнала.

Как известно, от генератора в нагрузку максимальная мощность передается в том случае, если их сопротивления одинаковы. Применительно к межкаскадным связям это означает равенство входного сопротивления данного каскада и выходного сопротивления предыдущего каскада. Такое согласование при емкостной связи между каскадами получить нельзя, поэтому используют трансформаторную связь между каскадами (рис.2.4.19).

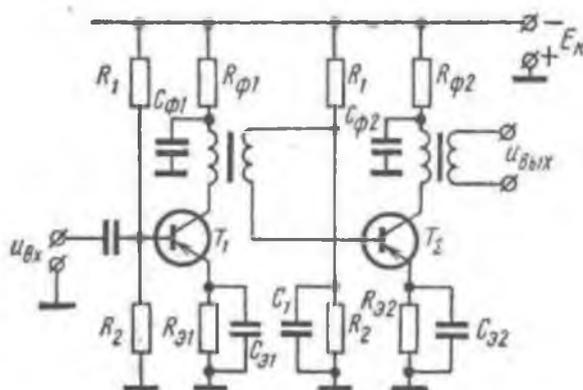


Рис.2.4.19

Согласующий трансформатор в таких схемах, как правило, является понижающим. За счет трансформатора эта схема имеет худшие частотные свойства, большие габариты и стоимость.

### Тема 2.5. Интегральные микросхемы.

*Общая характеристика интегральных микросхем. Операционные усилители. Обратная связь в усилителях. Структурная схема усилителя с обратной связью. Положительная и отрицательная обратная связь. Способы реализации. Коэффициент усиления усилителя с обратной связью.*

В усилителях постоянного тока (УПТ) (частота сигнала единицы и доли герц) применяют непосредственную омическую (гальваническую) связь. Лучшими показателями в этом отношении обладают дифференциальные (параллельно-балансные) каскады (рис.2.5.1).

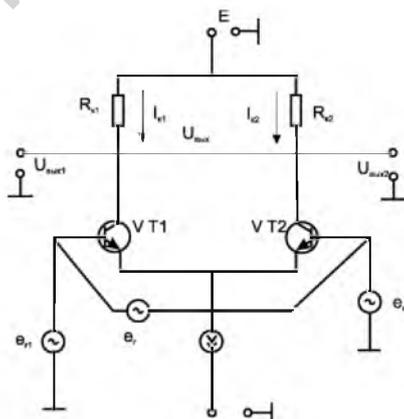


Рис.2.5.1

Дифференциальный усилитель (ДУ) выполнен по принципу моста, два плеча которого образуют резисторы  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$ , а два других – транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$ . Такие схемы как правило выполняются в виде интегральных микросхем. Непременными условиями ДУ являются равенство сопротивлений резисторов  $R_{K1}=R_{K2}$ , и идентичность параметров транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$ .

**Включение:** эмиттеры- генератор стабильного тока (ГСТ); питание - два источника  $E^{(+)}$  и  $E^{(-)}$  с равными напряжениями; входы (базовые цепи) - от двух источников  $e_{r1}$  и  $e_{r2}$  или от одного (симметричный вход).

**Выход:** с коллекторов транзисторов относительно общей точки (несимметричные  $u_{вых1}, u_{вых2}$ ); между коллекторами транзисторов (симметричный или дифференциальный выход  $u_{вых.д}$ ).

**Работа:** При  $e_{r1} = e_{r2} = 0$ , токи  $i_{Э1} = i_{Э2} = I_0/2$ . Т.к.  $I_0$  почти  $= I_K$ , то  $i_{K1} = i_{K2} = I_0/2$  (рис.2 а). Последнее равенство определяет, что  $u_{вых1} = u_{вых2} = E^{(+)} - I_0 R_K/2 = u_{баланс}$ . Это режим баланса или покоя системы (интервал времени  $0 - t_1$ ). В этом режиме :  $u_{вых.д} = u_{вых2} - u_{вых1} = 0$ , так как  $u_{вых1} = u_{вых2}$ .

Если на вход  $VT_1$  поступает положительный сигнал  $e_{r1} > 0$ , а  $e_{r2} = 0$  (рис.2б), то  $i_{K1} > I_0/2$ , а  $i_{K2} < I_0/2$ , но их сумма будет равна  $I_0$ . В результате, напряжения на несимметричных выходах будут  $u_{вых1} = E^{(+)} - i_{K1} R_{K1} < u_{баланс}$ ;  $u_{вых2} = E^{(+)} + i_{K2} R_{K2} > u_{баланс}$ , а по симметричному выходу -  $u_{вых.д} = u_{вых2} - u_{вых1} = 2\Delta u$  (см. рис. 2 в, интервал  $t_1 - t_2$ ).

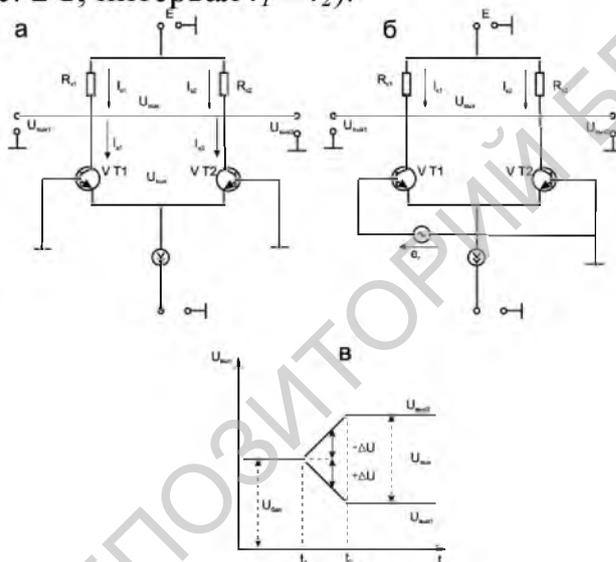


Рис.2.5.2

При увеличении сигнала  $e_{r1}$  (рис.2.5.2б), напряжение на первом выходе уменьшится, поэтому первый вход относительно выхода называется инвертирующим, а второй – неинвертирующим.

Если в схеме рис.2б входной сигнал  $e_{r1}$  очень большой,  $VT_2$  полностью закрыт. Тогда  $I_{K1} = I_0$ , а  $I_{K2} = 0$ ;  $u_{вых1} = E^{(+)} - I_0 R_{K1}$ ;  $u_{вых2} = E^{(+)}$ , а напряжение по симметричному выходу имеет максимальное значение:  $u_{вых.д} = u_{вых2} - u_{вых1} = I_0 R_{K1}$  (интервал  $t > t_2$  рис.2в). Для случая  $e_{r1} = 0$ ,  $e_{r2} > 0$  процесс аналогичен с точностью до наоборот.

На базе дифференциальных усилителей создаются интегральные усилители, получившие название *операционных (ОУ)*, т.к. с их помощью можно производить математические операции — суммирование, вычитание, интегрирование, дифференцирование, логарифмирование и т. д. ОУ изготавливаются в монолитном исполнении по полупроводниковой интегральной технологии. Условное обозначение ОУ как функционального элемента приведено на рис.2.5.3

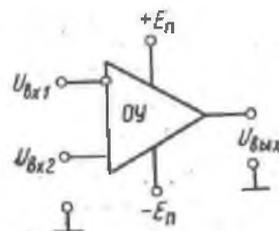


Рис.2.5.3

Он имеет два входа: инвертирующий и неинвертирующий.

Если при подключении источника сигнала ко входу потенциал инвертирующего входа выше, чем не инвертирующего, то выходное напряжение сдвинуто на  $180^\circ$  относительно входного. В случае если потенциал не инвертирующего входа выше, чем инвертирующего, то выходное и входное напряжения совпадают по фазе.

ОУ содержит следующие основные функциональные узлы: дифференциальный усилитель, преобразователь симметричного выхода в несимметричный, схему сдвига уровня напряжения и выходной каскад— усилитель мощности.

На (рис.2.5.4) приведена схема ОУ.

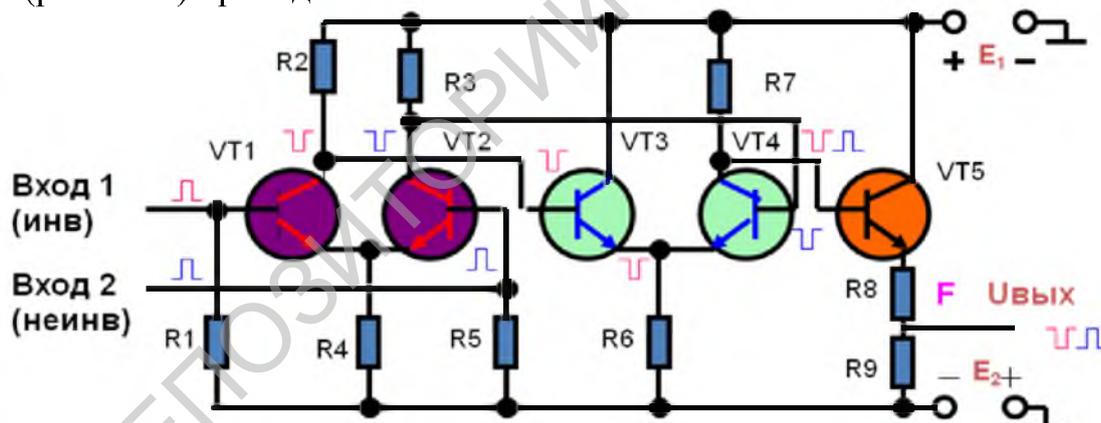


Рис. 2.5.4

На транзисторах VT1 и VT2 построен дифференциальный усилитель, на транзисторах VT3 и VT4 – преобразователь симметричного выхода в несимметричный, на транзисторе VT5 – каскад сдвига уровня напряжения. Выход F подключается ко входу выходного усилителя.

Режим работы дифференциального усилителя выбирается таким, чтобы коллекторные напряжения транзисторов VT1 и VT2 были одинаковыми.

В графическом обозначении операционного усилителя вход А ( $V_{x2}$ ) называют не инвертирующим, а вход В ( $V_{x1}$ ) – инвертирующим. Для подготовки работы ОУ необходимо, чтобы при отсутствии входного сигнала в дифференциальном усилителе коллекторные напряжения обоих транзисторов были одинаковыми, а, следовательно,  $U_{\text{вых}} = 0$ . Для установки этих напряжений используется балансировка, которая осуществляется резистором R4. (см. рис.5,6).



Суммирующий усилитель. На (рис. 9) представлена схема включения ОУ для суммирования двух сигналов с изменением фазы входного напряжения (инвертирующий сумматор).

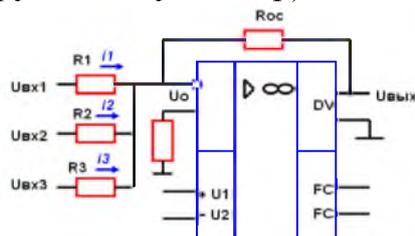


Рис.2.5.6

От схемы (рис. 2.5.6) она отличается тем, что каждый источник сигнала подключен к инвертирующему входу через свой резистор. Входных сигналов может быть и более трех. При  $R_{вх} \rightarrow \infty$  уравнение для токов схемы имеет следующий вид:

$$\frac{u_{вх1}}{R_1} + \frac{u_{вх2}}{R_2} + \frac{u_{вх3}}{R_3} = -\frac{u_{вых}}{R_{oc}}$$

Если принять  $R_1 = R_2 = R_3 = R_{oc}$ , то получим

$$u_{вых} = -(u_{вх1} + u_{вх2} + u_{вх3})$$

Вычитающий усилитель. Управляющие напряжения подаются на оба входа ОУ (Рис.2.5.7).

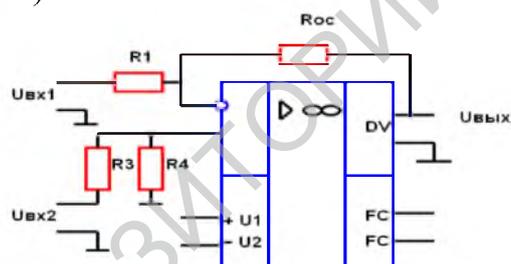


Рис.2.5.7

В этой схеме выходное напряжение усилителя пропорционально разности входных напряжений:  $u_{вых} = (u_{вх2} - u_{вх1}) \frac{R_{oc}}{R_1}$

Компаратор сигналов (пороговый усилитель). Компаратором называется схема для сравнения двух напряжений (рис. 2.5.8).

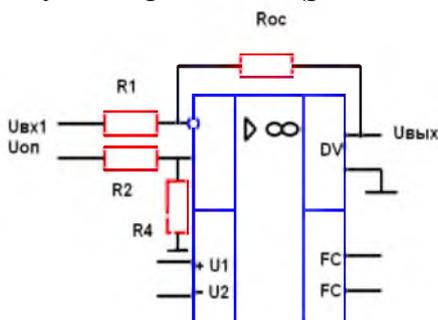


Рис.2.5.8

На неинвертирующий вход подается постоянное опорное напряжение  $U_{оп}$ . На инвертирующий вход - изменяющееся во времени напряжение  $u_{вх1}$ .

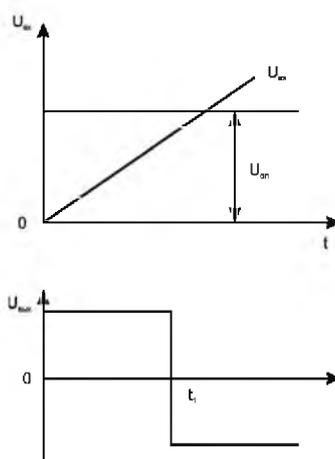


Рис.2.5.9

В схеме компаратора используется свойство усилителя изменять полярность (знак) выходного напряжения при изменении полярности напряжения на входах. Рассмотрим временные диаграммы (рис.2.5.9):

Интервал  $0 - t_1$   $U_{он} > u_{вх}$ , значит, потенциал неинвертирующего входа выше, чем инвертирующего,  $u_{вых}$  совпадает по фазе с  $U_{он}$  ( $u_{вых} > 0$ ). В момент времени  $t > t_1$ , когда  $u_{вх} > U_{он}$  потенциал инвертирующего входа выше неинвертирующего и  $u_{вых} < 0$ , т.е. отстает по фазе от на  $180^\circ$ . Изменение полярности выходного напряжения происходит в момент времени  $t_1$ , когда  $u_{вх} = U_{он}$ . Такие схемы используются для преобразования формы сигнала, получения прямоугольных импульсов и т.п.

В современных электронных устройствах усилители строятся, как правило, в виде интегральных микросхем.

Интегральными микросхемами называются миниатюрные электронные узлы с высокой плотностью электрически соединенных элементов, предназначенные для преобразования и обработки сигналов. Существует несколько типов микросхем.

Полупроводниковые микросхемы изготавливают в основном из пластин кристаллического кремния. Активные и пассивные элементы располагаются при поверхностном слое или в объеме подложки полупроводникового материала, изолированы друг от друга и в то же время соединены между собой в соответствии с принципиальной схемой узла.

Часть элементов в таких микросхемах (резисторы, конденсаторы и т.д.) неразъемно связана между собой, а другие элементы (безкорпусные диоды, транзисторы и т.д.) являются навесными.

Микросхемы не относящиеся к полупроводниковым и гибридным относятся к *прочим* микросхемам.

Первый элемент – цифра, указывающая на тип микросхемы (1, 5, 7 – полупроводниковые; 2, 4, 6, 8 – гибридные; 3 – прочие).

Второй элемент – две цифры, обозначающие порядковый номер разработки (от 00 до 99) и образуют серию микросхемы.

Третий элемент – две буквы, отображающие функциональное назначение микросхемы. Например, ГС – генератор гармонических сигналов, ДА – детектор амплитудный, ДС – детектор частотный, УВ – усилитель

высокой частоты, УН – усилитель низкой частоты, УД – операционный усилитель, ИЕ – счетчик и т.д.

Четвертый элемент – порядковый номер разработки в данной серии.

Пример: рассмотрим условное обозначение микросхемы К174УН3

К – микросхема широкого применения (усилитель серии К);

174 – номер серии;

1 – микросхема полупроводниковая;

УН – усилитель напряжения низкой частоты (до 5МГц);

3 – порядковый номер разработки в данной серии

### Тема 2.6. Генерация гармонических колебаний.

*Схема и работа LC-автогенератора. Условия самовозбуждения генератора. Схема генератора с параллельным включением контура. Схема генератора с автотрансформаторной связью. Режимы работы генератора. Стабилизация частоты генерации. Схемы генераторов с RC-цепями.*

Генераторы - электронные устройства создающие электрические колебания определенной амплитуды, частоты и формы. Энергия генерируемых колебаний появляется в результате преобразования энергии подключенных к генератору источников тока.

По форме генерируемого сигнала генераторы бывают *гармонические, прямоугольные и пилообразные.*

По способу возбуждения генераторы бывают с внешним возбуждением и с самовозбуждением (автогенераторы).

Генераторы с независимым или внешним возбуждением без внешнего источника создавать электрические колебания не могут и служат для усиления мощности колебаний, подаваемых на их вход от других устройств. Такие генераторы часто называют усилителями мощности.

Самовозбуждение означает, что для получения колебаний в таком генераторе не нужен дополнительный источник электрических колебаний. Колебания тока и напряжения происходят в самом генераторе при подаче на него напряжения питания автоматически.

*Автогенератор* можно образовать путем подключения к усилителю цепи положительной обратной связи (рис.2.6.1).

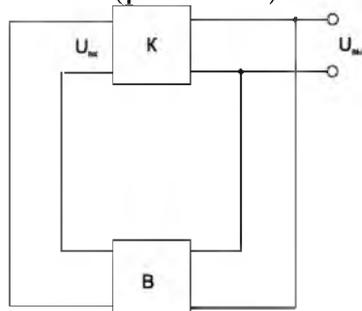


Рис.2.6.1

Появление на входе усилителя переменного напряжения амплитудой  $U_{Вхм}$  приводит к возникновению на его выходе напряжения амплитудой

$$\dot{U}_{Выхм} = K_u \dot{U}_{Вхм} .$$

По цепи обратной связи на вход усилителя передается напряжение амплитудой

$$\dot{U}_{Осм} = \beta \dot{U}_{Выхм} = \beta K_u \dot{U}_{Вхм} .$$

Очевидно, что при  $\beta K_u = 1$   $\dot{U}_{Осм} = \dot{U}_{Вхм}$  т. е. по цепи обратной связи на вход усилителя поступает напряжение, равное входному. Соотношение  $\beta K_u = 1$  определяет условие существования в усилителе с обратной связью этого стационарного процесса.

Комплексные числа  $K_u$  и  $\beta$  можно представить в виде  $K_u = K_u e^{j\varphi_k}$ ,  $\beta_u = \beta_u e^{j\varphi_\beta}$ , тогда  $\beta K_u = K_u e^{j\varphi_k} \beta_u e^{j\varphi_\beta} = 1$ . Это равенство выполняется, если  $K_u \beta = 1$  и  $\varphi_k + \varphi_\beta = \pm 2\pi k$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Первое равенство показывает, что усилитель усиливает сигнал во столько раз, во сколько ослабляет его цепь обратной связи, и называется *условием баланса амплитуд*. При балансе амплитуд энергия источника питания через цепь положительной обратной связи компенсирует потери энергии в схеме. Второе равенство называют *условием баланса фаз*.

Условию  $K_u \beta = 1$  соответствует  $K_u \rightarrow \infty$ . Что следует рассматривать как отражение возможности появления на выходе усилителя с положительной обратной связью переменного напряжения определенной амплитуды при сколь угодно малой амплитуде напряжения на его входе. Амплитуда выходного напряжения всегда ограничена.

При выполнении условия  $K_u \beta > 1$  амплитуда поступающего по цепи обратной связи напряжения окажется больше амплитуды первоначальных колебаний на входе усилителя. Амплитуда выходного напряжения генератора будет возрастать до некоторого значения. Ограничение амплитуды колебаний произойдет вследствие увеличения отдаваемой автогенератором энергии в нагрузку и уменьшения величины  $K_u$ , обусловленного наличием нелинейных элементов в цепи автогенератора.

Различают «мягкий» и «жесткий» режим самовозбуждения. Первый – на входе усилителя первоначально малые изменения напряжения, второй – большие.

Режимы работы автогенератора определяются величиной обратной связи:

Недонапряженный - это когда при увеличении обратной связи амплитуда напряжений возрастает без искажений.

Критический - увеличение обратной связи не приводит к увеличению амплитуды колебаний, при этом искажения формы тока незначительны.

Перенапряженный — возрастание амплитуды колебаний не происходит, а происходит искажение формы сигнала.

Применяется для получения высокочастотных гармонических колебаний и представляет собой резонансный усилитель с параллельным  $L_k C_k$  колебательным контуром, включенным в цепь коллектора. К усилителю подключена цепь положительной обратной связи в виде катушки  $L_{св}$  и конденсатора  $C_1$ , соединяющего по переменному току базу транзистора с землей (рис.2).

Работа автогенераторов  $LC$  типа основана на поддержании в контуре незатухающих колебаний за счет пополнения потерь энергии в нем путем периодической подзарядки конденсатора от источника постоянного тока.

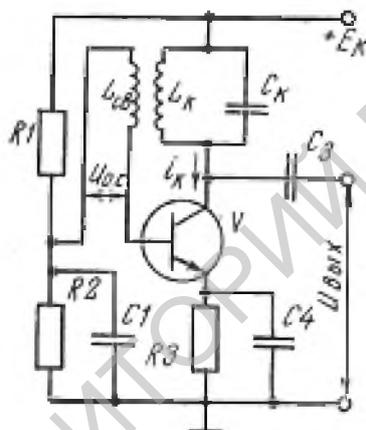


Рис.2.6.2

Таким образом в контуре будут создаваться незатухающие колебания. Эта энергия пополняется за счет источника питания. Транзистор в этой схеме выполняет роль нелинейного элемента.

Частота колебаний в контуре определяется параметрами колебательного контура:  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C_k}}$ .

RC - используются для получения низкочастотных колебаний и представляют собой апериодический усилитель с избирательными цепями обратной связи или связи между каскадами, содержащими лишь резисторы и конденсаторы. Широкое распространение получили две разновидности генераторов этого типа:

- генераторы с поворотом фазы напряжения на  $180^\circ$  в цепи обратной связи (генераторы с фазосдвигающими цепочками)
- генераторы без поворота фазы напряжения в цепи обратной связи (генераторы с мостом Вина).

Первый генератор (рис.3) представляет собой однокаскадный резисторный усилитель с общим эмиттером, имеющим три или больше RC-звеньев в цепи обратной связи.

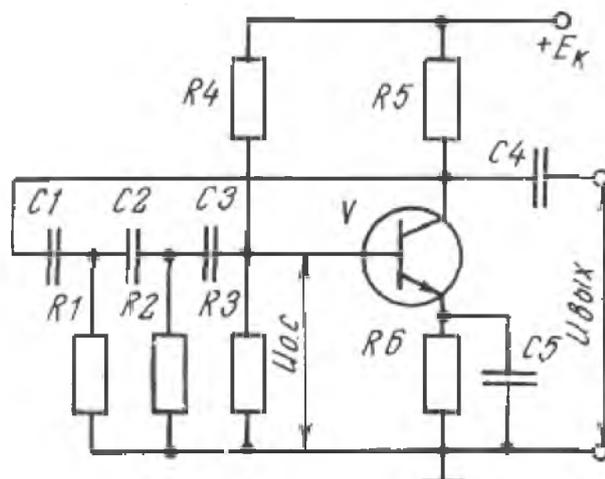


Рис.2.6.3

Как известно, в однокаскадном усилителе с общим эмиттером создается фазовый сдвиг на  $180^\circ$  выходного напряжения относительно входного. Для выполнения условия баланса фаз в цепи обратной связи сдвиг фаз напряжений должен быть таким же. Это обеспечивается  $RC$ -звеньями. Широко используются два варианта соединений резисторов и конденсаторов в  $RC$ -звеньях, образующих цепь обратной связи (рис. 2.6.4).

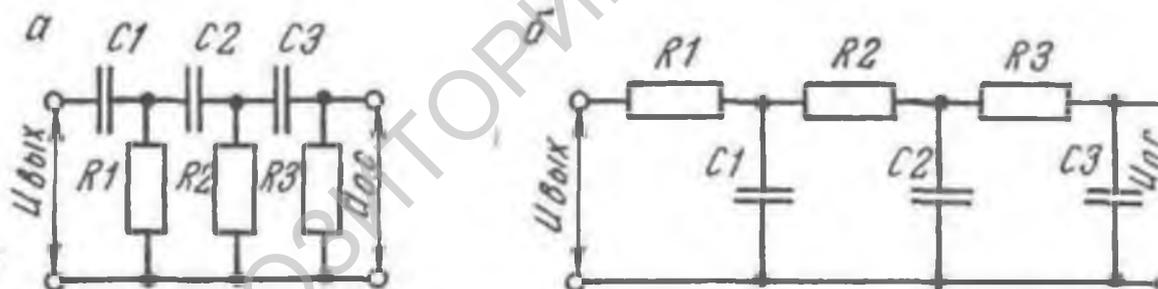


Рис.2.6.4(а,б)

При прохождении сигнала через звено R-параллель осуществляется опережение фазы сигнала, а при прохождении через звено C-параллель - отставание. Ввиду того, что одно звено может сместить фазу сигнала меньше чем на  $90^\circ$ , число звеньев для обеспечения положительной обратной связи должно быть не менее 3.

От количества этих звеньев, способа соединения элементов и их параметров зависят значение коэффициента обратной связи  $\beta$ , который определяется из условия:  $K_U \geq \frac{1}{\beta}$

Фазовращающие  $RC$  - цепи существенно уменьшают сигнал, поступающий на вход усилителя, поэтому:  $K_U \geq 1/\beta = 29$

Частота  $\omega$  для варианта R-параллель (фазовый сдвиг на угол  $\pi$ ), (рис.4а) вычисляется по формуле  $\omega = \frac{1}{\sqrt{6}RC}$ ;

C-параллель (фазовый сдвиг на угол  $-\pi$ ) (рис.4 б) по формуле  $\omega = \frac{\sqrt{6}}{RC}$ .

Условие баланса фаз  $\varphi = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ, \dots$

Для нормальной работы генераторов необходим согласующий каскад — эмиттерный повторитель (рис.6), выполненный на транзисторе  $V_2$ . При отсутствии эмиттерного повторителя условия самовозбуждения в схеме генератора выполнить трудно, так как, во-первых, фазовращающая цепь обратной связи шунтирует резистор  $R_5$  и тем самым уменьшает коэффициент усиления  $K_U$  усилительного каскада; во-вторых, малое входное сопротивление каскада снижает коэффициент передачи  $\beta$ .

В генераторах без поворота фазы в цепи обратной связи (рис.2.6.5) ставят двухкаскадный усилитель, который не вносит фазовых сдвигов.

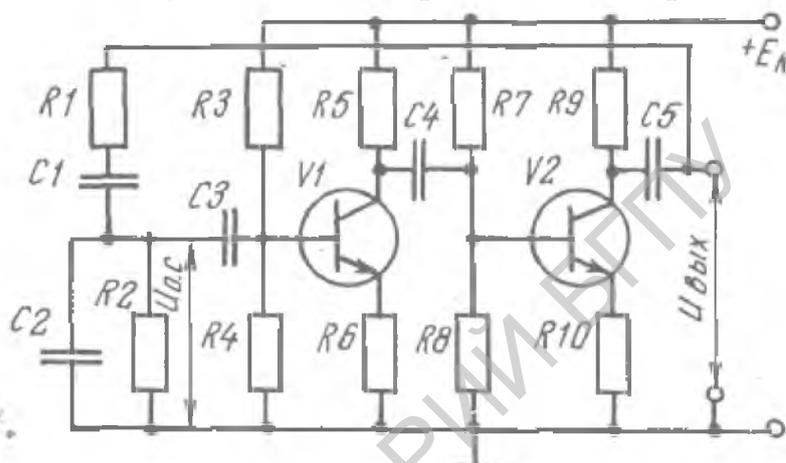


Рис.2.6.5

Если выход усилителя соединить с его входом через цепь без реактивных элементов, условия самовозбуждения будут выполняться в широком диапазоне частот, генератор будет широкополосным. Генерация колебаний в узкой полосе достигается введением специальной избирательной цепи обратной связи содержащей последовательно соединенные резистор  $R_1$  и конденсатор  $C_1$  и параллельно включенные резистор  $R_2$  и конденсатор  $C_2$ . Подобную последовательно-параллельную избирательную цепь наз. *мостом Вина* (рис.2.6.7).

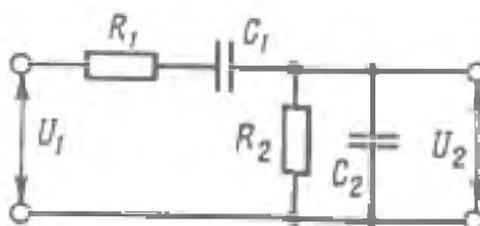


Рис.2.6.7

$RC$ -генератор с мостом Вина обеспечивает нулевой сдвиг между входным и выходным напряжениями на квази-резонансной частоте  $f_0$ . На этой частоте выполняется условие самовозбуждения. На других частотах условия самовозбуждения не выполняются, поскольку усиливается затухание

в  $RC$ -цепочке, т. е. уменьшается коэффициент ее передачи  $\beta$ . Генерируемые колебания имеют синусоидальную форму с частотой  $f_0$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

Обычно  $R_1 = R_2 = R$ ,  $C_1 = C_2 = C$ , тогда

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}; \quad \beta = \frac{1}{3}$$

Коэффициент усиления  $K_U$  определяет величину коэффициента обратной связи в генераторе  $\beta$ , и равен трем.

Двухкаскадный усилитель имеет значительный запас по усилению, и возбуждение колебаний в генераторе с мостом Вина происходит без осложнений.

$RC$ -генераторы преимущественно используются для получения гармонических колебаний звуковой частоты.

### Тема 2.7. Нелинейные преобразования сигналов.

*Амплитудная модуляция. Коэффициент амплитудной модуляции. Базовая амплитудная модуляция смещением. Коллекторная амплитудная модуляция. Детектирование амплитудно-модулированных сигналов. Диодный детектор. Коллекторный детектор.*

*Частотная модуляция. Коэффициент частотной модуляции. Функциональная схема осуществления частотной модуляции на транзисторах. Принципиальная схема частотного модулятора. Детектирование частотно модулированных сигналов.*

Скорость распространения звука в воздухе составляет 330 м/с, а распространение электромагнитных волн 300 000 км/с. Для того, чтобы осуществить передачу звука с большой скоростью, нужно использовать электромагнитные волны в качестве переносчика звукового сигнала.

*Модуляция* - процесс наложения сигнала низкой частоты на электромагнитные волны или процесс управления колебаниями высокой частоты при передаче речи, музыки или телевизионных сигналов.

*Ток несущей частоты* - переменный ток высокой частоты, протекающий в антенне передатчика при отсутствии сигнала

$$i = I_{m0} \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

Передаваемые сигналы могут воздействовать на одну из этих величин, поэтому различают *амплитудную, частотную и фазовую модуляцию*.

Амплитудная модуляция (АМ). Часто применяется при передаче сигналов звуковой частоты, т.е. когда амплитуда тока высокой частоты изменяется в такт звуковым колебаниям. Огибающая колебаний высокой частоты повторяет форму тока звукового сигнала  $i_F$ .

Глубина модуляции - степень изменения амплитуды высокочастотного колебания (зависит от силы звука). Чем громче звук, тем больше глубина модуляции.

Коэффициент модуляции - показывает отношение прироста амплитуды тока несущей частоты к амплитуде тока до модуляции. Коэффициент модуляции обычно выражают в процентах.

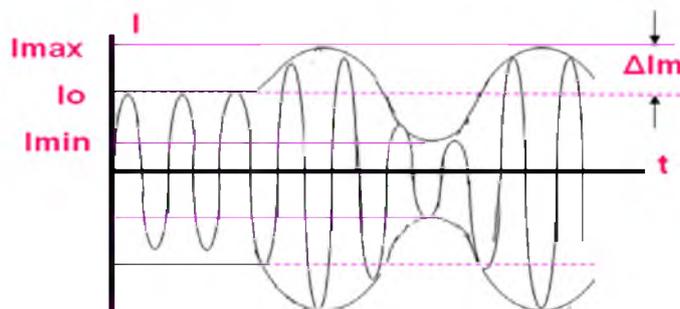


Рис.2.7.1

$$m = \frac{\Delta I_m}{I_{m0}} * 100\%$$

где  $\Delta I_m$  — прирост амплитуды тока при модуляции;

$I_{m0}$  — амплитуда тока до модуляции.

При нормальной работе коэффициент модуляции имеет величину 30—80%.

Коэффициент модуляции можно представить в другом виде:

$$\mu = \frac{\Delta I_m}{I_0} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Выделяют несколько случаев глубины модуляции:

$\mu = 0$ ;  $\mu = 1$ ;  $0 < \mu < 1$ ;  $\mu > 1$ .

АМ – не просто сложение колебаний высокой и низкой частоты, а более сложный процесс.

Установлено, что АМ колебания являются суммой нескольких высокочастотных колебаний с разными частотами и амплитудами.

Пусть высокочастотное колебание частотой  $\omega = 2\pi f$  описывается выражением  $u_\omega = U_{\omega m} \sin(\omega t + \varphi_\omega)$ . Под действием управляющего низкочастотного сигнала  $u_\Omega = U_{\Omega m} \sin(\Omega t + \varphi_\Omega)$  происходит пропорциональное ему изменение амплитуды высокочастотного колебания  $\Delta U_{\omega m}(t) = \Delta U_{\Omega m} \sin(\Omega t + \varphi_\Omega)$ . Тогда высокочастотное модулированное колебание может быть представлено в виде:

$u_\omega = [ U_{\omega m} + \Delta U_{\omega m}(t) ] \sin(\omega t + \varphi_\omega)$ , где  $U_{\omega m}$  — амплитуда немодулированного сигнала,  $\omega$  - циклическая частота колебаний,  $\Delta U_{\omega m}(t)$  - изменение амплитуды сигнала. Или

$$\begin{aligned}
 u_{\omega} &= (U_{\omega m} + \Delta U_{\omega m} \sin(\Omega t + \varphi_{\Omega})) \sin(\omega t + \varphi_{\omega}) = \\
 &= U_{\omega m} \sin(\omega t + \varphi_{\omega}) + \frac{1}{2} m U_{\omega m} \cos((\omega - \Omega)t + (\varphi_{\omega} - \varphi_{\Omega})) - \frac{1}{2} m U_{\omega m} \cos((\omega + \Omega)t + (\varphi_{\omega} + \varphi_{\Omega})); \\
 \sin(x) \sin(y) &= \frac{1}{2} [\cos(x - y) - \cos(x + y)]
 \end{aligned}$$

Где  $m = \Delta U_{\omega m} / U_{\omega m}$  - глубина модуляции.

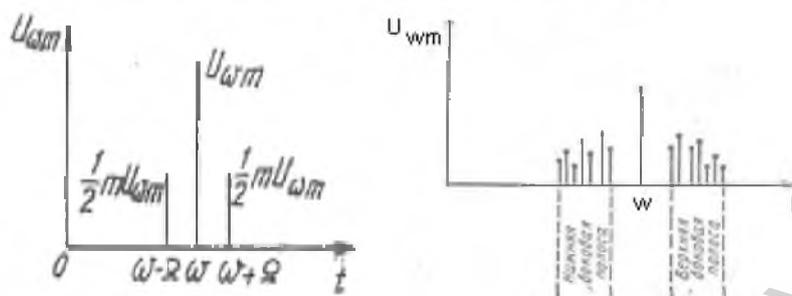


Рис.2.7.2 (а,б)

На рис.2,7.2а показана спектральная диаграмма АМ колебания при модуляции одним тоном. Видно, что при модуляции простым синусоидальным звуком с частотой  $\Omega$ , модулированное колебание содержит три составляющие:

колебание *несущей* частоты  $\omega$  и амплитудой  $U_{\omega m}$ ;

колебание *верхней боковой* частоты  $\omega + \Omega$  и амплитудой  $\frac{1}{2} m U_{\omega m}$

колебание *нижней боковой* частоты  $\omega - \Omega$  и амплитудой  $\frac{1}{2} m U_{\omega m}$

Амплитуды боковых колебаний одинаковы и всегда меньше половины амплитуды колебания несущей частоты. Вертикальные отрезки на диаграмме соответствуют амплитудам колебаний.

При модуляции сложным звуком, каждый простой звук (т.е. тон), даст свою пару боковых частот, образуя верхнюю и нижнюю боковые полосы частот (рис.2.7.2,б). Очевидно, что ширина спектра будет зависеть от наивысшей частоты модуляции, т.е. будет равна удвоенной верхней частоте модуляции  $2\Omega$ .

В зависимости от способа подачи управляющих колебаний различают устройства базовой амплитудной модуляции смещением и коллекторной амплитудной модуляции.

Устройство базовой амплитудной модуляции смещением (рис. 3) является нелинейным резонансным генератором (рис.3,а) (или усилителем (рис.3,б)) гармонических высокочастотных колебаний с контуром  $LC$  в цепи коллектора, катушкой положительной обратной связи  $L_{oc}$ , и транзистором. Контур выполняет роль фильтра, предназначенного для выделения колебаний несущей частоты и боковых составляющих.

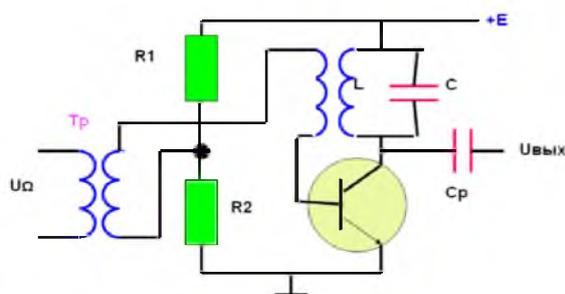


Рис.2.7.3

Полоса частот, в области которых контур должен обладать большим сопротивлением, не может быть уже  $2\Omega_n$ , поэтому добротность контура  $Q$  не может превосходить величину  $\omega_p/2\Omega_n$ . Добротность контура и не должна быть слишком низкой, иначе контур потеряет свои фильтрующие свойства. Роль модулятора низкой частоты выполняет трансформатор  $T_p$ , включенный в цепь базы (рис.3,а). Звуковой сигнал  $U_\Omega$  влияет на величину обратной связи, т. к. напряжение на базе состоит из напряжения обратной связи и напряжения звуковой частоты. При совпадении этих двух напряжений по фазе напряжение на базе возрастает, значит увеличивается коллекторный ток и амплитуда высокочастотных колебаний увеличивается. Если эти два напряжения в противофазе, то ситуация противоположная.

Работа устройства (рис. 2.7.3). К базе транзистора подводится постоянное напряжение  $U_{бн}$  напряжение высокой частоты  $U_\omega$  и управляющий сигнал низкой частоты  $U_\Omega$ . Конденсатор  $C1$  является разделительным, конденсаторы  $C3$  и  $C4$  — блокировочными. Через конденсатор  $C3$  на корпус устройства в обход трансформатора  $T$  замыкаются токи высокой частоты, через конденсатор  $C4$  в обход источника питания — токи низкой частоты. Катушка  $L1$  препятствует короткому замыканию по высокой частоте базы транзистора на корпус устройства. Сопротивление катушки  $L1$  переменному току низкой частоты невелико, напряжение  $U_\Omega$  оказывается приложенным к переходу база — эмиттер транзистора.

Работа устройств модуляции. Устройства работают с отсечкой коллекторного тока. Амплитуда импульсов коллекторного тока  $I_{км}$  и угол отсечки  $\Theta$  зависят от амплитуды напряжения высокой частоты  $U_{ом}$ , напряжения смещения  $U_{БП}$  (напряжение базы покоя) и напряжения низкой частоты  $U_{\Omegaм}$ . Обратимся к графикам, показывающим изменения тока коллектора (рис. 4). В течение промежутка времени от  $\theta$  до  $t_1$  (рис. 4,б) к базе транзистора подводится напряжение смещения  $U_{БП}$ , определяемое делителем напряжения и напряжение высокой частоты  $u_\omega$  с амплитудой  $U_{ом}$ . Точка покоя  $P$  расположена на характеристике транзистора, показывающей зависимость тока коллектора от напряжения база — эмиттер (рис. 2.7.4, а) влево от ее начала. Ток коллектора появляется при  $u_{бэ} > u_{бо}$ . Импульсы коллекторного тока (рис. 2.7.4, в) имеют форму, близкую к отсеченным синусоидам, амплитуда импульса тока  $I_{км}$  неизменна.

Затем к базе транзистора подводится напряжение  $u_{\Omega}$  амплитудой  $U_{\Omega m}$ . В зависимости от значения  $u_{\Omega}$  изменяется амплитуда импульсов.

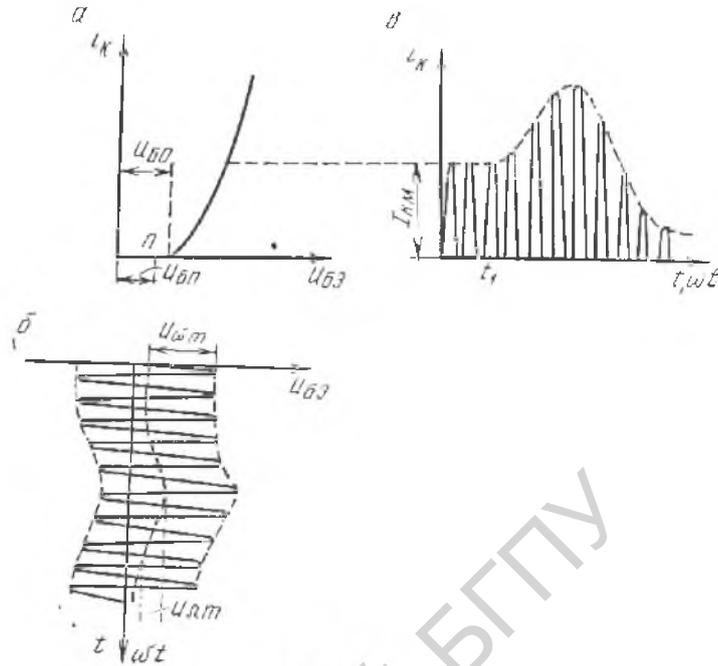


Рис.2.7.4

коллекторного тока  $I_{км}$ .

Для постоянной составляющей и более высоких гармоник коллекторного тока сопротивление контура невелико, падение напряжения на контуре, происходящее за счет этих составляющих тока, можно не учитывать.

С целью определения оптимального значения напряжения смещения  $U_{БПонт}$  и пределов изменений напряжения  $u_{\Omega}$  строят статическую модуляционную характеристику (рис. 2.7.5), для чего к базе транзистора подводят напряжение определенной амплитуды  $U_{ом}$ . Изменяя напряжение базы  $U_{БП}$ , измеряют амплитуду напряжения на контуре  $U_{кон.м}$ . Отсутствию искажений при модуляции соответствует линейный участок модуляционной характеристики (участок  $AB$ ).

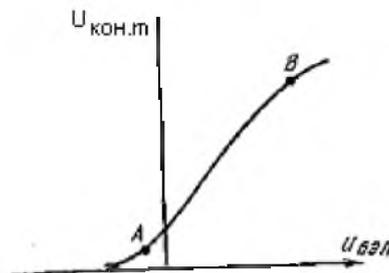


Рис.2.7.5

Базовая модуляция смещением не обеспечивает высокой линейности модуляционной характеристики. Применение этого вида модуляции целесообразно в маломощных передатчиках, так как подводимая к базе транзистора мощность переменного тока низкой частоты невелика, и процесс модуляции сопровождается усилением высокочастотного сигнала.

Устройство коллекторной модуляции представляет собой резонансный генератор (рис.6,а) или усилитель (рис.6б), работающий в нелинейном режиме, в котором напряжение питания цепи коллектора является пульсирующим. Устройство содержит транзистор  $V$ , колебательный контур  $L2C3$ , настроенный на частоту входного сигнала  $\omega$ , разделительный  $C1$  и блокировочные  $C2, C4$  конденсаторы, дроссель  $L1$  и трансформатор  $T$ .

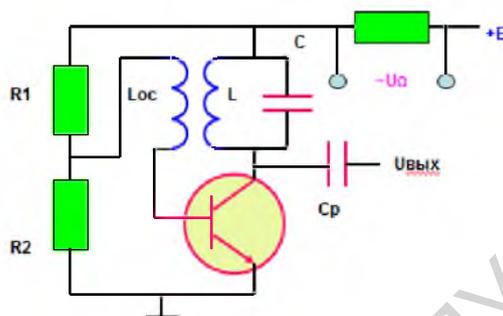


Рис.2.7.6

Вторичная обмотка трансформатора включена в цепь коллектора. К первичной обмотке подводится напряжение низкой частоты от мощного усилителя. Подводимое к коллектору напряжение является суммой напряжения питания  $E_K$  и переменного напряжения низкой частоты  $u_\Omega$ . Полярность напряжения остается одной и той же, но величина его меняется. Усилитель работает в перенапряженном режиме. Напряжение  $u_\Omega$  управляет амплитудой импульсов и углом отсечки коллекторного тока, в результате чего происходят изменения амплитуды первой гармоника коллекторного тока и амплитуды напряжения на контуре  $L2C3$ . Достаточная глубина модуляции достигается, когда амплитуда управляющего напряжения низкой частоты соизмерима с напряжением  $E_K$ . Этим объясняется необходимость в мощном усилителе низкой частоты — модуляторе.

Статическая модуляционная характеристика устройства коллекторной модуляции показывает зависимость амплитуды напряжения на контуре  $U_{кон м}$  от напряжения  $E_K$ . Линейность характеристики невысокая.

*Детектированием* или *демодуляцией* называется процесс выделения из модулированного высокочастотного колебания сигнала низкой частоты, соответствующего модулирующему сигналу. Детектирование сопровождается преобразованием спектра сигнала и может быть реализовано лишь в нелинейных или параметрических цепях.

При детектировании амплитудно-модулированного сигнала высокочастотное промодулированное колебание  $U_{вх}$  преобразуется в напряжения и токи, соответствующие огибающей кривой сигнала  $U_{вых}$  низкой частоты.

Нелинейный элемент, в котором происходит процесс детектирования, называется *детектором*. В современных радиоприемниках в качестве

детектора используются полупроводниковые диоды и реже — усилительные транзисторы.

*Диодный детектор* (рис.8,а).  $VD$  - диод,  $R$ —сопротивление нагрузки,  $C$ — блокировочный конденсатор.

Если на вход поступает колебание несущей частоты с постоянной амплитудой, то в цепи детектора протекает импульсный ток. Постоянная составляющая тока проходит через нагрузочное сопротивление  $R$ , а переменные составляющие — через блокировочный конденсатор  $C$ . Постоянная составляющая тока создает на сопротивлении  $R_n$  постоянное падение напряжения с полярностью «+» к катоду диода и «—» к аноду. Полученное напряжение  $E_o$  является напряжением смещения, в результате

чего угол отсечки тока оказывается очень малым (рис.2.7.7). При неизменной амплитуде высокочастотного напряжения величины угла отсечки  $\Theta$  и максимального значения тока  $i_{\max}$  остаются постоянными, что

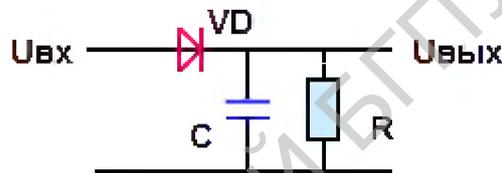
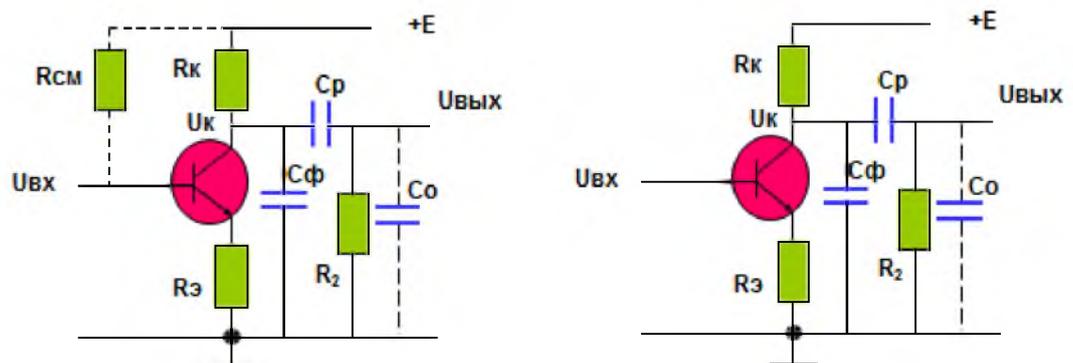


Рис.2.7.7

свидетельствует также о постоянстве всех составляющих тока в цепи детектора. При поступлении на вход детектора амплитудно-модулированного сигнала, изменение амплитуды высокочастотного напряжения вызывает пропорциональное изменение высоты импульсов тока  $i_{\max}$  и, следовательно, изменение величины постоянной составляющей по закону модулирующего сигнала. На сопротивлении нагрузки  $R_n$  при этом появляется напряжение, соответствующее огибающей амплитуды входного высокочастотного сигнала.

Таким образом, назначение нелинейного элемента — *диода* — преобразование входного сигнала так, чтобы в нем появилась постоянная составляющая, изменяющаяся по закону огибающей.

Коллекторный детектор сильных (рис. 2.7.8,а) и слабых (рис.2.7.8,б) сигналов.



а б

Рис.2.7.8

Работа детектора определяется режимом класса усиления. При детектировании сильных сигналов  $R_{см}$  отсутствует и транзистор работает в режиме класса С (рис.10,а). Преимущество в том, что помимо детектирования сигнал еще и усиливается.

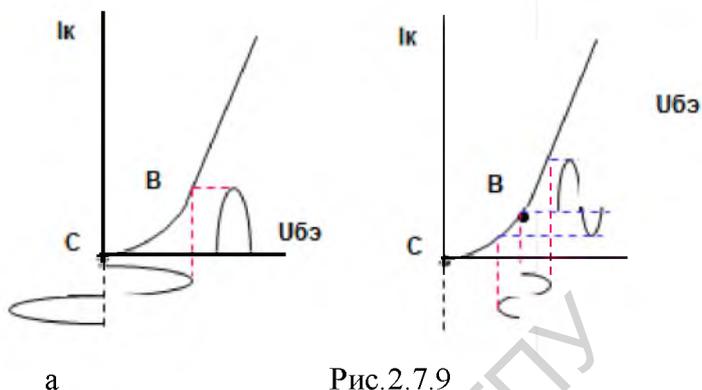


Рис.2.7.9

При детектировании слабых сигналов в схему коллекторного детектора вкл.  $R_{см}$ , перемещающий рабочую точку в класс В (рис.2.7.9б).

Разделение составляющих несущей и звуковой частоты осуществляется с помощью С-фильтра и С-разделительного. Емкость  $C_{\phi}$  намного меньше  $C_p$ , поэтому несущая высокая частота замыкается через  $C_{\phi}$ , а составляющая низкой частоты через  $C_p$  поступает на  $R_2$ . Т. о.  $U_{вых}$  пропорционально напряжению на  $R_2$ , которое создает звуковая частота.

Изменение частоты несущих колебаний под воздействием частоты управляющего сигнала называется *частотной модуляцией*.

При частотной модуляции передаваемый сигнал воздействует на частоту колебаний передатчика. Из (рис. 2.7.9) видно, что при отсутствии сигнала в антенне передатчика протекает немодулированный ток высокой частоты (ток несущей частоты). При воздействии сигнала частота (период) колебания меняется. В течение одного полупериода частота тока в антенне больше несущей частоты, в течение другого — меньше. Понятно, что чем громче звук, тем больше изменения частоты, при этом амплитуда тока в антенне остается неизменной.

Глубина модуляции, т.е. степень воздействия сигнала на несущую частоту, в этом случае оценивается девиацией частоты.

*Девиация частоты* - наибольшее отклонение ее от среднего значения (от несущей частоты).

На графике показан только принцип частотной модуляции. Чтобы сделать график более наглядным, изменения частоты показаны слишком резкими. В действительности в процессе модуляции частота изменяется лишь па десятые доли процента. Например, при несущей частоте 30 Мгц изменения частоты составляют 20 кгц.

*Индекс частотной модуляции* ( $m_f$ ) - отношение девиации частоты  $\Delta\omega$  к модулирующей частоте  $\Omega$

$$m_f = \frac{\Delta\omega_{\max}}{\Omega}$$

Недостаток: при передаче сигнала длинных, средних и даже коротких волн излучает более широкую полосу частот, чем передатчик АМ. Боковые частоты образуют целый спектр частот кратных  $\Omega$ .

ЧМ применяется лишь в передающих устройствах диапазона метровых и более коротких волн.

Транзистор, колебательный контур в коллекторной цепи,  $L_{св}$  образуют генератор гармонических колебаний (рис.2.7.10).

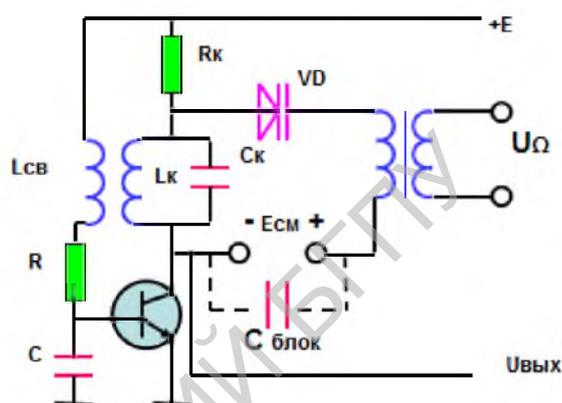


Рис.2.7.10

Частота генерации определяется резонансной частотой контура. Конденсатор  $C_k$  зашунтирован варикапом (параллельно контуру генератора). Если отсутствует звуковой сигнал, емкость варикапа не изменяется. Она добавляется к емкости контура и генератор работает на определенной постоянной частоте. При появлении звукового сигнала частоты  $\Omega$  напряжение вторичной обмотки будет суммироваться с напряжением смещения, происходит изменение барьерной емкости варикапа и общей емкости контура  $C_k + C_{\text{бар}}$ , что приведет к частотной модуляции.

Контур  $L1C1$  настраивается на частоту  $f_1 = f_H + \Delta f$ , где  $f_H$  – несущая частота, а  $L2C2$  на частоту  $f_2 = f_H - \Delta f$ . Если в  $L_k$  будет немодулированный сигнал, то частоты обоих контуров относительно несущей будут отстроены на одну и ту же величину. В этом случае токи  $I_1 = I_2$ ;  $U_1 = U_2$ , а так как эти напряжения находятся в противофазе, то  $U_{\text{вых}} = 0$ .

Пусть за счет модуляции частота детектируемого сигнала увеличится. Это приведет к увеличению  $I_1$  и уменьшению  $I_2$ , тогда  $U_1 > U_2$  и  $U_\Omega > 0$  и наоборот. При поступлении на вход дискриминатора модулированного сигнала на выходе получим гармонический сигнал звуковой частоты, которым осуществлялась частотная модуляция.

## Тема 2.8. Радиоприемные устройства.

*Классификация и характеристики радиоприемных устройств. Структурная и принципиальная схемы радиоприемных устройств. Особенности работы приемников частотно-модулированных сигналов.*

*Распространение радиоволн. Скорость, преломление, дифракция, интерференция, поглощение, отражение электромагнитных волн. Действие ионосферы на распространение радиоволн. Открытый колебательный контур. Полуволновой вибратор. Ферритовая антенна.*

Передача энергии с помощью радиосвязи широко используется при управлении автоматическими объектами. Структурная схема иллюстрирующая принцип радиосвязи, приведена на (рис. 2.8.1).



Рис. 2.8.1

Основными устройствами радиосвязи являются радиопередатчик и радиоприемник. Радиопередатчик предназначен для создания высокочастотного сигнала, некоторые параметры которого (частота, амплитуда или фаза) изменяются по закону, соответствующему передаваемой информации. Частота высокочастотного сигнала называется несущей.

Процесс воздействия на один или несколько параметров высокочастотного сигнала в соответствии с законом передаваемой информации называется модуляцией. Высокочастотный сигнал в радиопередатчике формируется задающим генератором. Элемент, с помощью которого осуществляется воздействие на колебания высокой частоты, называется *модулятором*. Модулятор является неотъемлемой частью радиопередатчика, так как формирует сигнал информации, подлежащий передаче на расстояние. Модулированные высокочастотные колебания усиливают усилителем мощности и излучаются в окружающее пространство с помощью антенны.

Радиопередатчик характеризуется следующими параметрами:

1. Мощностью, отдаваемой выходным каскадом в антенну. Увеличение мощности передатчика повышает дальность и надежность радиосвязи.
2. Коэффициентом полезного действия, определяемым как отношение выходной мощности передатчика к мощности, потребляемой от всех источников питания. Особенно важен этот параметр для мощных передатчиков.
3. Диапазоном частот, в котором работает передатчик. При этом перестройка с одной частоты на другую должна осуществляться плавно и по возможности простыми способами.

4. Стабильность частоты, от которой зависят надежность и помехоустойчивость радиосвязи.

Радиоприемное устройство предназначено для выделения из модулированного высокочастотного колебания, принятого от радиопередатчика, сигнала информации, обеспечивающего нормальную работу потребителя информации.

В качестве нагрузки радиоприемника могут быть использованы телефон, реле, записывающее устройство.

Полезный сигнал, принятый антенной радиоприемника, сопровождается помехами. Источниками помех являются искровые процессы в различных промышленных установках, работающих поблизости, грозовые разряды, космические излучения и т. д. Поэтому в радиоприемнике имеются специальные цепи для подавления помех.

Процесс непосредственного преобразования модулированных высокочастотных колебаний в информативный сигнал называется детектированием, а устройство, в котором оно происходит,—*детектором*. Детектор является неотъемлемой частью любого радиоприемного устройства.

Так как мощность полезного сигнала, принимаемого антенной приемника, обычно мала, то в нем предусматриваются усилитель высокой частоты, нагрузкой которого является детектор, и усилитель низкой частоты, усиливающий после детектора сигнал информации.

Радиоприемник, выполненный по структурной схеме называется *приемником прямого усиления*, так как частота принятого радиосигнала при его усилении и фильтрации остается неизменной.

Принципиальная схема приемника прямого усилителя дана на (рис. 28.2)

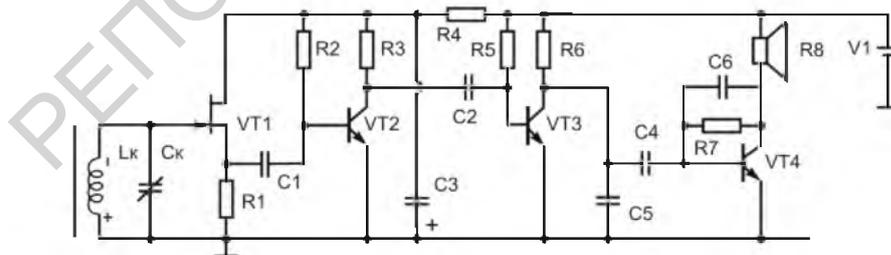


Рис.2.8.2

Схема приемника состоит из антенного контура  $L_k C_k$  двух каскадов усиления радиосигналов (транзисторы  $V1$  и  $V2$ ), детектора на транзисторе  $V3$  и каскада звуковой частоты на транзисторе  $V4$ . Это схема приемника прямого усиления  $2 - V - 1$ .

Антенный контур приемника предназначен для преобразования напряженности электромагнитного поля в электрический сигнал и состоит из катушки индуктивности  $L_k$ , намотанной на ферритовом стержне, и переменной емкости  $C_k$ , позволяющей настраивать контур на частоты принимаемых радиостанций.

Первый каскад приемника выполнен на полевом транзисторе  $V1$  по схеме истокового повторителя. Каскад усиливает радиосигнал по мощности, создает большое (свыше 10 МОм) входное сопротивление усилителя высокой частоты и имеет малое выходное сопротивление, соизмеримое с сопротивлением резистора  $R1$ .

Большое входное сопротивление первого каскада позволяет подключить транзистор этого каскада непосредственно к антенному контуру и при этом сохранить высокую добротность контура. В данной схеме добротность около 100, что обеспечивает хорошую избирательность приемника. Если в первом каскаде применить биполярный транзистор и согласовать его через катушку связи с катушкой контура, то добротность контура не будет выше 20 и избирательность приемника намного уменьшится.

Через конденсатор  $C1$  сигнал от первого каскада поступает на второй каскад, выполненный на биполярном транзисторе  $V2$  по схеме с общим эмитером. В данном каскаде нагрузкой является резистор  $R3$ , а не дроссель, как обычно в апериодических усилителях радиосигналов. Это обусловлено тем, что высокая чувствительность данного приемника и открытый (не экранированный) монтаж при наличии индуктивности в выходной цепи транзистора  $V2$  приводит к самовозбуждению приемника.

Напряжение питания второго и первого каскадов приемника подается от общего источника питания через фильтр развязки, состоящий из резистора  $R4$ , конденсатора  $C3$ . Этот фильтр не пропускает переменную составляющую по цепям питания от последующих каскадов на входы первого и второго каскадов. Без данного фильтра приемник может самовозбуждаться.

От второго каскада сигнал через конденсатор  $C3$  поступает на детекторную ступень. Детекторная ступень выполнена по схеме коллекторного детектора на транзисторе  $V3$ . В схеме этого детектора коллектор по радиочастоте заземлен через конденсатор  $C5$ . Транзистор  $V3$  работает в режиме АВ (почти В), это определяется величиной сопротивления смещения  $R5$ . Точка покоя транзистора находится в самом начале входной характеристики. Транзистор в данном каскаде является нелинейным элементом. Роль фильтра на выходе нелинейного элемента выполняет сопротивление коллектора  $R6$  и емкость  $C5$ . В коллекторной цепи каскада происходит выделение низкочастотного сигнала из высокочастотного модулированного, поступающего на вход каскада.

Особенностью данной схемы детектора является то, что детектирование происходит с усилением сигнала. Звуковой сигнал с резистора  $R6$  через конденсатор  $C4$  подается на вход каскада усилителя звуковой частоты, выполненного на транзисторе  $V4$ . Нагрузкой каскада УНЧ является сопротивление головных телефонов.

Радиоприемное устройство характеризуется следующими параметрами.

1. Чувствительностью, т. е. способностью радиоприемника принимать слабые сигналы. Чувствительность оценивается минимальным значением

сигнала в антенне. Обеспечивающим заданную мощность выходного сигнала, и зависит от усилительных свойств усилителей. Входящих в схему радиоприемника. Чем больше коэффициент усиления усилителей, тем выше чувствительность радиоприемника.

2. Избирательностью, т. е. способностью приемника выделять из суммы различных сигналов и помех сигналы нужной радиостанции. Чем выше избирательность приемника, тем меньше влияние на полезный сигнал помех и сигналов посторонних радиостанций.

Избирательность приемника зависит от числа каскадов в усилителе высокой частоты и качества резонансных фильтров в каждом каскаде. Повышение избирательности приемника связано с увеличением количества контуров и каскадов усиления в приемнике, что повышает его стоимость и усложняет настройку. Поэтому в зависимости от назначения приемника его избирательность имеет конкретное значение, которое задается при проектировании радиоприемника.

3. Выходной мощностью, т. е. мощностью, отдаваемой в нагрузку. Величина этой мощности зависит от назначения приемника и обычно задается при проектировании.

4. Качеством воспроизведения выходного сигнала, характеризующим различие между входным и выходным сигналами информации за счет линейных и нелинейных искажений.

Радиоприемник прямого усиления (рис. 3) имеет существенные недостатки, главными из которых являются низкие избирательность и чувствительность.

Как уже отмечалось, одной из мер повышения избирательности и чувствительности является увеличение числа каскадов усилителя высокой частоты. Резонансные контуры каждого каскада должны быть настроены на частоту принимаемой станции. Поэтому в приемнике прямого усиления для перестройки контуров обычно используют многосекционные конденсаторы переменной емкости, что усложняет схему, повышает габариты и вес радиоприемника.

В процессе перестройки контуров невозможно получить постоянную избирательность и чувствительность приемника во всем диапазоне частот, так как практически изготовить многосекционный переменный конденсатор трудно.

Недостатки приемника прямого усиления можно устранить в радиоприемнике супергетеродинного типа, структурная схема которого приведена на (рис.2.8.3).

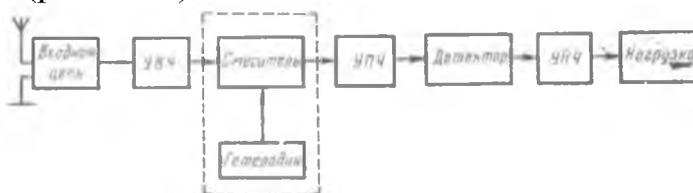


Рис. 2.8.3

В супергетеродинном приемнике сигнал высокой частоты с помощью преобразователя, состоящего из смесителя и гетеродина, преобразуется в сигнал так называемой промежуточной частоты.

При перестройке промежуточная частота остается постоянной. Поэтому, осуществив основное усиление сигнала в каскадах усилителя промежуточной частоты, можно получить высокие избирательность и чувствительность. Принцип преобразования частоты заключается в следующем. Принятый сигнал с частотой  $f_{\text{в}}$  и сигнал гетеродина с частотой  $f_{\text{гет}}$  поступают на смеситель. Гетеродин представляет собой маломощный генератор, вырабатывающий колебания высокой частоты  $f_{\text{гет}}$ . Частота гетеродина выше частоты принятого сигнала на величину, равную значению промежуточной частоты  $f_{\text{пр}}$ , т.е.  $f_{\text{гет}} = f_{\text{пр}} + f_{\text{в}}$ .

Смеситель работает как нелинейный элемент, в выходной цепи которого возникает целый ряд колебаний с комбинационными частотами  $f_{\text{гет}} + f_{\text{в}}$ ,  $2f_{\text{гет}} + f_{\text{в}}$ , и т.д. Для выделения промежуточной частоты  $f_{\text{пр}}$  в выходную цепь смесителя включают колебательный контур, настроенный на промежуточную частоту.

Чтобы обеспечить постоянство промежуточной частоты при перестройке приемника, частоту гетеродина нужно изменять в соответствии с законом изменения частоты принятого сигнала. На выходе смесителя сохраняется информация, заложенная в процессе модуляции сигнала высокой частоты. Поэтому после усиления сигнала промежуточной частоты производится операция детектирования, как в обычном приемнике прямого усиления.

Большое число каскадов усилителя промежуточной частоты (УПЧ) с контурами, настроенными только на одну частоту  $f_{\text{пр}}$ , позволяют получить высокие избирательность и чувствительность приемника супергетеродинного типа в широком диапазоне частот.

Но при этом возрастают собственные шумы и помехи по зеркальному каналу, свойственные только приемнику супергетеродинного типа. Сущность зеркальной помехи заключается в следующем. Пусть нужная радиостанция работает на частоте 2000 кГц. Тогда, приняв, что промежуточная частота равна 465 кГц, найдем частоту гетеродина 2465 кГц. Если одновременно с радиостанцией, работающей на частоте  $f_{\text{с}}=2000$  кГц, работает радиостанция на частоте  $f_{\text{zn}}=2930$  кГц, то ее сигнал также пройдет через преобразователь и поступит на вход УПЧ, так как разность частот мешающей радиостанции и гетеродина составляет  $2930 - 2465 = 465$  кГц. Из примера видно, что частота мешающей станции отличается от частоты гетеродина на величину, равную промежуточной частоте.

Для уменьшения зеркальной помехи резонансные контуры входной цепи и усилителя высокой частоты должны иметь достаточно узкую полосу пропускания. Уменьшить зеркальную помеху можно, повышая промежуточную частоту, так как при этом увеличивается различие между частотами нужной и мешающей радиостанций. Промежуточная частота

должна находиться в диапазоне частот, в котором работает минимальное количество мощных радиостанций, так как сигнал мешающей радиостанции с частотой, равной или близкой промежуточной частоте, через различные паразитные связи может пройти на входе УПЧ и, усиленный, создать помехи на выходе приемника.

### **Тема 2.9. Основы телевидения.**

*Развертка изображения. Принцип накопления зарядов. Структура телевизионного сигнала. Структурная схема телевизионной системы. Преобразование оптического сигнала в электрический и обратное преобразование. Передача и прием цветного изображения. Электронно – оптические преобразователи. Структурная схема телевизионной системы цветного телевидения.*

*Основы цифрового радиовещания и телевидения. Преобразование аналогового сигнала в цифровой. Передача и прием цифрового сигнала.*

*Телевидение*—это передача с помощью радиоволн движущихся или неподвижных изображений каких-либо объектов на расстояние. Слово «теле» означает «далеко» и в сложных словах указывает на отношение данных слов к дальнему расстоянию: (телефон, телеграф, телескоп) и т. д.

Обычно передаваемые сюжеты обладают многообразием и оттенков, красок, большим динамизмом сцен и для их передачи требуется достаточно сложная телевизионная аппаратура. Чем ближе переданное изображение к оригиналу, тем сложнее оказывается используемая техника. Однако известно, что возможная простота аппаратуры приводит к повышению ее надежности и снижению стоимости. Оба эти требования весьма существенны при проектировании и изготовлении телевизионной техники в больших масштабах. В передаче телевизионного изображения есть много общего с передачей звука, но есть и ряд особенностей. Для передачи звука на расстояние необходимо иметь устройство, преобразующее звук в электрические сигналы, канал связи и устройство, в котором электрические сигналы преобразуются в звук. Такой же имеют схемы для передачи телевизионного изображения. Схема включает в себя: источник света, объект передачи преобразователь света в электрические сигналы, канал связи и устройство обратного преобразования. Оговорим сразу, что канал связи разделяет передающую и приемную стороны телевизионной линии связи. На передающей стороне формируется электрическое изображение, на приемной оно вновь преобразуется в изображение. Роль канала связи может выполнять пространство или кабель, способные переносить электрические сигналы. К

числу необходимых показателей при передаче телевизионных изображений относятся четкость и контрастность.

*Четкость* характеризуется хорошо различимой границей раздела между светлыми и темными участками изображения. Под участками изображения может подразумеваться некоторая совокупность элементов разложения. *Контрастность* — это отношение яркости наиболее светлых к наиболее темным участкам изображения.

Назначением телевизионной системы является передача изображения некоторой области пространства по линии связи. В случае идеальной передачи полученное изображение пространственных объектов должно быть цветным и объемным, т. е. принятое изображение должно точно отображать объект передачи. Так как каждой точке  $M(x, y, z)$  объекта в данный момент времени соответствует некоторая яркость  $B$  и цвет, то для получения полной информации о точке  $M$  необходимо передать все параметры, характеризующие эту точку. Число параметров велико, и передача их представляет сложную задачу.

Формат кадра должен соответствовать условию ясного видения. Угол ясного видения по вертикали ( $\alpha \sim 12^\circ$ ) соответствует рассмотрению изображения с расстояния, равного приблизительно пяти-шести высотам изображения. Таким образом, высота кадра определяется расстоянием от изображения до оптической системы. Ширина кадра должна удовлетворять оптимальным условиям рассматривания изображения целиком. Поэтому формат кадра в телевидении выбирается таким, что отношение  $a : b$  — 4 : 3 (рис. 2.9.1). Такой же формат кадра принят и в кино.

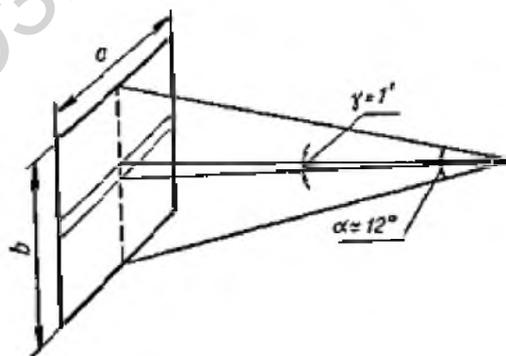


Рис.2.9.1

Число элементов изображения. Элементов изображения должно быть столько, чтобы глаз не воспринимал мозаичности последнего, т. е. строчная структура не должна быть видна. Так как разрешающая способность глаза (при оптимальной освещенности и контрастности) для людей с нормальным зрением составляет около  $\gamma = 1'$ , то угловые размеры строки должны быть близки к этой величине. Число строк при этом должно быть равным:

$$Z_{\text{макс}} = \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{12 \cdot 60}{1} = 720 \quad (11.1)$$

Число строк разложения изображения принята по стандарту равным 625. Угловой размер строки при этом получается, около  $1,1'$ , что близко к предельной разрешающей способности глаза. Число элементов разложения

$$n = n_{\text{верг}} n_{\text{гориз}} = Z \frac{4}{3} Z \sim 521\,000 \quad (11.2)$$

(отсюда следует абсолютная невозможность передачи информации о яркости всех элементов изображения одновременно, ибо для такой передачи потребовалась бы 521000 каналов связи).

Число строк определяет четкость (разборчивость) изображения. Четкость, соответствующую  $Z_{\text{макс}}$ , принято считать стопроцентной, так как она соответствует разрешающей способности глаза. Установлено, что прирост четкости ДК глаз воспринимает пропорционально относительному приращению числа строк:

$$\Delta Y \approx \frac{\Delta Z}{Z}, \quad Y \approx \frac{\ln Z}{\ln Z_{\text{макс}}} \quad (11.3)$$

На (рис.5) дана кривая зависимости относительной четкости  $\frac{Y}{Y_m} 100\%$  от числа строк  $Z$ .

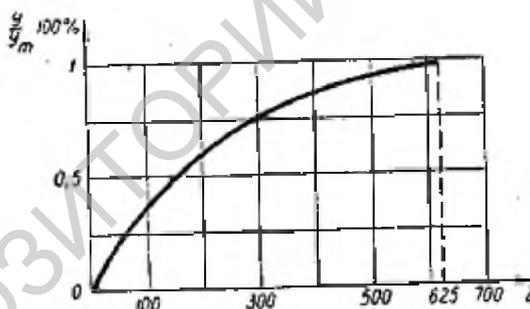


Рис.2.9.2

При числе строк  $Z = 625$  четкость составляет около 97% от максимальной.

Следует отметить, что реальная четкость изображения зависит от работы всего приемника в целом и определяется по испытательной таблице.

*Системы* цветного телевидения разрабатывались на основе принципа совместности или сосуществования цветного и черно-белого телевидения. Частоты строчной и кадровой разверток, отводимая телевизионному каналу полоса частот в черно-белом и цветном телевидении одинаковы. Является прием программ черно белого телевидения цветным телевизором и программ цветного телевидения черно-белым телевизором, разумеется, без воспроизведения цвета.

Помимо общего для всех телевизионных систем принципа разложения передаваемого изображения на отдельные элементы в месте передачи и соединения их в слитное изображение в месте приема в основе построения систем цветного телевидения лежат следующие физические процессы.

оптическое разложение передаваемого многоцветного изображения на три одноцветных изображения в основных цветах — красном  $R$ , зеленом— $G$  и синем  $B$ .

преобразование трех одноцветных изображений  $R$ ,  $G$  и  $B$  в электрические сигналы  $E_R$ ,  $E_G$ ,  $E_B$

образование электрического сигнала яркости  $E_y$  и так называемых цветовых разностных сигналов  $E_{R-Y}$  и  $E_{B-Y}$ .

передача трех электрических сигналов изображения  $E_y$ ,  $E_{R-Y}$  и  $E_{B-Y}$  по линиям связи.

прием электрических сигналов  $E_y$ ,  $E_{R-Y}$  и  $E_{B-Y}$ .

обратное преобразование электрических сигналов  $E_y$ ,  $E_{R-Y}$  и  $E_{B-Y}$  и выделение из них сигналов  $E_y$ ,  $E_R$ ,  $E_G$ ,  $E_B$ .

преобразование электрических сигналов  $E_y$ ,  $E_R$ ,  $E_G$ ,  $E_B$  в три одноцветных оптических изображения — красного  $R$ , зеленого  $G$  и синего  $B$ .

смешение одноцветных составляющих  $R$ ,  $G$  и  $B$  в одно многоцветное изображение.

Для получения информации о цвете элементов изображения в соответствии с координатной системой  $RGB$  формируются телевизионные сигналы, отражающие наличие излучения красного, зеленого и синего цветов и интенсивность этих излучений. Сигналы возникают в трехтрубной передающей камере (рис. 19). Идущий от объектива световой поток проходит через объектив  $1$  и попадает на дихроичные зеркала  $3$ ,  $4$ . Эти зеркала обладают способностью отражать преимущественно свет определенного участка спектра и пропускать остальную часть светового потока.

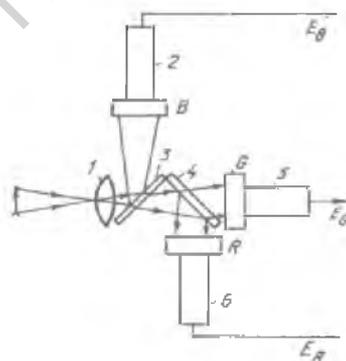


Рис.2.9.3

Зеркало  $4$  отражает составляющую светового потока, соответствующую красному цвету, а зеркало  $3$  — синего. Через оба зеркала проходит без отражения излучение зеленого цвета. Изображение, разделенное на три цветовых составляющих, попадает на три передающих трубки  $2$ ,  $5$ ,  $6$ . Возникает три цветовых составляющих сигнала изображения  $E_R$ ,  $E_G$ ,  $E_B$ . Каждый из них соответствует интенсивности своего цветового компонента излучения элементов изображения.

Ни один из этих сигналов не содержит информации о яркости элемента, а поэтому не может быть использован в качестве сигнала черно-белого телевидения. Поэтому с учетом чувствительности глаза к излучению

трех названных цветов путем суммирования сигналов образуют сигнал яркости  $E_Y$ . При  $E_R = E_G = E_B$

$$E_Y = 0,3 E_R + 0,59 E_G + 0,11 E_B \quad (11.7)$$

Дальнейшая задача состоит в передаче информации об уровнях сигналов  $E_Y$ ,  $E_R$ ,  $E_G$ ,  $E_B$  посредством электромагнитных волн. Для ее реализации разработаны определенные системы. В нашей стране и в ряде европейских стран применяется система цветного телевидения *СЕКАМ*, что расшифровывается как система последовательная цветная с памятью. В некоторых странах Западной Европы используется западногерманская система *ПАЛ* (строки с переменной фазой), на американском континенте – американская система *НТСК* (национального комитета телевизионных систем).

Во всех системах цветного телевидения, как и черно-белого, непрерывно передается широкополосный сигнал яркости  $E_Y$ . Для передачи информации о цветности используются вспомогательные колебания, называемые *поднесущими*, причем передаются только два сигнала цветности. В системе *СЕКАМ* вместе с сигналом яркости поочередно, через время, равное длительности одной строки (64 мкс), передаются два цветоразностных сигнала  $E_{R-Y}$  и  $E_{B-Y}$ . Цвета элементов изображения различимы при размерах, больших, чем размеры элементов, определяемых по яркости. Поэтому цветное изображение можно представить состоящим не из  $0,5 \cdot 10^6$  элементов, как это имеет место при черно-белом телевидении, а из меньшего их числа. Соответственно меньшей окажется наиболее высокая частота получаемого в передающей трубке сигнала цветности. Наибольшая частота сигнала цветности не превышает 1,5 МГц. Получаемые униполярные цветоразностные сигналы  $E_{R-Y}$  и  $E_{B-Y}$  преобразуются в частотно-модулированные поднесущие колебания.

Частота поднесущих колебаний для сигнала цветности  $E_{R-Y}$  выбрана равной  $f_{R-Y} = 4,40625$  МГц, что соответствует 282-й гармонике строчной частоты, для сигнала  $E_{B-Y}$  –  $f_{B-Y} = 4,250$  МГц, соответствует 272-й гармонике строчной частоты. Такой выбор частот поднесущих колебаний дает возможность осуществить уплотнение линейчатого спектра телевизионного сигнала.

Сигнал яркости, поочередно поступающие частотно-модулированные радиосигналы цветности и импульсы синхронизации суммируются. Возникает сложный сигнал  $E_T$ , который управляет амплитудой колебаний передатчика.

В радиочастотных блоках телевизионного приемника происходит такая же обработка принятого радиосигнала, как и в приемнике черно-белого телевидения, — усиление входного сигнала, преобразование частоты, усиление сигнала промежуточной частоты. Затем радиосигнал детектируется и появившийся на его выходе телевизионный сигнал направляется по двум каналам. Один из каналов содержит линию задержки и режекторный фильтр, препятствующий прохождению частотно-модулированных радиосигналов

цветности. На выходе этого канала появляется сигнал яркости  $E_y$ , который подается на катоды цветного кинескопа. Второй канал включает полосовой усилитель, обеспечивающий усиление, а следовательно, и выделение частотно-модулированных радиосигналов цветности. Для их дальнейшего прохождения имеется два пути: через ультразвуковую линию задержки, создающую сдвиг во времени на 64 мкс, и по проводу без задержки. В результате на входах электронного коммутатора появляются радиосигнал цветности передаваемой строки и радиосигнал цветности ей предшествующей. Через каждые 64 мкс происходит переключение коммутатора. На одном из выходов коммутатора возникает цветоразностный частотно-модулированный радиосигнал поднесущих колебаний частотой 4,406 МГц, на втором — радиосигнал поднесущих колебаний частотой 4,25 МГц.

Радиосигналы поступают на частотные детекторы. На первом из них появляется сигнал  $E_B - Y$  на втором — сигнал  $E_R - Y$ . Посредством цепи из делителей напряжения, называемой *матрицей*, формируется третий цветоразностный сигнал  $E_G - Y$ . Цветоразностные сигналы поступают на модуляторы кинескопа. С учетом управляющего напряжения  $E_y$  между модуляторами и катодами имеются напряжения,  $E_R$ ,  $E_G$ ,  $E_B$  управляющие потоками электронов, а следовательно, и яркостью свечения люминофорных зерен, создающих излучение красного, зеленого и синего цветов.

Для передачи цветного изображения используется кинескоп, в котором изображения формируются из трех цветов методом их пространственного смешения. В большинстве цветных кинескопов реализуется трехрастровая система, обеспечивающая формирование трех одноцветных растров — красного, зеленого и синего, совмещенных с достаточной степенью точности друг с другом.

*LCD* – монитор представляет собой матрицу которая состоит из множества мелких пикселей, каждый из которых содержит три жидкокристаллические ячейки с фильтрами основных цветов: красного, зеленого и синего. Упрощенная структура ячейки показана на (рис. 2.9.4)

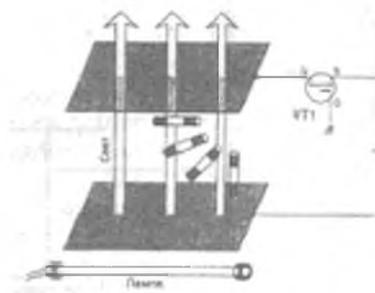


Рис.2.9.4

Работа *LCD* матрицы основана на свойстве жидкокристаллических ячеек менять свою прозрачность в зависимости от приложенного к ним напряжения — т.н. напряжения выравнивания. Напряжение выравнивания подается на подложки стеклянных панелей, между которыми заключена ячейка. В отличие от ячеек люминофора на экране ЭЛТ,

жидкокристаллические ячейки не светятся, и для получения видимого изображения они просвечиваются источником света, находящимся сзади экрана. Прикладывая различные напряжения к ячейкам каждого пикселя, можно менять его яркость и окраску, т.е. формировать изображение на поверхности матрицы.

Напряжением выравнивания управляет полевой транзистор  $V_{TI}$ , расположенный в правом верхнем углу каждой ячейки

Когда напряжение на затворе отрицательно относительно истока, транзистор  $V_{TI}$  закрыт, напряжения выравнивания нет, и молекулы жидких кристаллов ориентированы так, что свет беспрепятственно проходит через них. Если напряжение на затворе  $V_{TI}$  положительно относительно истока, транзистор открыт, возникает напряжение выравнивания, молекулы жидких кристаллов ориентируются перпендикулярно световому потоку и закрывают его.

"Зерном"  $LCD$  матрицы считается размер пикселя  $L$ . Количество пикселей для мониторов разных моделей различно, их количество по горизонтали и вертикали соответствует стандартным значениям. Например, монитор *Samsung SyncMaster 171 MP* имеет 17-дюймовую матрицу с числом пикселей  $1280 \times 1024$ , их размер  $L = 0,264$  мм.

Количество пикселей, размещенных на плоскости матрицы, определяет ее предельную разрешающую способность. Разрешение экрана можно уменьшить в целое число раз без ухудшения качества изображения. К примеру, если требуется уменьшить разрешение с  $1600 \times 1200$  (рис. 11.34а) до  $800 \times 600$  (рис. 11.34,б), то микроконтроллер, управляющий масштабированием, использует коэффициент пересчета  $K = 2$ , т.е. вместо одного пикселя точка изображения формируется четырьмя. Определенные проблемы возникают, если надо уменьшить разрешение не в целое число раз. Так, в случае переключения на разрешение  $1024 \times 768$  используется дробный коэффициент пересчета  $K = 1,5625$  и возникают пиксели, которые для правильного воспроизведения информации надо разделить на части. Поскольку это невозможно, такие пиксели засвечиваются не полностью, и возникают характерные искажения. В  $ЭЛТ$  мониторах такие искажения отсутствуют. Но на этом список отличий  $LCD$  и  $ЭЛТ$  мониторов не кончается.



Рис.2.9.5

*Сравнение LCD и ЭЛТ мониторов.*  $LCD$  матрица не мерцает ни при какой частоте кадров. Дело в том, что каждая строка "живет" на экране, не меняя своей яркости, вплоть до замены ее новой строкой. В  $ЭЛТ$  мониторах время послесвечения люминофора ограничено, и на низких частотах кадровой развертки (до 60 Гц) заметно мерцание изображения.

У *LCD* мониторов яркость свечения экрана может достигать 200...250 кд/м<sup>2</sup> и зависит в основном от яркости ламп подсветки, у *ЭЛТ* мониторов этот параметр находится в пределах 150...200 кд/м<sup>2</sup>. Со временем яркость *ЭЛТ* может снизиться из-за падения эмиссии катодов.

Коэффициент контрастности определяется как отношение уровня белого к уровню черного. У современных матриц коэффициент контрастности лежит в пределах от 200:1 до 400:1. В *ЭЛТ* мониторах коэффициент контрастности достигает значения 500:1, что позволяет получить фотореалистическое качество изображения.

У *LCD* матриц нет свойственных *ЭЛТ* геометрических искажений, несведения лучей, ухудшения фокусировки на краях экрана. К их преимуществам также можно отнести малую потребляемую мощность и отсутствие вредного излучения. Для *ЭЛТ* мониторов регламентируется излучение до 0,5 микрорентген в час.

К недостаткам *LCD* панелей следует отнести вероятность присутствия на экране неуправляемых пикселей. Справедливости ради надо отметить, что у *ЭЛТ* также могут быть темные нерабочие точки на экране.

Если же говорить о надежности *LCD* мониторов, то благодаря отсутствию в них таких узлов, как строчная развертка, небольшой потребляемой мощности и отсутствию в схеме высоких напряжений, она гораздо выше, чем у *ЭЛТ* мониторов.

Развитие телевидения связано с совершенствованием телевизионной аппаратуры и методов обработки телевизионных сигналов, расширением сети телевизионного вещания, применением бытовых телевизионных приемников для получения дополнительной информации и внедрением телевидения в народное хозяйство.

Выпускаемая промышленностью телевизионная аппаратура непрерывно совершенствуется. Новые модели цветных телевизоров имеют блочно-модульную конструкцию на базе интегральных микросхем. Большие интегральные микросхемы эквивалентны используемым ранее модулям на печатных платах, но гораздо меньше по размерам. Как и в радиовещательных приемниках, функциональные узлы телевизоров содержат элементы цифровой техники. Они реализуются в блоках выборки каналов, синхронизации, автоматической подстройки частоты, обработки сигналов цветности и других.

Действующие в настоящее время телевизионные системы являются аналоговыми. В каждом из многочисленных устройств телевизионного тракта сигнал подвергается воздействию шумов и помех. При передаче с одного устройства к другому искажения сигнала возрастают. В связи с увеличением расстояний между передающим центром и пунктами приема происходит еще большее увеличение искажений. Чтобы добиться их ослабления, осуществляют переход к цифровой форме сигнала. Такое преобразование позволит ввести дополнительную обработку телевизионного сигнала в аппаратно-студийном комплексе и использовать специальные

эффекты в процессе монтажа программы, обнаруживать и исправлять ошибки в передаче, длительное время эксплуатировать оборудование телецентров без его подстройки. Разработка методов представления телевизионных сигналов в цифровой форме, их обработка, хранение и передача относятся к области техники, называемой *цифровым телевидением*.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

## **ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

### **РАЗДЕЛ 2. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА**

#### **Тема 2.1. Радиотехнические цепи.**

##### **Лабораторная работа. Радиотехнические измерения.**

**Цель:** формирование навыков измерения напряжения с помощью электронного вольтметра, напряжения и частоты электрического колебания с помощью осциллографа; получение фигур Лиссажу и измерение по фигурам Лиссажу соотношения частот и неизвестной частоты.

1. Измерение цифровым вольтметром переменного напряжения.
2. Измерение цифровым вольтметром постоянного напряжения.
3. Проверка калибровки коэффициента масштабности входного аттенюатора и шкалы длительности развертки.
4. Измерение осциллографом переменного напряжения.
5. Измерение частоты гармонического колебания методом фигур Лиссажу.

##### **Лабораторная работа. Измерение амплитудно-частотных характеристик RC четырехполосников.**

**Цель:** измерение амплитудно-частотных характеристик RC-цепей; вывод формул расчета амплитудно-частотных характеристик RC- и RL-цепей методом комплексных амплитуд.

1. Измерения амплитудно-частотной характеристики фильтра высоких частот.
2. Измерение амплитудно-частотной характеристики фильтра низких частот.
3. Измерение амплитудно-частотной характеристики полосового фильтра.

#### **Тема 2.2. Колебательный контур.**

##### **Лабораторная работа. Фильтрующие свойства колебательных контуров.**

**Цель:** изучить работу параллельного и последовательного контуров при вынужденных колебаниях; научиться проводить измерение резонансных характеристик и определять с их помощью полосу пропускания и добротность.

1. Измерение резонансной характеристики параллельного контура.
2. Измерение резонансной характеристики параллельного контура с нагрузкой.
3. Измерение резонансной характеристики последовательного контура.

### **Тема 2.3. Полупроводниковые приборы.**

**Лабораторная работа. Измерение характеристик транзисторов.**

**Цель:** познакомиться с принципом работы биполярных и полевых транзисторов; научиться снимать статистические входные и выходные характеристики транзисторов; научиться определять по характеристикам основные параметры транзисторов.

1. Измерение входной характеристики биполярного транзистора  $p-n-p$ -типа, включенного по схеме с общим эмиттером.

2. Измерение семейства выходных характеристик биполярного транзистора  $I_k = F(U_k)$  при  $I_b = \text{const}$ .

3. Измерение семейства стоко-затворных характеристик полевого транзистора с каналом  $p$ -типа.  $I_c = F(U_s)$  при  $U_c = \text{const}$ .

4. Измерение семейства выходных характеристик полевого транзистора с каналом  $p$ -типа.  $I_c = F(U_c)$  при  $U_s = \text{const}$ .

### **Тема 2.4. Электронные усилители.**

**Лабораторная работа. Усилитель низкой частоты на биполярном транзисторе.**

**Цель:** научиться проводить расчет элементов режима каскада усилителя низкой частоты; изучить влияние элементов межкаскадной связи на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

1. Расчет параметров точки покоя.

2. Монтаж элементов режима и измерение параметров точки покоя.

3. Монтаж элементов межкаскадной связи и измерение амплитудно-частотных характеристик усилителя.

**Лабораторная работа. Расчет однотактного трансформаторного выходного каскада усилителя звуковой частоты на биполярном транзисторе.**

**Цель:** приобретение навыков проведения графического расчета усилительного каскада на транзисторе.

1. Расчет параметров и элементов схемы при заданной выходной мощности и сопротивлении нагрузки.

### **Тема 2.5. Интегральные микросхемы.**

**Лабораторная работа. Исследование операционного усилителя.**

**Цель:** изучить работу операционного усилителя на микросхеме К140УД1А; научиться балансировать микросхему; провести измерение амплитудной и амплитудно-частотной характеристики усилителя.

1. Балансировка микросхемы.

2. Измерение амплитудной характеристики усилителя.

3. Измерение амплитудно-частотной характеристики схемы усилителя.

### **Тема 2.6. Генерация гармонических колебаний.**

**Лабораторная работа. Генераторы гармонических колебаний.**

**Цель:** выучить работу  $LC$ - и  $RC$ -генераторов гармонических электрических колебаний на транзисторе; научиться различать частоту колебания  $LC$ -генератора по данным  $L$  и  $C$ , частоту колебания  $RC$ -генератора по данным  $R$  и  $C$ ; научиться измерять частоту колебания генератора с помощью осциллографа.

1. Исследование работы  $LC$ -генератора.
2. Исследование режимов работы  $LC$ -генератора.
3. Исследование работы  $RC$ -генератора.

### **Тема 2.7. Нелинейные преобразования сигналов.**

**Лабораторная работа. Амплитудная модуляция и детектирование.**

**Цель:** изучить процесс амплитудной модуляции электрических колебаний; изучить процесс детектирования амплитудно-модулированных электрических колебаний.

1. Наблюдение немодулированных и модулированных колебаний на выходе генератора Г4-221/1.
2. Получение немодулированных колебаний автогенератор.
3. Измерение и построение модулированной характеристики автогенератора.
4. Создание модулированных колебаний автогенератора на транзисторе.
5. Получение осциллограмм при детектировании.

### **Тема 2.8. Радиоприемные устройства.**

**Лабораторная работа. Приемник прямого усиления на транзисторах.**

**Цель:** изучить схему и работу приемника прямого усиления на транзисторах; научиться производить монтаж приемника; научиться определять частоты принимаемых станций, диапазон принимаемых приемником частот.

1. Изучение схемы приемника прямого усиления.
2. Измерение напряжения на электродах транзисторов приемника прямого усиления.
3. Получение осциллограммы напряжений в контрольных точках электрической цепи каждого каскада приемника прямого усиления.
4. Определение коэффициента усиления каждого каскада приемника прямого усиления.

5. Настройка и прием передач радиовещательных станций на магнитную антенну.

**Тема 2.9. Основы телевидения.**

**Лабораторная работа. Изучение цветного телевизионного приемника.**

**Цель: изучить основы цветового зрения; изучить функциональную схему цветного телевизионного приемника; познакомиться с устройствами цветных кинескопов.**

1. Цвет и цветовое зрение.
2. Функциональная схема цветного телевизионного приемника.
3. Устройство и принцип работы ЖКИ и плазменных кинескопов.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

## РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

### РАЗДЕЛ 2. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

1. Предмет радиоэлектроники и история развития радио. Схема радиосвязи.
2. Радиотехнические цепи. Основные элементы цепей. Активные, пассивные, линейные и нелинейные цепи. Графические обозначения элементов радиоэлектроники.
3. Избирательные четырехполюсники. Комплексный коэффициент передачи. Полоса пропускания четырехполюсника.
4. Фильтры нижних частот, верхних частот, полосовые и заграждающие фильтры.
5. Колебательный контур. Собственные колебания в контуре. Параметры колебательного контура.
6. Затухание колебаний в контуре. Добротность контура.
7. Вынужденные колебания в последовательном контуре.
8. Вынужденные колебания в параллельном контуре.
9. Методика измерения резонансной характеристики контура.
10. Полное и неполное подключение контуров к генератору.
11. Полупроводниковые приборы. Энергетическая структура чистого полупроводника. Собственная и примесная проводимости.
12. Электронно-дырочный переход. Полупроводниковые диоды. Типы диодов (выпрямительные, стабилитроны, стабилитроны, варикапы).
13. Устройство и работа биполярного транзистора. Схемы включения. Статические характеристики биполярных транзисторов.
14. Динамический режим работы биполярного транзистора (работа с нагрузкой). Расчет напряжения смещения для определения рабочей точки. Определение коэффициентов усиления по току, напряжению и мощности.
15. Схемы измерения статических характеристик биполярного транзистора.
16. Малосигнальные параметры биполярного транзистора. Маркировка полупроводниковых приборов (диоды, транзисторы).
17. Полевой транзистор с управляющим р–п-переходом. Принцип работы. Статические характеристики.
18. Полевой транзистор с изолированным затвором. Принцип работы. Основные параметры полевых транзисторов.
19. Электронные усилители. Принцип работы усилителя. Основные параметры усилителя. Виды искажений, вносимых усилителем.
20. Усилители напряжения. Работа апериодического усилителя напряжения. Амплитудно-частотная характеристика.
21. Режимы работы усилительных элементов.
22. Температурная стабилизация (эмиттерная и коллекторная).

23. Обратные связи в усилителях. Коэффициент передачи. Межкаскадная связь в усилителях.
24. Резонансные и полосовые усилители.
25. Трансформаторные усилители мощности (одно- и двухтактные).
26. Бестрансформаторный двухтактный усилитель мощности.
27. Схема и расчёт однотактного выходного каскада на транзисторе.
28. Операционные усилители (основные характеристики, балансировка, схема инвертируемого и неинвертируемого усилителя).
29. Применение операционных усилителей.
30. Генерация радиотехнических сигналов, основные элементы автогенератора, условия возникновения автогенерации, режимы работы генератора.
31. RC-генераторы гармонических колебаний.
32. LC-генераторы гармонических колебаний.
33. Амплитудная модуляция. Коэффициент модуляции.
34. Частотная модуляция. Индекс частотной модуляции. Схема частотной модуляции.
35. Базовая и коллекторная амплитудные модуляции.
36. Детектирование амплитудно-модулированных сигналов. Схемы диодного и коллекторного детекторов.
37. Детектирование частотно-модулированных сигналов. Фазовый дискриминатор.
38. Основные параметры радиоприемника. Детекторный приемник. Приемник прямого усиления.
39. Принцип супергетеродинного приема. Структурная схема супергетеродинного приемника.
40. Устройство, работа и параметры приемно-передающих антенн.
41. Распространение радиоволн.
42. Черно-белое телевидение (стандарт телевизионной системы). Структура телевизионного сигнала.
43. Основные принципы телевидения. Преобразование оптического изображения в электрический сигнал (иконоскоп и видикон).
44. Частота сигнала изображения. Спектр частот телевизионного канала.
45. Цветное телевидение. Преобразование оптического цветного изображения в электрический сигнал.
46. Формирование сигналов цветности и цветоразностных сигналов. Поднесущие частоты. Формирование цветного изображения.
47. Структура цветного телевизионного приемника.
48. Устройство и принцип работы цветных кинескопов.
49. Основы цифрового телевидения.
50. Преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал.
51. Блок-схема осциллографа. Устройство электронно-лучевой трубки.
52. Измерение осциллографом напряжения и частоты электрического колебания. Измерение по фигурам Лиссажу.

## ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

КОНТРОЛЬНЫЙ  
ЭКЗЕМПЛЯР

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени МАКСИМА ТАНКА»

УТВЕРЖДАЮ  
Профессор учебной работы БГПУ  
В.В. Шлыков  
2015 г.  
Регистрационный № УД 25-04-30-1015/р.

### ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА (Радиоэлектроника)

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности:  
1-02 05 02 Физика и информатика

|   |     |  |                 |
|---|-----|--|-----------------|
| Факультет физический                      |     |  |                 |
| Кафедра информатики и основ электроники   |     |  |                 |
| Курс (курсы)                              | 3   |  |                 |
| Семестр (семестры)                        | 5   |  |                 |
| Лекции                                    | 20  | Экзамен                                | 5 семестр       |
| Практические (семинарские)<br>занятия     |     | Зачет                                  | —               |
| Лабораторные<br>занятия                   | 40  | Курсовая работа (проект)               | —               |
| Аудиторных часов по<br>учебной дисциплине | 60  |  |                 |
| Всего часов по<br>учебной дисциплине      | 132 | Форма получения<br>высшего образования | очная (дневная) |

Составили: М.А. Вилькоцкий, доктор технических наук, профессор;  
В.В. Юргульский, старший преподаватель

2015 г.

Учебная программа составлена на основе учебной программы учреждения высшего образования «Физическая электроника», утвержденной 16.04.2014 г.

Регистрационный №УД –25-04-22/2014/ баз.

Рассмотрена и рекомендована к утверждению кафедрой информатики и основ электроники

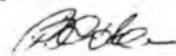
26.05.2015 протокол № 10  
Заведующий кафедрой



В.М. Зеленкевич

Одобрена и рекомендована советом физического факультета БГПУ

28.05.2015 протокол № 9  
Председатель



В.Р. Соболев

Оформление учебной программы и сопровождающих ее материалов действующим требованиям Министерства образования Республики Беларусь соответствует

Методист учебно-методического  
управления БГПУ



Е.А.Кравченко

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Важным элементом профессиональной культуры преподавателя физики является его подготовка в области радиоэлектроники.

Цель раздела «Радиоэлектроника» – формирование у будущего преподавателя физики системы теоретических знаний и практических навыков по основам радиоэлектроники. Радиоэлектроника опирается на применение знаний и навыков, полученных при изучении общей физики (раздел «Электричество и магнетизм»), а также электротехники. При этом предусматривается получение углубленных знаний по разделам физики, связанным с электричеством, электромагнитными колебаниями и волнами, принципами работы радиоэлектронных устройств. В то же время данный раздел является основой для изучения дисциплины «Цифровая электроника» и «Архитектура и программное обеспечение вычислительных систем».

Основная задача лекций заключается в получении студентами теоретических знаний по характеристикам электрических сигналов, построении и работе радиоэлектронных устройств, усилению, преобразованию, генерации, модуляции и детектированию электрических колебаний, основах радиоприема и телевидения, распространению радиоволн, характеристиках антенн и др.

Задачей лабораторных занятий является формирование практических навыков составления и анализа радиоэлектронных схем, измерения их параметров. Лабораторные работы проводятся фронтальным методом, предусмотрены работы по компьютерному моделированию с использованием пакета анализа радиоэлектронных схем Micro-Cap.

В соответствии со сказанным выше после изучения раздела «Радиоэлектроника» студент должен знать:

- физические законы, на которых основана работа радиоэлектронных устройств;
- условные графические обозначения электронных элементов, применяемых в электрических схемах;
- физические принципы работы радиоэлектронных устройств и процессы, протекающие в них.

После изучения раздела «Радиоэлектроника» студент должен уметь:

- составлять и анализировать режимы работы радиоэлектронных схем, измерять их параметры;
- моделировать на компьютере радиоэлектронные схемы и измерять их параметры с использованием пакета анализа радиоэлектронных схем Micro-Cap;
- выбирать аппаратуру и контрольно-измерительные приборы для проведения измерений;
- использовать инновационные технологии для решения типовых профессиональных задач учителя физики и информатики.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен владеть:

- навыками составления радиотехнических цепей;

- способами проектирования радиотехнических цепей с использованием современных компьютерных программ;
- приемами использования радиотехнических приборов в профессиональной деятельности будущего учителя физики.

### **Методы и формы обучения**

Обучение учебной дисциплине проходит в рамках организации лекционных и лабораторных занятий. В лекционном курсе рассматриваются новейшие концепции и подходы к изучению физической электроники. Обращается внимание на методологию постановки и решения задач. При чтении лекций особое внимание следует уделять демонстрации реальных электро-радиотехнических приборов, программных продуктов и мультимедийным презентациям, которые должны служить для будущих учителей образцом объяснения материала.

Лабораторные занятия направлены на формирование навыков практического использования полученных знаний при выполнении конкретных заданий. Методика их проведения должна содействовать развитию индивидуально-творческих способностей каждого студента и приобретению навыков самостоятельной работы.

Текущий контроль осуществляется при выполнении и сдаче лабораторных работ. Форма итогового контроля – экзамен.

### **Структура содержания учебной дисциплины**

На изучение дисциплины «Физическая электроника» (раздел «Радиоэлектроника») типовым учебным планом предусмотрено 132 часа, из них 60 часов аудиторных (20 лекционных и 40 лабораторных) занятий.

На лекциях рассматриваются теоретические основы радиоэлектроники. Лабораторные работы нацелены на формирование практических умений сборки и исследования электронных устройств. Особое внимание уделяется выяснению сущности физических процессов и законов, лежащих в основе работы различных радиоэлектронных устройств. Изучение материала опирается на использование знаний и навыков, полученных при изучении общей физики, математических и информационных дисциплин.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### 1. Введение.

История развития и области применения радиоэлектроники. Содержание и структура раздела. Роль радиоэлектроники в подготовке преподавателя. Характеристики электрических сигналов. Основные элементы цепей. Активные, пассивные, линейные и нелинейные цепи. Цепи с постоянными, переменными и распределенными параметрами.

### 2. Четырехполюсники.

Анализ радиотехнических цепей методом комплексных амплитуд. Избирательные четырехполюсники. Классификация фильтров. Анализ фильтров нижних и верхних частот методом комплексных амплитуд. Полосовые и заграждающие фильтры.

### 3. Колебательный контур.

Собственные колебания в контуре. Затухание колебаний в контуре. Волновое сопротивление, полоса пропускания и добротность контура. Вынужденные колебания в контуре. Фильтрующие свойства последовательного и параллельного контуров.

### 4. Полупроводниковые приборы.

Полевые транзисторы. Типы полевых транзисторов. Статические характеристики и параметры. Работа полевого транзистора с нагрузкой.

Биполярные транзисторы. Принцип работы. Статические входные и выходные характеристики. Эквивалентная схема транзистора. Динамический режим работы биполярного транзистора. Малосигнальные параметры. Маркировка полупроводниковых приборов.

### 5. Электронные усилители.

Классификация усилителей по назначению. Основные характеристики (коэффициент передачи, амплитудно-частотная характеристика, коэффициент частотных и нелинейных искажений, динамический диапазон). Режимы работы усилительных элементов.

### 6. Усилители напряжения.

Схемы апериодических усилителей на транзисторах. Принципиальная схема апериодического усилителя. Способы автоматической подачи напряжения смещения для полевого и бипольного транзистора. Эмиттерная и коллекторная температурная стабилизация. Резонансный усилитель.

### 7. Усилители мощности.

Схема и работа однотактного и двухтактного трансформаторных каскадов. Фазоинверсный каскад. Схема и работа безтрансформаторного двухтактного выходного каскада.

### 8. Интегральные микросхемы.

Общие характеристики интегральных микросхем. Операционные усилители. Обратная связь в усилителях. Структурная схема усилителя с обратной связью. Положительная и отрицательная обратная связь. Способы реализации обратной связи в усилителях. Коэффициент усиления усилителя с обратной связью.

### **9. Генерация гармонических колебаний.**

Схема и работа LC-автогенератора. Условия самовозбуждения генератора. Схема генератора с параллельным включением контура. Схема генератора с автотрансформаторной связью. Режимы работы генератора. Стабилизация частоты генерации. Схемы генераторов с RC-цепями.

### **10. Нелинейные преобразования сигналов.**

Амплитудная модуляция. Коэффициент амплитудной модуляции. Базовая амплитудная модуляция смещением. Коллекторная амплитудная модуляция. Детектирование амплитудно-модулированных сигналов. Диодный детектор. Коллекторный детектор.

Частотная модуляция. Коэффициент частотной модуляции. Функциональная схема осуществления частотной модуляции на транзисторах. Принципиальная схема частотного модулятора. Детектирование частотно модулированных сигналов.

### **11. Радиоприемные устройства.**

Классификация и характеристики радиоприемных устройств. Основные параметры радиоприемных устройств. Структурная и принципиальная схемы приемника прямого усиления. Структурная схема супергетеродинного приемника. Особенности работы приемников частотно-модулированных сигналов.

Распространение радиоволн. Скорость, преломление, дифракция, интерференция, поглощение, отражение электромагнитных волн. Действие ионосферы на распространение радиоволн. Основные параметры антенн. Открытый колебательный контур. Полуволновой вибратор. Ферритовая антенна.

### **12. Основы телевидения.**

Развертка изображения. Принцип накопления зарядов. Форма и частотный спектр видеосигнала. Полный управляющий сигнал в телевидении. Преобразование оптического сигнала в электрический сигнал и обратное преобразование. Передача и прием цветного изображения. Передающие трубки. Кинескопы. Форма и частотный спектр полного управляющего сигнала при передаче сигнала цветного изображения. Структурная схема телевизионной системы цветного телевидения.

Основы цифрового радиовещания и телевидения. Преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал. Передача и прием цифрового сигнала.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

| Номер раздела, темы, занятия | Название раздела, темы, занятия, перечень изучаемых вопросов  | Количество аудиторных часов |                      | Материальное обеспечение занятия (наглядные, методические пособия и др.) | Литература   | Формы контроля  |
|------------------------------|---|-----------------------------|----------------------|--|--|---|
|                              |   | Лекции                      | Лабораторные занятия |  |  |   |
| 1                            | 2   | 3                           | 4                    | 5  | 6  | 7   |
|                              | <b>Радиоэлектроника (60ч)</b>   | <b>20</b>                   | <b>40</b>            |  |  |   |
| <b>1</b>                     | <b>Четырехполюсники (2 ч.)</b>  | <b>2</b>                    | <b>6</b>             |  |  |   |
| 1.1                          | История развития и области применения радиоэлектроники. Содержание и структура раздела. Основные элементы цепей. Анализ радиотехнических цепей методом комплексных амплитуд. Избирательные четырехполюсники. Классификация фильтров. Анализ фильтров нижних и верхних частот методом комплексных амплитуд. Полосовые и заграждающие фильтры | 2                           |                      | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация                        | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.1), [1],[2],[3] | 1. Отчет о выполнении заданий по УСПС                   |
| 1.2                          | Лабораторная работа №1 «Радиотехнические измерения»   |                             | 2                    | 1. Инструкция к лабораторной работе № 1.<br>2. Оборудование              | [1], [2]   | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы. |

| 1        | 2  | 3        | 4        | 5  | 6   | 7  |
|----------|--|----------|----------|--|---|--|
|          |  |          |          | в соответствии с инструкцией лабораторной работы   |   | 2. Отчет по лабораторной работе  |
| 1.3      | Лабораторная работа №2<br>«Измерение амплитудно-частотных характеристик РС четырехполюсников»  |          | 4        | 1. Инструкция к лабораторной работы № 2.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией лабораторной работы | [1], [2]  | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет по лабораторной работе   |
| <b>2</b> | <b>Колебательный контур (1ч.)</b>  | <b>1</b> | <b>4</b> |  |   |  |
| 2.1      | Собственные колебания в контуре. Затухание колебаний в контуре.<br>Волновое сопротивление, полоса пропускания и добротность контура.<br>Вынужденные колебания в контуре. Фильтрующие свойства последовательного и параллельного контуров | 1        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>3. Презентация.<br>4 Демонстрации<br>2.1, 2.2, 2.3                        | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.3),<br>[1],[5] | 1. Сдача.<br>2. Тестовое задание   |
| 2.2      | Лабораторная работа №3 «Фильтрующие свойства колебательных контуров»   |          | 4        | 1. Инструкция лабораторной работы № 3.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией лабораторной работы   | [1],[5]   | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет по лабораторной работе.<br>3. Контрольная работа по рейтинговой системе №1 |
| <b>3</b> | <b>Полупроводниковые приборы (2 ч.)</b>  | <b>2</b> | <b>4</b> |  |   |  |

| 1        | 2  | 3        | 4        | 5   | 6   | 7  |
|----------|--|----------|----------|---|---|--|
| 3.1      | Полевые транзисторы. Типы полевых транзисторов. Статические характеристики и параметры. Работа полевого транзистора с нагрузкой  | 2        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация.<br>3. Демонстрация<br>3.1                              | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.4), [1],[2], [8] | 1.Сдача.<br>2. Тестовое задание  |
|          | Биполярные транзисторы. Принцип работы. Статические входные и выходные характеристики. Физическая эквивалентная схема транзистора. Динамический режим работы биполярного транзистора. Малосигнальные параметры. Маркировка полупроводниковых приборов  |          |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация.<br>3. Демонстрация<br>3.2, 3.3                         | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.5), [1],[2], [8] | 1.Сдача.<br>2. Тестовое задание  |
| 3.2      | Лабораторная работа №5 «Измерение характеристик транзисторов»  |          | 4        | 1.Инструкция лабораторной работы № 5.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией лабораторной работы | [1],[2], [8]  | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет по лабораторной работе |
| <b>4</b> | <b>Электронные усилители (3 ч.)</b>  | <b>3</b> | <b>4</b> |   |   |  |
| 4.1      | Классификация усилителей по назначению. Основные характеристики (коэффициент передачи, амплитудно-частотная характеристика, коэффициент частотных и нелинейных искажений, динамический диапазон). Режимы работы усилительных элементов. Расчет схем смещения. Схема автоматического смещения для полевого транзистора. Простая схема подачи напряжения для би- | 2        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация   | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.6), [1],[2], [7] | 1.Сдача.<br>2. Тестовое задание  |

| 1        | 2   | 3        | 4        | 5  | 6   | 7  |
|----------|---|----------|----------|--|---|--|
|          | полярного транзистора. Схема базового делителя. Схема эмиттерной стабилизации. Схемы апериодических усилителей на транзисторах. Принципиальная схема апериодического усилителя. Резонансный усилитель |          |          |  |   |  |
| 4.2      | Лабораторная работа №6 «Усилитель низкой частоты на биполярном транзисторе»   |          | 4        | 1. Инструкция лабораторной работы № 6.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией лабораторной работы | [1],[2], [7]  | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет по лабораторной работе |
| <b>5</b> | <b>Усилители мощности (1ч.)</b>   | <b>1</b> | <b>4</b> |  |   |  |
| 5.1      | Схема и работа однотактного и двухтактного трансформаторных каскадов. Фазоинверсный каскад. Схема и работа безтрансформаторного двухтактного выходного каскада  | 1        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация.<br>3. Демонстрация 4.1                                  | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.7), [1],[2], [7] | 1. Сдача.<br>2. Тестовое задание   |
| 5.2      | Лабораторная работа №7 «Расчет однотактного трансформаторного выходного каскада усилителя звуковой частоты на биполярном транзисторе»   |          | 4        | 1. Инструкция лабораторной работы № 7.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией лабораторной работы | [1],[2], [7]  | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет по лабораторной работе |
| <b>6</b> | <b>Интегральные микросхемы (2ч.)</b>  | <b>2</b> | <b>4</b> |  |   |  |
| 6.1      | Общие характеристики интегральных микросхем. Операционные усилители. Обрат-   | 2        |          | 1. Учебные плакаты, инструк-   | Электронный курс лекций   | 1. Сдача.<br>2. Тестовое зада-   |

| 1        | 2   | 3        | 4        | 5   | 6  | 7   |
|----------|---|----------|----------|---|--|---|
|          | ная связь в усилителях. Структурная схема усилителя с обратной связью. Положительная и отрицательная обратная связь. Способы реализации обратной связи в усилителях. Коэффициент усиления усилителя с обратной связью   |          |          | ции.<br>2. Презентация.<br>3. Демонстрация<br>4.2   | по радиоэлектронике (л.8), [1],[5], [8]                        | ние   |
| 6.2      | Лабораторная работа №8 «Исследование операционного усилителя»   |          | 4        | 1.Инструкция лабораторной работы № 8.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией лабораторной работы | [1],[5],[8]  | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет по лабораторной работе.<br>3.Контрольная работа по рейтинговой системе №2 |
| <b>7</b> | <b>Генерация гармонических колебаний (2ч.)</b>  | <b>2</b> | <b>4</b> |   |  |   |
| 7.1      | Схема и работа LC-автогенератора. Условия самовозбуждения генератора. Схема генератора с параллельным включением контура. Схема генератора с автотрансформаторной связью. Режимы работы генератора. Стабилизация частоты генерации. Схемы генераторов с RC-цепями | 2        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация   | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.9), [1],[2],[4] | 1.Сдача.<br>2. Тестовое задание   |
| 7.2      | Лабораторная работа №9 «Генераторы гармонических колебаний»   |          | 4        | 1.Инструкция лабораторной работы № 9.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией ла-                 | [1],[2],[4]  | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет по лабораторной работе  |

| 1        | 2   | 3        | 4        | 5   | 6   | 7  |
|----------|---|----------|----------|---|---|--|
|          |   |          |          | бораторной работы   |   |  |
| <b>8</b> | <b>Нелинейные преобразования сигналов (3ч.)</b>   | <b>3</b> | <b>4</b> |   |   |  |
| 8.1      | Амплитудная модуляция. Коэффициент амплитудной модуляции. Базовая амплитудная модуляция сдвигом. Коллекторная амплитудная модуляция. Детектирование амплитудно-модулированных сигналов. Диодный детектор. Коллекторный детектор       | 2        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация   | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.10), [1],[2],[3] | 1. Сдача.<br>2. Тестовое задание   |
| 8.2      | Частотная модуляция. Коэффициент частотной модуляции. Функциональная схема осуществления частотной модуляции на транзисторах. Принципиальная схема частотного модулятора. Детектирование частотно модулированных сигналов             | 1        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация   | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.10), [1],[2],[3] | 1. Сдача.<br>2. Тестовое задание   |
| 8.3      | Лабораторная работа №10 «Амплитудная модуляция и детектирование»  |          | 4        | 1. Инструкция лабораторной работы № 10.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией лабораторной работы | [1],[2],[3]   | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет по лабораторной работе |
| <b>9</b> | <b>Радиоприемные устройства (2ч.)</b>   | <b>2</b> | <b>2</b> |   |   |  |
| 9.1      | Классификация и характеристики радиоприемных устройств. Основные параметры радиоприемных устройств. Структурная и принципиальная схемы приемника прямого усиления. Структурная схема супергетеродинного приемника. Особенности работы | 2        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация   | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.11), [1],[2],[4] | 1. Сдача.<br>2. Тестовое задание   |

| 1         | 2  | 3        | 4        | 5   | 6   | 7  |
|-----------|--|----------|----------|---|---|--|
|           | приемников частотно-модулированных сигналов  |          |          |   |   |  |
|           | Распространение радиоволн. Скорость, преломление, дифракция, интерференция, поглощение, отражение электромагнитных волн. Действие ионосферы на распространение радиоволн. Открытый колебательный контур. Полуволновой вибратор. Ферритовая антенна   |          |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация   | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.12), [1],[2],[4] | 1. Сдача.<br>2. Тестовое задание   |
| 9.2       | Лабораторная работа №11 «Приемник прямого усиления на транзисторах»  |          | 2        | 1. Инструкция лабораторной работы № 11.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией лабораторной работы | [1],[2],[4].  | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет по лабораторной работе.<br>3. Контрольная работа по рейтинговой системе №3 |
| <b>10</b> | <b>Основы телевидения (3ч.)</b>  | <b>3</b> | <b>4</b> |   |   |  |
| 10.1      | Развертка изображения. Принцип накопления зарядов. Полный управляющий сигнал в телевидении. Преобразование оптического сигнала в электрический сигнал и обратное преобразование. Передача и прием цветного изображения. Передающие трубки. Кинескопы. Структурная схема телевизионной системы цветного телевидения | 2        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.<br>2. Презентация   | Электронный курс лекций по радиоэлектронике (л.13), [1],[2],[4] | 1. Сдача.<br>2. Тестовое задание   |
| 10.2      | Основы цифрового радиовещания и телевидения. Преобразование аналогового сигнала в цифровой сигнал. Передача и прием циф-   | 1        |          | 1. Учебные плакаты, инструкции.   | Электронный курс лекций по радиоэлек-                           | 1. Сдача.<br>2. Тестовое задание   |

| 1                     | 2   | 3         | 4         | 5  | 6                                 | 7  |
|-----------------------|---|-----------|-----------|--|-----------------------------------|--|
|                       | рового сигнала  |           |           | 2. Презентация   | тронике<br>(л.13),<br>[1],[2],[4] |  |
| 10.3                  | Лабораторная работа №13 «Изучение цветного телевизионного приемника |           | 4         | 1.Инструкция лабораторной работы № 13.<br>2. Оборудование в соответствии с инструкцией лабораторной работы | [1],[2],[4]                       | 1. Контрольный допуск к выполнению лабораторной работы.<br>2. Отчет о выполнении заданий по УСРС |
| <b>Итого (60 ч.):</b> |   | <b>20</b> | <b>40</b> |  |                                   |  |

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### ЛИТЕРАТУРА

#### Основная:

1. Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. Основы радиоэлектроники. Мн.: Вышэйшая школа, 1992.
2. Л.С. Бобровников. Электроника. Учебник для вузов. СПб.: Питер. 2004.
3. Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина, Н.В. Соина. Радиотехника. М.: Просвещение, 1986.
4. Д.С. Дьюб. Электроника. Схемы и анализ. М.: Техносфера, 2008.
5. А.А. Щука. Электроника. СПб.: БХВ, 2005.
6. В.Д. Разевиг. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. Горячая линия – Телеком, 2003.
7. В.А. Прянишников. Электроника: полный курс лекций. Корона-Принт, 2004.
8. Д. Крекрафт, С. Джерджли. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала. М.: Техносфера, 2005.
9. Бойт, К. Цифровая электроника / К. Бойт. – М.: Техносфера, 2007. – 231 с.
10. Угрюмов, Е.П. Цифровая схемотехника / Е.П. Угрюмов. – СПб.: БХВ, 2007. – 200с.

#### Дополнительная:

1. Ю.Н. Новиков. Электротехника и электроника. Теория цепей и сигналов, методы анализа. СПб.: Питер, 2005.
2. Е.И. Манаев. Основы радиоэлектроники. М.: Просвещение, 1985.
3. О.В. Миловзоров, И.Г. Панков. Электроника: учебник для вузов. Высш. шк., 2006.
4. Ю.В. Ревич. Занимательная электроника. СПб.: БХВ, 2006.
5. В.Е. Джакония, А.А. Гоголь и др. Телевидение: учебник для вузов. М.: Радио и Связь, 2004.
6. В.И. Лачин. Электроника. 4-е изд. Феникс, 2004.
7. В.И. Каганов. Радиотехнические цепи и сигналы. Лабораторный компьютеризированный практикум. Горячая линия – Телеком, 2004.
8. В.И. Карлашук. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB. Солон-ПРЕСС, 2004.
9. Карякин, В. Цифровое телевидение / В. Карякин. – Солон-Пресс, 2008. – 327 с.
10. Григоров, И. Антенны / И.Григоров. – М.: РадиоСофт, 2013. – 165 с.

## ПЕРЕЧЕНЬ ЛЕКЦИОННЫХ ДЕМОСТРАЦИЙ ПО РАЗДЕЛУ «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

### 1. Четырехполюсники.

1.1. Виртуальная модель схемы RC-фильтра нижних частот. Ее амплитудно-частотный и фазовый анализ в программе Micro-Cap 5.

1.2. Виртуальная модель схемы полосового RC-фильтра и ее амплитудно-частотный и фазовый анализ в программе Micro-Cap 5.

1.3. Виртуальная модель схемы параллельного контура. Анализ ее резонансной характеристики в программе Micro-Cap 5.

### 2. Вынужденные колебания в контурах.

2.1. Виртуальная модель последовательного контура. Графики зависимостей  $Z$ ,  $I$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$  от частоты. Полоса пропускания и добротность контура. Влияние параметров контура на его резонансные характеристики (программа Micro-Cap 5).

2.2. Виртуальная модель параллельного контура. Графики зависимостей  $Z$ ,  $I$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$  от частоты. Полоса пропускания и добротность контура. Влияние параметров контура на его резонансные характеристики (программа Micro-Cap 5).

2.3. Виртуальная модель связанных контуров. Схемы связи. Зависимость резонансных характеристик от коэффициента связи контуров (программа Micro-Cap 5).

### 3. Полупроводниковые приборы.

3.1. Виртуальная модель работы полевого транзистора.

3.2. Виртуальная модель работы биполярного транзистора.

3.3. Виртуальная модель биполярного транзистора р-п-р типа, включенного по схеме с общим эмиттером. Измерение входных и выходных характеристик (программа Micro-Cap 5).

### 4. Электронные усилители.

4.1. Виртуальная схема усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе. Расчет параметров рабочей точки. Измерение амплитудно-частотных характеристик (программа Micro-Cap 5).

4.2. Виртуальная схема операционного усилителя. Балансировка схемы. Измерение амплитудно-частотной характеристики схемы усилителя (программа Micro-Cap 5).

### 4. Телевидение.

Интерактивная модель формирования изображения в цветных кинескопах.

## **ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ НА ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЯХ**

1. Электротехника. Электронный учебник. (HTML).
2. Лекции по радиоэлектронике (рисунки и схемы).
3. Вопросы к допуску к лабораторным работам по радиоэлектронике.
4. Материалы к лабораторным работам по радиоэлектронике. Материалы доступны в сети факультета S:/ course03/radio/.

## **НАГЛЯДНЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОСОБИЯ**

Имеются в наличии в лаборатории радиоэлектроники – корп. 3. каб. 302.

## **ПЕРЕЧЕНЬ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ**

Для оценки достижений и уровня знаний студента при изучении дисциплины целесообразно применить комплексный инструментарий, который включает:

- контроль выполнения внеаудиторных заданий;
- контроль ведения рабочих тетрадей;
- выборочный отчет по внеаудиторным заданиям;
- устное собеседование, коллоквиум;
- компьютерное тестирование;
- отчет о выполнении заданий самостоятельного цикла;
- контроль выполнения самостоятельной работы по темам;
- зачетное занятие с учетом результатов рейтинг-листа, составленного по данным прохождения дисциплины в семестре.

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН**

| <b>№</b> | <b>Наименование раздела, темы</b>  | <b>Всего</b> | <b>Лек-<br/>ции</b> | <b>Лабора-<br/>торные</b> |
|----------|------------------------------------|--------------|---------------------|---------------------------|
| 1        | Радиоэлектроника                   | 60           | 20                  | 40                        |
| 1.1      | Радиотехнические цепи              | 8            | 2                   | 6                         |
| 1.2      | Колебательный контур               | 5            | 1                   | 4                         |
| 1.3      | Полупроводниковые приборы          | 6            | 2                   | 4                         |
| 1.4      | Электронные усилители              | 11           | 3                   | 8                         |
| 1.5      | Интегральные микросхемы            | 6            | 2                   | 4                         |
| 1.6      | Генерация гармонических колебаний  | 6            | 2                   | 4                         |
| 1.7      | Нелинейные преобразования сигналов | 7            | 3                   | 4                         |
| 1.8      | Радиоприемные устройства           | 4            | 2                   | 2                         |
| 1.9      | Основы телевидения                 | 7            | 3                   | 4                         |

РЕПОЗИТОРИЙ БГУТУ