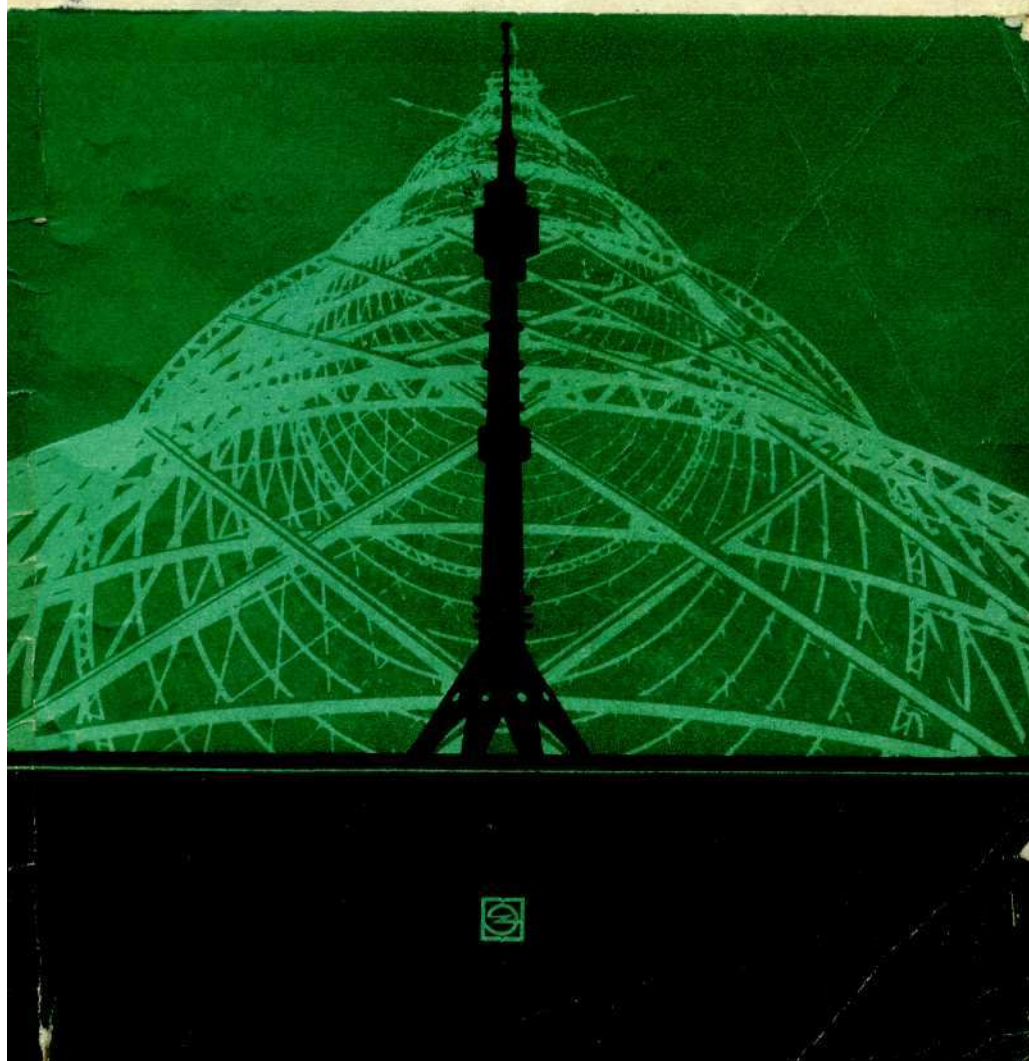




Е. АЙСБЕРГ

РАДИО И ТЕЛЕВИДЕНИЕ ?..
ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО !



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 975

Е. АЙСБЕРГ

РАДИО

И ТЕЛЕВИДЕНИЕ?.. ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО!

Перевод с французского Ю. Л. СМЕРНОВА

ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ

МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1979



ББК 32.84/32.94 А36

УДК 621.396.62 + 621.397.62

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Белкин Б. Г., Борисов В. Г., Ванеев В. И., Геништа Е. Н., Гороховский А. В., Демьянов И. А., Ельяшкевич С. А., Жеребцов И. П., Корольков В. Г., Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И., Чистяков Н. И.

Е. AISBERG

LA RADIO ET LA TELEVISION?., MAIS C'EST TRES SIMPLE!

SOCIETE DES EDITIONS RADIO, PARIS, 1972

Айсберг Е.

Радио и телевидение?.. Это очень просто!: Пер. с франц.—2-е изд.— М.: Энергия, 1979.— 232 9., ил.— (Массовая радиобиблиотека; Вып. 975).

1 р. 20 к.

В книге рассказывается о том, как устроены и работают современные радиоприемник и телевизор. Рассказ ведется в форме непринужденных бесед между опытным и начинающим радиолюбителями.

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Книга относится к серии популярных изданий Е. Айсберга, вышедших во Франции под названием «...Это очень просто!». Она написана в той же необычной манере, в виде бесед двух друзей — Любознайкина и Незнайкина. Беседы сопровождаются комментариями, преследующими двоякую цель: углубить изложенное и дополнить материал по ряду вопросов.

Читатель найдет в книге понятное изложение основных законов радиотехники и простое объяснение принципов действия современных радиоприемников и телевизоров, а остроумные рисунки на полях внесут оживление и, несомненно, помогут усвоению материала.

В русский перевод книги внесен ряд изменений в текст и графический материал, необходимость которых диктовалась существенными различиями между французским и советским стандартами. К основным различиям относятся в разделе радио — границы и промежуточная частота УКВ ЧМ диапазона, а в разделе телевидения — число строк разложения, форма сигналов синхронизации, разность несущих частот изображения и звукового сопровождения и их взаимное расположение по шкале частот, тип модуляции передатчика звукового сопровождения.

Во второе издание книги внесены поправки, связанные с изменением ГОСТа на условные графические обозначения.

Отзывы о книге просим присылать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия».

Редакция Массовой радиобиблиотеки

А $\frac{30403-005}{051(01)-79}$ 241-79.2401000000

ББК 32.84/32.94

6Ф2

© Перевод на русский язык. «Энергия», 1975 г. © Перевод на русский язык. «Энергия», 1979 г.

Е. АЙСБЕРГ

РАДИО

И ТЕЛЕВИДЕНИЕ?..

ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО!

Редактор издательства Ю. Н. Рысев Художественный редактор Д. И. Чернышев Технический редактор Г. Г. Самсонова Корректор А. Д. Халанская ИБ № 2423

Сдано в набор 18.01.78. Подписано к печати 23.06.78. Формат 60x90^{1/16}. Бумага типографская № 1, Гарн. таймс. Печать высокая. Усл. печ. л. 14,5. Уч.-изд. л. 16,27. Тираж 140000 экз. Заказ 1764. Цена 1 р. 30 к.

Издательство «Энергия»,

113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.

[Издательство](#)

Содержание

Предисловие к русскому изданию	3
Предисловие автора	4
Действующие лица	6
Беседа первая	
Телеграфия без проводов - радио - электроника	7
Покорение Вселенной	7
Всемогущество электроники	7
Рождение телеграфии без проводов	8
Эпоха радио	10
Быстрое развитие электроники	11
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Строение вещества	12
Крошечные размеры молекул	12
Микромир и макромир	12
Распределение электронов	13
Какая пустота!	14
Конец нейтралитета	14
Валентные тенденции	15
Проводники, диэлектрики и полупроводники	16
Беседа вторая.	
Электроны на прогулке	17
От бесконечно большого к бесконечно малому	17
Хожение электронов	17
Источники напряжения	18
Условность и истина	19
Незнайкин формулирует закон Ома	20
Сопrotивление и удельное сопротивление	20
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Цепи постоянного тока	22
Десятичные приставки	22
Применение закона Ома	23
Электрическая мощность	23
Падение напряжения	23
Беседа третья.	
Электромагнетизм	24
Притяжение и отталкивание	24
Прогулка по полям	24
Рождение магнетизма	25
Соленоид. Электромагнит	26
Рождение электрического тока	27
Переменный ток или постоянный	27
Генератор, превращенный в двигатель	28
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Индукция и индуктивность	29
Дедукция об индукции	29
Коэффициент трансформации	30
Самоиндукция	30
Устройство гальванометра	31
Измерительные приборы	31

Беседа четвертая.	
Емкость и емкостное сопротивление	33
Заряд конденсатора	33
Рождение конденсатора	34
Заряд и разряд	35
Величина емкости	35
Конденсаторы постоянной, переменной емкости и подстроечные	37
Прохождение переменного тока	38
Емкостное сопротивление конденсатора	39
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Соединение компонентов	40
Сосуществование R, L и C	40
Последовательное соединение	40
Параллельное соединение	42
Комбинированное соединение	43
Явление резонанса	45
Беседа пятая.	
Колебательный контур. Электромагнитные волны	47
Заряды и разряды	47
Поддержание колебаний	49
Радиоволны	50
Диапазоны волн	50
Прием радиоволн	51
Настройка и избирательность	52
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Радиопередатчики и радиоприемники	54
Звуковые волны	54
Различные микрофоны	55
Устройство передатчика	56
Устройство приемника	56
Телефоны и громкоговорители	57
Беседа шестая.	
От рамочной антенны к электровакуумному диоду	60
Рамочные антенны	60
Радиопеленгация	61
Рамочные антенны с ферромагнитными сердечниками	62
Эмиссия электронов	63
Выпрямление тока и детектирование	65
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
От электровакуумного диода к триоду	67
Температура и вакуум	67
Насыщение тока	67
Двухтактное детектирование	68
Действие сетки	68
Коэффициент усиления и крутизна	69
Характеристики триода	69
Внутреннее сопротивление	70
Соотношение между тремя основными параметрами	71
Использование триода для усиления	71
Смещение с помощью падения напряжения	73

Связь между усилительными каскадами	73
Беседа седьмая.	
Усиление колебаний НЧ	74
Детектирование с одновременным усилением	74
Усиление колебаний НЧ	75
Резистивно-емкостная связь	76
Двухтактная схема	77
Сдвиг фазы с помощью лампы	78
Катодный повторитель	79
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Обратная связь. Радиопередача. Многоэлектродные лампы	81
Детектирование плюс усиление	81
Положительные свойства обратной связи	81
Регенеративный детектор	82
Схемы генераторов	82
Явление интерференции	83
Модуляция и радиопередача	84
Отрицательные свойства обратной связи	85
Тетрод	85
Вторичная эмиссия. Пентод	87
Комбинированные лампы. Гептоды. Октоды	87
Беседа восьмая.	
Супергетеродин	88
Недостатки многокаскадного УВЧ	88
Принцип работы супергетеродина	88
Преобразование частоты	89
От двухсеточной лампы к октоду	90
Зеркальные частоты	92
Сопряженная настройка	92
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Системы питания	94
Характеристики электрической сети	94
Питание ламп в сетевых приемниках	94
Как получают напряжение накала и анодное напряжение	95
Фильтрация высокого напряжения	96
Электролитические конденсаторы	97
Полупроводниковые выпрямители	98
Беседа девятая.	
Замирание и автоматическая регулировка усиления	99
Распространение радиоволн	99
Вокруг Земли и в космосе	100
Принцип действия системы автоматической регулировки усиления	101
Переменная крутизна	102
Напряжение АРУ	103
Задержанная АРУ	104
Ручная регулировка громкости звука	104
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Полупроводниковые приборы	105
Преимущества полупроводниковых приборов	105
Проводники, диэлектрики и полупроводники	105

Собственная проводимость	106
Фотоэлектричество	106
Отрицательные полупроводники	107
Положительные полупроводники	107
n-p переход	109
Напряжение обратной полярности	109
Напряжение прямой полярности	110
Полупроводниковый диод	110
Беседа десятая.	
Транзистор	111
Неподвижность атомов	111
Переход + переход = транзистор	112
Транзистор p-n-p	112
Транзистор n-p-n	113
Аналогия транзистор — триод	115
Условные обозначения	115
Усилительный каскад	116
Входное и выходное сопротивления	116
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Технология изготовления транзисторов	118
Очистка полупроводников	118
Высокочастотный нагрев	118
Получение монокристалла	119
Сплавление	119
Диффузия и электролиз	120
Высокие частоты ставят проблемы	120
Решения проблемы	121
Транзисторы с мезоструктурой	122
Эпитаксиальный слой	123
Изготовление транзисторов по планарной технологии	123
Использование светочувствительных пленок	124
Беседа одиннадцатая.	
Полевые транзисторы	125
Эффект удушья	125
Родственные отношения с триодом	126
Бесконечное входное сопротивление	126
Крутизна характеристики транзистора	127
Напряжение смещения затвора	128
Радиоприемник на транзисторах	129
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Три основные схемы	130
Основные схемы включения триода	130
Схема с общим эмиттером	131
Схема с общей базой	131
Схема с общим коллектором	132
Беседа двенадцатая.	
Связь выход — вход. Отрицательная обратная связь	133
Аналогия и различие	133
Согласование между источником и нагрузкой	134
Идеальное средство согласования выход — вход	135

Обратная связь против нагревания	136
Отрицательная обратная связь против искажений	137
Схемы с отрицательной обратной связью	139
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Схемы связи	140
Трансформаторы ВЧ и ПЧ	140
Резистивно-емкостная связь	140
Непосредственная связь	141
Двухтактная схема на транзисторах	143
С фазоинвертором или без него	143
Комбинированная связь	144
Беседа тринадцатая.	
Супергетеродин на транзисторах	145
Действие обратной связи	145
Автоматическая регулировка усиления	147
Диод, вносящий переменное затухание	147
Прием в нескольких диапазонах волн	148
Карманный приемник	148
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Печатные и интегральные схемы	150
Способ изготовления печатных плат	150
Фото на службе электроники	150
Устройство интегральных схем	151
Создание пассивных компонентов	151
Изготовление БИС	151
Причины микроминиатюризации	152
Беседа четырнадцатая.	
Частотная модуляция	153
Сколько передатчиков может работать в каждом диапазоне волн?	153
Ширина боковых полос при ЧМ	154
Дальность распространения метровых волн	154
Принцип и преимущества ЧМ	155
Как модулируют частоту?	157
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Прием передач с частотной модуляцией	159
Усиление промежуточной частоты	159
Преобразователь частоты и УВЧ	160
Частотный детектор	161
Демодулирование с помощью дискриминатора	161
Детектор отношений	162
Беседа пятнадцатая.	
Анализ телевизионного изображения	163
Кинематограф — передача изображений во времени	163
Последовательная передача изображения в телевидении	164
Отсутствие международного стандарта	164
Полоса видеочастот	165
Телевизионная передача	166
Чересстрочное разложение изображения	166
Основные принципы телевидения	167
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	

Электронно-лучевая трубка	169
Электронная пушка	169
Способы фокусировки	169
Отклонение электрическими полями	171
Флуоресценция экрана	171
Магнитное отклонение	172
Возвращение электронов	173
Существует ли опасность взрыва?	173
Плоский экран будущего	174
Беседа шестнадцатая.	
Генераторы разверток	175
Отклонение пилообразным током	175
Основная схема развертки	176
Экспоненциальные кривые	176
Действие сигналов синхронизации	177
Ионизация тиратрона	178
Польза насыщения	179
Схема развертки с блокинг-генератором	180
Блокинг-генератор на транзисторе	181
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Передающие телевизионные трубки	183
Качества, которыми должна обладать передающая телевизионная трубка	183
Фотоэмиссия и фотопроводимость	183
Иконоскоп — предшественник современных передающих телевизионных трубок	184
Супериконоскоп	185
Суперортикон	186
Электронный умножитель	187
Видикон	187
Беседа семнадцатая.	
Телевизионные передатчики и приемники	188
Амплитуда видеосигналов	189
Форма сигналов синхронизации	190
Волны, модулированные сигналами изображения и звука	192
Устройство телевизионных передатчиков	192
Устройство телевизионных приемников	194
Беседа восемнадцатая.	
Физика цвета и физиология зрения	196
Спектр цветов	196
Сложение цветов	198
Физиология зрения	198
Восприятие цветов	200
Передача цветов в телевидении	201
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Цветные телевизионные передачи	202
Яркость — сумма цветов	202
Сигналы, передаваемые в цветном телевидении	203
Цветная передающая телевизионная камера	204
Передача трех сигналов	205
Системы NTSC, SECAM, PAL	206
Беседа девятнадцатая.	

Цветные телевизоры	207
Цветной телевизор, сконструированный Незнайкиным	207
Цветной кинескоп с теневой маской	207
Высокая точность	210
Кинескоп с цветоделительной сеткой	210
Монохромное изображение на цветном кинескопе	212
Система NTSC и PAL	212
Принцип системы SECAM	212
Линии задержки	213
<i>Комментарий профессора Радиоля.</i>	
Запись и воспроизведение звука и изображения	216
Три вида преобразования	216
Предки современных электропроигрывателей	216
Запись звука на грампластинку	217
Производство грампластинок	218
Звукосниматели	218
Звуковые кинофильмы	219
Магнитофоны	219
Видеомагнитофоны и видеопластинки	220
Беседа двадцатая и последняя.	
Применение электроники	222
Электронные способы измерения температуры	222
Медицинская электроника	222
Радиолокатор	223
Вычислительная техника, автоматика и телеуправление	224

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Свою первую книгу, называвшуюся «Я понял телеграфию без проводов», я написал в 1926 г. Она выдержала множество изданий и переведена на 22 языка.

В то время радиовещательные приемники собирали на лампах — триодах с прямым накалом с питанием от батарей. Появление ламп с косвенным накалом после 1930 г. позволило перейти к питанию их от сети переменного тока, что повлекло существенное изменение схем приемников. Вскоре я написал новую книгу под названием «Радио?.. Это очень просто!». Первая книга содержала 16 бесед, в ходе которых инженер Радиоль объяснял основы радиотехники своему племяннику Любознайкину. В следующей книге уже Любознайкин, в свою очередь, знакомил с этой техникой своего друга Незнайкина.

Впоследствии в форме диалога этих двух молодых людей был написан ряд других книг: «Телевидение?.. Это очень просто!», «Транзистор?.. Это очень просто!» и т. д. Однако электроника стремительно развивается. Она находит практическое применение во всех отраслях науки и производства, а также распространяется на все другие сферы человеческой деятельности.

Попытка изложить все аспекты этой техники и все разнообразные случаи ее применения представляет собой слишком сложную задачу, и, кроме того, читатели вряд ли бы одобрили такую книгу.

В предлагаемой читателю книге вначале изложены основы электротехники. Затем в популярной форме рассматривается техника передачи и приема радио- и телевизионных программ с помощью аппаратуры на лампах и транзисторах.

В заключение рассматриваются способы записи и воспроизведения звуковых и видеосигналов.

Чтобы избежать впечатления монотонности, я чередую в этой книге беседы Любознайкина и Незнайкина с рассказами профессора Радиоля. Юмористические рисунки на полях текста бесед, несомненно, сделают чтение более приятным и облегчат усвоение содержания.

Я желаю моим дорогим читателям легко войти в чудесную область, именуемую электроникой, прогрессу которой они, в свою очередь, будут эффективно содействовать. Желаю успеха!

Е. АЙСБЕРГ

Действующие лица

Любознайкин — молодой преподаватель электроники.

Незнайкин — юноша, обладающий лишь самыми поверхностными представлениями о физике и математике.

Профессор Радиоль — комментирует беседы Любознайкина с Незнайкиным и помогает читателю глубже и полнее усвоить материал.



Незнайкин



Любознайкин



Профессор
Радиоль

БЕСЕДА ПЕРВАЯ

ТЕЛЕГРАФИЯ БЕЗ ПРОВОДОВ — РАДИО - ЭЛЕКТРОНИКА

Прежде чем приступить к изучению электроники, двое друзей вспоминают историю ее развития, начиная от создания электромагнитных волн; они говорят о рождении телеграфии без проводов, начале радиовещания и т. д. Эта история делится на три эпохи, названия которых и служат заглавием настоящей беседы.

ПОКОРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Незнайкин. — Вчера вечером я с большим интересом смотрел цветные изображения, передаваемые по телевидению автоматической тележкой с планеты Марс. Меня охватило волнение при мысли, что все это мы видим, как в ходе репортажа со стадиона, т. е. в тот самый момент, когда эти изображения воспринимаются телевизионной камерой планетохода.

Любознайкин. — В этом случае, дорогой друг, прямая передача не означает, что изображения принимаются в момент их передачи. Не забывай, что электромагнитные волны, переносящие радио- и телевизионные сигналы, распространяются со скоростью света, т. е. 300000 км/с. Однако Марс находится от нашей Земли на расстоянии $225 \cdot 10^6$ км в среднем. Я предоставляю тебе возможность разделить это расстояние на скорость распространения волн, чтобы узнать, какое время они затратят на прохождение этой чудовищной дистанции.

Н. — Я получил 750 с, что составляет 12,5 мин... Ты прав, Любознайкин: это далеко не одновременно. Но это ничуть не уменьшает впечатления. Благодаря телевидению мы переносимся на различные небесные тела солнечной системы. И я твердо убежден, что в ближайшее время телевидение даст нам возможность увидеть и другие звезды с их системами планет.

Л. — Вне всякого сомнения. Но тогда с учетом скорости распространения волн передача изображений займет многие годы. Ведь даже на путь от самых близких звезд электромагнитные волны должны затратить около четырех с половиной лет.

Н. — Мы вооружимся терпением, необходимым для этого изумительного покорения Вселенной. Развитие электроники устранило препятствия пространства. Звук и изображение несутся с внушительной скоростью, и мы, не выходя из своего дома, слышим и видим то, что происходит на всех пяти континентах и даже в космосе.

ВСЕМОГУЩЕСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ

Л. — Кроме трех измерений пространства, электроника также покорила и так называемое «четвертое измерение» — время. Ведь теперь можно записать, а потом воспроизвести как звук,

7

так и изображение. Вот, мой дорогой друг, магнитофон, который записал всю нашу беседу с самого начала. Н. — Как он работает?

Л. — Чтобы это понять, нужно изучить работу микрофона, усилителя и т. д. Мы сделаем это постепенно.

Н. — Я очень бы этого хотел, так как на меня большое впечатление произвело всемогущество электроники, которая вторгается во все сферы человеческой деятельности. В промышленности все делается» автоматически благодаря электронным управляющим устройствам. В научных исследованиях широко применяются электронные средства! Врачи обращаются к электронике за помощью как для установления диагноза, так и для лечения некоторых заболеваний.

Л. — Ты забыл упомянуть электронную вычислительную машину. Точно так же, как два века тому назад паровая машина освободила от утомительной работы наши мышцы, ЭВМ благодаря своим вычислительным и логическим возможностям, а также памяти разгрузила человеческий мозг.

Н. — Но я думаю, что рождение ЭВМ ближе к нашим дням, чем рождение паровой машины.

Л. — И насколько! Первая электронная вычислительная машина появилась в 1943 г. Но прогресс идет все более стремительно, и эволюция ЭВМ может служить тому одним из самых впечатляющих примеров.

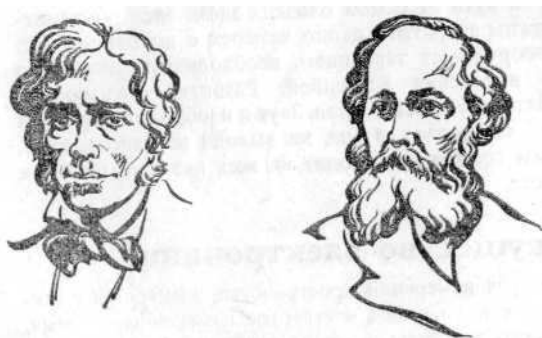
РОЖДЕНИЕ ТЕЛЕГРАФИИ БЕЗ ПРОВОДОВ

Н. — Но как началось развитие всей этой славной техники, какой является электроника?

Л. — Это началось с телеграфии без проводов.

Н. — Какой же гениальный человек ее изобрел?

Л. — Это коллективное изобретение, и я бы даже назвал его прекрасным образцом международного сотрудничества. Начало положил великий английский физик-самоучка Майкл Фарадей, интуитивно сформулировавший в 1831 г. теорию электрических и магнитных полей. Затем другой выдающийся английский ученый Джеймс Клерк Максвелл развил идеи Фарадея и показал, что электромагнитное поле распространяется в пространстве в форме волн. Математические формулы, известные под названием



8

уравнений Максвелла, позволяют рассчитать скорость распространения этих волн в зависимости от среды, в которой они распространяются. Максвелл доказал, что в природе света лежат электромагнитные волны. И он, как подтвердили проведенные позже измерения, правильно рассчитал их скорость.

Н. — Потрясающе! Здесь математики предвосхитили эксперимент.

Л. — Совершенно верно. Первым, кому удалось создать электромагнитные волны, был немецкий профессор физики Генрих Герц. В 1887 г. в своей лаборатории он с помощью высокого напряжения, получаемого от катушки Румкорфа, создавал электромагнитные волны и детектировал их с помощью «резонатора» — своеобразной металлической петли, между близко расположенными концами которой под воздействием электромагнитных волн проскакивала искра.



Н. — Я полагаю, что слово «детектировать», которое ты только что произнес, означает «обнаружить». Именно это делают детективы в полицейских романах, которые я читаю с увлечением... Но позволяет ли резонатор Герца детектировать волны, излучаемые на большом расстоянии?

Л. — Ниоим образом, резонатор обладает очень малой чувствительностью. Этот недостаток восполнил французский физик Эдуард Бранли. Проводя исследования, в 1890 г. он установил, что электрическое сопротивление металлических порошков резко снижается под воздействием электромагнитных волн. Таким образом создали «когерер» — тот самый чувствительный детектор волн, который позволил великому русскому ученому А. С. Попову осуществить передачу телеграмм без проводов. Свой первый радиоприемник - грозоотметчик он продемонстрировал 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Русского физико-химического общества. Этот день является датой изобретения радио.

Н. — Ты был воистину прав, Любознайкин, когда говорил о международном сотрудничестве. Для рождения телеграфии без проводов потребовалось, чтобы исследования проводили два англичанина, один немец, один француз и один русский.

Л.— Этим не ограничивается этот прекрасный пример общей работы, не знающей государственных границ. Связь на большие

9

расстояния была впервые осуществлена молодым итальянцем Гульельмо Маркони. В 1901 г. ему удалось установить радиосвязь через Атлантический океан. В последующем самое главное изобретение в интересующей нас области сделано в 1907 г. американцем Ли Де Форестом.

Н.— Что же он изобрел?

Л.— Первую «радиолампу», как говорили в то время; в наши дни ее называют «электронной лампой».

ЭПОХА РАДИО

Н. — Если я правильно понял, термин «электронный» появился относительно недавно?

Л. — Совершенно верно. Я бы даже сказал, что историю нашей техники можно разделить на три эпохи: Телеграфия без проводов, затем Радио и, наконец, Электроника. Н.—А с какого момента начинается эпоха Радио? Л. — Она начинается с появления радиовещания. Изобретение электронной лампы позволило использовать электромагнитные волны для передачи звука. Таким образом родилась радиотелефония. А в начале 20-х годов во многих странах приступили к радиовещанию. Во Франции передатчик на Эйфелевой башне начал работать в 1921 г.

Н. — А как в то время принимали передачи? Л.— До 1930 г. радиовещательные приемники собирали на лампах, требовавших питания постоянным током. Поэтому для этой цели пользовались батареями

или аккумуляторами. Нужна была батарея напряжением 4 В для накала и батарея напряжением 80 В для питания анодных цепей; обе батареи размещались вне радиоприемника.

Н.—Теперь я уже не понимаю. Что такое «накальное» и «анодное» напряжение?

Л. — Это я объясню тебе позже. А пока продолжим беглый экскурс в историю нашей техники. Итак, вернемся к радиоприемникам 20-х годов. Из-за низкой чувствительности они часто требовали установки внешней антенны. Громкоговорители устанавливали вне приемника. Можешь себе представить, каким насмешкам подвергались эти радиоприемники, так как многочисленные провода внешних соединений казались противоречащими самой идее «беспроводности». Н.—И как же все это изменилось?

Л.— Начиная с 1930 г. удалось питать приемники от осветительной сети. В большинстве этих аппаратов использовали принцип преобразования частоты. Это позволило достичь высокой чувствительности, благодаря чему роль антенны смогла выполнять внутренняя рамка. Громкоговоритель также поместили в футляре аппарата.

Н.—Таким образом осуществлялась передача звука. А передача изображения?

Л. — Телевидение, эксперименты с которым проводились с середины 20-х годов, в 30-х годах перешло к регулярным передачам. Но вторая мировая война прервала эти начинания.

10

БЫСТРОЕ РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОНИКИ

Н. — Разумеется, война останавливает прогресс техники.

Л.— Ты ошибаешься, Незнайкин. В интересах войны ученые быстро развили некоторые направления той техники, которая стала называться электроникой. Так, например, возник радиолокатор, использовавшийся для защиты городов от самолетов противника.

Н. — Ты прав. Как говорят, нет худа без добра... Я подозреваю, что после окончания военных действий наша техника пережила новый подъем.

Л. — Да, мой друг. Именно в это время она начала проникать во все сферы человеческой деятельности. А небывалому ускорению прогресса способствовало изобретение в 1948 г. транзистора. Родившаяся вместе с транзистором новая техника полупроводников привела к микроминиатюризации и колоссально расширила возможности практического применения электроники.

Н. — Спасибо, дорогой Любознайкин, за твой рассказ об истории телеграфии без проводов, которая, пройдя этап радио, превратилась в электронику. Твое повествование вызывает у меня большое желание заняться изучением электроники. Не сможешь ли ты изложить мне основные понятия и описать основные области применения электроники, какими являются радио и телевидение?

Л.— С удовольствием сделаю это. Но сначала я попрошу у моего дядюшки профессора Радиоля совета, в какой последовательности обучать тебя этой технике.

Н. — Я полагаю, что он не захотел бы видеть меня слитком несведущим в самых элементарных основах физики и особенно электричества.

Л. — Именно в такое положение попал я, когда мой дядюшка обучал меня основам электроники. Ну ладно, я передам ему магнитную ленту, на которой записан весь наш разговор. Таким образом, он будет точно знать, что нам потребуется. В этом случае электроника еще раз принесет нам пользу.

11

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Профессор описывает строение молекул и атомов, взаимное притяжение противоположных электрических зарядов, поведение валентных оболочек и то, что характеризует проводники, диэлектрики и полупроводники.

Дорогие Любознайкин и Незнайкин!

Я с **большим** интересом прослушал вашу беседу, записанную на магнитофоне. Пользуясь этой же магнитной лентой (предварительно стерев вашу запись), я отвечу на столь интересующие вас вопросы.

По моему мнению, прежде **чем** приступить к изучению собственно электроники, тебе, Незнайкин, необходимо приобрести хорошие познания в области электричества. А чтобы они не оказались поверхностными, нужно углублять знания изучением строения вещества, **потому** что (как показывает само слово) электроника основана на поведении электронов, входящих в состав всех существующих веществ.

КРОШЕЧНЫЕ РАЗМЕРЫ МОЛЕКУЛ

Ты знаешь, что самая малая частица вещества, обладающая всеми его основными характерными свойствами, называется *молекулой*. В сложных веществах каждая молекула состоит из некоторого количества *атомов*. Так, например, молекула воды содержит два атома водорода и один атом кислорода. Молекулы имеют очень маленькие размеры. Только в одном кубическом миллиметре воды содержится около $40 \cdot 10^{18}$ молекул. Представь себе, что если бы ты захотел расположить их по прямой от Земли до Луны, т. е. на расстоянии 380000 км, то на каждый сантиметр пришлось бы 10^9 молекул. Я полагаю, что теперь ты легче проникнешь в этот микромир, который по сравнению с окружающим нас миром столь же мал, как сам этот мир по сравнению со Вселенной, где расстояния измеряются световыми годами. А ты ведь знаешь, что *световой год* — это расстояние, которое свет, идущий со скоростью 300 000 км/с, проходит за год, т. е. примерно за $32 \cdot 10^6$ с.

МИКРОМИР И МАКРОМИР

Однако вернемся от макромира, где такие расстояния служат привычной единицей измерения (ведь говорят же о миллионах световых лет), к нашему микромиру, где крохотная молекула состоит из одного или нескольких атомов. Атом — слово греческого происхождения и означает «неделимый». На протяжении веков в самом деле думали; что атом — мельчайшая частица материи.

В микромире это далеко не самая малая частица, так как атом, в свою очередь, состоит из более мелких частиц: ядра и циркулирующих вокруг него электронов. Атом похож на солнечную систему с той, однако, разницей, что наши планеты движутся по орбитам, находящимся почти в одной и той же плоскости, тогда как орбиты электронов проходят по самым различным плоскостям. Если, несмотря на центробежную силу, планеты продолжают свое движение по кругу и не покидают солнечную систему, то причина кроется в гравитационных силах, определяющих взаимное притяжение между телами. Точно так же и электроны вращаются вокруг ядра и не покидают его, потому что имеется удерживающая их сила притяжения. Эта сила по своей

12

природе электрическая. Электроны представляют собой элементарные отрицательные электрические заряды. Ядра же состоят из *протонов*, представляющих собой элементарные положительные электрические заряды.

Между отрицательными и положительными зарядами существует сила притяжения, удивительно напоминающая гравитационную. Последняя, как известно, пропорциональна массе тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. А у электрических зарядов сила притяжения пропорциональна их величине и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. В ядре атомов кроме протонов находятся еще частицы, именуемые *нейтронами* (рис. 1), так как они нейтральны, т. е. не имеют никакого заряда. Присутствие этих частиц просто увеличивает массу атома.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Я тебе сказал, что в отличие от орбит наших планет орбиты электронов не находятся в одной плоскости. Но это не означает, что эти орбиты расположены беспорядочно. Они могут занимать только семь уровней или, если ты предпочтешь, семь сфер, центром которых служит ядро. Эти сферы обозначают буквами *K, L, M, N, O, P* и *Q* (рис. 2).

Сфера *K* располагается ближе всех к ядру. Ее радиус составляет $5 \cdot 10^{-9}$ см. Радиусы последующих сфер пропорциональны квадрату их порядкового номера. Так, сфера *L*, занимающая второе место, имеет радиус в 4 раза больше, чем сфера *K*. Радиус же седьмой сферы (*Q*), следовательно, в 49 раз больше радиуса первой сферы (*K*).

На орбите не может быть более двух электронов. Число же электронов на каждой сфере также ограничено. На первой сфере может быть лишь два электрона. На остальных сферах предельное количество электронов пропорционально радиусу сферы. На сфере *L*, радиус которой в 4 раза больше радиуса сферы *A*", максимальное количество электронов равно $2 \times 4 = 8$ и т. д.

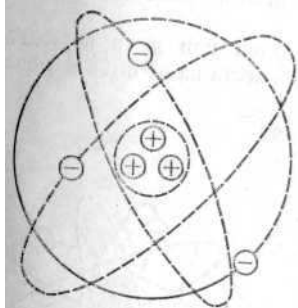


Рис. 1. Строение атома. Ядро состоит из положительно заряженных протонов и нейтронов (последние на рисунке не показаны). Вокруг ядра вращаются отрицательно заряженные электроны.

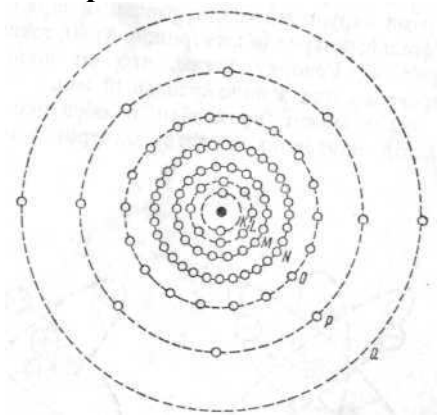


Рис. 2. Схематическое изображение атома радия, показывающее распределение электронов по различным оболочкам. В действительности орбиты расположены в различных плоскостях.

13

КАКАЯ ПУСТОТА!..

Что же касается размеров различных частиц атома, то ты получишь лучшее представление, если вообразишь себе атом, увеличенный в сто миллионов раз. В этом случае протоны будут иметь величину яблока, а электроны достигнут размеров футбольного мяча. Самая близкая орбита электронов, т. е. сфера *X*, будет иметь радиус, равный 5 км, а радиус следующей сферы 20 км. Если подвергнуть такому увеличению атом, имеющий электроны на орбитах всех своих сфер, как, например, атом урана, то радиус внешней орбиты вырастет до 245 км. Из этого ты можешь понять, что строение вещества таково, что почти все пространство занимает пустота. Если бы было можно так уплотнить элементы молекул, составляющие тело слона, чтобы между ними не осталось пустот, то в результате такого сжатия мы получили бы частицу, с трудом различимую под мощным микроскопом, но эта крупинка сохранила бы массу слона.

Ни один слон, конечно, не испытал на себе такого сжатия. Но этот процесс происходит на звездах, когда они стареют. Они как бы обрушиваются внутрь самих себя. И в результате такого

направленного взрыва диаметр небесного светила сокращается в десятки тысяч раз. Чудовищная плотность вещества создает настолько сильное гравитационное поле, что это поле полностью отклоняет световые лучи с прямого пути. Поэтому стареющая звезда представляет собой лишь черную дыру на небе.

КОНЕЦ НЕЙТРАЛИТЕТА

Вернемся еще раз от макромира к микромиру. Очень важное обстоятельство: обычно число электронов атома равно числу его протонов. Таким образом, сумма отрицательных зарядов равна общему количеству положительных зарядов. Они взаимно нейтрализуются, и уравновешенный таким образом атом называется нейтральным (рис. 3). Однако у некоторых веществ электроны внешнего слоя меньше привязаны к ядру и могут его покинуть, если их притягивают соседние положительные заряды или если сам атом подвергся встряске в результате повышения температуры тела. В этом случае равновесие атома нарушится: положительный заряд ядра становится больше суммы отрицательных зарядов электронов. Атом, таким образом, становится положительным (рис. 4). Говорят также, что он положительно *ионизируется* или что он превращается в положительный *ион*.

Но может произойти и обратное явление. Один или даже несколько находившихся по соседству электронов могут занять места на орбитах внешней

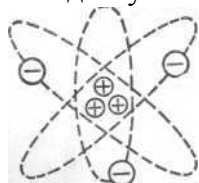


Рис. 3. Нейтральный атом.

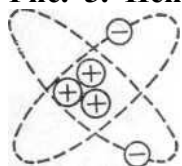


Рис. 4. Положительный атом.

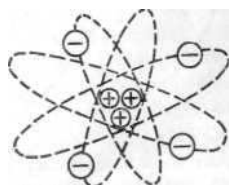


Рис. 5. Отрицательный атом.

14

оболочки атома. Добавив свой заряд к зарядам других электронов, они сделают атом отрицательным (рис. 5). В этом случае мы имеем дело с отрицательным ионом.

ВАЛЕНТНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Внешняя электронная оболочка играет первостепенную роль в образовании молекул, этих ассоциаций атомов, из которых состоят различные вещества. Именно эта внешняя оболочка способна иметь общие для нескольких атомов электроны.

Как правило, внешняя оболочка чувствует себя удовлетворенной, когда на ее орбитах циркулируют 8 электронов. Поэтому, если атом имеет на этой оболочке только 7 электронов, он имеет сильное желание заполучить дополнительно еще один; тогда говорят, что атом *одновалентный*. Если на внешней оболочке имеется 6 электронов, атом *двухвалентный*. Это, в частности, нормальное положение для кислорода, атомы которого имеют на внешней оболочке по 6 электронов. Когда кислород вступает в контакт с водородом, имеющим самый легкий атом, состоящий из одного протона и вращающегося вокруг него электрона, то каждый атом кислорода объединяется с двумя

атомами водорода с тем, чтобы довести до 8 число электронов на своей внешней оболочке (рис. 6). В результате такого объединения образуется окись водорода, известная под названием... воды. Рассмотрим случай с атомом хлора, имеющим на внешней оболочке M семь электронов, что делает его одновалентным. Оказавшись в непосредственной близости с атомом натрия, который имеет на своей внешней оболочке M только один электрон, он объединяется с ним, образуя хлористый натрий. Это научное название, дорогой мой Незнайкин, обозначает поваренную соль (рис. 7).

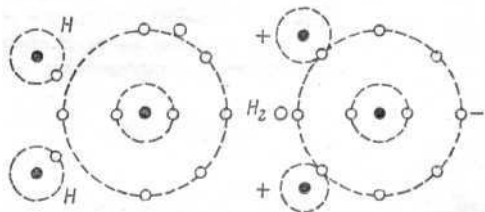


Рис. 6. Два атома водорода (H) своими электронами дополняют количество электронов на оболочке L атома кислорода (O) до 8.

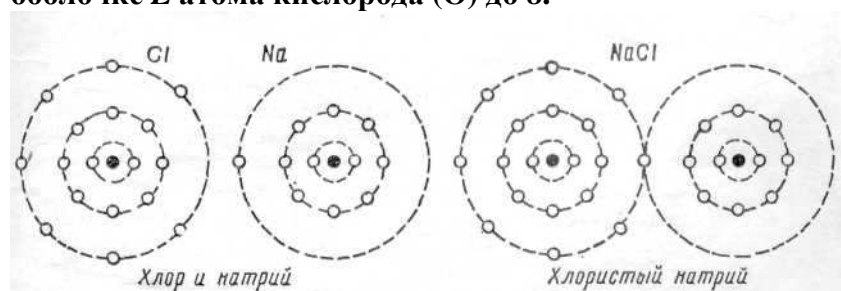


Рис. 7. При соединении атома хлора (Cl) с атомом натрия (Na) образуется молекула хлористого натрия.

15

ПРОВОДНИКИ, ДИЭЛЕКТРИКИ И ПОЛУПРОВОДНИКИ

Ты видишь, что атомы, внешняя оболочка которых притягивает электроны от своих соседей, становятся ионизированными отрицательно, тогда как атомы, потерявшие свои электроны, оказываются ионизированными положительно. Затем отрицательный ион притягивается положительным, и объединение двух атомов образует устойчивую молекулу.

Ты убедился, что атом, на внешней оболочке которого находится меньше 8 электронов, имеет тенденцию объединяться со своими соседями. Но это совершенно не относится к неону, который на своей периферийной оболочке имеет как раз 8 электронов и поэтому остается в изоляции в виде газа. Когда количество периферийных электронов меньше 4, атом великодушно отдает их своим соседям. Так ведут себя все металлы. Именно это свойство и определяет их электрическую проводимость. Когда внешняя оболочка имеет более 4 электронов, атом отказывается отпустить их от себя. Такое строение имеют диэлектрики. И, наконец, если на внешней оболочке имеется 4 электрона, что как раз характерно для кремния и германия, то это вещество и не проводник, и не диэлектрик. В этом случае мы имеем вещество, называемое полупроводником.

Я не хочу больше утомлять тебя жизнью в среде атомов. Но прежде чем выйти из микромира, я хочу сказать тебе, что благодаря притяжению периферийных электронов ядрами соседних атомов атомы твердых тел обычно расположены в стройном порядке. Именно по этой причине большинство твердых тел имеет кристаллическую структуру.

Теперь, Незнайкин, после того, как я изложил тебе основы строения вещества, ты сможешь без труда понять то, что мой дорогой племянник Любознайкин расскажет тебе об электрическом токе.

- О -

БЕСЕДА ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРОНЫ НА ПРОГУЛКЕ

Обладая теперь знаниями о строении вещества, Незнайкин без труда усвоит основные понятия, связанные с электрическим током, источниками электрической энергии, установит соотношение между силой тока, напряжением и сопротивлением, а также зависимость сопротивления от материала и размера проводника.

ОТ БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШОГО К БЕСКОНЕЧНО МАЛОМУ

Любознайкин. — Что ты думаешь, Незнайкин, о записанном на пленку монологе моего дядюшки Радиоля, который я тебе только что дал послушать?

Незнайкин. — На меня большое впечатление произвела аналогия между микромиром и макромиром. Атом как бы представляет собой эквивалент солнечной системы. В этих условиях молекула, по моему мнению, представляет собой эквивалент созвездия.

Л. — Можно даже пойти дальше и предположить, что Вселенная, состоящая из совокупности созвездий, собранных в галактике, представляет собою мир, расположенный в Сверхвселенной.

Н. — Ну хорошо, у меня возникло желание высказать гипотезу. Ты только что набросал картину того, что можно было бы назвать «макро-макромиром», а я хотел бы показать «микро-микромир». Кто знает, не представляет ли каждый электрон настоящую планету, состоящую из бесконечно малых частиц, которые в свою очередь...

ХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Л. — Позволь мне остановить тебя, Незнайкин. Вместо высказывания стольких идей, которые, может быть, и не лишены основания, нам лучше приступить к изучению электричества. Благодаря объяснениям моего дядюшки ты уже знаешь, при каких условиях атом может быть положительным или отрицательным. Недостаток электронов в первом случае и их избыток во втором нарушают равновесие атома. Предположи теперь, что у тебя есть проволочка-проводник...

Н. — Ты хочешь сказать, проволочка из вещества, атомы которого имеют на поверхностном слое меньше четырех электронов?

Л. — Разумеется. Это может быть, например, медная проволочка. Предположим, что на одном ее конце мы сделали атомы положительными, а на другом — отрицательными. Что тогда произойдет?

17

Н. — Природа любит равновесие. Поэтому я предполагаю, что избыточные электроны с отрицательного конца устремятся к другому, где их не хватает, так как этот конец проволочки положительный.

Л. — Совершенно верно. В действительности движения электронов более сложные. Избыточные электроны с одного конца не пробегают вдоль всего проводника до его другого конца. Дело обстоит иначе. Положительные атомы на положительном конце проводника притягивают электроны от соседних с ними атомов. Последние становятся положительными и в свою очередь притягивают электроны с расположенных дальше атомов. И движение продолжается таким образом до тех пор, пока избыточные электроны с отрицательного конца не будут притянуты соседними с ними атомами.

Н. — Если я правильно понял, это то, что называется *электрическим током*. Но, если принимать во внимание сложность описанного тобою процесса, скорость его должна быть достаточно низкой.

Л. — Мой друг, ты ошибаешься. Эта скорость может достигать скорости света. Но необходимо четко различать индивидуальную скорость электронов, перемещающихся от одного атома к другому, и скорость распространения совокупности электронов.

Когда вереница автомобилей стоит перед красным светом светофора и когда загорается зеленый свет, каждая из машин трогается с места медленно. Но если все водители реагируют мгновенно, все машины трогаются с места, как только светофор переключится на зеленый. В этом случае момент общего старта определяется временем, за которое свет дойдет до глаз каждого шофера. Это означает,

что рывки распространяются по цепочке со скоростью света, т. е. со скоростью 300 000 км/с. Электрический ток тоже распространяется со скоростью, близкой к скорости света.

ИСТОЧНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ

Н. — Но как только равновесие между двумя концами проводника восстановится, электрический ток прекратится?

Л. — Он будет продолжать свое движение, если мы будем поддерживать отсутствие равновесия, которое называют *разностью электрических потенциалов*. А чтобы создавать разность потенциалов или, как говорят, *напряжение*, можно использовать много различных способов. На практике все формы энергии могут преобразовываться в электрическую. Так, например, электрическая энергия возникает при нагревании термоэлектрической пары или при освещении фотоэлектрического элемента.

Ты можешь легко превратить химическую энергию в электрическую. Опустить в раствор серной кислоты стержень из меди и стержень из цинка. Сразу же химические реакции сделают цинк отрицательным относительно меди. Соедини проволочкой выступающие из раствора концы этих стержней, и по ней от цинка к меди потечет электрический ток.

Н. — Не это ли называют *электрическим элементом*?

18

Л. — Да, это самая простая модель элемента (рис. 8). Между двумя стержнями устанавливается напряжение примерно 1,5 В. Разность потенциалов измеряется в *вольтах* (В). Если требуется более высокое напряжение, можно включить несколько элементов последовательно, т. е. соединить положительный полюс одного элемента с отрицательным полюсом другого.

Н. — Я предполагаю, что *полюс* обозначает здесь каждый из выводов элемента. Очень возможно, что при таком последовательном включении напряжения складываются. Я догадываюсь, что таким образом создают батареи, используемые для питания радиоприемников.

Л. — Bravo, Незнайкин! Твоя интуиция тебя не обманула. Действительно, используемые нами батареи состоят из нескольких последовательно соединенных элементов.

УСЛОВНОСТЬ И ИСТИНА

Н. — Однако здесь кое-что меня удивляет. По твоим словам, электроны идут от отрицательного полюса к положительному. А я от компетентных людей слышал, что электрический ток идет от положительного полюса к отрицательному. Где же истина?

Л. — То, что ты слышал, — условное направление электрического тока, его приняли в то далекое время, когда еще не знали о существовании электронов и, следовательно, об истинном направлении их движения. Поэтому всегда учитывай истинное направление тока, который вне источника напряжения идет от отрицательного полюса к положительному (рис. 9).

Н. — Почему ты акцентируешь мое внимание на выражении «вне источника напряжения»?

Л. — Потому что в самом элементе по раствору серной кислоты электроны перемещаются от медного стержня к цинковому. Ты видишь здесь полностью замкнутый путь, по которому электроны проходят полный круг.

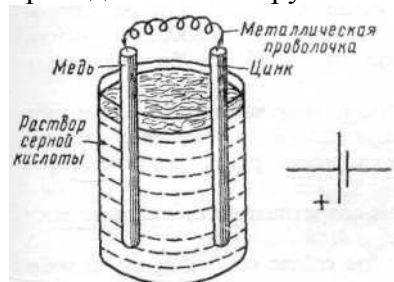


Рис. 8. Электрический элемент и его условное обозначение. Стрелками показано направление потока электронов, идущего от отрицательного полюса (цинк) к положительному (медь).

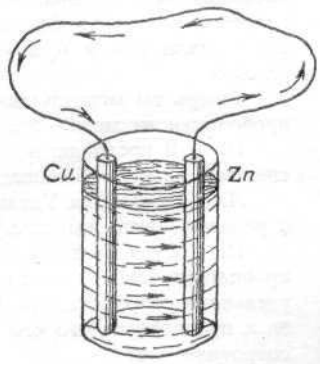


Рис. 9. Направление движения электронов в электрическом элементе и вне его.

19

НЕЗНАЙКИН ФОРМУЛИРУЕТ ЗАКОН ОМА

Н. — А какое количество электронов совершает эту прогулку?

Л. — Это количество зависит от двух факторов: от напряжения источника тока и от *электрического сопротивления* цепи. Количество электронов, проходящее в секунду, называется *силой тока*. Она измеряется в амперах (А).

Н. — Если я правильно понял, сила тока пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.

Л. — Bravo, дорогой друг! Ты превосходно сформулировал закон Ома, этот основной закон всей науки об электричестве. Действительно, для исчисления силы тока I достаточно разделить напряжение U на сопротивление R . Электрическое сопротивление выражается в омах (Ом). 1 Ом — это сопротивление проводника, который при напряжении 1 В пропускает ток силой 1 А.

Н. — Я думаю, что закон Ома можно выразить следующей простой математической формулой:

$$I = U/R,$$

т. е. сила тока равна напряжению, деленному на сопротивление. Мне хотелось бы понять, от чего зависит сопротивление проводника.

СОПРОТИВЛЕНИЕ И УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Л. — Сопротивление проводника зависит от его материала и размеров. Каждое вещество характеризуется так называемым *удельным электрическим сопротивлением*. Это сопротивление, которым обладает кубический сантиметр вещества при включении его в цепь двумя противоположными сторонами. Самое низкое удельное сопротивление из наиболее широко применяемых проводников у серебра: оно равно 0,000001492 Ом•см. Сопротивление меди чуть больше и составляет 0,000001584 Ом•см. Но у стали оно в 6, а у свинца — в 15 раз больше, чем у серебра.

Теперь ты можешь понять, почему чаще всего применяют проводники из меди — этот металл намного дешевле серебра.

Н. — Я предполагаю, что у диэлектриков удельное сопротивление намного больше.

Л. — Разумеется. Удельное сопротивление стекла, пластмасс и резины — очень высокое.

Н. — Судя по тому, что ты сейчас сказал, сопротивление проводника зависит не только от его материала, т. е. от его удельного сопротивления, но и от его формы. Не ошибаюсь ли я, предполагая, что чем длиннее проводник, тем больше его сопротивление?

Л. — Ты абсолютно прав. Сопротивление R пропорционально длине проводника L . Оно также зависит от его поперечного сечения S . Не догадываешься ли ты, каково это отношение?

20

Н. — Несомненно, чем больше сечение проводника, тем легче проходят через него электроны. Следовательно, R должно быть обратно пропорционально S .

Л. — Верно. А теперь, если мы обозначим удельное сопротивление греческой буквой ρ (ρ_0), сможешь ли ты составить формулу, позволяющую вычислить сопротивление проводника, имеющего длину L и сечение S ?

Н. - Это не сложно. Достаточно умножить удельное сопротивление на длину и разделить на сечение: При этом размеры должны быть выражены в сантиметрах.

Л. — Очень хорошо, Незнайкин. Применяя эту формулу, ты считаешь, что медный провод с сечением 1 мм^2 при длине, равной протяженности земного экватора, составляющей 40 600 км, имеет сопротивление больше 600 000 Ом. Однако это составляет всего лишь 60 Ом•км и только 0,06 Ом•м.

Н. — Если куском такого провода длиной в 1 м мы соединим оба полюса нашего цинково-медного элемента напряжением 1.5 В, то сила тока по закону Ома будет равна:

$$I=U/R=1,5/0,06=25\text{A}$$

Л. — Это чрезвычайно большая величина для такого источника тока, как наш элемент. В таком случае говорят, что источник практически *замкнут накоротко*. Такое короткое замыкание может разрушить элемент.

Н. — Глубоко огорчен, дорогой Любознайкин. Я чувствую, что сопротивление моего мозга резко упало из-за обилия новых сведений, которые ты мне сообщил. Поэтому во избежание короткого замыкания в моей черепной коробке я предлагаю тебе отложить продолжение беседы до нашей следующей встречи.

21

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЮЯ **ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

В этом кратком монологе дядюшка Любознайкина рассказывает, как правильно применять обозначения единиц измерения, а также десятичные приставки. Затем он объясняет различные случаи применения закона Ома. В заключение он дает определение понятия электрической мощности.

Дорогие Любознайкин и Незнайкин!

Ваш последний разговор был очень увлекательным. Я хочу поздравить Незнайкина с тем, с какой легкостью он понял все объяснения.

ДЕСЯТИЧНЫЕ ПРИСТАВКИ

После того как основные единицы измерения, используемые в разделе электричества, получили четкое объяснение, на мой взгляд, было бы полезно рассмотреть десятичные приставки. Ведь в нашей технике мы часто имеем дело с очень большими или, наоборот, с очень малыми значениями напряжения, тока, сопротивления или других величин.

Для образования производных единиц, кратных десяти, перед названиями единиц измерения ставят соответствующие приставки. При использовании сокращенных названий единиц измерения приставки также пишут в сокращенном виде. Эти приставки и их сокращенные обозначения я для тебя, Незнайкин, свел в следующую таблицу (табл. 1).

Таблица 1

Кратность и дольность	Наименование приставок	Сокращенное обозначение
1 000 000 000 000 = 10^{12}	тера	Т
1 000 000 000 = 10^9	гига	Г
1 000 000 = 10^6	мега	М
1000 = 10^3	кило	к
100 = 10^2	гекто	г
10 = 10^1	дека	да
0,1 = 10^{-1}	деци	д
0,01 = 10^{-2}	санти	с
0,001 = 10^{-3}	милли	м
0,000001 = 10^{-6}	микро	мк
0,000000001 = 10^{-9}	нано	н
0,000000000001 = 10^{-12}	пико	п

Так, миллион ом называется мегаом, а его сокращенное обозначение МОм. Тысячная доля вольта называется милливольт, а ее сокращенное обозначение мВ. Миллионная часть ампера — микроампер или мкА.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА ОМА

Теперь, когда мы научились пользоваться полными или сокращенными обозначениями различных единиц измерения, я хочу показать тебе условные графические обозначения различных элементов электрических цепей. Вот для начала графические обозначения электрических элементов и приборов, измеряю-

22

щих силу тока, которые (в зависимости от назначения) называют амперметрами, миллиамперметрами или микроамперметрами.

Вот самая простая схема (рис. 10). Ты видишь здесь резистор R , включенный последовательно с амперметром; оба эти устройства соединены с батареей напряжением 4,5 В.

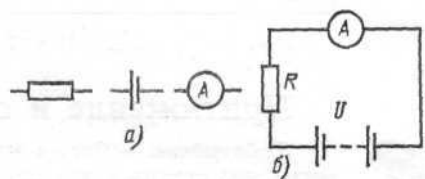


Рис. 10. Условные обозначения резистора, гальванического элемента и прибора, измеряющего силу тока (а), и схема, состоящая из этих устройств (б),

Предположим теперь, что стрелка амперметра показывает силу тока 0,1 А. Сможешь ли ты рассчитать сопротивление резистора?

Ты, Незнайкин, самостоятельно сформулировал закон Ома и теперь без труда можешь вывести из основного его выражения

Рассмотрим теперь случай с батареей, напряжение которой неизвестно, но от которой через резистор сопротивлением 50 Ом протекает ток 0,4 А. И здесь, исходя из закона Ома, ты легко вычислишь напряжение батареи:

$$U = I \times R = 0,4 \times 50 = 20 \text{ В.}$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ

А теперь рассчитаем электрическую *мощность* (P), рассеиваемую на резисторе. Мощностью называют количество энергии, рассеиваемое за одну секунду. Она, естественно, пропорциональна

напряжению и силе тока. Единица измерения мощности называется ватт и сокращенно обозначается Вт. Для рассмотренного нами случая

$$P=U \times I=20 \times 0,4 = 8 \text{ Вт.}$$

ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Составим цепь из батареи напряжением 40 В и трех последовательно соединенных резисторов, имеющих сопротивление соответственно 10, 30 и 40 Ом. Сумма этих сопротивлений равна 80 Ом. По закону Ома протекающий по цепи ток будет равен:

$$I=U/R=40/80=0,5\text{А}$$

При прохождении по первому резистору ток создаст на его выводах напряжение, равное $0,5 \times 10 = 5$ В. На втором резисторе напряжение будет равно $0,5 \times 30 = 15$ В и на третьем $0,5 \times 40 = 20$ В. В сумме эти три напряжения составляют $5 + 15 + 20 = 40$ В, что равно напряжению батареи. Каждое из этих составляющих напряжений называется *падением напряжения*.

Я полагаю, мой дорогой друг, что эти элементарные расчеты не были утомительными. А теперь для продолжения занятий и для подхода к электронике я рекомендую тебе познакомиться с основными понятиями электромагнетизма и переменного тока.

23

БЕСЕДА ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

В ходе этой беседы двое наших друзей устанавливают связь между электричеством и магнетизмом.

ПРИТЯЖЕНИЕ И ОТТАЛКИВАНИЕ

Любознайкин. — Следуя советам моего дядюшки, я принес магнитную стрелку и два магнита: один подковообразный, а другой в виде прямого стержня.

Незнайкин. — Все это не только притягивает железо, но и вызывает у меня большой интерес...

Л. — Ну раз это тебя интересует, не можешь ли ты сказать, какое положение занимает магнитная стрелка, свободно вращающаяся на острие иглы?

Н. — Само собой разумеется, что окрашенный кончик стрелки направлен на северный полюс Земли.

Л. — Это почти верно. На самом деле магнитный полюс нашей планеты несколько смещен от ее географического полюса. Во всяком случае это острие стрелки само носит название северного полюса. А теперь я подношу к стрелке один из концов магнитного стержня.

Н. — Я вижу, что стрелка повернулась; ее южный полюс притянут магнитом. Уж не принимаешь ли ты меня, Любознайкин, за полного невежду? Я очень хорошо знаю, что разноименные полюсы притягиваются, а одноименные отталкиваются друг от друга. Следовательно, ты поднес к компасу северный полюс магнита.

Л. — Правильно. Магнитные поля действительно ведут себя аналогично электрическим полям или электрическим зарядам: одноименные отталкиваются, а разноименные (как, например, протоны и электроны) притягиваются (рис. 11).

Н. — Любопытно то, что человек не способен непосредственно воспринимать эти магнитные и электрические поля. Л. — Не сожалею об этом, Незнайкин. Нам, скорее, повезло. Ведь, если бы наш организм был чувствителен к этим полям, мы одновременно ощущали бы все электромагнитные волны, излучаемые бурями, а также радио- и телевизионными передатчиками.

ПРОГУЛКА ПО ПОЛЯМ

Н. — Я признаю, что это было бы не очень приятно. Но как можно определить направление магнитного поля?

Л. — Очень просто: перемещая в поле магнитную стрелку и отмечая, какое положение она занимает. Так, можно вычертить то, что называют силовыми линиями поля. Ты видишь, что у каждого из наших магнитов они идут от северного полюса к южному.

24

Н. — Может быть, я говорю глупость, но мне кажется, что имеется определенная аналогия между магнитом и электрической цепью. На основании этой аналогии я предполагаю, что внутри магнита силовые линии идут от южного полюса к северному и что, таким образом, путь силовых линий замыкается (рис. 12).

Л. — Прими мои поздравления, Незнайкин! Твоя аналогия между магнетизмом и электричеством полностью соответствует природе этих физических явлений. Их родственные отношения еще более близки, ибо их силы притяжения и отталкивания подчиняются схожим математическим законам: в обоих случаях они пропорциональны количеству электричества или магнетизма и обратно пропорциональны квадрату расстояния.

Н. — Поскольку подобным образом ведут себя и гравитационные силы, я не могу не отметить, сколь велико единство законов природы!

РОЖДЕНИЕ МАГНЕТИЗМА

Л. — А теперь я покажу тебе, что между электричеством и магнетизмом существует еще более тесная связь. Возьмем наш электрический элемент и соединим его полюсы проводом с достаточно высоким сопротивлением, чтобы не вызвать короткого замыкания, но тем не менее способного пропустить достаточно большой ток, необходимый для предстоящего нам опыта (рис. 13).

Как ты видишь, я подношу магнитную стрелку к вертикальной части проводника. Что происходит?

Н. — Я вижу, что магнитная стрелка повернулась; она больше не направлена на северный полюс. И по мере того как мы перемещаем ее вокруг проводника, она поворачивается. У меня складывается впечатление, что повсюду стрелка располагается по окружности, центром которой служит проводник.

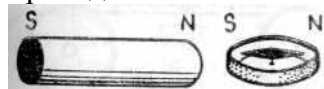


Рис. 11. Северный полюс *N* намагниченного стержня притягивает южный полюс *S* свободно вращающейся магнитной стрелки компаса.

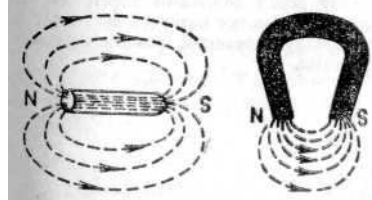


Рис. 12. Силовые линии магнитных полей (показаны пунктиром) идут от северного полюса к южному.

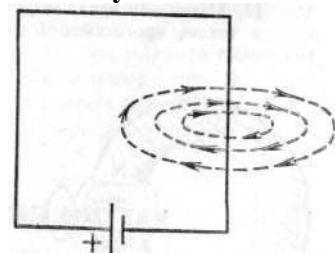


Рис. 13. Электрический ток, проходя по проводнику, создает вокруг него магнитное поле.

25

Л. — Ты верно заметил. Это доказывает, что протекающий по проводнику электрический ток порождает вокруг него магнитное поле, силовые линии которого образуют окружности с проводником в центре.

Н. — А каково направление этих силовых линий? Л. — Французский ученый Андре-Мари Ампер нашел очень простое средство для определения направления силовых линий в зависимости от направления тока. Если взять штопор и расположить его по направлению движения тока, то движение штопора для ввертывания покажет направление силовых линий магнитного поля.

СОЛЕНОИД. ЭЛЕКТРОМАГНИТ

Н. — Я предполагаю, что сила магнитного поля зависит от величины порождающего его тока.

Л. — И ты не ошибаешься. Поэтому для увеличения силы магнитного поля без соответствующего повышения отдаваемого нашим элементом тока я расположу параллельно несколько проводников.

Н. — Я совершенно не представляю, как это можно сделать.

Л. — Очень просто, намотав проводник в виде цилиндрической спирали. Полученная катушка называется соленоидом. А магнитные поля (рис. 14), создаваемые каждым из витков, складываются; возникающее суммарное поле имеет такую же форму...

Н. — ...что и поле стержневого магнита. Вот теперь-то я понял, что такое электромагнит. Я видел такой электромагнит у одного приятеля, который забавлялся им, заставляя подпры-

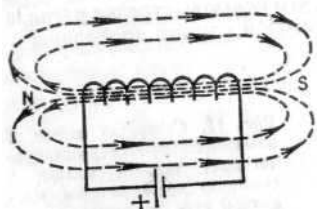


Рис. 14. Магнитное поле, создаваемое током, протекающим по соленоиду.

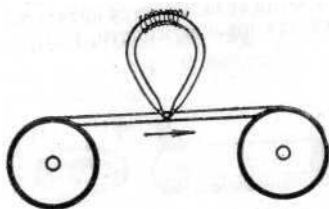


Рис. 15. В магнитофоне лента проходит перед полюсами электромагнита, по обмотке которого протекает ток, модулированный записываемыми звуками.

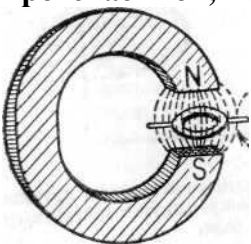


Рис. 16. В витке из проводника, вращаемом в магнитном поле, протекает электрический ток.

гнать в воздух небольшую стальную статуэтку. Для этой цели он намотал катушку на стальной стержень. Каждый раз, когда он пропускал электрический ток, его приспособление притягивало статуэтку.

Л. — Да, электромагниты применяются широко. В электрических звонках они используются для того, чтобы заставить вибрировать молоточек, ударяющий по колокольчику. И в магнитофоне, который сейчас записывает нашу беседу, имеется электромагнит, по которому протекает ток, модулированный звуками наших голосов; его магнитное поле воздействует на тонкий слой порошка

окси железа магнитофонной ленты, который в результате такого воздействия неравномерно намагничивается (рис. 15). Позднее я объясню тебе принцип работы этого аппарата,

РОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Н. — Одно меня беспокоит. Твой дядюшка сказал мне, что большинство физических явлений обратимы. Ты очень хорошо объяснил, как электрический ток порождает магнитное поле. Но нельзя ли произвести обратный процесс?

Л. — Ты прямо телепат... Я как раз собирался рассказать, как магниты, вернее сказать магнитные поля, порождают электрические токи.

Н. — Я предполагаю, что если проводник находится в магнитном поле, в нем появляется ток.

Л. — Нет, ведь само по себе магнитное поле не является источником энергии и, следовательно, не может порождать энергию. Но если проводник перемещается в магнитном поле, пересекая его силовые линии, то это перемещение, требующее затраты некоторого количества механической энергии, преобразуется в электрическую энергию, если проводник является частью замкнутой цепи. Это явление электромагнитной *индукции*. А величина наведенного тока зависит от силы магнитного поля и скорости перемещения проводника.

Н. — Следовательно, и в этом случае мы наблюдаем обратное явление. Я предполагаю, что индуктирующее магнитное поле может создаваться как постоянным магнитом, так и электромагнитом. Но используется ли эта индукция на практике для получения электрической энергии?

Л. — Еще как! Все вращающиеся генераторы электричества основаны на использовании явления индукции.

Проще всего поместить между полюсами магнита катушку, которая, вращаясь, пересекает магнитные силовые линии (рис. 16). Катушка приводится во вращение с помощью паровой машины, двигателя внутреннего сгорания или с помощью воды, падающей в турбине.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК ИЛИ ПОСТОЯННЫЙ

Н. — Но это не дает ничего путного. Ведь на половине оборота витки будут пересекать магнитное поле в одном направлении, а на другой половине оборота — в обратном направлении.

27

Л. — В таком случае наводимый в катушке ток будет *переменным*. Во время половины оборота он будет идти в одном направлении, а во время другой половины оборота — в обратном направлении. Продолжительность каждого оборота составляет *период* (T) тока. Каждый период состоит из двух *полупериодов*: положительного и отрицательного. А количество периодов в секунду называется *частотой* переменного тока.

Н. — Я догадываюсь, что ток в осветительной сети, имеющей частоту 50 периодов в секунду, создается подобной машиной.

Л. — Да, Незнайкин. Такая машина называется *генератором переменного тока*. Без особых усложнений с помощью похожей машины можно получать и постоянный ток. Для этой цели выходное напряжение нужно переключать так, чтобы при переходе от одного полупериода к другому внешняя цепь, питаемая от генератора, всегда получала ток, протекающий в одном и том же направлении.

ГЕНЕРАТОР, ПРЕВРАЩЕННЫЙ В ДВИГАТЕЛЬ

Н. — Я вновь думаю о принципе обратимости физических явлений. Если вместо того, чтобы вращать катушку, мы будем пропускать через нее переменный электрический ток, то она сама превратится в магнит, полюсы которого каждый полупериод будут меняться. Находясь в постоянном магнитном поле, он, несомненно, начнет вращаться. И таким образом генератор превратится в электрический двигатель.

Не сказал ли я какую-нибудь глупость? Л. — Совсем нет. Я счастлив констатировать, что ты великолепно понял мои объяснения и сделал из них очень верные выводы. Во время нашей ближайшей встречи мы сможем приступить к основам радио, так как уже завершили краткий обзор основных вопросов электричества.

28

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ

ИНДУКЦИЯ И ИНДУКТИВНОСТЬ

Во всех областях радиоэлектроники катушки индуктивности играют важную роль и применяются в самых различных устройствах. Вот почему профессор Радиоль описывает свойства катушек и объясняет устройство и принцип работы трансформаторов и гальванометров.

Нет, мой милейший Любознайкин, я не согласен с тем, что ты сказал в конце своей последней беседы. Ты считаешь, что охарактеризовал все основные понятия электричества. Но почему же тогда ты оставил без объяснения явление индукции и его использование? Мне придется сделать это вместо тебя.

ДЕДУКЦИЯ ОБ ИНДУКЦИИ

Незнайкин, ты легко уяснил принцип работы генератора переменного тока. Когда катушка вращается в магнитном поле, пересекая его силовые линии, возникает переменный электрический ток. Но для этой цели совершенно необязательно приводить катушку в движение. Переменный ток можно создать даже в неподвижной катушке, если изменять пронизывающее ее магнитное поле.

А как можно изменить его, т. е. менять на противоположное направление силовых линий?

Мне кажется, Незнайкин, что я слышу твой голос, произносящий правильный ответ. Да, для того, чтобы магнитное поле непрерывно меняло направление своих силовых линий, имеется очень простой способ: создать его с помощью катушки, по которой протекает переменный ток. В каждый полупериод тока направление магнитных силовых линий изменяется на противоположное. И в итоге переменный ток порождается во второй катушке, помещенной в магнитное поле первой катушки.

Это явление называется *индукцией*.

Для облегчения возникновения индуцируемого тока катушку нужно разместить на продолжении оси индуктирующей катушки. Одну из этих катушек можно даже намотать поверх другой (рис. 17). Устройство, состоящее из двух таких катушек, называется *трансформатором*. Индуктирующую катушку называют *первичной обмоткой*, а ту, в которой возникает индуцируемый ток, называют *вторичной обмоткой* трансформатора.

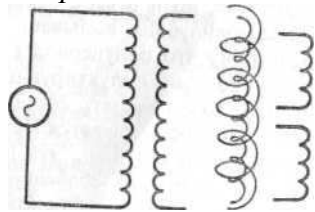


Рис. 17. Переменный ток, протекающий по катушке, наводит ток в другой катушке, расположенной в магнитном поле первой. Катушка, в которой наводится ток, может наматываться поверх индуктирующей катушки, или обе катушки могут размещаться рядом на одной оси.

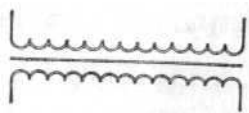


Рис. 18. Условное обозначение трансформатора с магнитным сердечником.

29

Для работы в электрической цепи с относительно низкой частотой трансформаторы делают с сердечником из мягкой стали (рис. 18), что увеличивает интенсивность магнитного поля, так как его силовые линии намного легче проходят по стали, чем по воздуху.

КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ

Напряжение, возникающее во вторичной обмотке трансформатора, зависит от напряжения первичной обмотки: оно прямо пропорционально напряжению первичной обмотки. Кроме того, оно определяется соотношением числа витков обеих обмоток. Если первичная и вторичная обмотки имеют одинаковое количество витков, то на выводах вторичной обмотки получают такое же напряжение, которое подается на выводы первичной. Но, если говорить в более общей форме, напряжение вторичной обмотки U_2 равно произведению напряжения первичной обмотки U_1 на отношение числа витков вторичной обмотки w_2 к числу витков первичной обмотки w_1 :

$$U_2=U_1(w_2/w_1).$$

Скажем проще: напряжения обеих обмоток пропорциональны числу их витков:

САМОИНДУКЦИЯ

Но я предвижу возникающий у тебя вопрос: чем вызывается напряжение первичной обмотки?

Так вот, здесь мы имеем падение напряжения, создаваемое не активным сопротивлением, которое обычно мало, а *индуктивным сопротивлением* обмотки. Это сопротивление порождается явлением *самоиндукции*, имеющим место в любой катушке, по которой протекает переменный ток. В чем заключается суть явления?

Я только что объяснил тебе, как, создавая изменяющееся магнитное поле, ток первичной обмотки наводит переменный ток во вторичной обмотке. Но кроме вторичной обмотки в этом изменяющемся магнитном поле находится еще одна катушка — сама первичная обмотка! Поэтому я надеюсь, что ты не удивишься, узнав, что первичная обмотка наводит ток не только в своей соседке — вторичной обмотке, но и в себе самой.

Явление самоиндукции вызывает увеличение сопротивления катушки; это происходит, потому что полупериоды наводимого переменного тока не совпадают с полупериодами индуктирующего тока: наведенный ток оказывается смещенным или, как говорят, *сдвинутым по фазе*. Именно это определяет сопротивление, которое называется индуктивным. Оно пропорционально частоте тока и *индуктивности* катушки. Эта последняя характеристика зависит исключительно от геометрических особенностей катушки: от количества и диаметра витков и от их взаимного расположения. Чем больше витков, чем больше их размеры и чем плотнее они расположены друг к другу, тем сильнее создающее ток магнитное поле воздействует на саму катушку и тем, следовательно, выше индуктивность.

Индуктивность пропорциональна квадрату числа витков. Удвой количество витков, и индуктивность увеличится в 4 раза.

30

Индуктивность измеряется в *генри*; принятое сокращенное название этой единицы Г. Следовательно, индуктивное сопротивление X_L (выражаемое, как и активное сопротивление, в омах) пропорционально произведению частоты f на индуктивность L . Эта зависимость выражается формулой

$$X_L=2\pi fL,$$

где $\pi=3,14$, как ты знаешь, численное выражение отношения окружности к диаметру.

УСТРОЙСТВО ГАЛЬВАНОМЕТРА

Поскольку мы изучаем различные аспекты электричества, тесно связанные с магнетизмом, я позволю себе еще раз вернуться к использованию устройства, состоящего из магнита, между полюсами которого установлена катушка; последняя укреплена на оси и свободно вращается.

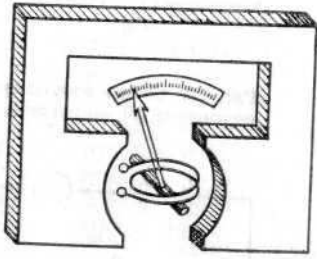


Рис. 19. В гальванометре катушка, по которой протекает измеряемый ток, расположена в поле электромагнита; она может вращаться вокруг горизонтальной оси.

Мы уже видели, что при вращении катушки в ней возникает переменный ток; в этом случае наше устройство выступает в роли генератора переменного тока. Если мы, наоборот, пропустим через катушку переменный ток, то она начнет вращаться. Так работает электрический двигатель.

А теперь предположим, что эта катушка подвешена на эластичной проволочке и укреплена на оси с двумя точками опоры: одна сзади, а другая спереди. В этих условиях катушка уже не может совершить несколько оборотов, так как это привело бы к чрезмерному скручиванию проволочки-подвески. Следовательно, это уже не двигатель. Но предположим, что мы пропускаем через катушку постоянный ток. Намагниченная таким образом катушка стремится повернуться. В зависимости от эластичности проволочки-подвески и, что самое главное, в зависимости от силы тока угол поворота катушки будет больше или меньше.

Теперь ты, несомненно, догадываешься, что это превосходное средство для измерения силы тока. Для этой цели на оси катушки укрепляют стрелку, а позади стрелки устанавливают шкалу с соответствующими делениями. Таким образом, мы построили *гальванометр* (рис. 19). Если его шкала отградуирована в амперах, то это *амперметр*. Прибор для измерения малых токов называется *миллиамперметром*, или *микроамперметром*.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Таким образом можно сделать и прибор для измерения напряжения. Для этой цели последовательно с катушкой включают резистор R . При подключении такого прибора к двум точкам цепи, между которыми надлежит измерить

31

напряжение, через наш гальванометр протекает ток, величина которого по закону Ома равна частному от деления напряжения на сумму омических сопротивлений резистора R и катушки. Шкала в этом случае отградуирована непосредственно в вольтах, милливольтах или микровольтах; в зависимости от единицы измерения мы получим *вольтметр*, *милливольтметр* или *микровольтметр*.

Гальванометр позволяет также измерять величину переменного тока и переменного напряжения (рис. 20). Для этой цели прибор должен оснащаться *выпрямителем*, преобразующим переменный ток в постоянный. В другой раз я объясню тебе принцип работы такого выпрямителя.

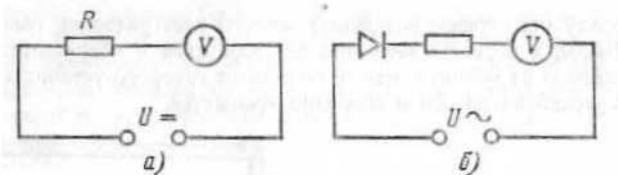


Рис. 20. Схемы вольтметров, измеряющих постоянное (а) и переменное (б) напряжения.

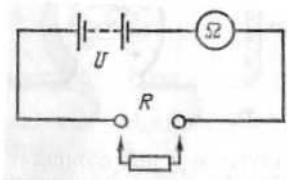


Рис. 21. Омметр, измеряющий сопротивление резистора R .

Я не могу позволить себе остановиться на этом. Ведь я объяснил тебе, как измеряют величину тока и напряжения. И у тебя, дорогой Незнайкин, должен возникнуть вопрос, каким образом измерить третью величину, входящую в формулу закона Ома: сопротивление.

Нет ничего проще. Для этой цели гальванометр нужно дополнительно оснастить батареей с известным и очень стабильным напряжением и включить ее последовательно с подвижной катушкой гальванометра (рис. 21). При подключении этого прибора к измеряемому сопротивлению по подвижной катушке протекает ток, величина которого обратно пропорциональна измеряемому сопротивлению. Поэтому шкалу такого *омметра* можно отградуировать непосредственно в омах.

Однако теперь, мой дорогой Незнайкин, я чувствую, что ты устал. Поэтому я заканчиваю свой рассказ. Тем не менее я хочу добавить, что существует множество комбинированных измерительных приборов, в которых гальванометр можно включать с резисторами разных номиналов не только последовательно, но и параллельно (чтобы отвести от подвижной катушки большую или меньшую часть тока), с выпрямителем, а также с батареей. Такими приборами можно измерить токи, напряжения и сопротивления.

- 0 -

32

БЕСЕДА ЧЕТВЕРТАЯ

ЕМКОСТЬ И ЕМКОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Двое наших друзей знакомятся с любопытным поведением конденсаторов, включенных в цепь постоянного или переменного тока. Они рассматривают устройство конденсаторов постоянной и переменной емкости, выводят формулу емкостного сопротивления конденсатора, включенного в цепь переменного тока, в зависимости от его емкости и частоты тока.

ЗАРЯД КОНДЕНСАТОРА

Любознайкин. — Прoshлый раз мы говорили с тобой о магнетизме. А мой дядюшка Радиоль рассказал тебе о различных свойствах и применении магнетизма. Теперь мы вернемся к изучению электрических полей.

Незнайкин. — Я думаю, что благодаря аналогии, существующей между электричеством и магнетизмом, изучить эту тему будет легче. В этих двух областях физики действует один и тот же закон притяжения разноименных зарядов и отталкивания одноименных. А силы, действующие в обоих этих случаях, обратно пропорциональны квадрату расстояния.

Л. — Твоя изумительная память облегчит мой рассказ о *емкости*. Так называют способность конденсатора накапливать больший или меньший заряд положительного или отрицательного электричества.

Ты, разумеется, понимаешь, что этот заряд в основном зависит от размеров этого конденсатора (рис. 22).

Н. — А какой единицей пользуются для измерения емкости?

Л. — Единица измерения емкости называется *фарадой*. Однако фарада — это очень большая емкость. Поэтому на практике обычно пользуются долями этой единицы, чаще всего миллионной долей, именуемой *микрофарадой*, миллионными долями микрофарады — *пикофарадами*. Фарада обозначается буквой Φ , а ее названные доли соответственно мк Φ и пф.

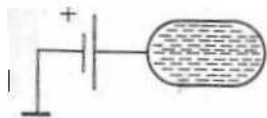


Рис. 22. Емкость проводника, позволяющая ему накапливать электрические заряды.

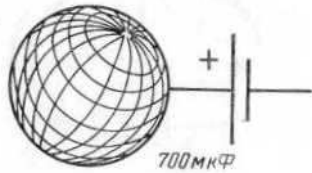


Рис. 23. Собственная емкость сферического проводника размером с земной шар составляет 700 мкФ.

33

Н. — Какой емкостью в этих условиях обладает сферический проводник размером с яблоко?

Л. — Совершенно ничтожной. Вообрази себе сферический проводник размерами с земной шар — его емкость была бы всего лишь 700 мкФ (рис. 23).

РОЖДЕНИЕ КОНДЕНСАТОРА

Н. — Я констатирую для себя, что емкость нечто столь ничтожное, что она не должна играть важной роли в электронике.

Л. — Мой друг, ты ошибаешься, так как существует вполне доступный способ увеличить емкость пли, чтобы быть более точным, сконденсировать ее.

Н. — Я не вижу, как достичь этой цели без увеличения размеров проводника.

Л. — Очень просто, достаточно приблизить к нему, но без касания, другой проводник с зарядом противоположной полярности. Что происходит в этом случае? Противоположные заряды испытывают взаимное притяжение, в результате чего величина заряда возрастает.

Н. — Совсем неглупо! Но как поступают на практике для достижения этой цели?

Л. — Два проводника, расположенные близко друг к другу, образуют устройство, известное под названием конденсатора, каждый из проводников называется *обкладкой*. Представь себе, например, две квадратные медные пластины, расположенные одна

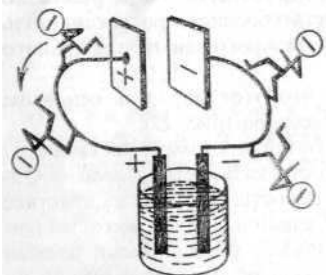


Рис. 24. При подключении конденсатора к гальваническому элементу соединенная с отрицательным полюсом обкладка заряжается электронами, а другая лишается электронов.

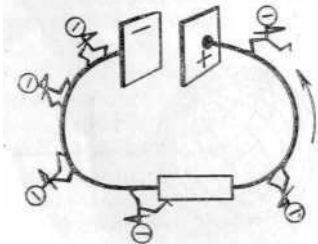


Рис. 25. Конденсатор, разряжающийся через резистор.

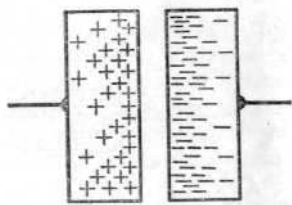


Рис. 26. Распределение зарядов на обкладках конденсатора.

34

параллельно другой на небольшом расстоянии. А теперь подключим каждую из этих обкладок к полюсам батарей. Что же здесь произойдет?

Н. — Я думаю, электроны с отрицательного полюса устремятся к подключенной к нему обкладке и зарядят ее отрицательно (рис. 24). И этот заряд оттолкнет электроны с расположенной напротив обкладки и направит их в сторону положительного полюса батареи, который их как раз и притянет. Любопытное явление! Протекает настоящий ток, как если бы между полюсами батареи был включен проводник, а ведь на самом-то деле конденсатор изолирует один проводник от другого.

ЗАРЯД И РАЗРЯД

Л. — *Зарядный ток*, который ты так хорошо описал, останавливается, как только конденсатор зарядится. Вначале этот ток имеет большую величину. Но по мере нарастания заряда движение электронов затрудняется, так как обосновавшиеся на отрицательной обкладке электроны отталкивают те, которые хотят туда проникнуть. А электронов, покидающих положительную обкладку, становится все меньше.

Н. — А что произойдет, если после того, как конденсатор полностью зарядится, мы отключим батарею?

Л. — Очень просто, заряд останется на обкладках. При желании ты можешь *разрядить* конденсатор, подключив к его обкладкам резистор или простой проводник (рис. 25). Тогда избыточные электроны с одной из обкладок перейдут на другую; это движение электронов будет продолжаться до тех пор, пока не установится равновесие.

Н. — У меня возникает вопрос, нельзя ли сравнить конденсатор с двумя резервуарами, разделенными эластичной резиновой мембраной? Если насос повышает давление воздуха в одном из резервуаров и снижает в другом, то это соответствует заряду конденсатора. Насос останавливается, когда разница давлений достигает некоторого предела, который зависит от размера резервуаров и эластичности мембраны. Теперь наш конденсатор заряжен. Насколько обоснованно такое мое сравнение? Л. — В основных чертах оно правильное. Но имеется одно различие. В каждом из твоих резервуаров давление во всех точках одинаковое. А на обкладках конденсатора заряды расположены неравномерно. На той стороне обкладки, которая смотрит на другую обкладку, самая высокая плотность электронов, а на противоположной стороне — самая низкая (рис. 26). Ведь в электричестве учитывается не только «давление», создаваемое источником напряжения, но и притяжение зарядов противоположной полярности. Тогда как в твоих резервуарах играет роль только одна сила — давление, создаваемое насосом.

ВЕЛИЧИНА ЕМКОСТИ

Н. — А что же определяет емкость конденсатора? Это уже не изолированный проводник, обладающий очень малой емкостью. Здесь притяжение между обкладками, несомненно, обес-

35

печивает значительный прирост зарядов, которые эти обкладки способны удержать.

Л. — Справедливо. Теперь тебе легче понять, что емкость тем больше, чем обширней поверхность обкладок, расположенных одна против другой. Учитывая эффект притяжения, ты также поймешь, что чем ближе сведены обкладки, тем больше емкость конденсатора.

Н.— Так, значит, емкость пропорциональна площади обкладок, расположенных одна напротив другой, и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Здесь мы еще раз видим чисто геометрическое отношение.

Л. — Не совсем так, Незнайкин. Имеется еще третий участвующий в игре фактор. И твое сравнение с резервуарами поможет легко его понять. В примере с резервуарами наряду с объемом резервуаров и толщиной мембраны имела значение и эластичность материала, из которого она сделана.

В конденсаторах на емкость влияет такой фактор, как материал *диэлектрика*, разделяющего обкладки. Если в качестве диэлектрика используется воздух, то его *диэлектрическая постоянная*, т. е. фактор, учитываемый при расчетах, равна 1. Но если пространство между обкладками заполнено не воздухом, а слюдой, емкость увеличивается в 8 раз, так как диэлектрическая постоянная слюды равна 8.

Н. — А какова роль толщины обкладок? В какой мере она влияет на емкость?

Л. — Толщина не оказывает никакого влияния, ибо заряды накапливаются на наиболее сближенных слоях обкладок. Впрочем, вот формула, позволяющая вычислить емкость:

$$C = \frac{\epsilon_a S}{d},$$

где C — емкость, Ф; ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость изоляции, равная произведению относительной диэлектрической проницаемости ϵ на электрическую постоянную, $\epsilon = 8,855 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S — площадь поверхности пластин, м²; d — расстояние между пластинами, м.

Н. — Глядя на эту формулу, я убедился, что емкость конденсатора можно без труда увеличивать сколько пожелаешь. Для этого достаточно сблизить его обкладки. По мере уменьшения d возрастает емкость C . При бесконечно малом d емкость становится бесконечно большой.

Л. — Да, но эти «бесконечно» невозможны.

Н. — Почему? Разве с точки зрения математики мои рассуждения ошибочны?

Л. — Математически все верно. Но вернемся к нашему сравнению с резервуарами: если ты станешь снижать толщину мембраны, то наступит момент, когда под давлением нагнетаемого насосом воздуха она разорвется.

А в конденсаторе, если ты сведешь слишком близко его обкладки, между ними станут проскакивать искры. Взаимное притяжение отрицательного и положительного зарядов позволит электронам пересекать разделяющее обкладки пространство, заполненное воздухом или любым другим диэлектриком.

36

Н. — Значит, расстояние между обкладками можно уменьшать лишь до некоторого предельного значения. И я предполагаю, что эта величина зависит как от материала диэлектрика, так и от прилагаемого к обкладкам напряжения. Чем выше напряжение, тем больше вероятность пробоя (рис. 27). И я не сомневаюсь, что существуют диэлектрики, которые в разной степени препятствуют возникновению пробоя.

КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ, ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ И ПОДСТРОЕЧНЫЕ

Л. — Рассмотренные выше конденсаторы называют конденсаторами постоянной емкости.

В конденсаторах же *переменной емкости* изменяется площадь или по крайней мере часть площади каждой обкладки, находящейся напротив другой.

Н. — Я предполагаю, что для этой цели сдвигают в сторону одну из обкладок.

Л. — Да. Обычно конденсатор переменной емкости состоит из набора неподвижно закрепленных обкладок, расположенных параллельно друг другу и соединенных между собой, и набора подвижных обкладок, расположенных между неподвижными и, само собой разумеется, тоже соединенных между собой.

В широко распространенной конструкции конденсатора переменной емкости форма обкладок приближается к полукругу. Подвижные обкладки укреплены на оси, которая соединяет их и

позволяет поворачивать, в большей или меньшей степени выводя из блока неподвижных обкладок. Ручка, служащая для поворачивания оси, может быть отградуирована в величинах емкости или в величинах того показателя, который изменяется в результате изменения емкости: частоты или длины волны (рис. 28). Подробнее это я объясню тебе позднее.

Кроме этих существуют *подстроечные конденсаторы*, емкость которых можно в известных пределах изменять, сближая их обкладки. Для этой цели одна из обкладок делается эластичной и приближается к другой под давлением винта, служащего для осуществления такой регулировки. Твердый диэлектрик, помещенный между обкладками, позволяет ограничить их сближение.

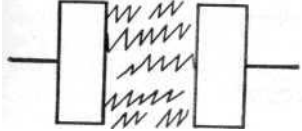


Рис. 27. При слишком высоком напряжении или близком расположении обкладок конденсатора между последними могут проскакивать искры.

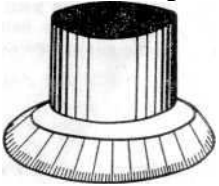


Рис. 28. Ручка управления конденсатора переменной емкости, отградуированная в единицах измерения емкости, частоты или длины волны.

37

Существуют подстроенные конденсаторы, в которых, как и в конденсаторах переменной емкости, ограниченно изменяют площадь пластин.

ПРОХОЖДЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Н. — При рассмотрении поведения конденсатора, подключенного к батарее, одно обстоятельство меня серьезно беспокоит — отсутствие тока. После заряда или разряда конденсатора его электрические заряды пребывают в неподвижности. Для меня, испытывающего такую любовь к движению...

Л. — Ты сейчас же получишь его в достаточной мере. Вместо того, чтобы подключать конденсатор к источнику постоянного напряжения, соедини обкладки конденсатора с источником переменного напряжения. Что тогда произойдет?

Н. — Дай мне подумать. Начнем с полупериода, когда одна обкладка заряжена положительно, а другая — отрицательно. При переходе к следующему полупериоду конденсатор разрядится, а затем вновь зарядится, но с противоположной полярностью (рис. 29). И так далее. В каждый полупериод будет происходить заряд, а затем разряд.

Л. — Следовательно, по проводникам от источника переменного напряжения до обкладок происходит движение электронов. И это движение каждый полупериод меняет свое направление. Иначе говоря, мы наблюдаем...

Н. — ...настоящий переменный ток. Потрясающе! Ток протекает по цепи, в которой имеется разрыв, — ведь между обкладками конденсатора нет контакта.

Л. — Да, дорогой Незнайкин. Говорят, что конденсатор ' «пропускает» переменный ток. Электроны, конечно, не проходят через конденсатор, но его емкость позволяет электронам циркулировать во внешней цепи, многократно совершая короткие рывки вперед и назад в момент заряда и разряда конденсатора.

Н. — Согласен, но мне было бы легче постичь это, вернувшись к сравнению с моими двумя резервуарами, наполненными воздухом и разделенными эластичной мембраной. Если теперь

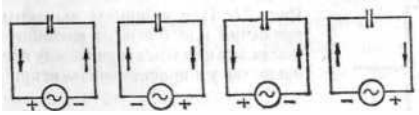


Рис. 29. Движение электронов в цепи, соединяющей конденсатор с источником переменного напряжения. На рисунке показаны четыре последовательных полупериода.

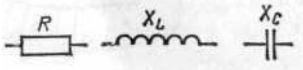


Рис 30. Три типа препятствий для прохождения электрического тока: активное R , индуктивное X_L и емкостное X_C сопротивления.

38

подключить эти резервуары не к насосу, а к цилиндру, в котором поршень совершает движения туда и обратно, то пришедший в переменное движение воздух будет поочередно наполнять то правый резервуар, то левый.

ЕМКОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНДЕНСАТОРА

Л. — Превосходное сравнение. Оно позволит нам продолжить изучение конденсатора. От чего, по твоему мнению, зависит интенсивность создаваемого таким образом переменного воздушного потока?

Н. — Количество воздуха, проходящее в каждый полупериод по трубам, зависит от емкости, т. е. от объема резервуаров и от создаваемого поршнем давления. И кроме того, чем чаще поршень будет совершать поступательно-возвратные движения, тем больше воздуха пройдет через сечение труб за единицу времени.

Л. — Эти же явления имеют место и в электричестве. Чем больше емкость конденсатора, тем большее количество электронов при каждом полупериоде заряжает обкладки, а затем при разряде уходит с них. И, кроме того, чем большее количество этих полупериодов чередуется в каждую секунду, иначе говоря, чем выше частота, тем большее количество электронов проходит по цепи за одну секунду.

Как ты видишь, здесь сила тока пропорциональна емкости конденсатора и частоте источника тока.

Н. — Я отмечаю для себя, что конденсатор для тока такое же препятствие, как резистор или катушка (рис. 30). Но любопытно, что сопротивление резистора не зависит от частоты, тогда как индуктивное сопротивление катушки пропорционально частоте и увеличивается при ее повышении, а сопротивление, которое конденсатор оказывает прохождению переменного тока, убывает по мере повышения частоты.

И еще по одному свойству емкостное сопротивление прямо противоположно индуктивному: чем больше индуктивность, тем труднее току пройти, тогда как чем больше емкость конденсатора, тем легче пропускает он ток.

Л. — Тебе пришла удачная мысль сравнить индуктивное сопротивление с *емкостным сопротивлением*; этим термином называют сопротивление, которое конденсатор оказывает прохождению переменного тока. Емкостное сопротивление, стало быть, обратно пропорционально емкости C и частоте f . Оно рассчитывается по следующей формуле:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Н. — Совсем неглупо! Так, если мы попытаемся пропустить постоянный ток, частота которого равна нулю, емкостное сопротивление окажется равным бесконечности. И это полностью соответствует действительности, так как постоянный ток через конденсатор не проходит.

39

СОЕДИНЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ

Всякая электрическая цепь характеризуется активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Компоненты, обладающие этими свойствами, могут соединяться между собой различными способами. В зависимости от способа соединения рассматриваются значения активных и реактивных сопротивлений. В заключение описывается явление резонанса, играющее в радиотехнике важнейшую роль.

Мои дорогие друзья, вы познакомились с пассивными компонентами. Так называют резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы в отличие от активных компонентов: электронных ламп и транзисторов, изучением которых вы вскоре займетесь.

СОСУЩЕСТВОВАНИЕ R , L И C

Все, что ты, Любознайкин, объяснил своему другу, совершенно правильно. Однако я должен добавить, что в действительности любой из компонентов обладает не только свойством, определяющим его название. Так, даже простой проводник из прямого отрезка провода одновременно обладает сопротивлением, индуктивностью и емкостью. В самом деле, какой хорошей ни была бы его проводимость, он все же обладает некоторым активным сопротивлением.

Вы помните, что, проходя по проводнику, электрический ток создает вокруг него магнитное поле. И если протекающий ток переменный, то и это поле переменное; оно наводит в проводнике токи, противодействующие основному току, протекающему по проводнику. Стало быть, здесь мы наблюдаем явление самоиндукции.

И, наконец, как и любой проводник, наш отрезок провода способен удерживать некоторый электрический заряд — как отрицательный, так и положительный. А это значит, что он обладает также и некоторой емкостью.

Все, что характерно для простого прямого отрезка провода, присуще, разумеется, и катушке: кроме своего основного свойства индуктивности, она обладает также некоторым активным сопротивлением и некоторой емкостью.

Конденсатор, в свою очередь, помимо характеризующей его емкости имеет некоторое, обычно очень малое, активное сопротивление. В самом деле, проходя по обкладкам конденсатора, электрические заряды пересекают некоторую массу обкладок, обладающую небольшим активным сопротивлением. И эти небольшие перемещения зарядов порождают также индукцию.

Таким образом, вы видите, что ни одна из этих трех характеристик, обозначаемых буквами R , L и C , не может существовать отдельно без наличия двух других. Тем не менее мы не будем учитывать эти побочные явления, так как они неизмеримо меньше основного свойства компонента.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Нам необходимо изучить соединение однородных и разнородных компонентов. Мы проанализируем, какая величина получается в результате и какое сопротивление прохождению тока оказывают соединенные между собой компоненты.

Компоненты могут соединяться *последовательно* или *параллельно* (рис. 31). Последовательным соединением называется такое, когда конец одного компонента

соединен с началом другого и т. д. В этом случае ток поочередно проходит по всем образующим цепочку компонентам. При параллельном соединении между собой соединены одноименные выводы. Здесь ток, разветвляясь, одновременно проходит по всем соединенным таким образом компонентам! Вы легко поймете, что соединенные последовательно сопротивления складываются. Возьмем резисторы сопротивлением 100, 500 и 1000 Ом. Соединим их последовательно; полученная цепочка будет иметь сопротивление

$$R=100+500+1000=1600 \text{ Ом.}$$

Возьмем теперь, катушки индуктивности и соединим их последовательно. При условии, что между ними нет взаимной индукции, их индуктивности должны складываться.

Возьмем катушки, обладающие индуктивностью соответственно 0,5 и 1,25 Г, и соединим их последовательно, разместив их достаточно далеко друг от друга, чтобы избежать взаимного влияния.

Индуктивность цепи составит:

$$L=0,5+1,25=1,75 \text{ Г.}$$

Все это кажется очень простым. А будет ли так же просто при последовательном соединении конденсаторов?

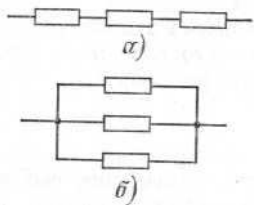


Рис. 31. Последовательное (а) и параллельное (б) соединения компонентов.



Рис. 32. Последовательное соединение конденсаторов. Суммарная емкость меньше емкости каждого из них.

Мы сказали, что при таком соединении сопротивления компонентов складываются. А у конденсаторов складываются емкостные сопротивления. Рассмотрим случай с двумя конденсаторами, имеющими емкости соответственно C_1 и C_2 , по которым протекает ток с частотой f (рис. 32). Емкостные сопротивления этих конденсаторов складываются и составляют общее емкостное сопротивление:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_1} + \frac{1}{2\pi f C_2}.$$

Рассматривая емкостное сопротивление всей цепочки как соответствующее емкости C , мы можем записать:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi f C_1} + \frac{1}{2\pi f C_2}.$$

Умножив все члены этого равенства на $2\pi f$, получим:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Проведенные преобразования позволяют нам сделать вывод, что при последовательном соединении конденсаторов нужно сложить обратные величины их емкостей, чтобы получить обратную величину емкости всей цепочки.

41

В рассмотренном нами случае, т. е. случае последовательного соединения двух конденсаторов, из последней формулы мы без большого математического усилия можем вывести формулу для расчета емкости всей цепочки:

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Перейдем теперь к изучению компонентов, соединенных параллельно. Этот способ включения облегчает прохождение тока. В самом деле, здесь складываются *проводимости* компонентов. Так называют величину, обратную сопротивлению.

Рассмотрим случай параллельного соединения активных сопротивлений (рис. 33). Их проводимости $1/R$ складываются. При параллельном соединении двух резисторов R_1 и R_2 проводимость всей цепочки $1/R$ равна сумме проводимостей соединенных резисторов:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Как вы видите, здесь наблюдается аналогия с последовательным соединением конденсаторов, и вы без труда можете рассчитать общее сопротивление цепи R двух параллельно соединенных резисторов:

$$R = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}.$$

Теперь, если мои рассуждения вам еще не наскучили, рассмотрим случай параллельного соединения двух катушек, между которыми нет взаимной индукции (рис. 34). Индуктивные сопротивления катушек пропорциональны их индуктивности. Следовательно, они будут вести себя аналогично активным сопротивлениям.

Итак, мы не ошибемся, если скажем, что две соединенные параллельно катушки L_1 и L_2 обладают общей индуктивностью, которая рассчитывается по формуле

$$L = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2}.$$

И, наконец, рассмотрим случай двух соединенных параллельно конденсаторов (рис. 35). Здесь нужно складывать проводимости, которые представляют собой величины, обратные емкостным сопротивлениям. Но сами емкостные сопротивления, как вы помните, обратно пропорциональны емкостям. Это означает, что проводимости конденсаторов прямо пропорциональны их емкостям.

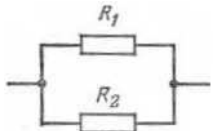


Рис. 33. При параллельном соединении резисторов общее сопротивление уменьшается.

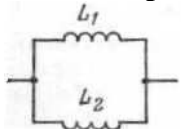


Рис. 34. Параллельное соединение катушек индуктивности.

42

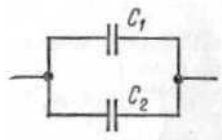


Рис. 35. Параллельное соединение конденсаторов.

Следовательно, будучи соединенными параллельно, емкости складываются:

$$C = C_1 + C_2.$$

Впрочем, анализируя физические явления, происходящие при заряде конденсаторов, вы легко пришли бы к этому выводу.

Постарайся запомнить, дорогой Незнайкин, что при последовательном соединении компонентов складываются их сопротивления, а при параллельном соединении складываются проводимости, т. е. величины, обратные сопротивлению.

КОМБИНИРОВАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Все только что сказанное мною применимо лишь к схемам, состоящим из однородных компонентов. Но положение значительно усложнится, если мы соединим вместе активные сопротивления, катушки индуктивности и конденсаторы.

Здесь мне следовало бы использовать термин *полное сопротивление*, который, как показывает само слово «полное», означает комплексное сопротивление, состоящее из *активного* и *реактивного сопротивления*. В отличие от активного сопротивления, присущего тому или иному материалу проводника, индуктивное и емкостное сопротивления называют реактивными сопротивлениями.

Полное сопротивление обозначается буквой Z , а его обратная величина $1/Z$ и называется *полной проводимостью*.

Я не хочу утомлять вас рассмотрением всех возможных комбинаций. Мы ограничимся только теми, которые встречаются во всех электронных устройствах (табл. 2).

Рассмотрим для начала последовательное соединение катушки индуктивности с конденсатором (рис. 36). Их реактивные сопротивления складываются, но это не дает нам основания написать формулу со знаком плюс. В самом деле, индуктивное и емкостное сопротивления имеют как бы противоположные свойства.

Индуктивность, как вы знаете, задерживает появление тока при подключении к ней переменного напряжения. Это называется *сдвигом по фазе*, и ток в данном случае отстает от напряжения.

Обратное явление происходит в конденсаторе, где ток опережает напряжение по фазе. Ведь по мере нарастания заряда конденсатора напряжение на его обкладках увеличивается, но с приближением к насыщению величина тока убывает. Поэтому вас не удивит, что, складывая индуктивное сопротивление с емкостным, я перед последним поставлю знак минус:

$$X = X_L - X_C = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}$$

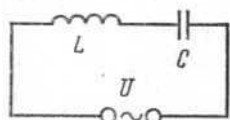


Рис. 36. Последовательно соединенные катушка и конденсатор. Полное сопротивление цепи равно разности индуктивного и емкостного сопротивлений.

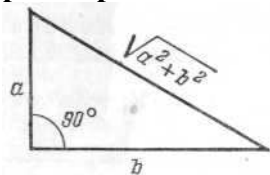


Рис. 37. Соотношение между гипотенузой и катетами прямоугольного треугольника.

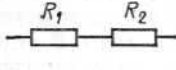
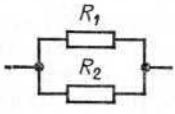

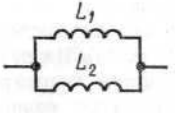
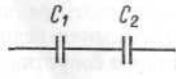
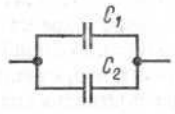
43

Активное сопротивление в данном случае очень мало, и поэтому в приведенной выше формуле оно не учитывается. Но если величина R активного сопротивления значительна, то наша формула приобретает более сложный вид:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}$$

Как вы видите, нужно извлечь квадратный корень из суммы квадратов активного и реактивного сопротивлений, чтобы получить полное сопротивление.

Таблица 2

Последовательное соединение	Параллельное соединение
 $R = R_1 + R_2$	 $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
 $L = L_1 + L_2$	 $L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$
 $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	 $C = C_1 + C_2$

Полное сопротивление

$Z = Z_1 + Z_2$	$Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$
-----------------	---------------------------------

Это ничего тебе не напоминает, Незнайкин, из области геометрии? Не таким ли образом рассчитывают длину гипотенузы (рис. 37), извлекая квадратный корень из суммы квадратов катетов?

44

ЯВЛЕНИЕ РЕЗОНАНСА

Вернемся к нашей схеме. Предположим, что мы будем изменять частоту f приложенного напряжения. По мере увеличения частоты индуктивное сопротивление $2\pi fL$, которое ей пропорционально, тоже увеличивается. Что же касается емкостного сопротивления $1/2\pi fC$, оно обратно пропорционально частоте и, следовательно, снижается. Стало быть, на очень низких частотах индуктивное сопротивление чрезвычайно мало, а емкостное сопротивление, напротив, очень высокое. Следовательно, реактивное сопротивление цепи, представляющее собой разность этих сопротивлений, высокое. Но по мере повышения частоты наступает момент, когда достаточно выросшее индуктивное сопротивление становится равным емкостному, которое соответственно уменьшилось. Их разность

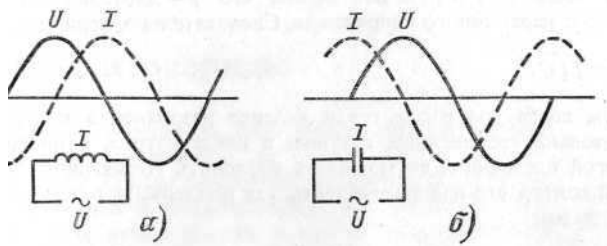


Рис. 38. Ток в катушке индуктивности отстает по фазе от напряжения (а), а в цепи конденсатора опережает его (б).

становится равной нулю. Тогда в формуле полного сопротивления под радикалом остается лишь R^2 ; это означает, что в этот момент полное сопротивление равно активному сопротивлению R .

Активное сопротивление может быть очень низким. В том случае, когда частота достигнет такого значения, при котором индуктивное и емкостное сопротивления сравняются, полное сопротивление цепи станет почти равным нулю. Тогда говорят, что наступает явление *резонанса*. Ток, протекающий по цепи, достигнет наибольшего значения. При этом между током и создающим его напряжением нет сдвига по фазе. Все происходит так, если бы цепь обладала только очень низким активным сопротивлением.

Само собой разумеется, что при дальнейшем повышении частоты приложенного напряжения вновь появится реактивное сопротивление, потому что индуктивное сопротивление станет больше емкостного. Если раньше ток опережал по фазе напряжение, то теперь он отстанет от напряжения по фазе, так как теперь преобладает индуктивное сопротивление (рис. 38).

Могу ли я предложить вам еще один расчет, не выходящий за пределы элементарной математики? Весьма важно определить значение резонансной частоты, при которой реактивное сопротивление становится равным нулю, а это, вы знаете, наступает, когда индуктивное сопротивление становится равным емкостному. Запишем это условие, выразив индуктивное и емкостное сопротивления уже знакомыми вам формулами:

$$X_L = X_C; \quad 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}.$$

45

Разделив оба члена последнего равенства на $2\pi L$ умножив их на f , получаем:

$$f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC}.$$

Извлечем квадратный корень из обоих членов этого равенства и получим следующее выражение:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

Таково значение частоты резонанса. Это основная формула в области радиоэлектроники.

Можно также определить период T который представляет собой величину, обратную частоте ($T=1/f$). Вы знаете, что T — длительность каждой пары полупериодов переменного напряжения. Следовательно, период резонанса равен:

$$T=2\pi\sqrt{LC}.$$

Теперь, когда мы рассмотрели явление резонанса в цепи, состоящей из Последовательно соединенных катушки и конденсатора, я предоставляю тебе, мой дорогой племянник, возможность объяснить Незнайкину, что такое колебательный контур, его избирательность, как поддержать в нем колебания и т. д. Не падай духом!

- О -

46

БЕСЕДА ПЯТАЯ

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

В настоящей беседе рассмотрением свойств колебательного контура заканчивается изучение основных понятий электричества. Затем двое наших друзей приступают к изучению основ радиотехники. Они рассматривают явления излучения и приема электромагнитных волн, изучают устройство входных цепей приемников.

ЗАРЯДЫ И РАЗРЯДЫ

Любознайкин. — Хорошо ли ты усвоил объяснения моего дядюшки Радиоля о резонансе?

Незнайкин. — Проблемы различных соединений резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов достаточно сложны. Для того, чтобы их лучше понять, я второй раз прослушал магнитную ленту, записанную твоим дядюшкой. И теперь я легко представляю себе поведение цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки и конденсатора.

По мере того как частота переменного напряжения, питающего эту цепь, приближается к частоте резонанса, полное сопротивление схемы снижается. На частоте резонанса оно становится близким к нулю, так как реактивное сопротивление падает до нуля и остается лишь активное сопротивление, которое может быть совершенно ничтожным. Когда частота превысит резонансную, реактивное сопротивление вновь возрастает (рис. 39).

Л. — Я с удовольствием отмечаю, что ты хорошо понял явление резонанса, которое делает полное сопротивление почти равным нулю и тем самым до максимума повышает ток в цепи.

А можешь ли ты теперь догадаться, как разрядится заряженный конденсатор, если к нему подключить не активное сопротивление (что мы рассмотрели в ходе нашей предыдущей беседы), а катушку индуктивности?

Н. — Я думаю, что самоиндукция катушки воспрепятствует разрядному току мгновенно достичь большой величины. Он, следовательно, будет нарастать постепенно и достигнет максимума, когда конденсатор уже будет разряжен. Из-за самоиндукции ток не упадет мгновенно до нуля, а будет снижаться, заряжая в это время конденсатор, но заряд будет при этом иметь противоположную по сравнению с исходной полярность. Когда ток, наконец, станет равным нулю, конденсатор будет вновь заряжен. И все начнется сначала в обратном направлении. Итак, ток будет бесконечно переходить, заряжая конденсатор то в одном направлении, то в другом. И все это будет происходить в силу инерции, которая характерна для самоиндукции.

47

Л. — Я спрашиваю тебя, Незнайкин, не подсмотрел ли ты в учебнике по электричеству, насколько правилен твой ответ... В самом деле, ток совершает *колебания* в цепи, которая по этой причине называется *колебательным контуром* (рис. 40). И ты, несомненно, можешь догадаться, какова частота этих колебаний.

Н. — Это, без сомнения, частота резонанса. Ведь именно для этой частоты наш колебательный контур имеет полное сопротивление, равное нулю или по крайней мере уменьшенное до значения его активного сопротивления.

Л. — Очень верно. И как ты думаешь, будут ли эти колебания продолжаться вечно?

Н. — Увы, ничто не вечно под луной. Как бы ни было мало активное сопротивление, оно при каждом полупериоде будет вызывать небольшую потерю энергии. Поэтому колебания постепенно ослабевают и вскоре полностью прекращаются (рис. 41).

Л. — Да, говорят, что они *затухают*. Затухание колебаний в контуре происходит в основном из-за его активного сопротивления.

Ты, Незнайкин, без малейшей ошибки сделал столько правильных выводов, что я не могу не поздравить тебя.

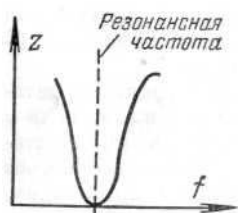


Рис. 39. Полное сопротивление колебательного контура изменяется в зависимости от частоты тока и становится практически равным нулю на резонансной частоте.



Рис. 40. В колебательном контуре токи имеют синусоидальную форму.

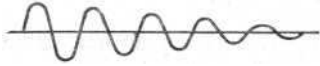


Рис. 41. Колебания, создаваемые разрядом конденсатора через катушку индуктивности, затухают из-за потерь энергии на активном сопротивлении.

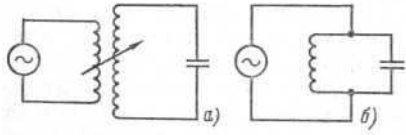


Рис. 42. Ввод энергии в колебательный контур с помощью взаимной индукции (а) или путем непосредственного включения контура (б).

48

ПОДДЕРЖАНИЕ КОЛЕБАНИЙ

Н. — Мне помогло то, что мой мозг нашел аналогию между колебательным контуром и маятником наших старых настенных часов. Даже в том случае, когда часы не заведены, достаточно отвести маятник в конечную точку его траектории, чтобы он пришел в колебательное движение. Но размах этих колебаний из-за сопротивления воздуха постепенно уменьшается. Частота же колебаний маятника туда и обратно — своего рода частота резонанса. Она зависит от его длины и массы.

Л. — Превосходное сравнение!.. Теперь ты знаешь, как достигается непрерывный ход маятника. Для этой цели заводят механизм часов, пружина которого становится как бы консервной банкой, наполненной некоторым количеством энергии. И при каждом колебании маятника пружина сообщает ему небольшой импульс, который только восполняет потерю энергии, вызываемую сопротивлением воздуха. Таким образом, твои часы идут безостановочно. А теперь скажи мне, что нужно сделать в нашем колебательном контуре, чтобы ток мог без ослабления продолжать свои прогулки туда и обратно?

Н. — По аналогии с часами я предполагаю, что при каждом периоде нужно вводить небольшое количество электрической энергии, компенсирующей потери, вносимые активным сопротивлением. Но я не вижу, как практически можно осуществить этот ввод энергии.

Л. — Такой ввод энергии можно выполнить методом индукции, пропуская ток резонансной частоты через катушку, индуктивно связанную с катушкой нашего колебательного контура. Можно также непосредственно соединить соответствующий источник напряжения с обкладками конденсатора (рис. 42).

Н. — Я предполагаю, что этот источник будет отдавать очень мало энергии, так как требуется лишь восполнить небольшие потери на активном сопротивлении.

Л. — Действительно, ток, который пойдет от источника в колебательный контур, исключительно мал. Можно, следовательно, сказать, что по отношению к внешней цепи колебательный контур обладает высоким входным сопротивлением. Н. — Я счастлив узнать это заключение, так как твой дядюшка ничего не говорил мне о параллельном соединении катушки и конденсатора.

Л. — Следовательно, если полное сопротивление соединенных последовательно катушки и конденсатора на частоте резонанса становится почти равным нулю, то при их параллельном соединении оно на этой же частоте резонанса становится почти бесконечным.

Н. — И колебания в контуре больше не затухают?

Л. — Нет, они сохраняют постоянную *амплитуду* при отсутствии активных потерь.

Н. — ...А что произойдет, если мы изменим частоту внешнего источника напряжения, сделав ее выше или ниже частоты резонанса?

Л. — В обоих случаях реактивное сопротивление колебательного контура снизится.

49

РАДИОВОЛНЫ

Н. — А где на практике используются незатухающие колебания?

Л. — Именно они используются в радиотехнике. Они служат для создания электромагнитных волн, а при приеме они наводятся в колебательных контурах.

Н. — А как создают эти волны?

Л. — Очень просто, пропуская колебания переменного тока высокой частоты в *передающую антенну*. Последняя состоит из проводника, соединенного с колебательным контуром и обладающего металлической массой с определенной емкостью. Благодаря такому устройству при каждом полупериоде электрические заряды устремляются к этой емкости или возвращаются от нее к колебательному контуру. Таким образом создается переменный ток, протекающий по антенне. Этот ток создает вокруг антенны магнитное поле, направление силовых линий которого при каждом полупериоде изменяется. Так рождаются электромагнитные волны, распространяющиеся со скоростью света, т. е. со скоростью 300 000 км/с.

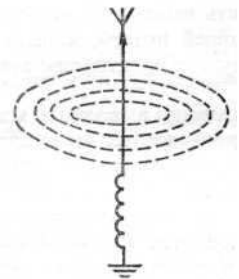


Рис. 43. Электромагнитные волны (показаны пунктиром), излучаемые передающей антенной.

Н. — А в каком направлении они идут?

Л. — Если передающая антенна расположена вертикально, то волны равномерно распространяются по всем направлениям (рис. 43). Сам радиус каждой такой круговой волны растет со скоростью света. Но можно также сделать и направленные антенны, где, например, проводник-отражатель отражает волны и концентрирует их в луч.

Н. — Одним словом, здесь поступают, как при конструировании осветительных приборов. Бывают лампы, равномерно распространяющие свет во все стороны; но можно и ориентировать освещение в одном заданном направлении, как это, в частности, сделано в автомобильных фарах.

ДИАПАЗОНЫ ВОЛН

Л. — В этой аналогии нет ничего удивительного, потому что радиоволны и световые волны имеют одну и ту же электромагнитную природу. Единственная разница заключается в их частоте. А что касается частоты, то запомни, что для ее измерения пользуются единицей *период в секунду*, которая назы-

50

вается *герц*. Сокращенное написание этой единицы Гц. В радиотехнике обычно имеют дело с тысячами герц — килогерцами (кГц), миллионами герц — мегагерцами (МГц) и даже миллиардами герц — гигагерцами (ГГц).

Частоты электромагнитных волн видимого света занимают полосу $(385 — 790) \cdot 10^6$ МГц. В радиотехнике пользуются менее высокими частотами: от 30 000 Гц до 3000 МГц. Можешь ли ты рассчитать *длину* соответствующих этим частотам волн?

Н. — Я предполагаю, что так называют расстояние между двумя последовательно отделившимися от антенны волнами. Так как они распространяются со скоростью 300 000 000 м/с, то расстояние, пройденное одной волной до момента отделения следующей, равно этой скорости, умноженной на время, протекающее между двумя соседними волнами. Это время представляет собой период переменного тока, порождающего волны, причем он обратно пропорционален частоте.

Л. — Совершенно верно, Незнайкин. Если мы обозначим период буквой T , тогда $T=1/f$. Следовательно, длина волны X в метрах равна:

$$\lambda = 300\,000\,000 \times T = \frac{300\,000\,000}{f},$$

Н. — Таким образом, если частота 30000 Гц, длина волны равна 10 000 м. А максимальной частоте 3000 МГц соответствует волна длиной всего 10 см.

Л. — Ты правильно рассчитал. Запомни, что используются *длинные волны* (1000 м и более), *средние волны* (от 100 до 1000 м) и, наконец, *короткие волны* (меньше 100 м). Используются также *ультракороткие волны*, длина волны которых меньше метра; к ним относятся дециметровые и сантиметровые волны. В некоторых особых случаях используются даже миллиметровые волны.

Для того чтобы получить направленное распространение волн с помощью рефлекторов, необходимо применять короткие и ультракороткие волны, так как для длинных и средних волн требуются рефлекторы диаметром несколько километров, сделать которые невозможно.

ПРИЕМ РАДИОВОЛН

Н. — А как принимают радиоволны?

Л. — С помощью *приемной антенны*, представляющей собой проводник, находящийся на пути распространения волн, проходя по которому, электромагнитные волны наводят в нем токи высокой частоты. Эти волны без какого бы то ни было ослабления проходят через диэлектрики. Однако, наводя токи в проводниках, они теряют часть своей энергии.

Н. — Ты меня пугаешь, Любознайкин. Человеческое тело — проводник электричества. Следовательно, волны всех радио- и телевизионных передатчиков наводят в моем теле токи?

Л. — Несомненно, но успокойся: эти токи чрезвычайно малы и никоим образом не могут причинить тебе вреда.

51

Н. - Тем лучше. А как они ведут себя в радио- или телевизионных приемниках?

Л. — Здесь наводимые ими токи тоже очень малы. Антенна непосредственно или индуктивно соединена с входным колебательным контуром приемника. Если контур *настроен* на частоту принимаемых волн, то благодаря явлению резонанса в контуре возникает относительно большой ток. Антенна через катушку должна быть *заземлена*. Если колебательный контур включен непосредственно между антенной и заземлением (рис. 44) и если он точно настроен на частоту принимаемых волн, его сопротивление большое, поэтому падение напряжения, создаваемое токами антенны на выводах контура, относительно высокое.

НАСТРОЙКА И ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ

Н. — А что произойдет, если контур окажется не в резонансе с принимаемыми волнами?

Л. — В этом случае его полное сопротивление станет меньше, что приведет к снижению напряжения на выводах кон-

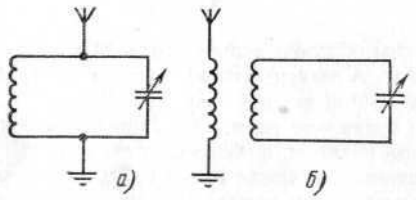


Рис. 44. В приемнике контур настройки может включаться непосредственно между антенной и заземлением (а) или же индуктивно связываться с катушкой, по которой протекают токи, наводимые принимаемыми сигналами (б).

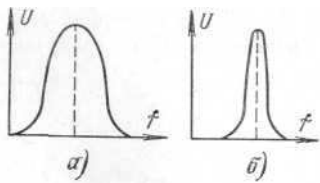


Рис. 45. Кривые, показывающие, как изменяется напряжение U на колебательном контуре в зависимости от частоты сигнала f . Кривые представлены для контура с низкой (а) и высокой (б) избирательностью.

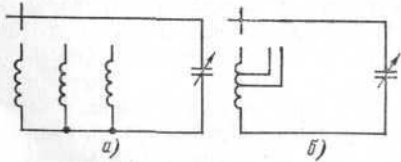


Рис. 46. Переключение с одного диапазона волн на другой осуществляется переключением катушек (а) или части витков одной катушки (б).

52

тура. Это то самое явление, которое лежит в основе *избирательности* контура, его способности наилучшим образом принимать частоты, на которые он настроен.

Измеряя напряжение на выводах контура для различных частот, можно вычертить *кривую избирательности*, показывающую, как изменяется напряжение в зависимости от частоты (рис. 45).

Н. — А что определяет форму этой кривой? Я имею в виду прежде всего ее большую или меньшую ширину, так как чем уже эта кривая, тем выше, на мой взгляд, избирательность контура.

Л. — И ты не ошибаешься. Избирательность определяется *коэффициентом затухания* контура. Этот коэффициент в основном зависит от активного сопротивления катушки, вносящего в контур потери.

Н. — А каким образом удастся установить колебательный контур в резонанс с частотой передачи, которую желают принять?

Л. — Для этого *настраивают* контур на требуемую частоту соответствующим изменением индуктивности катушки или емкости конденсатора. Если использовать конденсатор переменной емкости, настройку можно осуществить плавно. Что же касается индуктивности, то ее обычно меняют скачками для переключения диапазонов, например чтобы перейти с длинных волн на короткие. Для этой цели служит переключатель, позволяющий заменить одну катушку другой или использовать часть витков одной катушки, имеющей специальные отводы (рис. 46). Раньше использовали также катушки с плавным изменением индуктивности. Примером такого устройства может служить *вариометр*, состоящий из двух последовательно соединенных катушек, одну из которых можно было вращать внутри другой и, таким образом, изменять их взаимную индукцию.

Н. — Хорошо. Я понял, как излучают волны и как их принимают. Но каким образом заставляют волны передавать звук или изображение? И как при приеме удастся их воспроизводить?

Л. — Все это потребует немало объяснений. Мой дядюшка и я сам сможем теперь приступить к этим вопросам, так как ты постиг основы общей электротехники.

53

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ

РАДИОПЕРЕДАТЧИКИ И РАДИОПРИЕМНИКИ

Как звуки преобразуют в электрические сигналы? Как эти сигналы вводят в электромагнитные волны? Как эти волны принимают, выделяют, усиливают? Как из них извлекают звуковые сигналы и как эти сигналы вновь преобразуют в звуки? Все это объясняет профессор Радиоль.

Слушая вашу последнюю беседу, я убедился, что вы подошли непосредственно к радиотехнике. Не вдаваясь в детали, я попытаюсь изложить вам основные принципы этой области знаний.

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

С помощью электромагнитных волн устанавливают связь между передатчиком и приемниками. И ты, Незнайкин, хотел бы знать, каким образом эти волны передают звуки и изображение?

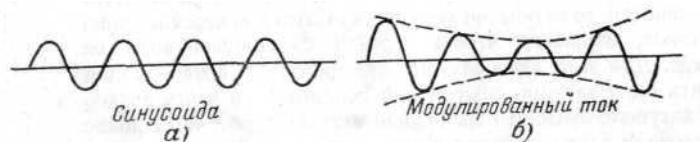


Рис. 47. Форма тока высокой частоты, не модулированного (а) и модулированного звуковым сигналом (б).

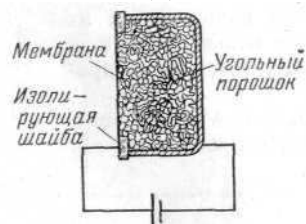


Рис. 48. Активное сопротивление угольного порошка в микрофоне изменяется под воздействием звуковых волн.

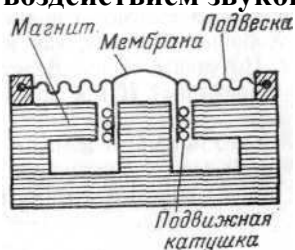


Рис. 49. Динамический микрофон, в котором катушка колеблется в поле постоянного магнита.

Ток высокой частоты, изображенный на рис. 47, а, имеет постоянную амплитуду и частоту; он не несет никакой информации, а только порождает высокочастотные волны. Конечно, передавая такие волны с перерывами, т. е. короткими отрезками времени, соответствующими точкам, и несколько более продолжительными отрезками времени, соответствующими тире, можно передавать сигналы азбуки Морзе; это типичная телеграфия без проводов.

54

Я же хочу объяснить тебе принцип радиотелефонии, позволяющей передавать звуки. Не знаю, имеешь ли ты представление об элементарных понятиях акустики.

Что такое звук? Это последовательность волн, распространяющихся в воздухе со скоростью около 340 м/с. Они могут излучаться нашими голосовыми связками (это и происходит сейчас, когда я говорю), вибрирующими струнами музыкальных инструментов, а говоря в общей форме — всеми возбуждениями, приводящими поочередно к сжатию и разрежению воздуха. Частота колебаний звуков, которые мы слышим, находится в пределах от 16 до 20 000 Гц. Они охватывают всю гамму звуков — от самых низких, имеющих небольшие частоты, до самых высоких. Впрочем, по мере увеличения возраста, человек хуже воспринимает самые высокие звуки; верхняя граница слышимых частот снижается до 15 000 или даже до 12000 Гц. Такое изменение объясняется тем, что у пожилых людей барабанные перепонки становятся менее эластичными, а именно эти перепонки приходят в колебание под воздействием звуков. Их колебания, действуя на слуховые нервы, создают в нашем мозгу ощущение звуков. Попутно можешь отметить некоторую аналогию между излучением и приемом радиоволн и излучением и восприятием звуков.

А теперь рассмотрим, как звуки могут передаваться с помощью электромагнитных волн. Для этой цели прежде всего необходимо преобразовать звуки в электрические сигналы, а затем наложить их на токи высокой частоты, порождающие радиоволны (рис. 47, б).

При приеме токи обычно бывают очень слабыми, следовательно, их нужно *усилить*. Затем из них нужно извлечь звуковые сигналы. После этого эти сигналы необходимо усилить и преобразовать в звуковые волны.

Как выполнить все эти операции? У меня нет времени описывать их все, но я тем не менее покажу тебе их общий характер.

РАЗЛИЧНЫЕ МИКРОФОНЫ

Для начала рассмотрим, как можно преобразовать звуки в электрические сигналы. Ты догадываешься, что для этой цели пользуются *микрофонами*. Все преобразователи независимо от принципа работы имеют эластичную мембрану, вибрирующую под воздействием звуковых волн. Как ты видишь, микрофон в принципе можно уподобить электрическому уху. Для преобразования вибраций мембраны в переменный электрический ток или напряжение нужно заставить мембрану своими движениями воздействовать на активное сопротивление, индуктивность или емкость. Микрофон, используемый в домашних телефонах, относится к первому случаю. Пространство между металлической мембраной и металлической коробочкой заполнено угольным порошком. Под воздействием переменного давления мембраны сопротивление этого порошка изменяется: при каждом сжатии оно уменьшается, а затем, когда мембрана перестает сжиматься, вновь увеличивается (рис. 48). Теперь достаточно приложить напряжение между мембраной и коробочкой и мы получим ток, сила которого изменяется в такт звуковым волнам и пропорционально их амплитуде.

Можно также сделать микрофон, прикрепив к мембране маленькую катушку, помещенную в магнитное поле постоянного кольцевого магнита. Имеющий такую конструкцию *динамический микрофон* отличается высокой верностью воспроизведения (рис. 49). Легко понять, что перемещение катушки в результате пересечения силовых линий магнитного поля создает в катушке токи, точно соответствующие звуковым колебаниям.

И, наконец, воздействием звуковых волн можно изменять емкость *электростатического микрофона*. Такой микрофон состоит из очень тонкой мембраны,

55

помещенной совсем близко к плоскому и параллельному ей электроду (проводнику). Под воздействием звуковых волн мембрана изменяет емкость конденсаторов, который она образует вместе с плоским электродом; емкость составляет несколько десятков пикофард. К обкладкам этого конденсатора прилагается напряжение. Ты легко понимаешь, что таким образом изменения емкости определяют зарядные и разрядные токи конденсатора, характер изменения которых точно соответствует звуковым колебаниям.

УСТРОЙСТВО ПЕРЕДАТЧИКА

Микрофон любого типа позволяет нам получить токи *низкой частоты* (НЧ) или, иначе, *звуковой частоты*, которые используются для *модуляции* тока высокой частоты, создающего радиоволны.

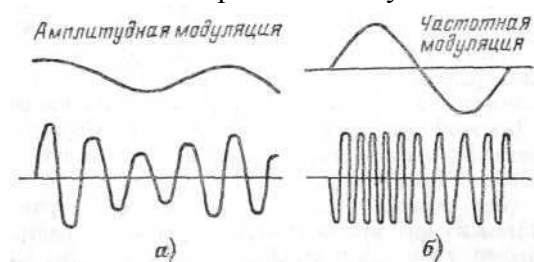


Рис. 50. При амплитудной модуляции изменяется амплитуда тока в соответствии с изменением модулирующего сигнала (а), а при частотной модуляции — частота высокочастотных колебаний (б).

Модуляция заключается в изменении в соответствии с формой тока НЧ одной из двух основных характеристик тока высокой частоты (ВЧ): его амплитуды или частоты. На этом основаны два разных вида радиовещания: передачи с *амплитудной модуляцией* и передачи с *частотной модуляцией*. В первом случае частота тока, порождающего волны, остается постоянной; изменяется лишь амплитуда ее различных периодов (рис. 50).

При частотной модуляции амплитуда тока высокой частоты остается постоянной. Изменения претерпевает сама частота, которая отклоняется в ту или иную сторону от своего среднего значения. Модулированный ток усиливается и только после усиления подается в передающую антенну, вокруг которой создает переносящие звук радиоволны (рис. 51).

УСТРОЙСТВО ПРИЕМНИКА

Последуем за радиоволнами и посмотрим, что происходит с ними в приемниках. В приемных антеннах наши волны порождают токи, имеющие такую же форму, что и токи в передающих антеннах, но бесконечно уступающие им по величине. В самом деле, представьте себе, что мощность, которая в больших радиовещательных передатчиках может достигать нескольких сотен киловатт, затем рассеивается во всех направлениях на сотни и даже тысячи

56

километров. Ты, несомненно, понимаешь, что твоя антенна примет лишь ничтожную долю энергии; исключение может иметь место в том случае, когда владелец радиоприемника живет в непосредственной близости от передатчика, но к тебе это, как мне известно, не относится.

Прежде всего необходимо усилить принятый слабый ток. Но усиливать надо не любой ток: ведь в одной и той же антенне наводятся токи от волн многочисленных передатчиков. Для отбора волны передатчика, который ты желаешь послушать, необходимо воспользоваться избирательностью входного колебательного контура, настроив его на частоту нужного передатчика.

Обычно для обеспечения хорошей избирательности в высокочастотной (ВЧ) части приемника используют несколько настроенных контуров. После того, как ток достаточно усилен, нужно выделить из него ток НЧ, который был использован для модуляции. Для этой цепи применяют демодулирующую схему, роль

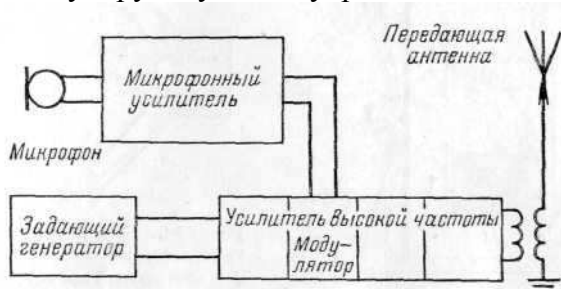


Рис. 51. Структурная схема радиотелефонного передатчика.

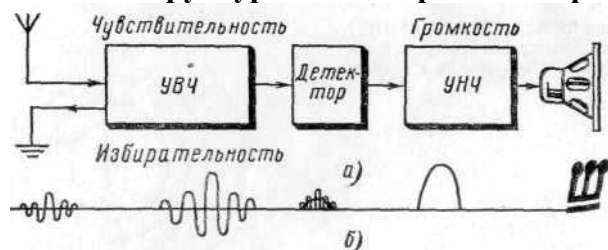


Рис. 52. Упрощенная схема радиоприемника (а) и формы токов в его различных блоках (б).

демодулятора в которой выполняет *детектор* (рис. 52). После выделения тока НЧ или, как принято говорить, детектирования его нужно усилить и затем преобразовать в звук.

ТЕЛЕФОНЫ И ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Эта последняя операция выполняется с помощью *головного телефона*, если ты хочешь слушать один, не нарушая покоя окружающих, или с помощью *громкоговорителя*, если ты любезно хочешь доставить удовольствие всем присутствующим.

57

Наиболее распространена электромагнитная модель телефона (рис. 53). Он состоит из тонкой стальной мембраны, расположенной перед электромагнитом. Когда через обмотку электромагнита протекает ток НЧ, магнит заставляет мембрану вибрировать, создавая при этом звуковые волны.

Громкоговорители, выпускавшиеся раньше, были основаны на том же принципе, что и описанный мною телефон. Перед мембраной устанавливался бумажный диффузор конической формы, который излучал звуковые волны. В наши дни в основном используют *электродинамические головки* громкоговорителей, основанные на том же принципе, что и динамические микрофоны «(рис. 54). В такой головке используется довольно большой диффузор кониче-

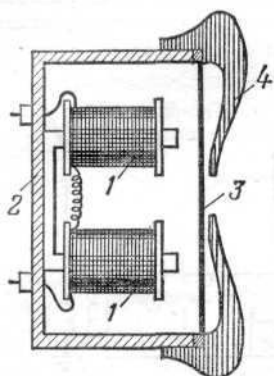


Рис. 53. Устройство телефонной трубки.

1 — электромагнит; 2 — корпус; 3 — мембрана; 4 — крышка, фиксирующая мембрану на корпусе.

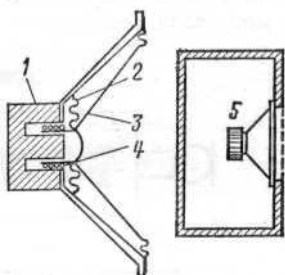


Рис. 54. Электродинамический громкоговоритель.

1 — постоянный магнит; 2 — эластичные подвески; 3 — диффузор; 4 — подвижная катушка; 5 — головка громкоговорителя.

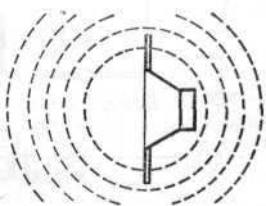


Рис. 55. Волны, излучаемые громкоговорителем.

ской формы, сделанный из пропитанной специальным составом бумаги. На узком конце диффузора укреплена катушка цилиндрической формы, через которую пропускается ток НЧ. Эта катушка помещается в зазор между полюсами мощного постоянного кольцевого магнита.

Вы легко поймете, что здесь происходит явление, обратное тому, которое имеет место в динамическом микрофоне: при каждом полупериоде тока подвижная катушка смещается вперед или назад в зависимости от взаимодействия собственного переменного магнитного поля и поля постоянного магнита. Катушка увлекает за собой диффузор, который приводит в колебание прилетающие к нему слои воздуха, образующие достаточно мощные звуковые волны (рис. 55). Однако то обстоятельство, что диффузор посылает эти волны как вперед, так и назад, приводит к ослаблению звуков низкой частоты. Дело в том,

58

что соответствующие этим звукам волны имеют достаточно большую длину. Когда идущие сзади волны встречаются с волнами, исходящими от передней поверхности диффузора, они противодействуют друг другу и взаимно ослабляются.

Для устранения этого явления нужно каким-либо образом разделить распространяющиеся в разные стороны волны. Для этой цели можно использовать деревянный экран. Однако для достижения желаемой эффективности потребовалось бы сделать экран диаметром в несколько метров, который занял бы слишком много места, если только не использовать в качестве экрана стену, прорезав в ней отверстие по размерам диффузора. Более простое и практическое решение заключается в использовании ящика достаточных размеров, который поглощает волны, излучаемые задней поверхностью диффузора.

В настоящее время именно таким образом выполняется большинства громкоговорителей. Роль ящика в радиовещательных приемниках выполняет футляр самого приемника. У портативных приемников футляр слишком мал, чтобы обеспечить высокое качество звука. Вот почему в *системах высококачественного воспроизведения звука*, т. е. в установках высокой верности воспроизведения, головки размещают отдельно от всех прочих устройств в акустических колонках достаточного объема.

Я полагаю, что сегодня достаточно полно дал тебе общее представление об устройстве радиопередатчиков и радиоприемников. Но я совершенно не касался способов усиления, модуляции или детектирования и принципов создания высокочастотных колебаний. Для понимания этого необходимо предварительно изучить принципы работы электронных ламп, транзисторов и других компонентов.

Я думаю, что в своей следующей беседе вы с Любознайкиным займетесь этими вопросами.

- О -

59

БЕСЕДА ШЕСТАЯ

ОТ РАМОЧНОЙ АНТЕННЫ К ЭЛЕКТРОВАКУУМНОМУ ДИОДУ

Антенна позволяет улавливать электромагнитные волны. Любознайкин объясняет своему другу, как для этой цели используют рамочную антенну. Затем он рассматривает устройство и принцип работы лампы — электровакуумного диода, как она используется для выпрямления тока и для детектирования. Свой рассказ он заканчивает упоминанием о некогда использовавшемся кристаллическом детекторе.

РАМОЧНЫЕ АНТЕННЫ

Любознайкин. — Теперь, дорогой Незнайкин, благодаря объяснениям моего дядюшки ты имеешь достаточно ясное представление о том, каким образом осуществляется радиотелефонная связь. И мы

можем перейти к изучению основных устройств, которые используются для этой цели. Начну я с электронных ламп.

Незнайкин. — Повремени немного. Есть один вопрос, вызывающий у меня беспокойство. Как сказал твой дядюшка,

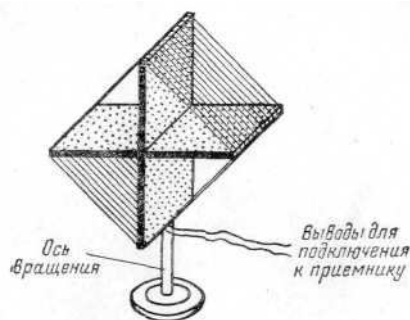


Рис. 56. Рамочная антенна для приема электромагнитных

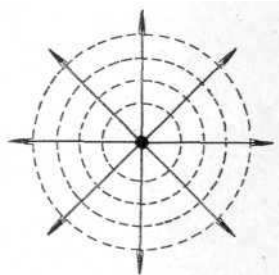


Рис. 57. Направление электрических и магнитных силовых линий. Передающая антенна находится в центре. Электрические силовые линии показаны стрелками, а магнитные силовые линии — пунктирными окружностями.

60

волны наводят слабые токи в приемной антенне. Я предполагаю, что антенна представляет собой провод определенной длины. Однако мой портативный транзисторный приемник очень хорошо работает совсем без антенны. Для того чтобы услышать передачу, достаточно сориентировать его в том или ином направлении, которое изменяется в зависимости от того, какой передатчик я хочу принять. Как это происходит без антенны?

Л. — Ты ошибаешься, говоря об отсутствии антенны. В твоём приемнике имеется превосходная антенна. Но это не наружная, а рамочная антенна.

Н. - До сих пор я знал только рамки у картин... Что же это за рамка, которая принимает волны?

Л. — Это просто катушка, в которой переменные магнитные поля радиоволн наводят токи (рис. 56).

Раньше пользовались рамочными антеннами, расположенными вне ящика, содержащего электрические блоки приемника. Рамочную антенну делали из нескольких витков проволоки, намотанных на соединенные крестообразно две деревянные рамки. Таким образом получали катушку квадратной формы. Одна из двух рамок устанавливалась вертикально и служила осью вращения, позволяющей ориентировать катушку в любом направлении.

Электромагнитные волны, как говорит само их название, одновременно имеют электрические и магнитные силовые линии.

Н. — Я даже думаю, что они взаимно перпендикулярны. Электрические силовые линии направлены вдоль распространения волн (рис. 57). Они образуют своеобразные радиусы окружностей, которые образуют магнитные силовые линии. Можно сказать, что радиус окружности перпендикулярен участку окружности, которого он касается.

РАДИОПЕЛЕНГАЦИЯ

Л. — Учитель геометрии поправил бы тебя, сказав, что радиус перпендикулярен касательной, проходящей через данную точку окружности. Но то, что ты сказал, верно.

Теперь ты легко можешь понять, что для того чтобы магнитные силовые линии радиоволн навели токи в катушке рамочной антенны, необходимо, чтобы ее ось совпадала с направлением этих силовых линий. А так как они направлены перпендикулярно направлению на передатчик, нужно плоскость витков рамочной антенны сориентировать в этом направлении. Следовательно, для приема того или иного передатчика нужно сориентировать на него рамочную антенну. Это явление, позволяющее точно определить, откуда приходят волны, легло в основу *радиопеленгации*.

Ты знаешь, какую пользу приносит этот метод в морской и воздушной навигации? С помощью двух радиопеленгаторов, расположенных достаточно далеко друг от друга, точно определяют направление на излучающий радиоволны корабль или самолет (рис. 58). Затем, вычертив на карте соответствующие прямые, легко устанавливают место, где этот корабль или самолет находится. Движущийся объект находится в точке пересечения этих линий.

61

Н. — Скажи, пожалуйста, а нельзя ли поступить наоборот: с корабля или самолета определить направления на два стационарных передатчика, местонахождение которых точно известно?

Л. — Такой метод радиопеленгации действительно применяется. Однако в наши дни радиопеленгаторы постепенно исчезают: их очень удачно заменяют радиолокаторы, о которых я тебе расскажу позднее.

РАМОЧНЫЕ АНТЕННЫ С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Н. — Но вернемся к вопросу, который я задал тебе в начале нашей беседы. Должен ли я предположить, что внутри футляра моего портативного приемника имеется рамочная антенна?

Л. — Это не вызывает сомнения, но используемая в твоём приемнике рамочная антенна представляет собой катушку на *ферритовом* сердечнике.

Н. — Что ты так называешь?

Л. — Это магнитный сердечник с высокой проницаемостью, сделанный в виде стержня и состоящий из ферромагнитных окислов, крупинки которых изолированы друг от друга.

Н. - Зачем?

Л. — Чтобы до минимума уменьшить *токи Фуко*, т. е. токи, которые переменное магнитное поле катушки наводит в

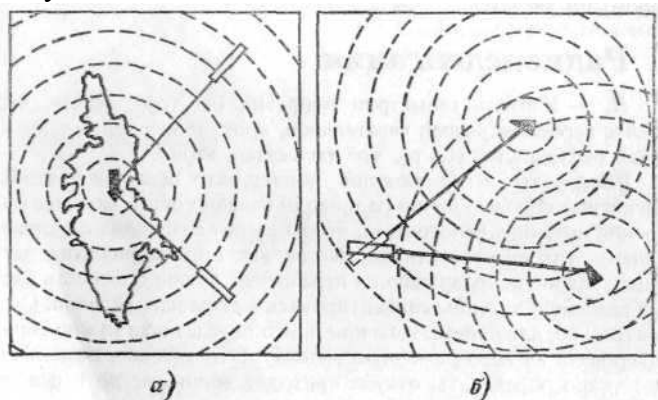


Рис. 58. Сориентировав две рамочные антенны на передатчик, определяют его местонахождение (а), а направив рамочную антенну на два передатчика, определяют местонахождение приемника (б).

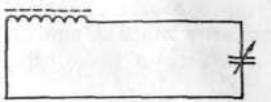


Рис. 59. Колебательный контур, содержащий рамочную антенну с ферритовым сердечником.

любом помещенном в него проводнике. Благодаря изоляции магнитных зерен активное сопротивление магнитного сердечника так велико, что его практически можно рассматривать как диэлектрик. В результате токи Фуко равны нулю и наша катушка, служащая внутренней антенной, не растрчивает энергию понапрасну. Такие антенны носят название ферритовых или магнитных.

Н. — Но для какой цели служит этот сердечник?

Л. — Принимая во внимание очень малые размеры ферритовой антенны, установленной в футляре радиоприемника, необходимо использовать сердечник, позволяющий повысить индуктивность и, что самое главное, дающий возможность более эффективно принимать радиоволны. Благодаря своей высокой магнитной проницаемости эти сердечники, облегчая прохождение магнитных силовых линий, концентрируют волны в ферритовых антеннах.

Н. — А как такие антенны соединяются с входом приемной схемы?

Л. — Обычно ферритовая антенна является индуктивностью входного колебательного контура и поэтому соединяется с обкладками настроенного конденсатора переменной емкости (рис. 59).

Н. — Понятно. И последний вопрос относительно антенны. Никакого труда не вызывает ориентация в нужном направлении портативного радиоприемника. Но ведь нельзя же крутить громоздкий и тяжелый приемник, стоящий в углу комнаты. Как поступают в этом случае?

Л. — В этом случае вращают только ферритовую антенну, установленную внутри футляра, с помощью специальной ручки, находящейся на передней панели радиоприемника.

ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Л. — До сих пор мы говорили лишь о пассивных компонентах — конденсаторах, катушках индуктивности и резисторах. Теперь подошло время заняться активными компонентами.

Н. — А как в них протекает ток?

Л. — Через вакуум или полупроводник.

Н. — У меня такое впечатление, Любознайкин, что ты надо мною смеешься. Как можно себе представить прохождение тока через вакуум, если он еще в большей степени, чем сухой воздух, представляет собой идеальный диэлектрик?

Л. — И тем не менее электроны свободно проходят через вакуум при условии, что их туда выбрасывают. Для этой цели проводник нужно нагреть до высокой температуры. Знаешь ли ты, что происходит в нагретом веществе?

Н. — Конечно. Молекулы вещества приходят в беспорядочные колебательные движения, скорость которых по мере повышения температуры возрастает.

Л. — Совершенно верно. И наступает такой момент, когда молекулы настолько раскачиваются, что электроны, находящиеся на внешних орбитах и потому слабее притягиваемые ядрами, отрываются и, покидая вещество, вылетают наружу.

Н. — Мне это напоминает наполненный фруктами поднос, который трясут до такой степени, что некоторые фрукты падают.

Л. — Аналогия справедлива. Но ты не спросил меня, как нагревают вещество, чтобы вызвать *эмиссию* электронов. Это, конечно, можно сделать с помощью пламени горящего угля, бензина или газа. Но если я скажу тебе, что в электронике предпочитают пользоваться электрической энергией, то ты мне поверишь на слово.

На практике пользуются небольшой спиралью, которую протекающий ток накаляет наподобие нити осветительной лампы. Электрическая энергия при прохождении по спирали превращается в тепло. А

так как нить накала очень тонкая, ее сопротивление высокое, а масса ничтожная, выделяющиеся на ней калории доводят ее до высокой температуры.

Н. — Таким образом, как я понял, и происходит эмиссия электронов с нити накала в окружающее пространство?

Л. — Да, по крайней мере в *лампах с непосредственным накалом*, в которых накаленная нить накала эмитирует электроны (рис. 60). Но чаще пользуются *лампами с косвенным накалом*, в которых нить накала закрыта тонким слоем диэлектрика, на этот диэлектрик надета никелевая трубочка, по-

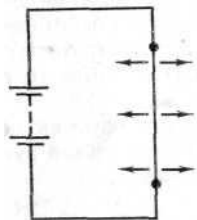


Рис. 60. Эмиссия электронов катодом с прямым накалом.

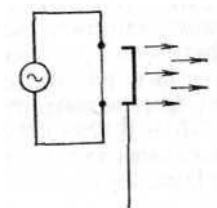


Рис. 61. Эмиссия электронов катодом с косвенным накалом.

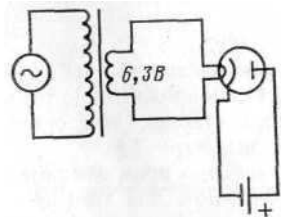


Рис. 62. В диоде с косвенным накалом на анод подается положительный относительно катода потенциал, что позволяет ему притягивать испускаемые катодом электроны.

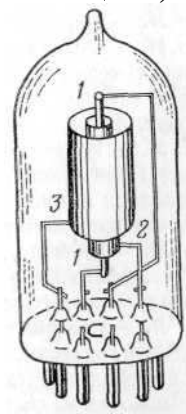


Рис. 63. Устройство диода.

1 — нить накала; 2 — катод; 3 — анод.

крытая эмиссионным слоем, состоящим из различных окислов, способных испускать электроны при не очень высокой температуре, чаще всего здесь используют окислы бария и стронция (рис. 61).

Н. — А какой смысл так усложнять устройство, испускающее электроны?

Л. — Благодаря косвенному накалу нить накала электрически изолирована от слоя, испускающего электроны. Это, в частности, позволяет нагревать ее как постоянным, так и переменным током. *Ток накала* в данном случае играет лишь второстепенную роль.

Создание ламп с косвенным накалом позволило наладить производство приемников с питанием от осветительной сети. А раньше в приемниках на лампах с непосредственным накалом для получения стабильной эмиссии электронов нити накала нагревали с помощью энергии батарей напряжением 4 В.

В наши дни лампы с косвенным накалом питают переменным током напряжением 6,3 В, получаемым от сети с помощью понижающего трансформатора.

ВЫПРЯМЛЕНИЕ ТОКА И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Н. — Я хорошо понял, как создают эмиссию электронов, но не вижу, для чего могут понадобиться рассеянные в пространстве электроны. Я даже спрашиваю себя, не будут ли они страдать, разбивая себе носы при столкновении с молекулами воздуха, которые они встретят на своем пути.

Л. — Никакой опасности нет, потому что эмиттер (излучатель электронов) помещается в вакууме, т. е. в стеклянной колбе, из которой откачали воздух, создав в ней почти абсолютную пустоту.

Но мы не позволим электронам прохладиться в этой пустоте. Напротив нашего электрода, термического излучателя электронов, мы установим пластину из проводника и подведем к ней положительный относительно излучающего электрода потенциал (рис. 62). Что же тогда произойдет?

Н. — Будучи положительной, пластина притянет к себе вылетающие электроны. И если источник постоянного напряжения включен между испускающим электроны электродом и притягивающей их пластиной, то потечет постоянный ток по цепи, одним из участков которой будет вакуум. Это, однако, потрясающе!

Л. — Так устроен *электривакуумный диод*. Он имеет два электрода: тот, который излучает электроны и обладает отрицательным потенциалом, называется *катодом*, а другой, обладающий положительным потенциалом, называется *анодом*.

В выпускаемых в настоящее время лампах (рис. 63) катод чаще всего располагают на вертикальной оси колбы, а анод, имеющий форму цилиндра, окружает катод со всех сторон.

Н. — А для чего может служить диод?

Л. — Представь себе, что ты ошибся: перепутал полюсы при включении батареи для создания напряжения между катодом

65

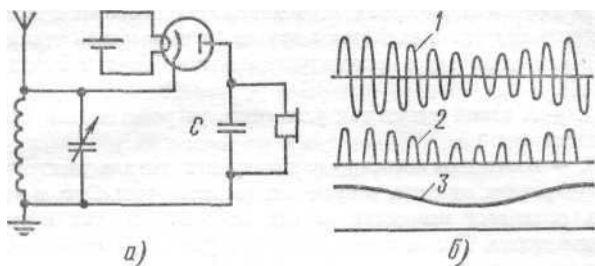


Рис. 64. Схема детекторного приемника (а) и формы токов (б). 1 — модулированный высокочастотный ток, наведенный в антенне; 2 — протектированный диодом ток; 3 — ток низкой частоты, выделенный конденсатором С.

и анодом. Анод стал отрицательным по отношению к катоду. Что тогда произойдет?

Н. — Став отрицательным, анод вместо того, чтобы притягивать испускаемые катодом электроны, станет их отталкивать. Следовательно, через диод ток протекать не будет.

Л. — Верно, а теперь предположим, что вместо батареи ты включил между электродами диода источник переменного напряжения.

Н. — Хорошо. Я вижу, к чему ты хочешь меня подвести. В этом случае при полупериодах, делающих анод положительным, от катода к аноду будет протекать ток. А при полупериодах, делающих анод отрицательным, тока не будет.

Л. — Как ты видишь, наш диод пропускает ток лишь в одном направлении и позволяет *выпрямлять* переменный ток. Эта способность выпрямлять ток — очень ценное для радиотелефонии качество. Ты помнишь, какую форму имеет несущий высокочастотный ток, модулированный токами низкой частоты, полученными в результате преобразования звуков в электрические сигналы. Такой модулированный ток наводит во входном настроенном контуре приемника напряжение такой же формы. Приложим это напряжение между анодом и катодом диода. Оно будет выпрямлено; через диод пройдут только те полупериоды, при которых анод становится положительным.

Пропустим полученный таким образом ток через телефон, включенный параллельно конденсатору (рис. 64). Емкость этого конденсатора примет на себя полупериоды высокой частоты и таким образом восстановит ток низкой частоты, содержащий передаваемые по радио звуки. Ты услышишь их в телефоне. Такой приемник называют детекторным. В этом случае диод *детектирует* ток высокой частоты. Благодаря такому детектированию из тока высокой частоты выделяется использовавшийся для его модуляции ток низкой частоты.

Н. — Одним словом, если я правильно понял, основная роль диода заключается в выпрямлении тока, что позволяет детектировать токи, наведенные радиоволнами.

Л. — Да, и попутно отметить, что детектировать можно не только электровакуумным диодом, но и любым другим устройством, "способным выпрямлять ток."

66

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ ОТ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ДИОДА К ТРИОДУ

Профессор Радиоль прежде всего дополняет объяснения своего племянника и дает некоторые уточнения относительно работы электровакуумного диода. Затем он описывает устройство триода, его основные параметры, характеристики и рассматривает возможность его использования для усиления токов высокой частоты.

Я с удовольствием отмечаю, Незнайкин, что ты очень хорошо понял принцип работы электронного диода. К рассказу моего племянника я добавлю несколько уточнений. И прежде всего приведу цифры.

ТЕМПЕРАТУРА И ВАКУУМ

Сначала я скажу тебе, до какой температуры нужно нагревать катоды. В лампах с непосредственным накалом катод часто изготавливают из вольфрама — он раскаляется до температуры 2000°C. В лампах с косвенным накалом окислы хорошо испускают электроны при менее высоких температурах, обычно между 800 и 900°C.

Любознайкин сказал тебе, что в лампе создается вакуум. Действительно, количество воздуха уменьшают в десяток миллиардов раз. Однако даже при таком низком давлении в лампе содержатся десятки триллионов молекул воздуха. В каждом кубическом миллиметре их насчитывается около 80 000.

Успокойся: плотность молекул в этих условиях ничтожна. Ведь размеры молекул настолько микроскопические, что среднее расстояние между двумя соседними молекулами в 20 000 раз больше их диаметра. Это означает, что электроны свободно преодолевают расстояние между катодом и анодом, не сталкиваясь с молекулами воздуха. И это очень важно. Так как если электрон проникает в одну из молекул, то своим присутствием и своим зарядом делает ее отрицательной. Тогда говорят, что молекула *ионизирована* отрицательно. Превратившаяся таким образом в *ион* молекула притягивается анодом, который заряжает ее положительно. А слой молекул воздуха, который может образоваться в результате таких процессов вокруг анода, совершенно нежелателен.

НАСЫЩЕНИЕ ТОКА

Какова скорость, с которой электроны пролетают пустое пространство между катодом и анодом? Они не встречают никакого препятствия и поэтому преодолевают это пространство с приличной скоростью. Если анод имеет потенциал $U_a=200$ В относительно катода, скорость движения электронов составляет 9000 км/с. Как ты помнишь, в проводниках индивидуальная скорость электронов (не путай со скоростью всей массы электронов, образующей электрический ток) несколько ниже.

А теперь перейдем к определению величины анодного тока. Она, разумеется, зависит от напряжения U_a между анодом и катодом. Чем выше положительный потенциал анода относительно катода, тем сильнее притягивает он испускаемые катодом электроны, тем больше величина протекающего тока. Здесь мы еще раз видим цепь, подчиняющуюся закону Ома (рис. 65). Однако при повышении напряжения U_a за пределы некоторой величины этот закон перестает действовать. При этом анодный ток I_a достигает *насыщения*: все испускаемые катодом электроны притягиваются анодом. Можно сколько угодно повышать потенциал анода, но ток при этом не возрастет.

67

ДВУХТАКТНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Любознайки, ты объяснил, что благодаря своей способности выпрямлять ток диод может служить детектором. И ты показал, как из модулированного по амплитуде напряжения ВЧ диод выделяет ток НЧ, использовавшийся для модуляции. Это детектирование можно осуществить еще более эффективно, если использовать два диода, включенных так, как показано на нарисованной мною схеме (рис. 66). В этой схеме каждый из диодов выпрямляет один из двух полупериодов. Если один полупериод делает положительным анод верхнего (по схеме) диода, то следующий полупериод делает положительным анод нижнего (по схеме) диода. Токи, выпрямленные каждым из диодов, протекают по катушкам телефона в одном и том же направлении.

ДЕЙСТВИЕ СЕТКИ

Перейдем теперь от диода к *триоду*. Для этой цели поставим между катодом и анодом третий электрод — *сетку*. Таким электродом может служить цилиндрическая спираль, установленная вокруг катода, или решетка с узкими ячейками. Если мы станем изменять потенциал такой сетки относительно потенциала катода, то этот электрод окажет сильное влияние на величину анодного тока. Чем больше будет отрицательное напряжение на сетке, тем сильнее станет она отталкивать испускаемые катодом электроны и больше будет им мешать достичь анода. И наоборот, если зарядить сетку положительно относительно катода, то, притягивая вылетающие с катода электроны, она ускорит их движение и анодный ток возрастет.

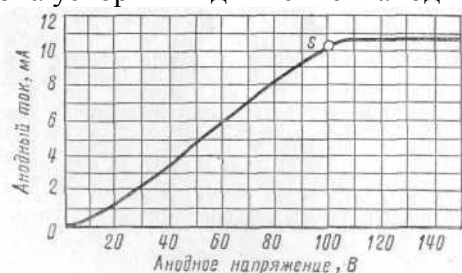


Рис. 65. Изменение анодного тока в зависимости от изменения напряжения между анодом и катодом. Достигнув насыщения в точке S, ток больше не увеличивается.

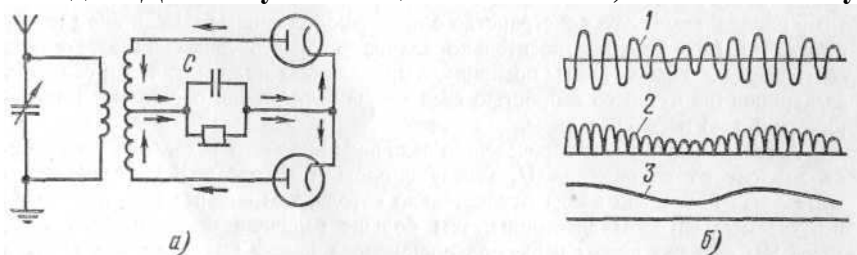


Рис. 66. Схема, позволяющая выпрямлять оба полупериода высокой частоты (а), и форма токов (б).

1 — модулированный высокочастотный ток, наведенный в антенне; 2 — проректированный диодом ток; 3 — ток низкой частоты, выделенный конденсатором С.

68

Однако, будучи положительной, сетка не только помогает аноду, но одновременно выступает его конкурентом, сама поглощая некоторое количество электронов. Возникающий таким образом сеточный ток совершенно нежелателен. Поэтому для предотвращения его возникновения на сетку подают *смещение* — небольшой постоянный и отрицательный относительно катода потенциал. Потенциал сетки изменяют относительно потенциала смещения, но при этом не допускают, чтобы сетка стала положительной.

КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ И КРУТИЗНА

Изменения потенциала сетки оказывают на анодный ток более сильное воздействие, нежели изменения потенциала анода. Находясь в непосредственной близости от катода, сетка очень эффективно управляет электронами, которые проходят через нее и достигают анода. Этим определяется способность триода *усиливать*. Усиление измеряется отношением между изменением потенциала анода ΔU_a и изменением потенциала сетки ΔU_c , вызывающими одинаковое изменение анодного тока ΔI_a . Это отношение называется *коэффициентом усиления* и обозначается буквой μ . Следовательно,

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}.$$

Предположим, что для повышения анодного тока на 1 мА потребуется увеличить потенциал анода U_a на 40 В или же увеличить потенциал сетки U_c на 2 В. В этом случае коэффициент усиления $\mu=40:2=20$.

Этот коэффициент в основном зависит от расстояния между сеткой и катодом. Чем меньше расстояние между этими электродами, тем выше коэффициент усиления; он обратно пропорционален квадрату расстояния.

Для создания ламп с высоким коэффициентом усиления расстояние между сеткой и катодом сокращают до доли миллиметра. Существуют лампы, в которых это расстояние составляет всего лишь 1/8 миллиметра, т. е. равно толщине тонкой бумаги. Коэффициент усиления триодов обычно меньше 100.

Основным параметром триода является *крутизна*. Так называют величину изменения анодного тока (в миллиамперах), вызываемую изменением на 1 В потенциала сетки относительно катода. Крутизна в зависимости от конструкции лампы может изменяться от 1 до 15 мА/В.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИОДА

У тебя, Незнайкин, несомненно, возникнет вопрос, почему этот параметр назвали словом «крутизна». Ты легко поймешь это, посмотрев на кривую, которая поднимается точно так, как изменяется величина анодного тока I_a в зависимости от изменения потенциала сетки U_c (рис. 67). Ты видишь, что чем круче эта кривая, т. е. чем больше ее крутизна, тем больше изменяется I_a на каждый вольт увеличения U_c .

Можно вычертить целое семейство таких кривых, каждая из которых будет соответствовать определенному значению потенциала анода U_a . Как ты видишь, чем выше этот потенциал, тем раньше начинает протекать ток (рис. 68). В самом деле, когда сетка более отрицательна, она сильнее препятствует прохождению электронов, но если потенциал анода увеличился, его притяжение позволяет нейтрализовать противодействие сетки и пропустить ток.

На значительной части своей длины кривые имеют прямолинейные отрезки, параллельные между собой. Это означает, что при любом значении анодного

потенциала крутизна остается постоянной. И, наконец, все кривые имеют горизонтальный участок, соответствующий, как ты, несомненно, догадался, режиму насыщения. По этим кривым можно легко определить крутизну. Достаточно посмотреть, какая разность анодного тока соответствует двум точкам кривой, разнесенным по горизонтали на 1 В.

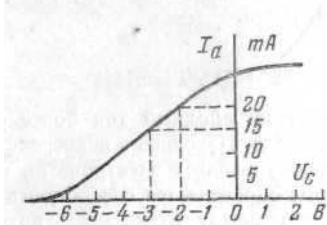


Рис. 67. Характеристика триода, показывающая изменение анодного тока I_a в зависимости от изменения напряжения на сетке U_G .

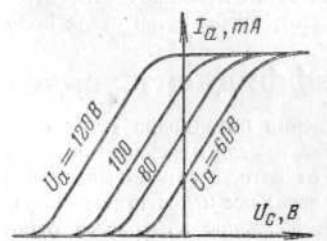


Рис. 68. Семейство характеристик, каждая из которых получена при определенной величине анодного напряжения U_a .

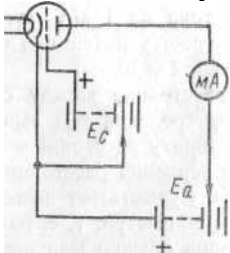


Рис. 69. Схема, позволяющая снимать характеристики триода.

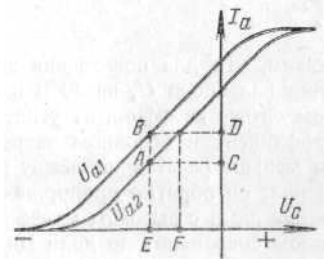


Рис. 70. По двум характеристикам, снятым при анодных напряжениях U_{a1} и U_{a2} , определяют коэффициент усиления триода. Он равен разности $U_{a2} - U_{a1}$, разделенной на разность напряжений, соответствующих точкам E и F .

По семейству кривых, снятых с помощью схемы рис. 69, можно также найти коэффициент усиления. Для этого определяют значения анодного тока в точках C и D (рис. 70), соответствующие точкам A и B , которые при одной и той же величине сеточного потенциала U_G располагаются на кривых, проведенных для двух различных анодных потенциалов U_{a1} и U_{a2} . Затем по одной кривой, например для U_{a2} , определяют, что такое же изменение анодного тока можно получить за счет изменения потенциала сетки с точки E до точки F . Теперь для получения коэффициента усиления достаточно разделить разность $U_{a2} - U_{a1}$ на разность сеточных потенциалов.

ВНУТРЕННЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Мне остается познакомить тебя с третьим основным параметром — *внутренним сопротивлением* триода. Так называют отношение между изменениями потенциала анода ΔU_a и вызываемыми ими изменениями анодного

70

тока ΔI_a . Внутреннее сопротивление обозначается R_i . Следовательно,

По вычерченным мною кривым очень легко рассчитать величину R_i . Так, на одной вертикали (следовательно, при одном и том же значении сеточного потенциала) мы находим точки A и B , которые соответствуют значениям тока C и D . Разделим разность анодных потенциалов $U_{a1}-U_{a2}$ на разность соответствующих им значений токов и получим величину внутреннего сопротивления. У триода внутреннее сопротивление составляет несколько тысяч или даже десятков тысяч ом.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ТРЕМЯ ОСНОВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Я позволю себе напомнить тебе формулы трех характеристик триода, а именно: коэффициента усиления μ , крутизны S и внутреннего сопротивления R_i :

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}; \quad S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}; \quad R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Перемножим две последние формулы:

$$S \times R_i = \frac{\Delta I_a \times \Delta U_a}{\Delta U_c \times \Delta I_a} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \mu.$$

Как ты видишь, коэффициент усиления равен произведению крутизны на внутреннее сопротивление.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИОДА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ

Я догадываюсь, что, слушая меня, дорогой Незнайкин, ты сейчас испытываешь определенное нетерпение. Ты спрашиваешь себя, зачем понадобилось изучать поведение триода, если тебе не объяснили, как его можно использовать. Так вот, теперь мы можем свободно приступить к этому вопросу.

Сначала рассмотрим использование триода для усиления. Для этого переменное напряжение $U_{вх}$, которое нужно усилить, прилагается на *вход* лампы, т. е. между сеткой и катодом. Ты, разумеется, догадываешься, почему так поступают. Ведь малые изменения напряжения между двумя этими электродами вызывают большие изменения анодного тока. А изменения последнего дают нам выходное напряжение. Для этого анодный ток пропускают через нагрузку Z , на которой возникает выходное напряжение $U_{вых}$.

Схема содержит источник напряжения смещения сетки E_c и источник анодного напряжения E_a . Это упрощенная схема усилителя (рис. 71).

Зная свойства триода, ты легко поймешь, что малые изменения входного напряжения $U_{вх}$ вызывают значительно большие изменения выходного напряжения $U_{вых}$. Само собой разумеется, что источники постоянного напряжения могут быть самыми разными: вместо батареи анодного напряжения можно использовать выпрямленное напряжение сети, а напряжение смещения можно получить с помощью падения напряжения на резисторе. Все это я тебе вскоре опишу. А пока рассмотрим конкретный случай усиления тока высокой частоты, получаемого во входном колебательном контуре приемника. Входным служит напряжение на выводах колебательного контура, порождаемое наведенными в антенне токами. Контур подключают к сетке и катоду и на сетку с помощью батареи E_c подают отрицательное смещение (рис. 72).

71

Какого рода нагрузку следует включить в анодную цепь? Колебательный контур, настроенный на такую же частоту, что и входной контур. Его полное сопротивление на резонансной частоте высокое, и поэтому колебания анодного тока создадут на его выводах напряжение более высокое, чем входное. Обрати внимание, что катушка колебательного контура, имеющая небольшое активное

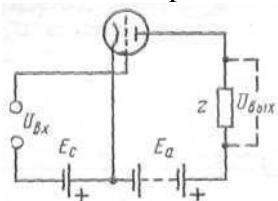


Рис. 71. Упрощенная схема усилителя. Входное напряжение $U_{вх}$ усиливается триодом, а на нагрузке Z получают выходное напряжение $U_{вых}$.

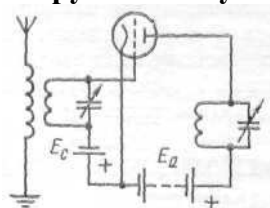


Рис. 72. Отрицательное смещение на сетку можно подать с помощью батареи E_c .

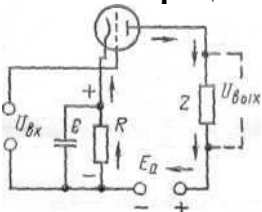


Рис. 73. Отрицательное смещение на сетке получается в результате падения напряжения, которое анодный ток создает на резисторе R .

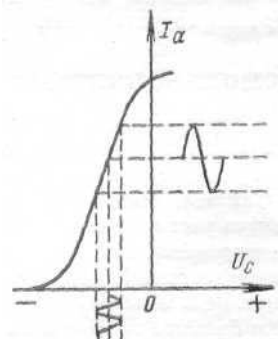


Рис. 74. При усилении колебания сеточного напряжения не должны выходить за пределы прямолинейного участка кривой, характеризующей изменения анодного тока I_a в зависимости от потенциала сетки U_c .

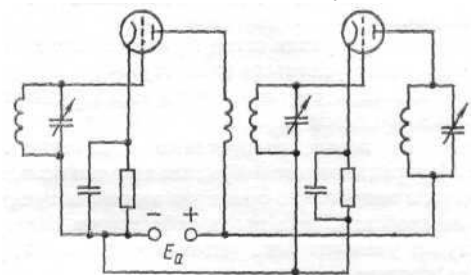


Рис. 75. Связь между двумя каскадами усиления высокой частоты с помощью трансформатора с настроенной вторичной обмоткой.

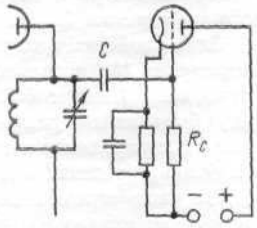


Рис. 76. Связь между каскадами с помощью конденсатора С.

сопротивление, никоим образом не снижает постоянного напряжения, приложенного между анодом и катодом, благодаря чему на аноде остается почти полное положительное напряжение, получаемое от батареи.

СМЕЩЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Не желая злоупотреблять твоим терпением, я сейчас покажу очень простой способ подачи отрицательного смещения на сетку. Для этой цели между катодом и отрицательным полюсом источника анодного напряжения E_a включают резистор R (рис. 73). Анодный ток протекает по резистору и создает падение напряжения, которое делает катод положительным относительно отрицательного полюса источника анодного напряжения E_a . А через входной контур сетка соединена как раз с этим полюсом. Таким образом, сетка становится отрицательной относительно катода. Однако через этот резистор не следует пропускать переменную составляющую анодного тока, ибо в противном случае на резисторе между сеткой и катодом также появится переменное напряжение, которое окажется в противофазе с входным переменным напряжением. Это приводит к снижению коэффициента усиления.

Для предотвращения подобного нежелательного последствия достаточно параллельно резистору R включить конденсатор C , обладающий достаточной емкостью. В результате переменная составляющая анодного тока свободно пройдет через конденсатор, через который ей пройти намного легче, чем через резистор. Таким образом, через резистор потечет практически только постоянная составляющая анодного тока, что обеспечит стабильное и постоянное смещение. Сопротивление резистора смещения R нужно выбирать так, чтобы полученное напряжение смещения соответствовало такой величине, при которой так называемая *рабочая точка* на кривой, характеризующей изменения анодного тока в зависимости от напряжения сетка — катод, была расположена в середине прямолинейного участка между нижним «щитом» характеристики и точкой, соответствующей нулевому потенциалу на сетке. В самом деле, необходимо, чтобы колебания напряжения, приложенного к сетке, происходили на прямолинейном отрезке кривой и чтобы колебания анодного тока были им строго пропорциональны (рис. 74).

СВЯЗЬ МЕЖДУ УСИЛИТЕЛЬНЫМИ КАСКАДАМИ

Ты догадываешься, что очень малое напряжение, полученное во входном контуре, должно усиливаться последовательно в нескольких *усилительных каскадах*. Для этой цели выходное напряжение предшествующего каскада служит входным напряжением следующего каскада. Как достичь этого в каскадах высокой частоты? Связь между каскадами можно установить с помощью высокочастотного трансформатора, первичная обмотка которого включена в анодную цепь первого триода, а вторичная — между сеткой и катодом второго триода (рис. 75). Одна из обмоток трансформатора должна быть настроена на принимаемую частоту. Можно так же настроить и обе обмотки.

Связь между каскадами можно осуществить с помощью конденсатора C , передающего на сетку следующей лампы переменное напряжение, созданное на аноде предшествующей лампы (рис. 76). В этом случае постоянный потенциал сетки (смещение) — этого не следует забывать — должен подаваться через резистор R_c , который обычно должен иметь большое сопротивление...

Я вижу, что магнитная лента приближается к концу, и поэтому заканчиваю. А следовало бы еще рассказать об электронных лампах. Я поручаю моему дорогому племяннику сделать это вместо меня.

БЕСЕДА СЕДЬМАЯ

УСИЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ НЧ

Объяснив, как усилительный триод может одновременно служить детектором, Любознайкин рассказывает о различных схемах НЧ. Затем он рассматривает трансформаторную и резистивно-емкостную связи, служащие для передачи усиливаемого напряжения от одного каскада к другому. И в заключение он приводит различные варианты двухтактной схемы.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ С ОДНОВРЕМЕННЫМ УСИЛЕНИЕМ

Незнайкин. — Я с большим интересом прослушал объяснения твоего дядюшки о триоде и его использовании для усиления колебаний ВЧ. Теперь мне хотелось бы перейти к низким частотам, перешагнув на этом пути через детектирование, потому что мы хорошо знаем, как оно осуществляется диодом.

Любознайкин. — А знаешь ли ты, что детектировать можно также с помощью триода?

Н. — Не следует ли для этой цели превратить его в диод, например, соединив сетку с анодом?

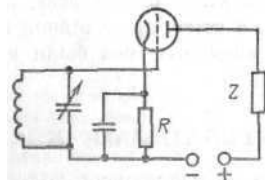


Рис. 77. Благодаря сопротивлению резистора R лампа не только усиливает, но и детектирует поступающие на сетку колебания высокой частоты.

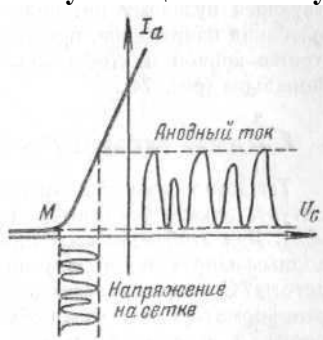


Рис. 78. Детектирование на изгибе анодной характеристики в рабочей точке M .

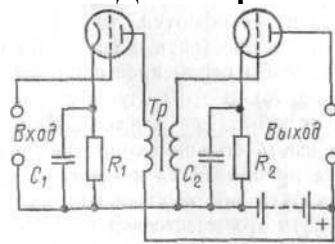


Рис. 79. Два усилительных каскада НЧ с трансформаторной связью между ними.

Л. — Это возможный путь, но им совершенно не пользуются, так как он не дает никаких преимуществ по сравнению с использованием обычного диода. Тогда как схема на рис. 77 одновременно обеспечивает детектирование и усиление. На нагрузке Z , включенной в анодную цепь, выделяется напряжение НЧ более высокое, чем в случае использования диода.

Н. — Ты что, Любознайкин, смеешься надо мною? Нарисованная тобою схема представляет собой всего лишь каскад усиления высокой частоты, который описал мне твой дядюшка.

Л. — Это действительно так, но здесь резистор смещения R выбирают с достаточно большим сопротивлением, чтобы рабочая точка соответствовала самой малой величине анодного тока. Эта точка располагается у подножья кривой анодного тока. При этом положительные полупериоды напряжения высокой частоты, приложенного к сетке, вызывают усиленные колебания анодного тока. А отрицательные полупериоды лишь незначительно снижают величину анодного тока, так как еще до приложения этого напряжения ток был почти равен нулю (рис. 78).

Как ты видишь, напряжение, возникающее на нагрузке Z , состоит почти из одних положительных полупериодов приложенного к сетке напряжения ВЧ. Стало быть, это одновременно усиленное и протектированное напряжение.

Н. — Я должен отметить, что триод обладает поистине универсальными качествами. Не можешь ли ты теперь объяснить, как в нем происходит усиление напряжения НЧ? Ведь, как я предполагаю, усиление напряжения ВЧ в основном служит для повышения чувствительности приемника, тогда как, усиливая колебания НЧ, мы повышаем громкость звучания.

УСИЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ НЧ

Л. — Ты забываешь, что УВЧ благодаря наличию настроенных контуров служит также и для обеспечения хорошей избирательности. Кроме того, детектирование оказывается намного эффективнее, если детектируемое напряжение имеет достаточно большую амплитуду.

Но ты прав, когда утверждаешь, что усиление колебаний НЧ преследует цель увеличить громкость звука. Для домашнего приемника вполне достаточно нескольких ватт мощности. В тех же случаях, когда требуется воспроизвести звук в большом зале или на открытом воздухе, громкоговорители должны получать несколько десятков и даже сотен ватт. Обычно необходимую громкоговорителям мощность дает *выходной каскад*. Роль же предшествующих ему каскадов УНЧ заключается в усилении напряжения, полученного после детектирования.

Н. — А каким образом напряжение НЧ передается от одного каскада к другому?

Л. — Существует несколько способов связи между каскадами. Для этой цели можно использовать трансформатор НЧ (рис. 79), первичная обмотка которого включена в анодную цепь первой лампы, а вторичная — между сеткой и катодом следующей лампы (последовательно с резистором смещения, зашунтированным конденсатором).

75

Н. — А как сделан такой трансформатор? По схеме я вижу, что он снабжен магнитным сердечником или магнитопроводом.

Л. — На НЧ сердечник крайне необходим. А чтобы в нем не возникло даже самых малых токов Фуко, сердечник собран из изолированных друг от друга пластин из мягкой стали.

Н. — В итоге, если я правильно понял, протекающий по первичной обмотке анодный ток порождает во вторичной обмотке переменное напряжение. Это напряжение подается на вход следующего каскада.

РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНАЯ СВЯЗЬ

Л. — Именно это и происходит. Я лишь добавлю, что следует использовать трансформаторы высокого качества, способные одинаково передавать всю полосу звуковых частот, а это далеко не просто сделать и к тому же дорого будет стоить.

Для осуществления связи между двумя каскадами можно обойтись двумя резисторами и одним конденсатором. Это тебе обойдется дешевле. Один резистор включается в анодную цепь лампы предшествующего каскада (рис. 80). Переменное напряжение, возникающее на этом резисторе, через конденсатор передается на сетку следующей лампы. Однако конденсатор не позволяет обеспечить постоянный потенциал, необходимый для установления рабочей точки лампы. Поэтому сетку соединяют с отрицательным полюсом источника напряжения через резистор с высоким

сопротивлением; этот резистор иногда называют *резистором утечки* сетки. Добавлю, что резистор, включенный в цепь анода, можно заменить катушкой индуктивности с магнитным сердечником (рис. 81).

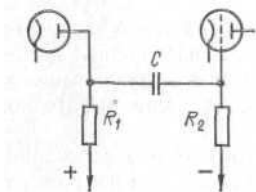


Рис. 80. Резистивно-емкостная связь между двумя каскадами УНЧ.

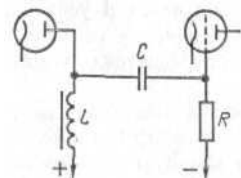


Рис. 81. Индуктивно-емкостная связь между двумя каскадами УНЧ.

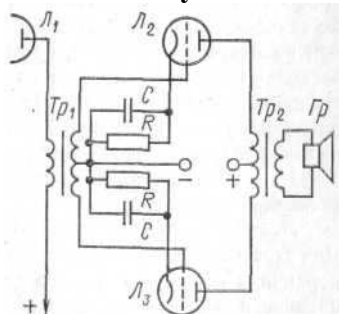


Рис. 82. Двухтактная схема усилительного каскада.

76

Н. — А нельзя ли использовать резисторно-емкостную связь в схемах УВЧ?

Л. — В принципе можно, так как резистивно-емкостная связь не зависит от частоты. Но на ВЧ нужно обеспечить высокую избирательность. А избирательность можно повысить лишь при наличии колебательных контуров.

ДВУХТАКТНАЯ СХЕМА

Н. — Сколько НЧ каскадов должен иметь радиоприемник?

Л. — Чаще всего два. Основная задача первого заключается в усилении напряжения НЧ. Второй же каскад должен обеспечивать громкоговорителю необходимую мощность.

Н. — Нельзя ли для этой цели использовать два соединенных параллельно триода? Я имею в виду схему, в которой оба катода соединены вместе, и то же самое сделано с сетками и анодами ламп.

Л. — Это возможно; такая схема позволяет удвоить выходную мощность. Но лучшие результаты дает *двухтактная схема*, которую иногда называют «пуш-пул».

Н. — Что ты так называешь? По-английски «пуш-пул» означает «толкай-тяги». Что здесь толкают, а потом тянут?

Л. — Речь идет о магнитных полях, возникающих в трансформаторе. Посмотри на схему, которую я для тебя нарисовал. Как ты видишь, лампа предварительного усилителя L_1 соединена с выходным каскадом, содержащим две лампы (L_2 и L_3), с помощью трансформатора НЧ, вторичная обмотка которого имеет средний вывод. Этот вывод подключен к отрицательному полюсу источника высокого напряжения (рис. 82).

Каждый из концов вторичной обмотки соединен с сеткой соответствующего выходного триода. Догадываешься ли ты, как они работают?

Н. — Я думаю, что они работают попеременно. В самом деле, колебания, которые со вторичной обмотки трансформатора Tr_1 подаются на их сетки, находятся в противофазе. Когда наведенный в этой обмотке ток протекает сверху вниз (по схеме), верхняя часть обмотки становится отрицательной, а нижняя — положительной. При следующем полупериоде все происходит наоборот.

Л. — Я полностью с тобой согласен... Как ты видишь, изменения потенциалов, приложенных к сеткам обеих выходных ламп, направлены в противоположные стороны.

Н. — Это напомнило мне двух спортсменов, которых я видел в цирке. Они стояли на концах доски, качавшейся на опоре, расположенной посередине доски. Когда один из них подпрыгивал и затем опускался на доску, она подбрасывала в воздух второго спортсмена. Последний, опустившись на доску, перекидывал ее в обратном направлении. И все это повторялось вновь и вновь...

Л. — Две наши выходные лампы ведут себя таким же образом. В один из полупериодов анодный ток в одной из ламп повышается, а в другой — снижается. Во время следующего полупериода наблюдается противоположная картина.

77

Н. — Это очень забавно, но, как я вижу, анодные токи обеих ламп проходят по первичной обмотке трансформатора Tr_2 . Однако, изменяя направления на противоположные, они взаимно уничтожатся, и наша схема ничего не даст.

Л. — Ты глубоко заблуждаешься, Незнайкин! Анодные токи текут по обмотке в противоположных направлениях. А так как их изменения направлены противоположно, во вторичной обмотке возникнут токи индукции, текущие в одном направлении и, следовательно, складывающиеся.

Н. — Подожди, Любознайкин. Дай мне возможность более детально проанализировать схему. Начнем с полупериода напряжения, которое делает сетку лампы L_2 положительной, что вызывает увеличение ее анодного тока. Одновременно сетка лампы L_3 становится отрицательной, что снижает ее анодный ток. Ток с анода лампы L_2 протекает сверху вниз (по схеме) по верхней половине первичной обмотки выходного трансформатора Tr_2 . Ток с анода лампы L_3 протекает снизу вверх (по схеме) по нижней половине обмотки.

Предположим, что первый из этих токов наводит во вторичной обмотке ток, тоже идущий сверху вниз (по схеме). О, ты прав, мой дорогой друг! Ток лампы L_3 , идущий в противоположном направлении с током лампы L_2 , наводит во вторичной обмотке ток, который тоже идет сверху вниз (по схеме). Следовательно, эти токи складываются.

Л. — Мне доставляет большое удовольствие видеть, что ты это очень хорошо понял. Добавлю, что двухтактная схема обладает одним очень важным достоинством: постоянные составляющие анодных токов ламп L_2 и L_3 протекают в первичной обмотке трансформатора Tr_2 в противоположных направлениях и поэтому уничтожаются. Они не намагничивают сердечник выходного трансформатора, что значительно повышает его магнитную проницаемость и улучшает индуктирование токов во вторичной обмотке. Кроме того, благодаря исключительной симметричности схемы *искажения*, которые могут возникнуть из-за нелинейности характеристик обеих выходных ламп, исчезают вследствие противоположного направления анодных токов.

СДВИГ ФАЗЫ С ПОМОЩЬЮ ЛАМПЫ

Н. — Теперь я стал сторонником двухтактной схемы. Но я опасаясь, что ее создание повлечет довольно высокие затраты, ведь два трансформатора НЧ со средними выводами должны стоить довольно дорого.

Л. — Если ты пожелаешь, можно обойтись без первого трансформатора. В частности, его можно заменить ламповым *фазоинвертором*.

Ты знаешь, что переменное напряжение, снимаемое с анодной нагрузки, находится в противофазе с переменным напряжением на сетке. Значит, мы можем использовать фазовращающий триод, чтобы приложить к одному из выходных триодов напряжение НЧ, находящееся в противофазе с напряжением, приложенным к другой выходной лампе.

Вот в этой схеме переменное напряжение на резисторе R_1 по которому протекает анодный ток лампы предварительного усилителя, подается через конденсатор C_1 на сетку одной из двух ламп двухтактного каскада (рис. 83). Часть этого напряжения, снимаемая со среднего вывода резистора R_1 подается через конденсатор связи C_3 на сетку лампы фазоинвертора. Напряжение со сдвинутой фазой возникает на резисторе R_2 , включенном в анодную цепь этой лампы; через конденсатор C_2 оно подается на вторую лампу двухтактного каскада.

Н. — А почему на сетку лампы фазоинвертора подается лишь часть напряжения, выделяющегося на резисторе R_1 ?

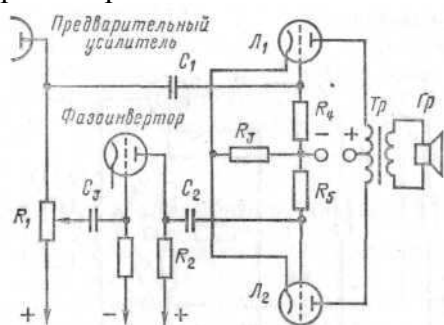


Рис. 83. Двухтактная схема, в которой входной трансформатор заменен лампой-фазоинвертором.

Л. — Потому что эта лампа усиливает напряжение, подаваемое на ее вход. А ведь нам требуется, чтобы напряжения, приложенные к сеткам обеих ламп выходного каскада, находились в противофазе, но в то же время были равны между собой. Вот почему приходится уменьшать напряжение на входе лампы фазоинвертора.

Например, если она усиливает напряжение в 5 раз, нужно снимать с резистора R_1 только $1/5$ часть всего напряжения. Лучше всего установить на резисторе подвижный контакт, позволяющий снимать большую или меньшую часть напряжения. Такой резистор, снабженный подвижным выводом, называется *потенциометром*. Обычно его делают из проволоки с высоким сопротивлением, которую наматывают на полоску изоляционного материала, изогнутую по окружности. Подвижный контакт укрепляют на свободно вращающейся оси, проходящей через центр окружности. Вращая ось с помощью ручки, можно перемещать подвижный контакт в любую точку резистора, произвольно изменяя таким образом его сопротивление.

КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ

Н. — Идея фазоинвертора совсем не глупа!

Л. — Сдвиг фазы можно осуществить также с помощью лампы, включенной по схеме *катодного повторителя*. Это стало

возможным после появления ламп с косвенным накалом. Идея очень проста. Кроме резистора, включенного между анодом и положительным полюсом источника напряжения, в анодную цепь вводят еще один резистор; его включают между отрицательным полюсом источника и катодом (рис. 84). Ты легко можешь догадаться, что когда на сетке возрастает положительный потенциал и вследствие этого увеличивается анодный ток, потенциал на выводе резистора, соединенном с анодом, уменьшается, тогда как на выводе другого резистора, соединенного с катодом, увеличивается. Стало быть, на аноде и на катоде лампы катодного повторителя колебания находятся в противофазе. И нам остается с помощью конденсаторов связи подать их на сетки обеих ламп двухтактного каскада.

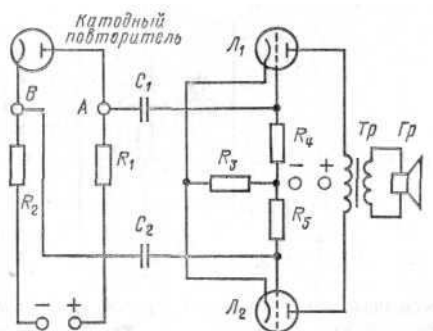


Рис. 84. Двухтактная схема, в которой сдвиг входных напряжений по фазе осуществляется катодным повторителем. Напряжения, прилагаемые на лампы L_1 и L_2 , поступают с анода и катода лампы катодного повторителя.

Н. — Дает ли катодный повторитель одновременно и усиление?

Л. — Нет. Потому что на катоде появляется напряжение, находящееся в противофазе с напряжением, приложенным на сетку, в результате чего входное напряжение катодного повторителя оказывается уменьшенным. Нельзя же, Незнайкин, требовать от одного триода слишком многого. Достаточно того, что триод способен детектировать и усиливать как ВЧ, так и НЧ колебания, причем на этом его возможности не ограничиваются. Триод служит также для генерирования колебаний. Но сегодня вечером уже слишком поздно приступать к объяснению устройства и работы схемы генератора. Я думаю, что мой дядюшка с удовольствием объяснит это тебе.

80

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ. РАДИОПЕРЕДАЧА. МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ

Объяснив принцип действия обратной связи, профессор Радиоль описывает различные случаи ее применения, в частности в регенеративном приемнике и в устройствах для генерирования колебаний. Затем он объясняет, как в передатчиках эти колебания модулируются по амплитуде. И наконец, рассмотрев опасности возникновения паразитных связей, он описывает назначение экранов и принципы работы многоэлектродных ламп: тетрода и пентода.

Мои дорогие друзья, вы, несомненно, правы, когда восхищаетесь универсальностью электронных ламп. Я охотно объясню вам, как с их помощью можно генерировать колебания. Но сначала я покажу вам, что триод может обеспечивать так называемое «сеточное детектирование».

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПЛЮС УСИЛЕНИЕ

В этой схеме, некогда широко использовавшейся, сетка играет двойную роль: анода детектора и сетки усилителя (рис. 85).

Наша сетка, не имеющая отрицательного смещения, улавливает некоторое количество испускаемых катодом электронов во время положительных полупериодов переменного напряжения настроенного контура. Возникающий таким образом выпрямленный ток создает на резисторе R_1 падение напряжения. Это напряжение, являющееся результатом детектирования, управляет анодным током лампы. Таким образом обеспечивается одновременное усиление НЧ колебаний.

Обрати внимание, Незнайкин, что резистор R_1 имеющий сопротивление один или несколько мегаом, можно также включать непосредственно между сеткой и катодом (рис. 85,б).

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

До сих пор мы шли только вперед. В радиоприемнике мы рассмотрели антенну, от нее перешли к входной схеме, затем прошли по каскадам УВЧ к детектору и к УНЧ, выходной каскад которого снабжает энергией громкоговоритель.

А теперь посмотрим, что происходит, когда ток ВЧ после усиления возвращается назад. Для этой цели установим в анодной цепи лампы катушку L' , индуктивно связанную с катушкой L сеточного колебательного контура (рис. 86). Что тогда произойдет?

В катушке L' колебания тока имеют ту форму, что и в катушке L , но усиленные. Следовательно, они наведут в катушке L переменные токи. Будут ли они в фазе или в противофазе с протекающими там токами? Это зависит от направления витков катушек. Можно так расположить катушки, что токи, наводимые катушкой L' в катушке L , будут усиливать протекающие по ней токи. При этом переменное напряжение на сетке станет больше. Это увеличит анодный ток лампы, в результате чего катушка L' наведет в катушке L напряжение еще большей величины и т. д.

Это воздействие анодной цепи на сеточную называется *обратной связью*. И ты легко догадаешься, что степень этого воздействия зависит в основном

81

от связи между двумя катушками. Чем сильнее они связаны между собой, тем больше воздействие. Таким образом можно весьма значительно повысить усиление нашего триода.

РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ДЕТЕКТОР

Это явление использовалось в широко распространенной схеме, называвшейся «регенеративным детектором». В ней использовали сеточное детектирование, которое обеспечивалось цепочкой RC_1 (рис. 87). Самое важное заключалось в наличии в анодной цепи катушки L' , соединенной последовательно с телефоном. Эта катушка имела регулируемую связь с катушкой L сеточного колебательного контура. Для этой цели катушка обратной связи устанавливалась на подвижном основании, позволявшем приближать ее к неподвижной катушке L . Такая конструкция давала возможность устанавливать максимальную обратную связь, обеспечивая большое усиление и высокую избирательность. Таким образом радиолюбители могли принимать очень удаленные передатчики.

СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРОВ

Когда я говорил тебе об увеличении обратной связи, мне следовало бы объяснить, что нельзя увеличивать ее беспрестанно. Существует предел, после которого лампа начинает генерировать колебания. Теперь мы подошли к изучению одного из самых важных явлений, каким является генерирование колебаний с помощью электронных ламп.

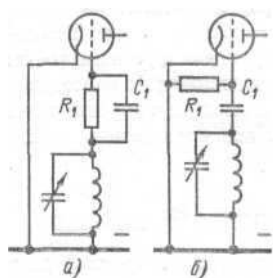


Рис. 85. Сеточное детектирование с помощью триода. Резистор R_1 может быть включен через контур (а) или между сеткой и катодом (б).

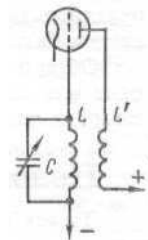


Рис. 86. Протекающий по катушке L' анодный ток наводит ток обратной связи в катушке L колебательного контура к цепи сетки.

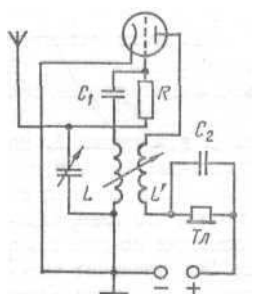


Рис. 87. Схема приемника с регенеративным детектором.

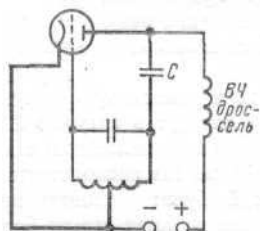


Рис. 88. Трехточечная схема. Путь переменной составляющей анодного тока показан жирной линией.

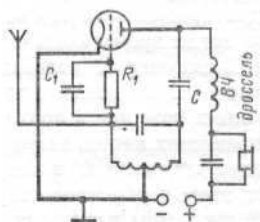


Рис. 89. Регенеративный приемник, в котором используется трехточечная схема,

82

Для получения колебаний в цепь сетки направляют часть энергии из анодной цепи. Лампа усиливает полученные таким образом колебания, и усиленные токи через цепочку обратной связи воздействуют на сеточную цепь.

Обратную связь можно осуществить не только воздействием анодной цепи на сеточную с помощью взаимосвязанных катушек. Такой же результат можно получить с помощью ловко придуманной *трехточечной схемы* (рис. 88). Здесь анодный ток разветвляется на два направления: переменная составляющая через конденсатор C подводится к колебательному контуру, а постоянная составляющая проходит к положительному полюсу анодного напряжения через ВЧ *дроссель*. Так называют катушку, индуктивное сопротивление которой препятствует прохождению токов ВЧ. По пути к катоду лампы переменная составляющая анодного тока проходит по части катушки колебательного контура; катушка снабжена специальным выводом. Переменная составляющая наводит в контуре напряжение, достаточное для генерирования колебаний.

Чтобы сделать схему более наглядной, я провел жирной линией путь токов обратной связи.

ЯВЛЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Трехточечная схема может также применяться в приемнике с регенеративным детектором. Для этой цели в цепь сетки включают резистор R_1 , зашунтированный конденсатором C_1 (рис. 89). Конденсатор C , пропускающий ток обратной связи в колебательный контур, должен быть переменным, что позволит регулировать коэффициент обратной связи. Благодаря такой конструкции становится возможным не переходить точку, где возникают собственные колебания, которые сопровождаются свистом в телефоне, вызываемом *интерференцией*. Об этом явлении я сейчас расскажу тебе.

Представь себе, что колебания, возникающие в результате воздействия обратной связи, имеют частоту f_2 , несколько отличающуюся от частоты f_1 колебаний, наводимых в антенне принимаемыми радиоволнами. Что же произойдет в результате наложения колебаний этих частот?

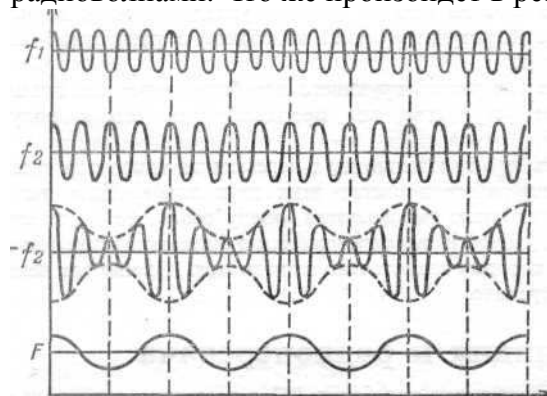


Рис. 90. Наложение двух колебаний с частотами f_1 и f_2 образует сложное колебание с частотой $f_1 - f_2$, которое при детектировании дает колебание с частотой F , равной разности частот двух составляющих.

83

Я начертил для тебя кривые, соответствующие частотам f_1 и f_2 (рис. 90). Вначале, как ты видишь, колебания их совпадают, поэтому амплитуда результирующего тока равна сумме амплитуд обоих колебаний. Но вследствие разницы частот образуется сдвиг, и вскоре наши колебания оказываются в противофазе и должны вычитаться одно из другого. Затем сдвиг уменьшается, колебания постепенно начинают совпадать, и все повторяется сначала.

Ты видишь, что амплитуда результирующего тока периодически меняется. И если ты посчитаешь количество периодов каждой из двух составляющих и количество периодов результирующего тока, то, несомненно, придешь к следующему важному выводу: в результате наложения колебаний с частотами f_1 и f_2 образуется колебание с частотой $f_1 - f_2$.

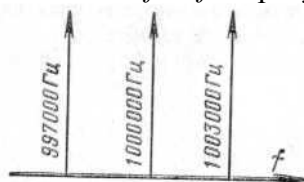


Рис. 91. Колебания с несущей частотой 1000000 Гц модулируются сигналом НЧ с частотой 3000 Гц.

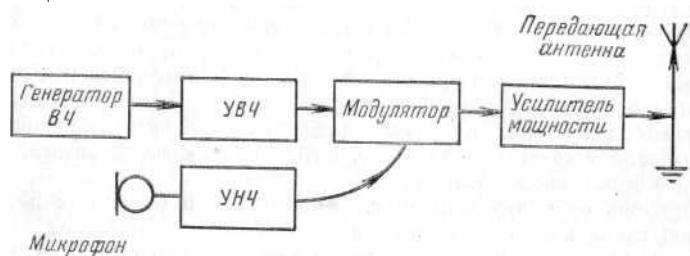


Рис. 92. Структурная схема радиотелефонного передатчика с амплитудной модуляцией.

В самом деле, на моем рисунке изображено 20 периодов колебания с частотой f_1 . В этот же отрезок времени укладывается 16 периодов колебаний с частотой f_2 . А результирующее колебание с разностной частотой $f_1 - f_2$ имеет 4 периода.

Пропустив ток результирующего колебания через диод или любое другое выпрямляющее устройство, мы продетектируем его и получим ток НЧ:

Ты видишь, что наложение двух переменных токов порождает ток, частота которого равна разности частот этих двух токов. Если это два тока ВЧ, частоты которых мало различаются между собой, то их наложение дает ток НЧ. Тогда говорят об *интерференции* или о *биениях*. Можно также накладывать токи, частоты которых значительно отличаются. Именно так делают при радиотелефонной передаче.

МОДУЛЯЦИЯ И РАДИОПЕРЕДАЧА

Сначала генерируют колебания ВЧ с помощью одного из рассмотренных нами способов, в которых обратная связь порождает такие колебания. Затем их усиливают и модулируют токами НЧ, полученными в результате усиления микрофонных токов. Как осуществляется эта модуляция?

84

Это можно сделать посредством одновременной подачи на сетку лампы двух напряжений: ВЧ и НЧ. Сетка в этом случае должна получить такое смещение, чтобы рабочая точка находилась у подножья характеристики (см. рис. 78). Тогда во время отрицательных полупериодов НЧ анодного тока не будет, а во время положительных полупериодов НЧ приложенное на сетку напряжение ВЧ создаст анодный ток, амплитуда которого в каждый момент времени будет пропорциональна напряжению НЧ. Таким образом получают токи ВЧ, модулированные по амплитуде сигналами НЧ.

Я не хочу утомлять тебя тригонометрическими расчетами сложения синусоидальных кривых ВЧ и НЧ. Просто запомни, что при модулировании по амплитуде несущего высокочастотного тока с частотой f током низкой частоты F возникает ток, имеющий две частоты: $f-F$ и $f+F$.

Например, если ток ВЧ с частотой 1000000 Гц модулируется током НЧ с частотой 3000 Гц, в результате получается модулированный ток с частотами 997 000 и 1 003 000 Гц (рис. 91).

В радиотелефонии полоса звуковых частот ограничена 4500 Гц. Ширина каждой из модулированных боковых полос, расположенных по обе стороны от *несущей частоты*, равна 4500 Гц. А спектр частот, который занимает радиотелефонный передатчик, следовательно, составляет 9000 Гц. Поэтому международное разделение несущих частот предусматривает выделение интервалов шириной 9 кГц во избежание одновременного приема двух передач и появления интерференционных свистов.

Для завершения описания устройства передатчика я добавлю, что, прежде, чем подать в передающую антенну, которая порождает электромагнитные волны, модулированные токи, их следует усилить по мощности (рис. 92).

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Вернемся к рассмотрению обратной связи. До тех пор, пока мы ею управляем, все идет хорошо. Она позволяет повысить усиление или, если это нужно, генерировать колебания.

К сожалению, обратная связь может возникать самопроизвольно, что нередко имеет пагубные последствия. Катушка, по которой протекает анодный ток, может, помимо нашего желания, наводить напряжение в катушке, соединенной с сеткой, и вызвать тем самым появление колебаний. Это явление называют *самовозбуждением*.

Самовозбуждение может возникнуть также при наличии емкости между компонентами во входной и выходной цепях лампы.

Для предотвращения возникновения связей между магнитными или электрическими полями применяют *экраны*. Так называют металлические пластины или коробочки, являющиеся препятствием для распространения силовых линий. Распространение магнитных полей низкочастотных катушек и трансформаторов ограничивают стальными экранами. На ВЧ применяют преимущественно экраны из меди.

ТЕТРОД

Однако имеется еще одна емкость, способная вызвать особенно опасную обратную связь. Это емкость между анодом и сеткой триода. Подумай о том, что положительный потенциал на сетке вызывает увеличение анодного тока. Поэтому падение напряжения на нагрузке, включенной в анодную цепь, увеличивается. В результате через емкость анод — сетка часть электронов попадет

обратно на сетку, создав на ней еще более высокий положительный потенциал. Работа лампы станет неустойчивой, и может возникнуть самовозбуждение.

Здесь, как ты видишь, мы сталкиваемся с паразитной обратной связью. Как с ней бороться?

И в этом случае можно воспользоваться экраном. Нет, Незнайкин, не думай, что я смеюсь над тобой. Экран, о котором я сейчас говорю, представляет собой сетку со строго фиксированным потенциалом. Ее размещают между управляющей сеткой и анодом. Так получили четырехэлектродную лампу, потому что помимо катода, управляющей сетки и анода в ней имеется *экранирующая сетка*. Поэтому лампу называют *тетродом* (от греческого слова «тетра» — четыре).

Чтобы экранирующая сетка не мешала, а, наоборот, способствовала прохождению электронов, на нее подают высокий положительный потенциал, который все же ниже потенциала анода. Для этой цели экранирующую сетку можно соединить с общей точкой двух резисторов, включенных последовательно между двумя полюсами источника высокого напряжения (рис. 93, а). Говорят, что эти

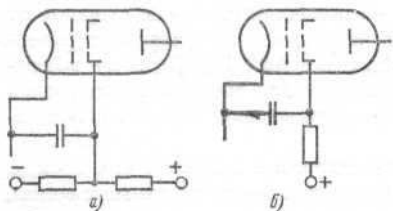


Рис. 93. В схеме с тетродом для подачи положительного напряжения на экранирующую сетку можно использовать делитель напряжения из двух резисторов (а) или подключить экранирующую сетку к положительному полюсу источника высокого напряжения через резистор (б).

резисторы образуют *делитель напряжения*. Можно также соединить экранирующую сетку через резистор с положительным полюсом источника напряжения (рис. 93, б). Имеющая положительный потенциал экранирующая сетка притягивает электроны, и образовавшийся таким образом ток создает падение напряжения на резисторе, необходимое для поддержания потенциала экранирующей сетки заданной величины.

Благодаря экранирующей сетке действие анода на электронный поток уменьшается, а чем меньше действие анода на электронный поток по сравнению с действием управляющей сетки, тем больше усиление лампы.

Я надеюсь, что ты не забыл определение коэффициента усиления. Это отношение изменения потенциала сетки к изменению потенциала анода, вызывающие такое же изменение величины анодного тока. Из сказанного ты легко поймешь, что у тетрода коэффициент усиления значительно больше, чем у триода; он может достигать и даже превышать 1000.

Что же касается крутизны, то у тетрода и триода значения ее примерно одинаковы, так как экранирующая сетка не оказывает никакого влияния на результат воздействия потенциала управляющей сетки на величину анодного тока.

Ты, надеюсь, не забыл, что коэффициент усиления μ равен произведению крутизны S на внутреннее сопротивление R_i :

$$\mu = S \times R_i$$

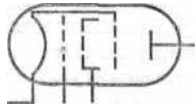
И если у тетрода μ значительно больше, чем у триода, а значения S примерно одинаковы, то следует предположить, что и R_i тоже намного выше. В самом деле, внутреннее сопротивление тетрода очень велико. Оно может даже достигать 1 МОм.

ВТОРИЧНАЯ ЭМИССИЯ. ПЕНТОД

До сих пор я говорил лишь о достоинствах, которыми обладает тетрод. Увы, наряду со своими прекрасными качествами он имеет большой недостаток: *вторичную эмиссию*. Когда испускаемые катодом электроны ударяются об анод, удар вызывает вылет некоторого количества электронов. Они покидают молекулы, расположенные на поверхности анода. В триоде это не вызывает нежелательных явлений, так как эти вторичные электроны сразу же притягиваются анодом, имеющим положительный потенциал.

Однако в тетроде не все завершается столь благополучно. Часть вторичных электронов получает в результате удара большую скорость, дающую им возможность достаточно удалиться от анода и приблизиться к экранирующей сетке настолько, что ее притяжение превысит притяжение анода. Попавшие в поле экранирующей сетки электроны притягиваются ею. В результате вторичная эмиссия порождает ток, проходящий от анода к экранирующей сетке.

Рис. 94. Условное графическое обозначение пентода.



Устранить этот недостаток тетрода возможно введением в лампу третьей сетки между экранирующей сеткой и анодом. Эту сетку соединяют внутри самой лампы с катодом. Ее отрицательный по отношению к аноду потенциал будет отталкивать вторичные электроны обратно к аноду.

В то же время третья сетка не мешает прохождению электронов, испускаемых катодом. Ускоренные экранирующей сеткой и притягиваемые сильным полем анода, они на большой скорости проходят сквозь третью сетку.

Эта новая лампа с тремя сетками содержит пять электродов, чем и определяется ее название *пентод* (рис. 94).

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАМПЫ. ГЕПТОДЫ. ОКТОДЫ

Теперь ты, наверно, спрашиваешь себя, до чего может пойти это увеличение количества электродов в лампе. Успокойся. Триоды, тетроды и пентоды — основные типы электронных ламп.

Существуют лампы, содержащие в себе комбинации этих основных типов, — *комбинированные лампы*. Примером может служить двойной диод, используемый для выпрямления переменного тока. Но существуют и лампы с 7 и 8 электродами, которые называются соответственно *гептодами* и *октодами*.

Об этих сложных приборах мы поговорим в следующий раз.

- О -

87

БЕСЕДА ВОСЬМАЯ

СУПЕРГЕТЕРОДИН

Практически все современные радио- и телевизионные приемники собраны по супергетеродинной схеме. В настоящей беседе Любознайкин объясняет принцип преобразования частоты, приводит различные способы, позволяющие осуществить преобразование частоты, и используемые для этой цели комбинированные лампы.

НЕДОСТАТКИ МНОГОКАСКАДНОГО УВЧ

Незнайкин. — Должен признаться, Любознайкин, что последний рассказ твоего дядюшки произвел на меня очень большое впечатление. Обратная связь, которая в зависимости от обстоятельств может быть полезной или вредной, наложение колебаний разной частоты и лампы с многочисленными электродами — все это до сих пор беспрестанно кружится в моей голове.

Любознайкин. — Все это, однако, позволит тебе лучше понять принцип действия *супергетеродина*.

Н. — Что за аппарат наградили таким суперназванием?

Л. — Это исключительно рационально сконструированный приемник, обладающий высокой чувствительностью и избирательностью.

Н. — Мне думается, что, установив достаточно каскадов УВЧ, можно очень просто обеспечить и превосходную чувствительность и очень хорошую избирательность.

Л. — Теоретически ты прав, а на практике нет. Когда собирают несколько каскадов УВЧ, все меры предотвращения паразитных связей (экранирование, применение ламп типа тетродов и пентодов) оказываются напрасными; паразитные связи обычно достигают такой величины, что возникает самовозбуждение, т. е. начинают генерироваться колебания, вступающие в интерференцию с ВЧ колебаниями принимаемых передач. Чем выше частота последних, тем более опасно действуют паразитные связи. Так, при приеме коротких и еще в большей степени ультракоротких волн практически невозможно обеспечить сколько-нибудь эффективное усиление ВЧ. Кроме того, каждый каскад УВЧ в принципе должен содержать по крайней мере один контур, настроенный на частоту принимаемой радиостанции. А ты, несомненно, понимаешь, насколько сложно произвести такую настройку нескольких контуров одновременно.

ПРИНЦИП РАБОТЫ СУПЕРГЕТЕРОДИНА

Н. — Теперь я понимаю недостатки многокаскадного усиления ВЧ. Но в чем же заключается решение этой проблемы?

Л. — В *преобразовании частоты*. Частоты принимаемых станций преобразую в постоянную частоту, именуемую *про-*

88

межуточной (рис. 95). Колебания этой частоты можно эффективно усиливать, не опасаясь трудностей, о которых мы только что говорили. В то же время наличие контуров, настроенных на промежуточную частоту (ПЧ), обеспечивает прекрасную избирательность без усложнения процесса настройки, так как частоты всех применяемых станций после преобразования имеют одно и то же значение. Контур ПЧ настраивают один раз при сборке приемника, чаще всего на частоту 465 кГц.

Н. — Я начинаю представлять себе преимущества подобной конструкции приемника, но хотел бы знать, как осуществляется преобразование частоты. Нельзя ли получить желаемый результат путем наложения на сигнал принимаемой станции колебания, отличающегося от него на величину ПЧ. В этом случае интерференция этих двух частот будет равна их разности, т. е. самой ПЧ.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ

Л. — Я утверждаю, что если бы супергетеродин не был изобретен в 1917 г., то он был бы изобретен сегодня тобою... Действительно, для преобразования частоты на принимаемый от передатчика ВЧ сигнал налагают генерируемые в приемнике колебания, частота которых выше или ниже частоты принимаемого сигнала на величину ПЧ.

Например, какую, по твоему мнению, частоту должен иметь местный генератор, называемый *гетеродином*, если УПЧ настроен на 465 кГц, а мы хотим принять передачу на волне длиной 25 м?

Н. — Волна длиной 25 м имеет частоту $300\,000\,000 : 25 = 12\,000\,000$ Гц = 12 000 кГц. Следовательно, местный гетеродин должен генерировать частоту $12\,000 + 465 = 12\,465$ кГц, или $12\,000 - 465 = 11\,535$ кГц. В обоих случаях смешение такой частоты с принимаемой частотой 12 000 кГц даст разность 465 кГц.

Л. — Я должен отметить, что ты очень силен в математике... И раз ты так хорошо усвоил все это, мы можем

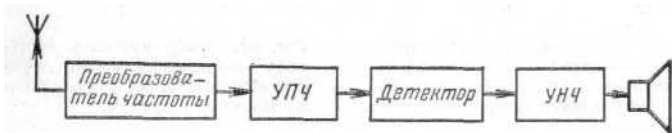


Рис. 95. Структурная схема приемника-супергетеродина.

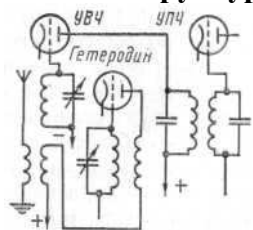


Рис. 96. В преобразователе частоты полученные из антенны сигналы ВЧ складываются с колебаниями, создаваемыми гетеродином; полученные в результате сложения сигналы промежуточной частоты подаются на УПЧ.

89

теперь рассмотрим, как на практике обеспечивается преобразование частоты.

Вначале для этой цели применяли отдельный гетеродин. На схеме (очень упрощенной), которую я нарисовал (рис. 96), ты видишь, что анодный ток гетеродина наводит с помощью небольшой катушки токи во входном контуре, настроенном на ВЧ колебания принимаемой станции.

В этой схеме на сетке первого триода смешивались две частоты: частота принимаемого передатчика и частота местного гетеродина. Благодаря тому, что лампа детектирует совокупность токов, а ее сетка имеет отрицательное смещение, в анодной цепи получаем ток промежуточной частоты. Он подается на УПЧ через трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого настроены на промежуточную частоту.

ОТ ДВУХСЕТОЧНОЙ ЛАМПЫ К ОКТОДУ

Н. — Должен ли я знать, что позднее колебания генерировались той же лампой, в которой осуществлялось смешение двух частот?

Л. — Да, но к этому пришли постепенно. Первоначально пользовались двухсеточной лампой. Не путай ее с тетродом. В этой лампе были две управляющие сетки. На первую подавали напряжение местного гетеродина, на вторую - сигнал от антенны (рис. 97).

Двухсеточная лампа довольно хорошо выполняла роль смесителя. Однако емкость, существующая между двумя сетками,

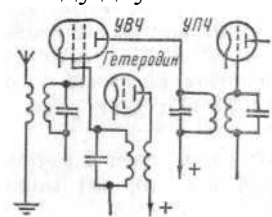


Рис. 97. В двухсеточной лампе принимаемые сигналы ВЧ эффективно складываются с колебаниями местного гетеродина.

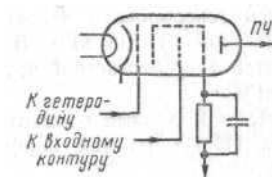


Рис. 98. Чтобы избежать действия емкости между сетками двухсеточной лампы, последнюю можно заменить гексодом.

могла иногда порождать связь между входным контуром и контуром гетеродина, в результате чего гетеродин начинал генерировать на частоте входного контура, что полностью расстраивало работу приемника.

Н. — А как удалось исправить этот недостаток? Не воспользовались ли в этом случае помощью экранирующей сетки, служащей разделяющим экраном?

Л. — Сделали еще лучше: по обе стороны второй сетки поставили по экранирующей сетке: одна отделяет ее от первой основной сетки, а другая — от анода. Так устроен *гексод* — электронная лампа, имеющая шесть электродов (рис. 98).

90

Н. — Здесь мы имеем дело с двумя лампами: гексод служит смесителем, а триод выполняет роль местного гетеродина.

Л. — Эволюция завершилась созданием комбинированной лампы триод-гексода, где обе части имеют общий катод, а третья

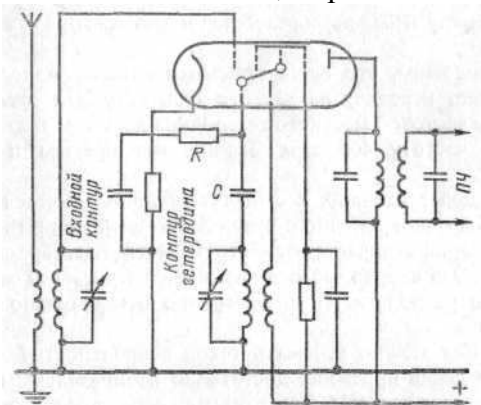


Рис. 99. Преобразование частоты с помощью триод-гексода.

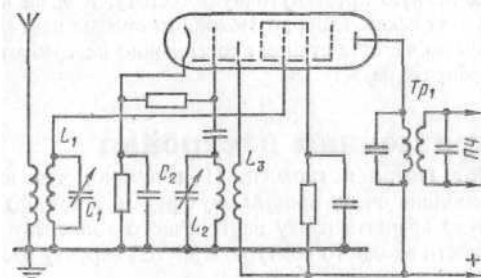


Рис. 100. Преобразование частоты с помощью октода.

сетка гексода внутри лампы непосредственно соединена с сеткой генерирующего триода (рис. 99).

Н. — Имея восемь электродов, подобная комбинированная лампа должна называться *октодом*. Не так ли?

Л. — Нет, октодом называют комбинацию из триода и пентода, у которого экранирующая сетка располагается по обе стороны от управляющей сетки (рис. 100). Анод триода имеет малые размеры и не мешает потоку электронов проходить в пентодную часть лампы. Триод служит гетеродином, а пентод — смесителем, на управляющую сетку которого подаются колебания из антенной цепи.

91

ЗЕРКАЛЬНЫЕ ЧАСТОТЫ

Н. — Одно обстоятельство меня тревожит. Нет ли риска принять супергетеродином одновременно две различные передачи? Предположим, что мы хотим принять станцию на волне 300 м, что

соответствует частоте 1000 кГц. При промежуточной частоте 465 кГц настроим местный гетеродин на частоту 1465 кГц. Разность между этими двумя частотами даст нам промежуточную частоту. Предположим, что наша приемная антенна одновременно воспринимает передачу на частоте 1930 кГц. Эта частота при смешении с частотой местного гетеродина даст нам также промежуточную частоту 465 кГц. Значит, мы примем и вторую станцию?

Л. — Действительно, с супергетеродином имеется определенный риск одновременно с нужной станцией принять другую, частота которой отличается от частоты местного гетеродина тоже на 465 кГц. Эта вторая частота называется *зеркальной частотой*, потому что располагается симметрично относительно частоты гетеродина.

Н. — Как можно избежать такой неприятности?

Л. — Сделав приемник достаточно избирательным еще до преобразователя частоты. Для этой цели перед преобразователем нужно разместить настроенный каскад УВЧ.

Следует отметить, что благодаря достаточно высокой промежуточной частоте опасность приема на зеркальной частоте ничтожна. Ведь зеркальная частота отстоит от частоты принимаемой на удвоенную промежуточную частоту, т. е. на $465 \times 2 = 930$ кГц. Для исключения возможности приема настолько различающейся по частоте станции совершенно не требуется очень высокая избирательность.

СОПРЯЖЕННАЯ НАСТРОЙКА

И. — Вот теперь я спокоен. И я думаю, что настройка в супергетеродине очень проста: двух рук мне должно хватить. Одной я буду вращать ручку настроечного конденсатора переменной емкости входного контура, а другой — ручку настроечного конденсатора местного гетеродина.

Л. — Одной руки, дорогой Незнайкин, вполне достаточно, так как оба конденсатора переменной емкости управляются одной ручкой; их подвижные пластины укреплены на одной и той же оси.

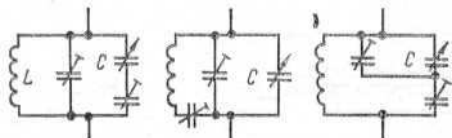


Рис. 101. Три способа включения подстроечных конденсаторов в колебательный контур гетеродина; они служат для обеспечения сопряженной настройки.

92

Н. — Я не верю, что такая конструкция может хорошо работать. Ведь требуется, чтобы между двумя контурами всегда была одинаковая разница по частоте. Однако я не вижу, как этого можно достичь, если оба конденсатора управляются одновременно.

Л. — Емкость обоих конденсаторов переменной емкости идентична, какое бы положение они ни занимали.

Для создания разницы емкостей используют два подстроечных конденсатора; один из них включен параллельно конденсатору переменной емкости гетеродина, а другой, значительно больше емкостью, включен последовательно с ним (рис. 101).

Параллельно включенный подстроечный конденсатор повышает общую емкость всей цепочки, тогда как включенный последовательно конденсатор снижает ее. Подобранные соответствующие емкости подстроечных конденсаторов, удастся сделать так, что во время настройки разность в емкости всегда обеспечивает получение одинаковой промежуточной частоты.

Н. — Я констатирую, что постройка супергетеродина требует немало сложной работы. Но получаемые результаты, несомненно, стоят такого труда.

93

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

Портативные приемники на транзисторах обычно работают от батарей, а стационарные радио- и телевизионные приемники получают необходимую энергию от электрической сети. Как обеспечить в этом случае подогрев нитей накала ламп и анодное питание? Все эти вопросы рассматриваются здесь. Профессор Радиоль объясняет, в частности, различные способы выпрямления и фильтрации анодного тока, а также устройство электролитических конденсаторов.

До сих пор, дорогие мои Любознайки и Незнайки, вы говорили лишь о схемах на электронных лампах. В большинстве современных приемников используют полупроводниковые приборы, но и сегодня имеется немало ламповых приемников.

В следующий раз, Незнайки, я изложу тебе физические основы полупроводниковой техники. В настоящий момент мне предстоит удовлетворить твой голод познания рассмотрением схем питания.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Всем электронным устройствам без исключения требуются источники тока. Портативные транзисторные радиоприемники питаются от батарей, напряжение которых составляет от 4,5 до 9 В. Стационарные радиоприемники и телевизоры питаются от электрической сети. Каковы ее характеристики?

В странах Европы частота тока в сети 50 Гц, а в Соединенных Штатах Америки — 60 Гц. Что касается напряжения, то повсеместно наблюдается тенденция к установлению напряжения 220 В. Однако еще существует немало сетей с напряжением 110, 127 или даже 240 В. Это означает, что схемы питания должны по мере возможности быть пригодными для всех этих значений напряжения.

ПИТАНИЕ ЛАМП В СЕТЕВЫХ ПРИЕМНИКАХ

Рассмотрим сначала, какие токи и напряжения требуются для питания ламповых радио- и телевизионных приемников. Прежде всего необходимо обеспечить подогрев нитей накала ламп. В этой области, к счастью, господствует всемирное единство: практически все лампы для накала требуют одинакового напряжения 6,3 В.

Благодаря тому, что чаще всего лампы имеют косвенный накал, нити накала можно без каких-либо опасений питать переменным током.

Для подачи смещения на 'сетки дополнительных источников питания не требуется; для этой цели используют падение напряжения на резисторах. Ты уже знаешь это, как, впрочем, и способ получения напряжения, необходимого для питания экранирующих сеток.

Для питания анодных цепей требуется обязательно постоянное напряжение. В зависимости от типа используемых ламп анодное напряжение может достигать нескольких сотен вольт. Значение тока может быть от нескольких миллиампер до долей ампера в случае использования мощных ламп.

94

КАК ПОЛУЧАЮТ НАПРЯЖЕНИЕ НАКАЛА И АНОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Для снижения напряжения сети до 6,3 В, необходимого для питания нитей накала электронных ламп, используют трансформатор. Его первичная обмотка может иметь несколько выводов для включения в электрическую сеть с различным напряжением (рис. 102).

Как ты видишь, проблема питания нитей накала решается очень просто. Не так просто решить проблему анодного напряжения, так как здесь требуется не только повысить напряжение, но и сделать его постоянным.

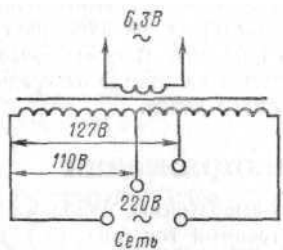


Рис. 102. Трансформатор, преобразующий напряжение сети 220, 127 или 110 В в напряжение накала 6,3 В.

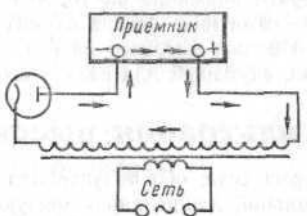


Рис. 103. Однополупериодная схема выпрямления высокого напряжения.

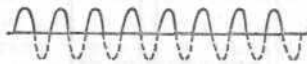


Рис. 104. Полупериоды напряжения, проходящего через диод, показаны сплошной линией. Пунктиром обозначены задерживаемые и поэтому не используемые полупериоды напряжения.

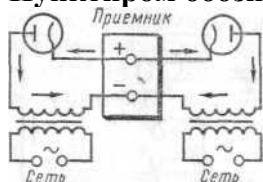


Рис. 105. Благодаря использованию двух диодов выпрямляются оба полупериода напряжения, которое поступает в приемник в одном направлении.

Для получения высокого напряжения применяют трансформатор. И я попутно обращаю твое внимание, что для всех видов питания используют только один трансформатор, имеющий несколько вторичных обмоток. Одна из них дает 6,3 В для нитей накала ламп, о чем мы только что говорили. С помощью другой получают высокое напряжение, которое еще предстоит преобразовать в постоянное. Для этой цели ток надлежит выпрямить. Ты уже знаешь устройство, выполняющее такую задачу. Это диод.

Посмотри на схему, на которой я стрелками показал направление электронного тока, выпрямленного диодом (рис. 103). Ты видишь, что таким образом пропускают один полупериод из двух (рис. 104). Полученное таким образом однонаправленное пульсирующее высокое напряжение довольно трудно выровнять. Вот почему желательно выпрямлять оба полупериода напряжения. Как это осуществить? Я нарисовал тебе схему с двумя выпрямителями. В один из полупериодов ток проходит через один из этих выпрямителей, а во второй полупериод — через другой (рис. 105).

Действительно ли нужно использовать два трансформатора и два диода? Можно обойтись одним трансформатором с отводом от средней точки. А оба диода, катоды которых, как ты видишь, соединены друг с другом, можно заменить одним двойным диодом с общим катодом (рис. 106). Обрати внимание, что в каждый полупериод ток проходит только по половине вторичной обмотки трансформатора: один раз — по левой, а в другой раз — по правой. Это означает, что общее напряжение на вторичной обмотке должно быть вдвое выше того, которое хотят получить.

В действительности трансформатор будет сложнее, так как он должен иметь еще две вторичные обмотки: одну — для подогрева нитей накала ламп приемника, другую — для накаливания катода двойного выпрямительного диода.

Обрати внимание на то, что здесь используется двойной диод прямого накала — сама нить накала служит катодом (рис. 107). В этом случае положительный полюс высокого напряжения получается на отводе от средней точки обмотки, служащей для накала выпрямительного диода.

ФИЛЬТРАЦИЯ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Форма тока, оба полупериода которого выпрямлены, приближается к горизонтальной линии, характеризующей постоянный ток (рис. 108). Как сгладить, или, как говорят, *отфильтровать* этот ток, чтобы сделать его действительно постоянным?

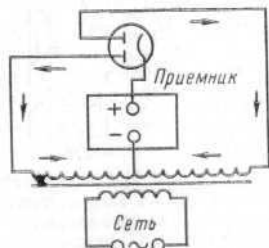


Рис. 106. Вместо двух диодов и двух трансформаторов, показанных на рис. 105, здесь используются двойной диод и трансформатор с отводом от средней точки.

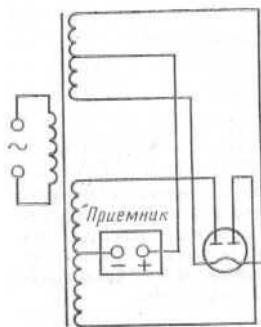


Рис. 107. Блок питания, в котором используется двойной диод с прямым накалом.

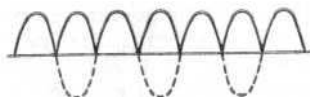


Рис. 108. Сплошной линией показан ток, являющийся результатом выпрямления обоих полупериодов напряжения. Пунктирной линией обозначены полупериоды напряжения, задержанные одним, но пропущенные другим диодом.

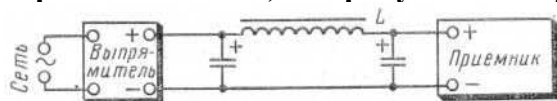


Рис. 109. Между выпрямителем и приемником установлено звено сглаживающего фильтра, состоящее из двух электролитических конденсаторов и катушки индуктивности L .

96

Для этой цели применяют фильтры, состоящие из катушки индуктивности, называемой дросселем, и конденсаторов (рис. 109).

Дроссель имеет стальной сердечник, называемый магнитопроводом, и обладает большой индуктивностью, которая препятствует нарастанию и убыванию тока в цепи и поэтому способствует сглаживанию пульсаций выпрямляемого тока.

Кроме того, чтобы уменьшить колебания тока, на выходе выпрямителя параллельно нагрузке включают конденсатор с большой емкостью между положительным и отрицательным полюсами

высокого напряжения. Конденсатор в момент нарастания тока заряжается, а когда ток в цепи уменьшается, отдает накопленный заряд, тем самым компенсируя уменьшение напряжения в цепи. Чем больше емкость конденсатора, тем больше и его заряд и, следовательно, тем лучше он сможет поддержать ток в цепи. Обычно включают два конденсатора: один до дросселя, а другой после него. Такая схема представляет собой *фильтрующее звено*. В некоторых случаях используют даже два таких звена, включая их последовательно.

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсаторы фильтра, как я тебе уже сказал, должны иметь большую емкость. Поэтому используют *электролитические конденсаторы*, емкость которых может достигать нескольких десятков микрофард. Какие конденсаторы называют электролитическими?

Это конденсаторы, у которых в качестве одной обкладки, подключаемой к положительному полюсу, используется алюминиевая пластина; ее поверхность увеличивается благодаря большому количеству небольших углублений. Второй обкладкой служит жидкий проводник или полужидкая паста. Все это помещается в цилиндрический металлический корпус, имеющий контакт с *электролитом*, выполняющим роль отрицательной обкладки. Когда между двумя обкладками прилагается напряжение, электролит разлагается и создает на поверхности алюминия тонкую пленку окиси алюминия толщиной около одного микрометра.

Ты, конечно, не забыл, что емкость конденсатора обратно пропорциональна толщине диэлектрика, разделяющего обкладки. И ты, несомненно, понимаешь, почему электролитические конденсаторы обладают такой большой емкостью.

Но увы, ничто не свободно от недостатков. Чрезвычайно малая толщина диэлектрического слоя увеличивает вероятность пробоя, если разность потенциалов между обкладками превысит некоторую величину. Величина рабочего напряжения указывается для каждого электролитического конденсатора. Если в цепи конденсатора напряжение превысит допустимый предел, то через слой окиси алюминия проскочит искра. Но не беспокойся, это не испортит конденсатора.

Как только напряжение снизится, слой диэлектрика восстановится. Обычные конденсаторы не обладают такой способностью к восстановлению. Вследствие чрезмерного напряжения искры пробивают твердый диэлектрик. Он обугливается и становится проводником; конденсатор выходит из строя.

Не забывай, Незнайкин, что в отличие от обычных конденсаторов электролитический обладает емкостью только при определенной полярности. Поэтому следует внимательно включать его в цепь в соответствии с указанной на нем полярностью.

97

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Теперь, когда мы рассмотрели устройство звеньев фильтра, вернемся к проблеме выпрямления тока. Я объяснил тебе способ выпрямления тока с помощью вакуумного диода. Однако уже давно для этой цели используют полупроводниковые выпрямители. Создавая контакт между чистой медью и окисью меди, носящей название купрокса, получают превосходный выпрямитель. В самом деле, при приложении к этим двум элементам переменного напряжения электроны свободно переходят только в направлении из меди в купрокс. Накладывая одну на другую пластины, состоящие из этих веществ, можно сделать выпрямители, которые будут пропускать ток тем больший, чем больше площадь этих пластин.

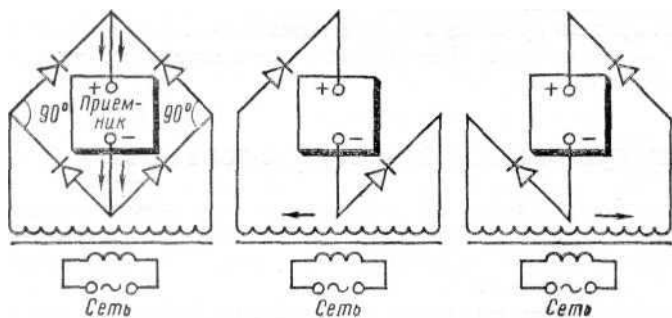


Рис. 110. Мостовая схема выпрямителя с четырьмя полупроводниковыми диодами. На среднем рисунке показано прохождение одного, а на правом — другого полупериода напряжения.

Весьма часто такие выпрямители монтируют по так называемой мостовой схеме (рис. 110). Как ты видишь, содержащая четыре выпрямителя схема имеет форму квадрата. К одной из диагоналей моста подводится переменное напряжение со вторичной обмотки трансформатора, а на концах другой диагонали получается выпрямленное высокое напряжение, которое подается на приемник.

На отдельных схемах я нарисовал для тебя путь тока при одном и при другом полупериодах. Обрати внимание на то, что, рисуя условное изображение выпрямителя, я сориентировал стрелки в направлении движения электрического тока.

В заключение скажу, что питание приемника от электрической сети не вызывает серьезных проблем. Трансформатор выдает ток накала для ламп; он же выдает высокое напряжение, которое выпрямляется, сглаживается и затем подается в анодные цепи приемника.

Надеюсь, что теперь я насытил твой голод знаний по вопросам питания.

- 0 -

98

БЕСЕДА ДЕВЯТАЯ

ЗАМИРАНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ

Как распространяются длинные, средние и короткие электромагнитные волны? Что вызывает изменение их мощности, которое сказывается на приеме и называется замиранием или федингом? Как преодолеть его влияние, чтобы получить постоянную громкость звучания приемника? Все эти вопросы рассматриваются в приведенной здесь беседе.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Незнайкин. — Твой дядюшка и ты, мой дорогой друг, объяснили мне, как устроены и как работают радиопередатчики и ламповые радиоприемники. А из того, что происходит в пространстве между ними, я знаю лишь, что радиоволны распространяются со скоростью света, т. е. 300 000 км/с. Ты не сказал мне, по какому пути они идут. Не проходят ли они через земной шар, что позволяет нам принимать коротковолновые передатчики, расположенные по ту сторону Земли?

Любознайкин. — Нет, Незнайкин. Волны не проходят сквозь землю. Все то, что хотя бы в небольшой степени является проводником электричества — земная кора как раз относится к этому случаю — поглощает волны или в лучшем случае отражает их. Отражение происходит, если волны падают на проводящий слой под относительно небольшим углом.

Характер распространения зависит в основном от частоты передаваемых сигналов. Длинные волны (ДВ) распространяются вдоль поверхности земного шара. Встречая на своем пути проводники, они теряют энергию. Это означает, что дальность действия ДВ передатчиков ограничена.

Н. — В самом деле, я хорошо принимаю ДВ передатчики из соседних стран, например из Люксембурга или Лондона, но мне никогда не удавалось принять станции из более удаленных городов. Вместе с тем я принимаю средние волны (СВ) на значительно больших расстояниях, особенно с наступлением ночи. Что же касается коротких волн (КВ), то они приходят ко мне со всего света. Я предполагаю, что у них траектория более гибкая, чем у ДВ, что легко позволяет им обогнуть половину земного шара.

Л. — Твое предположение неправильное. Чем короче волны, тем более прямолинейно они распространяются. Вспомни, Незнайкин, о распространении таких сверхультракоротких волн, как световые. Можно ли себе представить что-нибудь более прямое, чем луч света?.

99

И.— Тогда я совершенно не понимаю, как, несмотря на кривизну земной поверхности, нам удастся принимать КВ, приходящие даже с другой стороны Земли. Если эти волны действительно распространяются по прямой линии, они должны затеряться во внеземном пространстве.

ВОКРУГ ЗЕМЛИ И В КОСМОСЕ

Л. — Действительно, имеются волны, проникающие в космическое пространство. Именно с их помощью устанавливают связь с космонавтами, которые летят в своих кораблях, прогуливаются по Луне или по более далекой планете.

Вернемся, однако, на Землю, как это делают и радиоволны. А они это делают, потому что на высотах от 100 до 125 км они отражаются проводящим электричеством слоем атмосферы. Это слой *ионосферы*, состоящей из воздуха, ионизированного воздействием ультрафиолетовых лучей солнца. А ты знаешь, что ионизация делает вещество проводником.

Н.— Следовательно, после отражения в ионосфере средние и короткие волны вновь падают на Землю. Однако теперь я не понимаю, как можно установить космическую связь, о которой ты только что упомянул.

Л.— Все зависит от угла, под которым волны входят в ионосферу. Если он превышает некоторую величину, волны проникают в ионосферу, проходят сквозь нее и затем свободно распространяются в космическом пространстве. И наоборот, если угол меньше некоторой предельной величины, волна под этим же углом отражается к Земле,

Н.— И она поглощается поверхностью земного шара?

Л. — Не обязательно. В зависимости от угла между волнами и земной поверхностью последняя также способна отражать волны. Таким образом, волны могут совершать несколько путешествий туда и обратно между ионосферой и Землей, что позволяет им пройти очень далеко и даже обогнуть весь наш земной шар.

Н. — Теперь я понимаю, как принимают передачи очень далеких станций. Однако громкость звучания таких передач временами изменяется. Не является ли это результатом того, что волны не всегда хорошо отражаются ионосферой?



Рис. 111. Волна передатчика *А* доходит до приемника *Б* двумя разными путями: прямо и после отражения в верхних слоях атмосферы от ионизированного слоя воздуха.

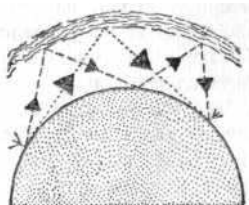


Рис. 112. Одновременный прием двух волн, исходящих из одного передатчика, но отраженных неодинаковое количество раз в ионосфере (здесь 1 и 2 раза).

100

Л. — Эти изменения громкости называются «фединг», что означает замирание. А вызывается это явление тем, что одновременно принимаются волны, излучаемые одним и тем же передатчиком, но доходящие до приемника по различным путям. Примером может служить случай приема прямой и отраженной волн, что часто случается при приеме СВ. Эти волны способны огибать часть поверхности земного шара, если передатчик имеет достаточно большую мощность. На некотором расстоянии принимают одновременно прямую волну и волну, отраженную ионосферой. Пройденное ими расстояние неодинаково; отраженная волна проделала путь значительно больший, чем прямая (рис. 111).

Н. — Прости, что перебиваю тебя, но мне кажется, что теперь я понимаю причины замирания. Когда волны приходят на приемную антенну в фазе, все идет хорошо. Наводимые ими токи складываются, и прием происходит хорошо. Однако, если отраженная и прямая волны оказываются не в фазе, наводимые в антенне токи мешают друг другу. А если волны находятся явно в лротивофазе, токи взаимно уничтожаются. Не в этом ли кроется причина замирания?

Л. — Ты превосходно уяснил эту причину.

Н. — Однако не вижу, как происходит замирание на КВ, излучаемых очень далекими передатчиками. Ты сказал, что эти волны не способны огибать поверхность земного шара. В этом случае мы принимаем только отраженные волны. И я напрасно ломал себе голову — я не вижу, что здесь может вызывать замирание.

Л.— Причина кроется в одновременном приеме волн, которые отразились между ионосферой и Землей разное количество раз (рис. 112).

Н. — Понял, но как объяснить характеризующие замирание изменения? Разве длина пути, проходимого отраженными волнами, изменяется?

Л.— И еще как! Не нужно думать, что ионосфера похожа на твердое зеркало. Она колеблется, ее высота изменяется в зависимости от направления солнечных лучей, а ее поверхность далеко не однородна. Вот почему сдвиг по фазе принимаемых одновременно волн тоже быстро или медленно изменяется.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ

Н. — У меня возник вопрос, нельзя ли во избежание неприятного явления замирания воспользоваться направленным приемом?

Л.— Это, несомненно, возможно. И для установления постоянной связи между двумя точками на земном шаре применяют направленные антенны как при передаче, так и при приеме. Однако в радиовещании такой способ рекомендовать нельзя. Для того чтобы радиостанцию могли принимать повсюду, передающая антенна не должна посылать свои волны только в одном

101

направлении. А приемник для легкой перестройки с одной станции на другую тоже не может оснащаться антенной направленного действия.

Н. — Иначе говоря, мы должны терпеть замирания, так как воспрепятствовать им не можем?

Л.— Успокойся, Незнайкин. Все приемники оснащены *антифединговым устройством*, которое называется также *автоматической регулировкой усиления* (АРУ). Это устройство позволяет избежать воздействия замирания на громкость звучания громкоговорителя. АРУ изменяет чувствительность приемника, уменьшая ее при увеличении мощности принимаемых волн и повышая, когда замирание ослабляет принимаемые волны.

Н.— Как я понял, это устройство воздействует на лампы в У ВЧ и УПЧ, от которых зависит чувствительность приемника? И если это так, то воздействует ли оно на характеристики ламп?

Л. — На оба твоих вопроса я отвечаю утвердительно. Да, устройство воздействует на усиление этих ламп. Величина же усиления в основном зависит от крутизны. Поэтому для достижения поставленной цели применяют лампы с *переменной крутизной*.

ПЕРЕМЕННАЯ КРУТИЗНА

Н. — Как же можно изменять крутизну? Ведь ты объяснил мне, что на сетки ламп подается такое смещение, чтобы рабочая точка лампы находилась на прямолинейном участке кривой, характеризующей изменение анодного тока в зависимости от потенциала сетки. А я знаю, что, если рабочая точка расположена на нижнем изгибе характеристики, лампа совершенно не усиливает, а детектирует.

Л. — Все это, мой дорогой друг, правильно, когда мы имеем дело с лампами, обладающими прямолинейной характеристикой, о чем ты только что сказал. А для обеспечения АРУ используют лампы с переменной крутизной. Кривая... есть кривая.

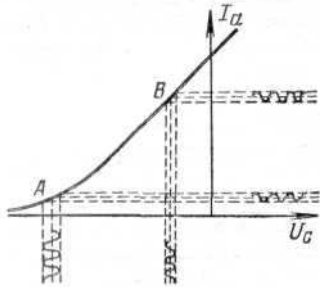


Рис. 113. Характеристика с переменной крутизной позволяет при разных амплитудах напряжения на сетке получить одинаковые амплитуды анодного тока. Для этого перемещают рабочую точку, изменяя потенциал сетки.

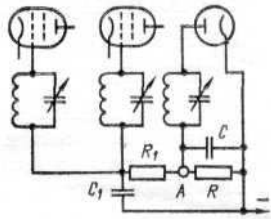


Рис. 114. Напряжение АРУ, снимаемое с резистора R нагрузки детектора, после прохождения через фильтр R_1C_1 подается на сетки обеих ламп УВЧ.

102

Как ты видишь, по мере того как отрицательный потенциал рабочей точки становится меньше, крутизна повышается. В точке B она выше, чем в точке A (рис. 113). Кривизна характеристики, однако, очень плавная, в результате чего небольшой участок этой кривой практически не отличается от отрезка прямой линии. Следовательно, колебания с малой амплитудой напряжения U_c не способны вызвать искажений анодного тока.

Н. — Так вот в чем дело! Благодаря рисунку, который ты мне показал, я понял, что происходит. В точке A с малой крутизой ты прилагаешь напряжение с большей амплитудой, чем в точке B , где крутизна выше. И оба напряжения на сетке порождают колебания анодного тока с одинаковыми амплитудами. Я предполагаю, что проблема решается путем перемещения рабочей точки в зависимости от амплитуды колебаний, поступающих на вход приемника. Чем слабее эти колебания, тем сильнее они сдвигают рабочую точку вправо, чтобы более высокая крутизна обеспечила лучшее усиление.

Л. — Именно это происходит в лампах с переменной крутизой.

Н. — Подведем итоги: чем мощнее принимаемые волны, тем большее отрицательное напряжение нужно подать на сетку ламп УВЧ и УПЧ. Как это осуществляется системой АРУ?

НАПРЯЖЕНИЕ АРУ

Л. — Очень просто. Для этого используют напряжение, полученное после диода детектора. Это напряжение пропорционально амплитуде колебаний, принимаемых антенной. Напряжение АРУ,

подаваемое на сетки предшествующих детектору ламп, снимается с резистора R , по которому протекает продетектированный ток (рис. 114).

Н. — Но, мой дорогой Любознайкин, то, что ты делаешь, просто безумие! В точке A мы имеем продетектированное напряжение, т. е. напряжение НЧ. Ты же не станешь устраивать своеобразную обратную связь, я бы даже сказал отрицательную обратную связь, прилагая напряжения НЧ к сеткам ламп, стоящим перед детектором.

Л. — Успокойся Незнайкин. К названным тобою сеткам это напряжение НЧ непосредственно не прикладывается. На своем пути оно проходит через резистор R_1 с высоким сопротивлением, который препятствует прохождению быстро изменяющихся напряжений. А те из них, которым все же удастся пройти через резистор, конденсатором C_1 с большой емкостью возвращаются на катод диода — детектора.

Н. — Цепочка R_1C_1 сейчас напоминает мне звено сглаживающего фильтра. Теперь-то я понимаю, что на сетки ламп с переменной крутизной подаются не напряжения НЧ, а только отрицательные потенциалы, изменяющиеся в зависимости от наведенного в антенне сигнала. Чем мощнее принимаемые волны, тем больше становится отрицательное напряжение, подаваемое на сетки ламп с переменной крутизной, что снижает чувствительность приемника. Так, несмотря на замирание, громкость звучания может удерживаться на одном уровне.

103

ЗАДЕРЖАННАЯ АРУ

Л. — Я вижу, что ты хорошо понял принцип действия системы АРУ. Мне остается лишь добавить, что часто используют лампу, содержащую два диода с общим катодом. Один из диодов служит для детектирования сигнала, т. е. выделения колебаний НЧ, другой — детектирует колебания для создания напряжения АРУ, которое подается на сетки ламп УВЧ и УПЧ (рис. 115). Такое разделение функций позволяет создать *задержанную АРУ*, регулирующее действие которой начинается только после того, как мощность принимаемых волн превысит некоторую величину. Если мощность меньше этой величины, снижения чувствительности приемника не происходит. В отсутствие напряжения АРУ приемник работает с максимальной чувствительностью.

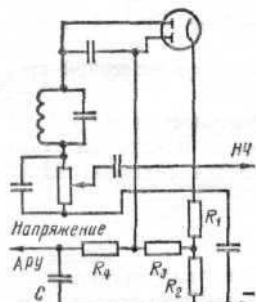


Рис. 115. Использование двойного диода позволяет разделить функции детектора и автоматической регулировки усиления и сделать последнюю задержанной, что повышает чувствительность приемника.

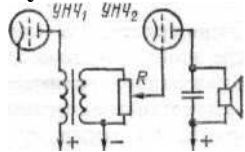


Рис. 116. Потенциометр R позволяет регулировать громкость звука приемника.

Задержанная АРУ осуществляется путем подачи отрицательного напряжения на анод диода, служащего для создания напряжения АРУ. Причем АРУ начинает действовать тогда, когда подаваемые на этот диод колебания по своей амплитуде превосходят отрицательное напряжение на аноде.

РУЧНАЯ РЕГУЛИРОВКА ГРОМКОСТИ ЗВУКА

Н.— Ты очень понятно объяснил мне действие системы АРУ, поддерживающей постоянной громкость звучания приемника несмотря на воздействия изменений мощности электромагнитных волн. Могу ли я теперь спросить тебя, каким образом регулируют громкость звука, чтобы не досаждают соседям?

Л. — Эта регулировка осуществляется после детектирования с помощью потенциометра, позволяющего передавать на следующий каскад УНЧ большую или меньшую часть получаемого напряжения.

На схеме, которую я нарисовал тебе для объяснения задержанной АРУ, ты видишь такой потенциометр R , включенный в цепь детектора. Его также можно установить между первым и Вторым каскадами УНЧ (рис. 116).

104

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Прежде всего он напоминает физические основы электричества и строение проводников, полупроводников и диэлектриков. Затем он объясняет характеристики полупроводников типов n и p и поведение перехода между ними в зависимости от полярности и величины прикладываемых напряжений.

Мои дорогие друзья, вы сделали почти полный обзор различных радиотехнических схем на лампах. Единственное, что вы не рассмотрели, это частотную модуляцию. Я полагаю, что позднее мы изучим и это.

Теперь пора приступить к обширной области полупроводниковых приборов.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Преимущество этих приборов в первую очередь в том, что они работают при напряжениях значительно более низких, чем лампы. На анод ламп необходимо подавать напряжение 100 В и более. Транзистор же довольствуется напряжением ниже 10 В, которое он получает от небольшой батареи. Еще более важно то, что транзистор не требует накала, столь необходимого для ламп.

По сравнению с лампами полупроводниковые приборы обладают высокой *надежностью*: срок их службы значительно больше.

Транзисторы также не столь прожорливы по сравнению с лампами: они довольствуются мощностью в сотню раз меньше той, которую потребляют электронные лампы.

И наконец использование полупроводников позволило осуществить *миниатюризацию* и, я бы сказал даже, *микроминиатюризацию* электронного оборудования. В самом деле, объем транзисторов и других полупроводниковых приборов можно сделать очень маленьким. Стало возможным создание *интегральных схем*, представляющих собой комбинацию нескольких полупроводниковых приборов с резисторами и конденсаторами, где каждый из этих элементов имеет микроскопические размеры.

ПРОВОДНИКИ, ДИЭЛЕКТРИКИ И ПОЛУПРОВОДНИКИ

О микроэлектронике мы поговорим позднее. Сегодня же я хочу изложить тебе основы полупроводниковой электроники. Я надеюсь, Незнайкин, что ты ничего не забыл из моих объяснений о строении вещества. Я напомню тебе, что атом нейтрален, когда он имеет электронов столько же, сколько и протонов. Если количество электронов больше количества протонов, то он отрицательный. При обратном соотношении атом положительный.

Перемещаться могут лишь те электроны, которые находятся на внешней оболочке атома. Если эта оболочка в нормальных условиях содержит меньше четырех электронов, то они способны покинуть

ее; в частности, их могут увлечь другие атомы, заряженные положительно. Поэтому вещества, атомы которых имеют на внешней оболочке меньше четырех электронов, представляют собой *проводники*. Высвобожденные электроны и образуют электрический ток.

Когда электрон покидает нейтральный атом, последний ионизируется положительно. Если внешняя оболочка содержит более четырех электронов, то они

105

упорно отказываются ее покинуть. Вещество, не располагающее свободными электронами, представляет собой *диэлектрик*.

Наконец, существуют такие вещества, как кремний или германий, атомы которых имеют на внешней оболочке по четыре электрона. Это и не проводники, и не диэлектрики; такие вещества называют *полупроводниками*. Это название хорошо оправдано удельным электрическим сопротивлением этих веществ. Я напому тебе, что этот термин обозначает сопротивление кубика вещества с ребром длиной 1 см.

Удельное электрическое сопротивление проводников составляет $(1 \text{ — } 100) \times 10^{-6}$ Ом. У полупроводников этот показатель находится в пределах от 0,01 до 1000 Ом, а у диэлектриков — от 10 до 10^6 МОм (удельное электрическое сопротивление кварца). Как видишь, полупроводники занимают место между проводниками и диэлектриками.

СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

На чем основана *собственная проводимость* полупроводников? Очень просто, на тепловом движении их атомов. Молекулы находятся в беспорядочном движении, которое по мере повышения температуры усиливается. Так, в германии при температуре окружающей среды $+ 22^\circ\text{C}$ под воздействием движения молекул освобождаются два электрона на один миллиард атомов. Это, разумеется, не очень много, но вспомни, что 1 мг германия содержит 10^{26} атомов. Это означает, что в этом количестве содержится два миллиарда свободных электронов, создающих очень слабый ток, имеющий величину 10^{-9} А. С повышением температуры полупроводника этот ток усиливается. Этого, однако, следует избегать, потому что, как сейчас увидим, в полупроводниковых приборах используется не собственная проводимость, создаваемая тепловым движением. И в этом кроется причина более частого использования кремния, который менее германия чувствителен к повышению температуры: удельное электрическое сопротивление кремния изменяется значительно меньше, чем у германия.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Можно также повысить проводимость полупроводников, подвергая их атомы воздействию *фотонов*. Что такое фотон? Это частица света. По теории Луи де Бройля, световые лучи состоят одновременно из этих частиц и электро-

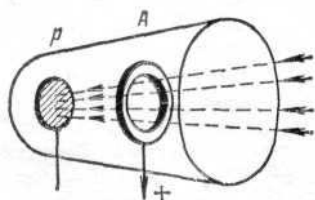


Рис. 117. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом, состоящий из светочувствительного полупроводника *p* и электрода *A*, которому сообщен положительный потенциал.

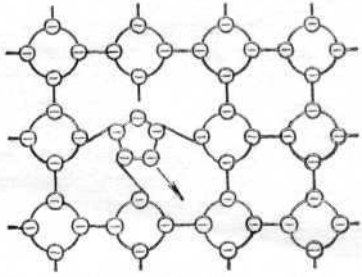


Рис. 118. В кристаллической структуре, состоящей из атомов с четырьмя электронами, присутствует посторонний атом с пятью электронами.

106

магнитных волн. Направь свет на пластинку селена и ты увидишь, что удельное электрическое сопротивление этого полупроводника снизится. Происходит это потому, что фотоны, сталкиваясь с атомами, вырывают периферийные электроны и делают их свободными, что вызывает движение электрического тока.

Так устроены *фоторезисторы*, служащие для преобразования световых колебаний в электрические сигналы. На их основе были созданы первые устройства для передачи изображений. Впоследствии удалось получать свободные электроны, выбивая их ударами фотонов с поверхности полупроводников, в частности кадмия. На этом принципе основаны фотоэлементы: полупроводниковые элементы помещают в вакуум, и высвобожденные электроны притягиваются с помощью положительного электрода (рис. 117). Эта конструкция, очевидно, напоминает тебе устройство диода.

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Однако при использовании полупроводников главную роль играет не тепловое движение и не фотоэлектрический эффект, а наличие некоторых *примесей*. Очень малые количества инородных веществ, например 1 атом примеси на 10 миллионов собственных атомов полупроводников, полностью изменяют поведение последних.

Рассмотрим случай с пентавалентными примесями, т. е. состоящими из атомов, у которых на внешней оболочке имеется пять электронов. К этой группе, в частности, относятся мышьяк и сурьма. Вспомни кристаллическую структуру полупроводников, где каждый из четырех периферийных электронов устанавливает связь с соседними атомами. Наличие одного постороннего атома с пятью периферийными электронами разрушает безупречный порядок структуры (рис. 118). Четыре электрона вступают в валентные связи с соседними атомами. А что станет делать пятый? Так вот, он становится свободным. Атом с таким электроном рассматривается как *донор*. А полупроводник считается *типом n*, т. е. отрицательным. Если к такому полупроводнику приложить разность потенциалов, то положительный полюс притянет свободные электроны и через полупроводник потечет ток. При этом отрицательный полюс источника будет отдавать электроны.

Самый любопытный факт заключается в том, что в этом отрицательном полупроводнике атомы примеси становятся положительными. В самом деле, уход пятого периферийного электрона нарушает нейтралитет атома и делает его положительным. На месте этого электрона образуется *дырка*, которую может заполнить другой электрон.

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Посмотрим теперь, что происходит при введении в полупроводник трехвалентных примесей, таких, как алюминий или галлий, атомы которых имеют на внешней оболочке три электрона. Такой атом, попав в кристаллическую решетку из атомов, имеющих по четыре периферийных электрона, устанавливает валентные связи с тремя соседними атомами. Но четвертый атом тоже хочет быть с ним в связи, чтобы сохранить нормальную структуру кристалла. Поэтому он всячески стремится направить к нему один из своих периферийных электронов. Теперь он становится положительным,

так как отсутствие этого электрона образует дырку, пустоту. И он стремится заполнить ее, притягивая электрон от другого соседнего атома (рис. 119).

107

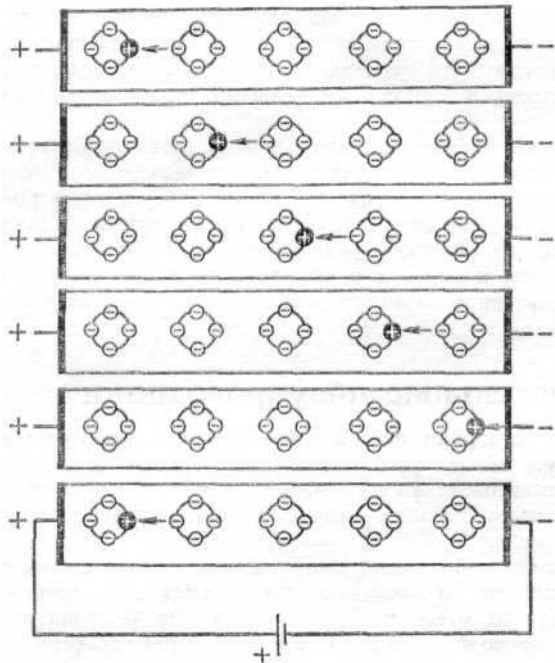


Рис. 119. В положительном полупроводнике дырка примесного трехвалентного атома заполнена электроном, пришедшим с отрицательной стороны. Это вновь создает дырку, которая в свою очередь заполняется электроном, приходящим с соседнего атома, и т. д. На рисунке показаны последовательные фазы этого перемещения электронов, которые направляются к положительному полюсу, и дырки (представляющие собой положительный заряд), которые перемещаются к отрицательному полюсу.

⊖ Электрон

⊕ Дырка

⊕ Ионизированный донор

△ Ионизированный акцептор

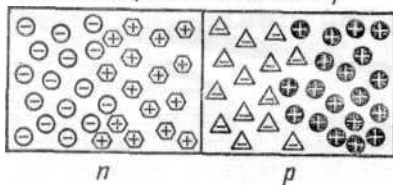


Рис. 120. Переход между полупроводниками типов n и p . Внимание привлекает возросшая плотность ионизированных атомов вблизи перехода. Они отталкивают дырки и электроны,

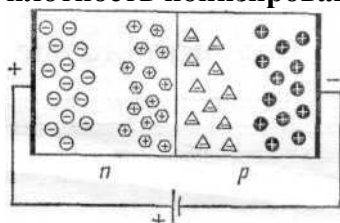


Рис. 121. Прилагая к n - p переходу обратное напряжение, лишь оттягивают электроны к положительному полюсу, а дырки — к отрицательному: никакой ток тут пройти не может.

Необходимо отметить, что все эти перемещения электронов происходят при приложении к полупроводнику разности потенциалов. В этот момент дырка в трехвалентном атоме заполняется электроном, пришедшим со стороны, в которой проложен отрицательный потенциал. В результате электрон приблизился к положительному концу полупроводника. Но в это же время дырка образовалась в соседнем атоме, расположенном ближе к отрицательному концу полупроводника. С этой стороны приходит другой электрон заполнить новую дырку, что приведет к возникновению дырки еще ближе к отрицательному концу полупроводника, и т. д.

Как видишь, благодаря трехвалентным примесям дырки, т. е. положительные заряды, перемещаются от положительного полюса к отрицательному, тогда как электроны движутся в обратном направлении. Такой полупроводник относится к типу p (положительному), а явление, столь же парадоксальное, как и в полупроводнике типа n , заключается в том, что атомы примеси становятся отрицательными, когда дополнительный электрон занимает место на их внешней оболочке. Эти атомы в отличие от доноров пятивалентных примесей называются *акцепторами*,

N - P ПЕРЕХОД

Посмотрим теперь, что произойдет, если плотно соединить два полупроводника противоположных типов (рис. 120). Изменит ли образовавшийся n - p переход распределение зарядов внутри каждого из соединенных таким образом полупроводников?

Ты догадываешься, что атомы-доноры зоны n , ионизированные положительно, притянут атомы-акцепторы зоны p , ионизированные отрицательно. В результате по обе стороны перехода увеличится плотность ионизированных атомов. Но если заряды противоположной полярности притягиваются, то заряды одинаковой полярности отталкиваются. Следовательно, положительные ионы, которые сгруппировались около перехода в зоне n , оттолкнут положительные дырки зоны p . Что же касается отрицательно ионизированных атомов, то, сгруппировавшись у перехода в зоне p , они оттолкнут свободные электроны в зоне n .

Итак, соединение двух полупроводников противоположных типов вызвало в каждом из них перемещение свободных электронов, не изменив при этом общего заряда, который остается равным нулю. В самом деле, как в полупроводнике n , так и в полупроводнике p положительные заряды имеют такую же величину, как и отрицательные.

НАПРЯЖЕНИЕ ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

А теперь приложим к полупроводниковому n - p переходу напряжение, подключив положительный полюс источника к зоне n , а отрицательный полюс — к зоне p (рис. 121). Что же произойдет?

Положительный потенциал, приложенный к зоне n , еще больше притянет свободные электроны, которые уже имели наибольшую плотность на этом конце, и оттолкнет положительные ионы, еще больше увеличив их плотность у перехода. В это же время отрицательный потенциал, приложенный к зоне p , притянет атомы-дырки, собравшиеся на этой стороне, и оттолкнет к переходу еще большее количество отрицательно ионизированных атомов.

Как видишь, ток через переход практически не протекает. Вследствие приложения к переходу напряжения увеличилась плотность ионизированных атомов, положительных атомов-дырок и свободных электронов.

НАПРЯЖЕНИЕ ПРЯМОЙ ПОЛЯРНОСТИ

А теперь посмотрим, что произойдет, если мы приложим напряжение в соответствии с полярностью полупроводника: положительный полюс источника к зоне p , а отрицательный — к зоне n (рис. 122). Отрицательный потенциал оттолкнет свободные электроны в полупроводнике n к переходу, который

они свободно преодолеют благодаря притяжению положительным полюсом источника. Со своей стороны, положительный потенциал оттолкнет положительные атомы-дырки через переход в зону n .

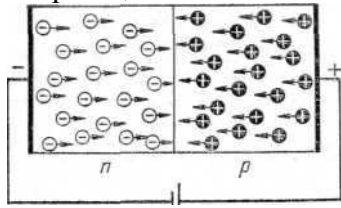


Рис. 122. Здесь напряжение приложено в прямом направлении: положительный полюс соединен с зоной p , а отрицательный — с зоной n . В этом случае ток проходит через переход.



Рис. 123. Условное графическое изображение полупроводникового диода.

Если ты желаешь получить более подробное объяснение, я скажу, что положительный полюс притянет и поглотит электрон зоны p каждый раз, когда свободный электрон преодолет n - p переход. Образовавшаяся таким образом дырка в атоме, расположенном близко к концу зоны p , будет заполнена электроном, приходящим с атома, расположенного ближе к переходу, а образовавшаяся в результате ухода этого электрона дырка, в свою очередь, будет заполнена электроном, пришедшим с атома, расположенного еще ближе к переходу, и т. д. Этим и объясняется движение дырок через переход из зоны p в зону n , тогда как электроны преодолевают переход в обратном направлении.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

Итак, ты видишь, что n - p переход пропускает ток в одном направлении и препятствует его прохождению в противоположном направлении. Это означает, что полупроводниковый n - p переход представляет собой диод, аналогичный вакуумному диоду. Вот почему n - p переход называется *полупроводниковым диодом* (рис. 123). Он выгодно заменяет вакуумный диод во всех случаях его применения. Иначе говоря, он может служить детектором, а также выпрямителем переменного тока для питания электронных устройств. И, как ты видишь, здесь не нужно заботиться о накале, как в случае использования электронных ламп. В то же время обращение с полупроводниковым диодом требует осторожности, так как приложенное в непроводящем направлении напряжение не должно превышать некоторого предела. Выше этой величины создаваемый переходом *потенциальный барьер* разрушится, в результате чего диод выйдет из строя.

А теперь, когда я объяснил основные понятия, относящиеся к полупроводникам, и, в частности, поведение n - p перехода, я думаю, что ты, Любознайкин, можешь смело начать объяснять Незнайкину принцип работы и использования транзистора.

110

БЕСЕДА ДЕСЯТАЯ

ТРАНЗИСТОР

Здесь рассматриваются основные вопросы, относящиеся к транзисторам: их конструкция, способ питания, прохождение токов во входной и выходной цепях, схема усилительного каскада, изменение тока коллектора в зависимости от приложенного на вход напряжения, входное сопротивление транзистора и рассеиваемая на нем мощность.

НЕПОДВИЖНОСТЬ АТОМОВ

Незнайкин. — Мне представляется очень сложным строение этих полупроводников, которые вместе со своими трехвалентными и пятивалентными примесями образуют положительные и отрицательные зоны n - p перехода. Необходимо учитывать атомы примесей, ионизированные положительно и отрицательно, атомы самого полупроводника, которые, потеряв электрон, стали положительными дырками, и, наконец, свободные электроны. При приложении напряжения, порождающего электрический ток, начинается сложное движение этих частиц.

Любознайкин. — Успокойся, дорогой друг. В действительности прохождение тока не вызывает практически никакого перемещения атомов. Двигутся только электроны, как это происходит в проводниках. Не забывай, что атомы наших полупроводников образуют кристаллическую решетку и поэтому прочно закреплены на своих местах.

Н. — Тогда я не понимаю, что сказал мне твой дядюшка, когда объяснял, как на *n-p* переходах изменяется плотность ионизированных атомов акцепторов и доноров в зависимости от того, находятся ли они ближе к переходу или дальше от него. Как может изменяться плотность, если эти атомы не движутся?

Л.— Очень просто, благодаря перемещению электронов, которые покидают большее или меньшее количество атомов-доноров, расположенных в одном месте, чтобы занять место на внешней оболочке атомов-акцепторов, расположенных в другом месте. И когда мы говорим, что дырка (т. е. атом, ставший положительным из-за недостатка одного электрона) перемещается от положительного полюса к отрицательному, то на самом деле речь идет не о перемещении атома, а о последовательной цепочке перемещений электронов от одного атома к другому, расположенному ближе к положительному полюсу. Таким образом, дырка образуется на одном атоме, затем на соседнем с ним, расположенном ближе к отрицательному полюсу, затем на соседнем уже с этим и т. д. в направлении к отрицательному полюсу.

Н.— Ты меня успокоил, Любознайкин. Значит, действительно перемещаются только электроны. И благодаря движению элект-

111

ронов изменяются заряды некоторых атомов, которые перестают быть нейтральными и становятся положительными, если они теряют электрон, или отрицательными, если они получают лишний электрон.

ПЕРЕХОД + ПЕРЕХОД = ТРАНЗИСТОР

Л.— С удовольствием отмечаю, что ты хорошо усвоил, что происходит на переходе. Это позволяет мне соединить два перехода, чтобы получить *транзистор*.

Н. — Я не очень хорошо представляю, как ты соединишь два перехода.

Л. — Это несложно. Возьми два противоположно направленных перехода, например *p-n* переход и *n-p* переход, и сделай общей их зону *n*. Таким образом получишь транзистор типа *p-n-p*. Средняя часть, в данном случае зона *k*, должна быть очень тонкой. Она называется *базой*. Одна из крайних зон *p* называется *эмиттером*, а другая — *коллектором*.

Н. — Очень красивые названия. Однако, на мой взгляд, конструкция лишена какого бы то ни было смысла. Твой транзистор представляет превосходное препятствие для прохождения тока. Ты установил два диода, включив их в противоположных направлениях. Каждый из них пропускает ток только в одном направлении. А при таком расположении направления проводимости диодов ориентированы в разные стороны (рис. 124). Ты можешь сколько угодно прилагать между своими эмиттером и коллектором отрицательно-положительный или положительно-отрицательный потенциал, все равно тока не будет.

ТРАНЗИСТОР P-N-P

Л.— Совершенно с тобой согласен. Но посмотрим, что произойдет, если одновременно приложить еще одно напряжение между базой и эмиттером. Подключим батарею напряжением в несколько вольт положительным полюсом к эмиттеру, а отрицательным — к коллектору. Возьмем другую батарею с еще более низким напряжением и подключим ее между эмиттером, с которым соединим положительный полюс, и базой, с которой соединим отрицательный полюс (рис. 125). Что же теперь произойдет, Незнайкин?

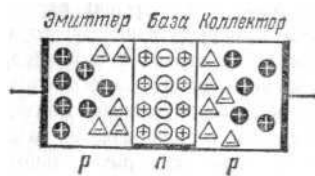


Рис. 124. Распределение электронов, дырок и ионизированных атомов во всех трех зонах транзистора до приложения к нему напряжения.

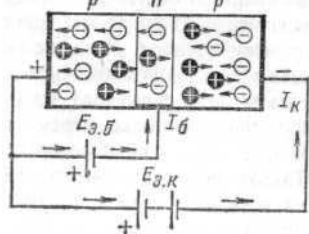


Рис. 125. Движение носителей зарядов в транзисторе типа *p-n-p* под воздействием напряжений.
112

Н. — Ток потечет от эмиттера к базе, так как вторая батарея включена так, что электроны могут проходить через *p-n* переход. Но я не вижу, что может дать батарея, включенная между эмиттером и коллектором.

Л. — Будучи заряженной отрицательно, база притянет из эмиттера немалое количество положительных дырок. Небольшая часть этих дырок пойдет к отрицательному полюсу батареи, пройдет через нее и через другой полюс вернется в эмиттер, тогда как в противоположном направлении будут двигаться электроны. Это образует небольшой ток I_b (эмиттер — база).

Но не забывай, что база очень тонкая. Поэтому основная часть положительных дырок, которые проникли в базу из эмиттера, продолжит свой путь и войдет в коллектор. А эта зона, будучи заряженной отрицательно, как раз и притянет эти дырки, которые, как ты, вероятно, помнишь, представляют собой положительные заряды.

П. — Теперь я понимаю, что небольшой ток I_b порождает больший ток, протекающий от эмиттера через базу к коллектору.

Л. — Действительно, ток базы I_b обычно не превышает нескольких десятков или сотен микроампер, тогда как ток коллектора I_k достигает нескольких миллиампер или даже нескольких десятков миллиампер. А в мощных транзисторах он еще больше. Но прежде чем рассматривать его цифровые значения, я хотел бы посмотреть, не сможешь ли ты сам проанализировать работу транзистора *n-p-n*, имеющего обратные полярности по сравнению с только что изученным нами транзистором *p-n-p*.

ТРАНЗИСТОР *N-P-N*

Н. — Попытаюсь. В отсутствие напряжения эмиттер из полупроводника типа *n* будет иметь больше свободных электронов на своем свободном конце, тогда как на стороне перехода с базой выше будет плотность положительных ионов. Поэтому в самой базе поблизости от этого перехода будут преобладать отрицательные ионы. На переходе между базой и коллектором заряды будут располагаться симметрично. В середине же базы будут преобладать дырки, так как у расположенных там атомов электроны сорваны атомами, находящимися около обоих переходов (рис. 126).

Л. — Все это совершенно верно. Я вижу, что ты хорошо знаешь распределение различных зарядов на переходах. А теперь доставь мне удовольствие, приложив напряжения на все три электрода транзистора.

Н. — Отрицательный полюс батареи я соединяю с эмиттером, а положительный — с коллектором. Еще меньшее напряжение другой батареи я прилагаю положительным полюсом к базе, а отрицательным — к эмиттеру (рис. 127).

Л. — Что же произойдет?

Н. — Напряжение между эмиттером и базой и в этом случае приложено в проводящем направлении. Значит, свободные электроны устремятся от эмиттера к базе. Некоторые из них пойдут к положительному полюсу источника питания, пройдут

113

через него и вернуться к эмиттеру. Они определяют ток базы. Но и здесь он будет малым. Вследствие исключительно малой толщины базы основная часть электронов, устремляющихся от эмиттера в базу, преодолет и второй переход; это облегчается тем, что они притягиваются положительным потенциалом, приложенным к коллектору. Они войдут в коллектор, покинут его и направятся к положительному полюсу батареи $E_{э.к.}$, чтобы, пройдя через нее, вернуться, наконец, к эмиттеру.

Л. — Bravo, Незнайкин! Ты мог бы еще добавить, что в это же время положительные дырки, которые до приложения напряжения находились в середине базы, устремятся к эмиттеру, притягиваемые его отрицательным потенциалом.

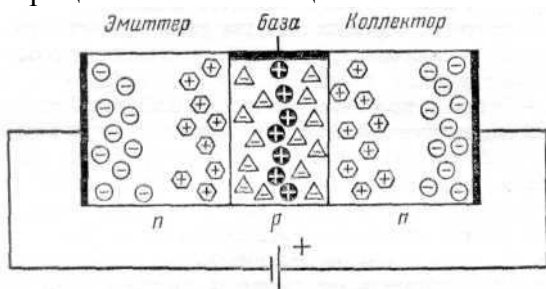


Рис. 126. Транзистор типа *n-p-n*.

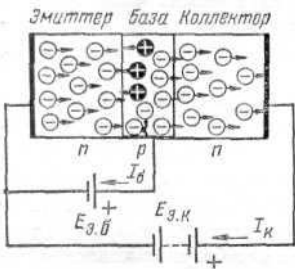


Рис. 127. Притягивая электроны от эмиттера к базе, напряжение источника $E_{э.б.}$ открывает им путь в коллектор.

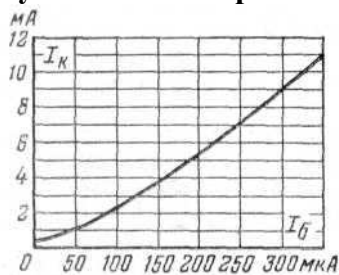


Рис. 128. Кривая напряжения тока коллектора $I_{к.}$ в зависимости от изменения тока базы $I_{б.}$

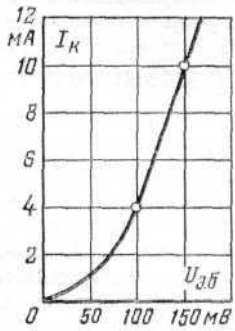


Рис. 129. Изменение тока коллектора I_K в зависимости от изменения напряжения $U_{э,б}$, приложенного между эмиттером и базой.

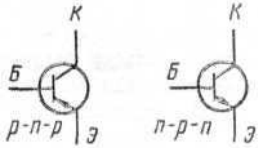


Рис. 130. Условные графические обозначения транзисторов.

114

АНАЛОГИЯ ТРАНЗИСТОР — ТРИОД

Н. — Как изменяется ток коллектора в зависимости от изменения тока базы?

Л. — Можно сказать, что I_K практически пропорционален I_B . Кривая, которую я тебе показываю, представляет собой почти прямую линию (рис. 128). Как видишь, когда ток базы увеличивается на 100 мкА, ток коллектора возрастает на 3 мА, т. е. в 30 раз больше. Однако еще большее впечатление производят кривые, показывающие изменение тока коллектора I_K в зависимости от изменения напряжения эмиттер - база $U_{э,б}$ (рис. 129). На кривой, которую я для тебя начертил, видно, что, когда напряжение $U_{э,б}$ увеличивается со 100 до 150 мВ, ток I_K повышается с 4 до 10 мА. Иначе говоря, при изменении напряжения базы на 50 мВ ток возрастает на 6 мА.

Н. — Для расчета крутизны надо 6 мА разделить на 50 мВ, или 1/20 В; получим 120 мА/В — это просто колоссально!

Л. — Не очень, так как имеются транзисторы с крутизной 300 мА/В и даже больше.

Н. — Что меня сейчас больше всего поражает, так это глубокая аналогия между транзистором и лампой-триодом. Эмиттер соответствует катоду, сетка — базе, а коллектор — аноду.

Л. — Действительно, если в лампе малые изменения потенциала сетки вызывают значительные изменения анодного тока, то и здесь, немного изменяя потенциал базы, можно сильно изменять ток коллектора.

Ты догадываешься, что вход транзистора образуется базой и эмиттером. Между этими двумя электродами прилагают подлежащие усилению переменные токи. Выход же транзистора образуется между коллектором и эмиттером, так как между ними протекает усиленный ток.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Н. — Не мог бы ты показать мне схему усилительного каскада на транзисторе? Прежде покажи условное графическое обозначение транзистора.

Л. — В связи с существованием двух типов транзисторов должно быть и два условных обозначения. База изображается вертикальной линией; эмиттер обозначается в виде стрелки, направленной к базе в транзисторе типа $p-n-p$ и направленной от базы в транзисторе типа $n-p-n$ (рис. 130).

Н. — Эта стрелка, если я правильно понимаю, показывает условное направление электрического тока, т. е. от положительного полюса к отрицательному.

Л. — Совершенно верно. Коллектор же обозначается прямой линией, подходящей, как и стрелка эмиттера, к базе. Принятое условное обозначение верно отражает историческую действительность.

Самые первые транзисторы, сделанные в 1948 г., не имели настоящих переходов. Эмиттер и коллектор этих транзисторов представляли собой металлические острия, опиравшиеся на кристалл германия (базу).

115

УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД

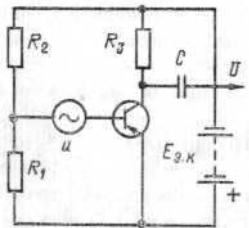
Л. — А вот общая схема усилительного каскада (рис. 131). В этой схеме переменное напряжение на входе обозначено буквой u . Усиленное напряжение, получаемое на выходе при прохождении коллекторного тока по нагрузочному резистору R_3 обозначено буквой U . Его пропускают через конденсатор связи C .

Н. — А для чего служат резисторы R_1 и R_2 , которые соединены последовательно и подключены к обоим полюсам батареи $E_{э,к}$?

Л. — Эти два резистора образуют делитель напряжения. Следовательно, их общая точка обладает меньшим потенциалом, чем вся батарея. Таким образом, база транзистора, соединенная с этой общей точкой (через источник переменного напряжения), оказывается заряженной отрицательно по отношению к эмиттеру, который непосредственно соединен с положительным полюсом батареи.

Н. — Совсем не глупо! Так можно обойтись без батареи, служившей для подачи смещения на базу. А какое сопротивление должны иметь резисторы, образующие делитель напряжения?

Рис. 131. Общая схема усилительного каскада на транзисторе.



Л. — Необходимо получить смещение, достаточное для того, чтобы рабочая точка на характеристике, показывающей изменение тока коллектора I_k в зависимости от потенциала базы $U_{э,б}$, находилась в правой части и достаточно далеко от нижнего изгиба, чтобы изменения напряжения, приложенного между эмиттером и базой, не достигали этого участка кривой. Таким образом предотвращают возникновение искажений.

На практике смещение должно представлять собой небольшую часть напряжения батареи. Поэтому резистор R_1 имеет сопротивление всего несколько ом, тогда как резистор R_2 должен иметь сопротивление, в 30 — 50 раз большее.

ВХОДНОЕ И ВЫХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Н. — Сходство между транзистором и лампой-триодом еще большее, нежели я думал. В лампе-триоде смещение на сетке осуществляется падением напряжения на резисторе. Здесь смещение на базе также получается благодаря падению напряжения на резисторе R_1 .

Л. — Мне надлежит предостеречь тебя от некоторого преувеличения в отношении их сходства. Между вакуумной лампой

116

и транзистором есть и немало очень важных различий. Прежде всего вспомни о существовании тока, идущего от эмиттера к базе внутри транзистора и возвращающегося по внешней цепи к эмиттеру, как это происходит в транзисторах типа $n-p-n$, или идущего в обратном направлении в транзисторах типа $p-n-p$. В обоих случаях ток базы не превышает несколько сотен микроампер. Это означает, что...

Н. — ...этим транзистор отличается от лампы-триода, в которой не должно быть сеточного тока. Смещение на сетку подается как раз для того, чтобы предотвратить полностью возникновение этого тока.

Л.— Пойми, Незнайкин, что для порождения тока базы приложенный на вход переменный ток должен израсходовать некоторую мощность. А она, как ты помнишь, есть произведение напряжения на ток.

Н. — Я думаю о другом аспекте этого явления. Раз напряжение, приложенное между базой и эмиттером, порождает ток, значит, с помощью закона Ома можно рассчитать сопротивление входа транзистора.

Л. — Действительно. И таким способом можно убедиться, что входное сопротивление составляет всего лишь несколько сотен ом. Ты видишь, насколько транзистор отличается от вакуумного триода и других усилительных ламп, где вход имеет бесконечно большое сопротивление, в связи с чем сеточный ток отсутствует.

Н. — А какое сопротивление имеет транзистор между эмиттером и коллектором?

Л. — Это сопротивление следует рассматривать как выходное. Оно составляет несколько килоом.

Н. — Я думаю, что сопротивление нагрузочного резистора, включенного в цепь коллектора, определяется с учетом выходного сопротивления транзистора.

Л.— Само собой разумеется. Его не следует делать слишком высоким, чтобы переменное напряжение, возникающее между его выводами, своими пиками не изменяло на обратную полярность потенциала, приложенного к коллектору.

Н. — Я начинаю спрашивать себя, Любознайкин, не сложнее ли использовать транзисторы, чем лампы?

Л.— Нет, успокойся. Об этом мы поговорим во время нашей следующей встречи. На сегодня, мне кажется, я уже достаточно насытил твой мозг. Поэтому давай прервем нашу беседу.

117

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Как делают транзисторы разных типов?.. Каким образом очищают полупроводники и придают им монокристаллическую структуру?.. Какие способы позволяют ввести в полупроводник примеси положительного и отрицательного типов?.. Как в заводских условиях производят обычные транзисторы, мезатранзисторы и планарные?.. Какие сложные дилеммы ставит форма базы в транзисторах для усиления ВЧ?.. Все эти вопросы рассматриваются здесь профессором Радиолем.

Я с интересом прослушал вашу беседу о транзисторах и с удовлетворением отмечаю, что Любознайкин объяснил тебе все основные понятия, относящиеся к этим активным компонентам, которые за немногие годы успешно заменили вакуумные лампы в большинстве видов электронной аппаратуры.

Ты хорошо понял, Незнайкин, что слабые переменные токи, приложенные между базой и эмиттером, определяют ток базы, который в свою очередь вызывает ток коллектора. Можно сказать, что коэффициент усиления транзистора определяется отношением изменения тока коллектора к вызвавшему его изменению тока базы.

ОЧИСТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Я думаю, что ты хотел бы знать, какие типы транзисторов существуют и как их делают. Поэтому я попытаюсь описать тебе основные характеристики транзисторов и технологию их изготовления.

Транзисторы изготавливают из германия или кремния, причем в начале производственного цикла нужно иметь очень чистый полупроводник, обладающий безукоризненной кристаллической структурой.

Для устранения примесей применяют метод нагрева, носящий название *зонной плавки*. Полупроводниковый стержень кладут в кварцевый тигель и нагревают до тех пор, пока узкая зона стержня не расплавится. Затем эту расплавленную зону медленно передвигают от одного конца полупроводникового стержня к другому. Что здесь происходит? Примеси стремятся остаться в расплавленной части. Перемещая эту зону от одного конца стержня к другому, мы собираем примеси в одном конце и хорошо очищаем от них остальную часть стержня. После этого конец стержня, в котором собрались примеси, отрезают, а в хорошо очищенной части остается не более одного атома примесей на сто миллионов атомов полупроводника.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ

Ты, может быть, хочешь знать, как удастся нагреть полупроводник узкой зоной, в которой температура достигает 940°C при очистке германия и 1420°C при очистке кремния? В этом случае на помощь призывают электронику. Расплавляемую зону вместе с тиглем помещают в катушку, по которой протекает сильный ток высокой частоты. Этот ток наводит в массе полупроводника токи, которые сильно его разогревают. Катушку медленно перемещают вдоль тигля, что вызывает соответствующее перемещение расплавленной зоны (рис. 132).

Нагрев магнитным полем, наведенным токами высокой частоты и в свою очередь порождающим токи в массе полупроводника, кардинально отличается

118

от нагрева с помощью пламени. Нагрев пламенем повышает температуру поверхности тела, а уже с поверхности благодаря тепловой проводимости калорий проникают в глубь тела. При высокочастотном же нагреве тепло сразу охватывает всю массу нагреваемого тела.

Добавлю, что этот способ можно использовать и для нагрева диэлектриков, но тогда в нагреваемом теле создают электрическое (а не магнитное) поле. Для этого нагреваемое тело помещают между обкладками конденсатора, к которому прилагают напряжение ВЧ. Этот метод используют в медицине, где он называется *высокочастотной диатермией*.

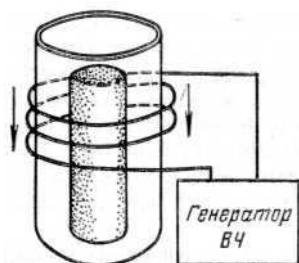


Рис. 132. Очистка полупроводника методом зонной плавки.

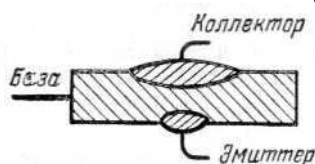


Рис. 133. Расположение трех элементов, образующих транзистор.

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛА

Вернемся, однако, к полупроводникам. Теперь, когда они хорошо очищены, им нужно придать безукоризненную кристаллическую структуру. Дело в том, что обычно полупроводник состоит из большого количества беспорядочно расположенных кристаллов. Такое скопище кристаллов надлежит превратить в один *монокристалл* с исключительно однородной кристаллической структурой во всей массе.

Для этого весь полупроводник нужно вновь расплавить; эту операцию также выполняют с помощью токов ВЧ, протекающих по катушке. В расплав вводят крошечный кристаллик, служащий затравкой

для безупречной кристаллизации всей массы, и необходимое количество примесей типа n или p в зависимости от типа будущих транзисторов.

После охлаждения получают монокристалл, обладающий массой несколько килограммов. Затем его предстоит разрезать на большое количество маленьких кусочков, каждый из которых впоследствии будет превращен в транзистор. За исключением заготовок для транзисторов большой мощности эти кусочки имеют примерно 2 мм в длину и в ширину и несколько десятых долей миллиметра в толщину.

СПЛАВЛЕНИЕ

Вот мы и имеем заготовки для базы. Как из них сделать транзисторы? Ты без труда догадываешься, что для этого по обе стороны базы нужно иметь примеси типа, противоположного тому, какой содержит база.

Для выполнения этой задачи существует несколько способов. Если база сделана из германия типа p , то по обе стороны ее можно наложить крохотные таблетки из индия, представляющего собой примесь типа n . Нагреем все это до температуры 600°C , при которой индий начинает плавиться; гер-

119

маний же, как я тебе уже говорил, обращается в жидкость лишь при нагревании до 940°C . Атомы индия вкрапляются в германий; проникновение это облегчается тепловым движением.

Таким образом, с одной стороны базы образуется эмиттер, а с другой — коллектор (рис. 133). Последний должен иметь больший, чем эмиттер, объем, так как токи рассеивают на нем большую мощность. Само собой разумеется, что к каждому из этих трех электродов необходимо припаять проволочный вывод.

ДИФФУЗИЯ И ЭЛЕКТРОЛИЗ

Только что описанный мною способ формирования эмиттера и коллектора используется при производстве *сплавных* транзисторов. Но эмиттер и коллектор можно также создать методом *диффузии*. Для этого полупроводник нагревают до температуры, близкой к точке плавления, и помещают его в атмосферу нейтрального газа, содержащую пары примеси, предназначенной для формирования эмиттера и коллектора. Атомы примеси легко проникают в полупроводник. В зависимости от дозировки паров примеси и продолжительности операции глубина проникновения может быть большей или меньшей. Это и определяет толщину базы.

Метод диффузии очень хорошо подходит для производства мощных транзисторов, так как он позволяет вводить примеси на больших площадях — таким образом можно сформировать эмиттер и коллектор необходимых размеров, достаточных для прохождения относительно больших токов.

Методу диффузии аналогичен *электролитический* метод, при котором полупроводник подвергают воздействию струек жидкости, содержащей примесь противоположного типа.

Как видишь, для производства транзисторов используют вещества в твердом состоянии — сплавление, в жидком — электролиз и в газообразном — диффузия.

Созданный одним из описанных методов транзистор помещают в герметичный и непрозрачный корпус, чтобы свет не вызывал в полупроводнике фотоэлектрического эффекта. В корпусе создают вакуум или заполняют его нейтральным газом, например азотом, чтобы предотвратить окисление германия или кремния кислородом воздуха. Корпуса для мощных транзисторов делают с таким расчетом, чтобы они могли рассеять тепло и тем самым предотвратить чрезмерный нагрев полупроводников. Такой корпус представляет собой теплоотводящий радиатор, он имеет большие размеры.

ВЫСОКИЕ ЧАСТОТЫ СТАВЯТ ПРОБЛЕМЫ

К высокочастотному транзистору предъявляются требования в отношении толщины базы.

Если ее толщина очень мала, то между эмиттером и коллектором образуется относительно высокая емкость. Тогда токи ВЧ, вместо того чтобы проходить через два перехода, проходят непосредственно от эмиттера к коллектору, которые представляют собой своеобразные обкладки конденсатора.

Следует ли для снижения этой нежелательной емкости увеличить толщину базы? Ты, Незнайкин, несомненно, собираешься предложить это решение. Давай посмотрим, насколько оно рационально.

Увеличив расстояние, разделяющее эмиттер и коллектор, ты заставишь электроны проделывать между двумя переходами более длинный путь. Однако в полупроводнике скорость перемещения электронов и дырок довольно низкая: около 40 км/с. Предположим, что толщина базы составляет 0,1 мм. Для прохождения этой более чем короткой дистанции электронам потребуется

120

2,5 мкс. Это равно длительности одного полупериода тока с частотой 200 кГц, соответствующей волне длиной 1500 м. Как видишь, при такой толщине базы можно усиливать лишь токи, соответствующие длинным волнам.

Вот почему в ВЧ транзисторах толщину базы необходимо сделать значительно меньшей. При толщине базы 0,001 мм можно усиливать волны длиной до 1,5 м, а для приема дециметровых волн, на которых, в частности, ведутся телевизионные передачи, база должна быть еще тоньше.

Как видишь, здесь мы сталкиваемся с двумя противоречивыми требованиями: чтобы емкость эмиттер — коллектор не была слишком большой, нужно увеличить толщину базы, а чтобы электроны проходили через базу достаточно быстро, ее нужно сделать как можно тоньше.

РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Как же выйти из этой дилеммы? Очень просто, снизить емкость не путем сокращения расстояния между двумя обкладками, в роли которых здесь выступают эмиттер и коллектор, а путем предельно возможного уменьшения их площадей на переходах.

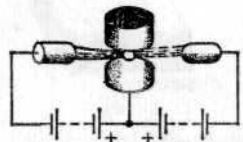


Рис. 134. Электролитическая обработка с помощью струек жидкости.



Рис. 135. Транзистор, в которой между базой и коллектором имеется зона из полупроводника с собственной проводимостью, улучшающая усиление на высоких частотах.

Для этой цели примеси вводят таким образом, чтобы эмиттер и коллектор имели форму конусов, вершины которых обращены в сторону базы. Такой результат достигается, в частности, при обработке обеих сторон полупроводниковой пластинки струйками жидкости, которая под воздействием напряжения вызывает электролиз и тем самым постепенно вырывает атомы, создавая в полупроводнике настоящие кратеры. Когда доньшки этих углублений оказываются достаточно близко друг от друга, изменяют направление напряжения, а в жидкость добавляют достаточное количество примесей, которые с помощью электролиза вводят в углубления, образующие эмиттер и коллектор (рис. 134).

Существует категория ВЧ транзисторов, в которых обращенный к эмиттеру слой базы содержит повышенное количество примесей, что повышает скорость электронов и тем самым позволяет усиливать более высокие частоты. Такие транзисторы называют *дрейфовыми*; они позволяют усиливать дециметровые волны.

Можно идти дальше в этом направлении, разместив между базой и коллектором то, что называют *зоной с собственной проводимостью* (рис. 135). Она представляет собой слой очень чистого германия или кремния и поэтому обладает посредственной проводимостью. Эта зона отделяет очень тонкую базу от коллектора, что уменьшает емкость между эмиттером и коллектором и позволяет усиливать очень высокие частоты.

121

ТРАНЗИСТОРЫ С МЕЗАСТРУКТУРОЙ

Еще один метод служит для изготовления *транзисторов*, способных работать на частотах несколько тысяч мегагерц, благодаря чему они, в частности, применяются во входных схемах телевизоров.

Для изготовления таких транзисторов берут пластину германия типа *p*, которая будет служить коллектором. На нижнюю сторону пластины прочно припаивают полоску золота — будущий вывод. Верхнюю сторону пластины подвергают воздействию паров сурьмы. Эта примесь типа *n*, плотность которой у поверхности выше, образует базу. Затем на этой же стороне пластины методом диффузии вводят примесь типа *p* (обычно алюминий), которая формирует эмиттер. Эту диффузию производят через решетку, в результате чего алюминий осаждается на поверхности узкими полосами (рис. 136, о).

После завершения этих операций на поверхность наносят крохотные капельки воска, каждая из которых одной стороной прикрывает участок полу-

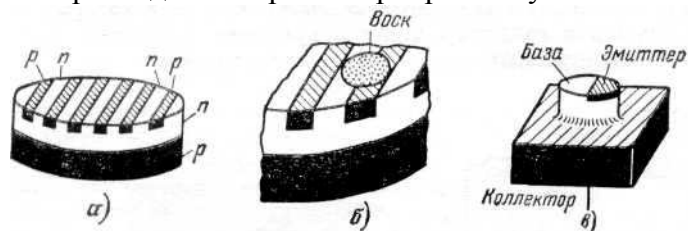


Рис. 136. Последовательные этапы изготовления меза-транзистора.

a — диффузия через решетку примеси типа *p*; *б* — нанесение капелек воска на поверхности, образующие эмиттер и базу; *в* — обработка кислотой и разделение пластины на отдельные транзисторы.

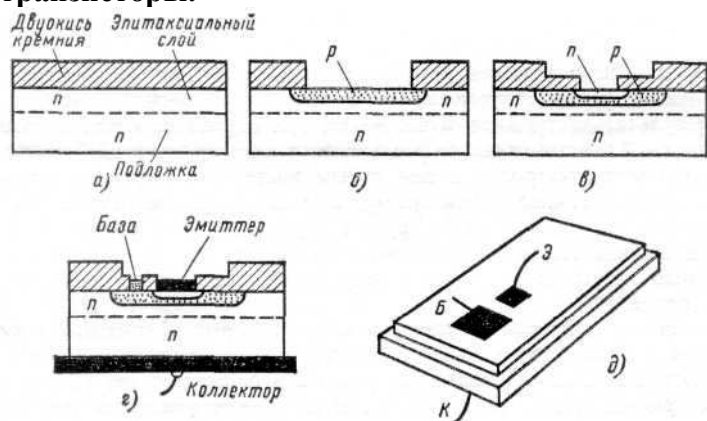


Рис. 137. Этапы изготовления транзистора по планарной технологии.

a — на эпитаксиальный слой наносят изолирующий слой двуокиси кремния; *б* — в изолирующем слое создают «окно», через которое методом диффузии вводят примесь типа *p*; *в* — после нанесения нового изолирующего слоя в нем создают «окно» меньших, чем первое, размеров и через него вводят примесь типа *n*; *г* — для доступа к зонам базы и эмиттера вскрывают отверстия, заполняемые металлом, к которому затем припаивают выводы; *д* — подложку укрепляют на металлической пластинке, которая служит выводом коллектора.

проводника типа p — будущий эмиттер, а другой своей частью — участок типа n — будущую базу (рис. 136, б). Затем всю пластину обрабатывают кислотой, которая стравливает все участки эмиттеров и баз, за исключением защищенных воском. Теперь остается лишь разрезать пластину на столько транзисторов, сколько имеется эмиттеров и баз, образующих на коллекторе небольшие своеобразные горки с плоской вершиной (рис. 136, в). Транзисторы с такой структурой стали называть *меза*, потому что в Южной Америке этим словом называют гору с плоской вершиной.

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ СЛОЙ

Спустимся теперь с этой горы на равнину. Под этим я подразумеваю планарную технологию изготовления транзисторов, получившую очень широкое распространение, так как она позволяет подготовить на одном монокристалле тысячи штук транзисторов за один технологический цикл. Эти транзисторы позволяют также усиливать высокие частоты и получать значительные мощности.

Чаще всего такие транзисторы формируют на *эпитаксиальном слое* полупроводника. Что же это такое?

Коллектор должен иметь небольшое удельное электрическое сопротивление, чтобы легко пропускать ток. Следовательно, его желательно делать из полупроводника с большим содержанием примесей. База и эмиттер, наоборот, должны иметь значительно меньше примесей.

Для создания необходимой разницы богатыми примесями полупроводник покрывают тонким эпитаксиальным слоем. Для этого полупроводник, например кремний, нагревают в атмосфере водорода до температуры примерно на сто градусов ниже точки его плавления. Затем температуру слегка понижают и одновременно вводят полупроводник в тетрахлорид кремния. Последний разлагается, и на поверхности полупроводника осаждаются эпитаксиальный слой, состоящий из атомов кремния, расположенных в идеальном порядке кристаллической решетки. Толщина этого слоя составляет сотую долю миллиметра, а его высокая чистота определяет высокое удельное электрическое сопротивление.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ ПО ПЛАНАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Представим себе, что мы имеем пластину кремния, покрытую эпитаксиальным слоем. Для начала нанесем на эпитаксиальный слой изолирующий слой двуокиси кремния (рис. 137). Затем, воздействуя соответствующим химическим составом, вскроем в изолирующем слое отверстие, через которое введем в эпитаксиальный слой методом диффузии примесь типа p , например бор; этот участок с примесями будет служить базой будущего транзистора.

Вновь покроем всю пластину изолирующим слоем двуокиси кремния и повторным химическим травлением вскроем в центре небольшое отверстие. Через это отверстие методом диффузии введем примесь типа n , например фосфор. Таким образом создают эмиттер.

Еще раз покроем всю пластину изолирующим слоем двуокиси кремния и затем вскроем в этом слое два отверстия: одно над эмиттером, а другое, расположенное в самом центре, над базой. Через эти отверстия напылением алюминия или золота создадим выводы эмиттера и базы. Что же касается вывода коллектора, то его изготовление не вызывает сложности — достаточно укрепить проводящую пластинку на нижней стороне коллектора.

Ты, Незнайкин, несомненно, заметишь, что у выполненного таким образом транзистора края переходов не имеют контакта с окружающей атмосферой; они защищены слоем двуокиси кремния, что полностью исключает возможность порчи транзистора. Двуокись кремния больше известна под названием кварца.

При желании повысить мощность племарного транзистора в принципе следует увеличивать площадь перехода эмиттер — база; для этого можно также увеличить площадь контакта между этими двумя зонами, сделав эмиттер не в виде маленького круга, а в форме звезды или замкнутой ломаной линии.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПЛЕНОК

Узнав из моих объяснений о большом количестве операций, необходимых для производства транзистора по планарной технологии, ты, Незнайкин, несомненно, думаешь, что его себестоимость должна быть очень высокой. Поэтому я спешу успокоить тебя.

За один прием изготавливают несколько десятков или даже сотен транзисторов. В производстве применяют фотолитографические методы, еще шире используемые при изготовлении интегральных схем, о которых мы поговорим в другой раз.

Запомни, что для вскрытия крохотных отверстий («окон») всю поверхность сначала покрывают светочувствительной пленкой, которая под воздействием света становится твердой и устойчивой к растворителю, используемому на следующем этапе. Таким образом, подвергшиеся засветке участки поверхности оказываются защищенными своеобразным лаком, в который превратилась отвердевшая пленка.

Как я надеюсь, ты догадался, что на пленку проецируют световые изображения участков эпитаксиального слоя, которые не должны подвергаться химической обработке. Обычно световая проекция осуществляется через объективы, позволяющие уменьшать проецируемое изображение, что способствует микроминиатюризации...

Я мог бы рассказать тебе и о других транзисторах, например полевых. Но мне не хочется утомлять тебя. Можешь выключить магнитофон.

- О -

124

БЕСЕДА ОДИННАДЦАТАЯ

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Принцип работы обычного транзистора существенно отличается от принципа работы полевого транзистора. В некотором отношении полевые транзисторы по своим свойствам более сходны с вакуумными триодами.

В приведенном диалоге анализируются устройство и различные параметры полевых транзисторов, а затем рассматриваются способы их практического применения.

ЭФФЕКТ УДУШИЯ

Незнайкин. — Твой дядюшка упомянул о существовании полевых транзисторов. Я предполагаю, что в этих приборах полупроводниковый кристалл помещен в катушку, магнитное поле которой воздействует на ...

Любознайкин. Нет, мой дорогой друг. В основу работы полевого транзистора положено воздействие на кристалл электрического поля. Транзистор этого типа совершенно не похож на те, которые мы изучали до сих пор. В частности, у него нет таких зон, как эмиттер, база и коллектор.

Полевой транзистор выполнен из полупроводниковой пластинки чаще всего n типа, в средней части которой имеются вырезы, значительно уменьшающие ее толщину. В образовавшиеся углубления помещен электрод, создающий электрическое поле. При использовании полупроводника типа n это поле должно быть отрицательным, чтобы противодействовать прохождению электронов, движение которых вызвано напряжением, приложенным к концам полупроводниковой пластинки.

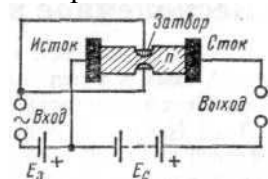


Рис. 138. Полевой транзистор из полупроводника типа *n*.

Н. — Если я правильно понял, это отрицательное поле как бы душит пучок электронов, продвигающихся от отрицательного конца полупроводника к положительному (рис. 138).

Л. — Именно в этом суть полевого транзистора. Усиление в нем происходит за счет воздействия поля на поток электронов. Подлежащие усилению переменные напряжения прилагаются между электродами, создающими электрическое поле, и одним из концов полупроводниковой пластинки. Это служит входом, а выход образуется между концами полупроводниковой пластинки.

125

РОДСТВЕННЫЕ ОТНОШЕНИЯ С ТРИОДОМ

Н.— Твой полевой транзистор до смешного похож на триод! В лампе усиливаемые напряжения прилагают между сеткой и катодом, а изменения потенциала сетки в большей или меньшей степени влияют на прохождение потока электронов от катода к аноду. Такой же эффект создает в этом транзисторе электрод, который в зависимости от своего потенциала оказывает большее или меньшее влияние на прохождение электронов от одного конца полупроводниковой пластинки к другому. Поэтому я предполагаю, что один из концов полупроводниковой пластинки можно назвать катодом, другой — анодом, а создающий электрическое поле электрод — сеткой.

Л. — Сформулированная тобою аналогия совершенно обоснованна. Однако она не послужила основанием дать электродам транзистора названия, идентичные электродам триода.

Электрод, который создает поле, получил название *затвора*. Вывод полупроводниковой пластинки, служащий вторым электродом, на который подаются усиливаемые напряжения, называется *истоком*, а противоположный вывод, с которого снимают усиленный ток, *стоком*.

Н. — По схеме я вижу, что между затвором и истоком последовательно прилагаются два напряжения: постоянное напряжение смещения затвора U_z и входное переменное напряжение, которое усиливается этим транзистором. Я думаю, что постоянное напряжение батареи должно быть достаточно велико, чтобы противоположные ему полупериоды переменного напряжения не изменили полярности затвора.

В рассматриваемом нами случае затвор сделан отрицательным. Поэтому не следует допускать, чтобы положительные полупериоды переменного напряжения оказались выше напряжения E_z батареи.

Л. — Можно подумать, Незнайкин, что ты уже имеешь опыт практического применения полевых транзисторов.

БЕСКОНЕЧНОЕ ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Н. — Пока еще нет, но надеюсь, что ждать осталось недолго. А пока я хотел бы знать, создает ли напряжение U_z большой ток между истоком и затвором.

Л. — Никакого! В этих транзисторах затвор образуется диффузией примесей типа, противоположного тем, которые содержатся в полупроводнике. Если примеси полупроводника типа *n*, затвор образуется двумя зонами с примесями типа *p*. Когда к созданному таким образом *p-n* переходу прилагают напряжение, делающее зону *p* отрицательной зоны *n*, переход превращается в непреодолимое для тока препятствие. Через переход проходит ничтожный ток порядка наноампера. Впрочем, существуют полевые транзисторы, в которых затвор выполнен из алюминиевых пластинок, отделенных от полупроводника очень тонким изолирующим слоем из двуокиси кремния.

Н. — Все больше и больше я убеждаюсь, насколько полевой транзистор похож на триод. В лампе ток не должен

126

протекать по сеточной цепи. Для этого на сетку подают отрицательное относительно катода смещение. А усиление определяется изменением анодного тока, вызванным изменением потенциала сетки.

В полевом транзисторе также нет тока во входной цепи, т. е. между затвором и истоком, а переменное напряжение затвора определяет изменение тока стока. Это намного лучше того, что происходит в обычных транзисторах, где усиливаемые токи утомляются, так как создают ток база — эмиттер, что требует затраты определенной мощности.

Л. — Именно по этой причине полевые транзисторы часто применяют во входных каскадах приемников. Благодаря такому решению принимаемые антенной очень слабые сигналы не затрачивают энергии и эффективно усиливаются. Как видишь, в этом транзисторе, как и в триоде, входное сопротивление почти бесконечно.

КРУТИЗНА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА

Н. — А можно ли узнать, как изменяется ток стока в зависимости от изменений потенциала затвора?

Л. — Я сейчас нарисую очень простую схему, используемую для таких измерений, но сначала покажу тебе условные графические обозначения полевых транзисторов. В зависимости от типа полупроводника символизирующая затвор стрелка направлена в том или другом направлении (рис. 139).

А вот схема для интересующих тебя измерений (рис. 140). Как видишь, приложенный к затвору потенциал можно изменять с помощью потенциометра R , включенного параллельно ба-

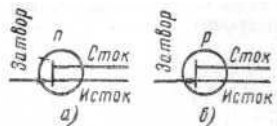


Рис. 139. Условные графические обозначения полевых транзисторов из полупроводника типа n (а) и типа p (б)

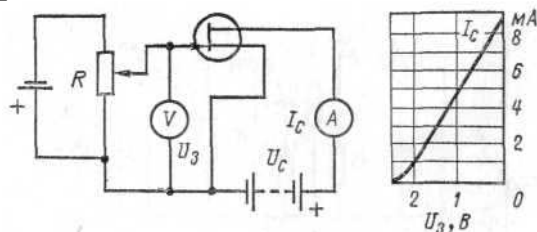


Рис. 140. В полевом транзисторе из полупроводника типа n и измеряют протекающий по нему ток I_c в зависимости от напряжения $U_з$, приложенного между затвором и истоком. Это напряжение изменяют с помощью потенциометра R . Полученная в результате таких измерений кривая похожа на кривую, характеризующую зависимость анодного тока триода от потенциала сетки.

127

тарее. Вольтметр показывает нам напряжение $U_з$, приложенное между затвором и истоком, а миллиамперметр — ток стока I_c , создаваемого батареей E_c .

По результатам измерений вычерчивают кривую, показывающую изменение I_c , в зависимости от изменения $U_з$. Обрати внимание, что большую часть этой кривой составляет прямолинейный участок. Кривая позволяет определить крутизну транзистора.

Ты видишь, что, когда напряжение $U_з$ изменяется от -2 до -1 В, ток I_c увеличивается от 1 до 5 мА. Следовательно, крутизна равна 4 мА/В. Это небольшая величина, однако некоторые полевые транзисторы имеют крутизну в несколько десятков миллиампер на вольт.

НАПРЯЖЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ ЗАТВОРА

Н. — Я вижу, что по сравнению с обычными транзисторами типов *n-p-n* и *p-n-p* полевой транзистор обладает рядом преимуществ. Но мало хорошего в том, что он требует применения двух источников напряжения: батареи для подачи смещения на затвор и батареи, дающей ток стока.

Л. — Успокойся, Незнайкин, одного последнего источника будет вполне достаточно. Ты помнишь, как подают отрицательное смещение на сетку триода?

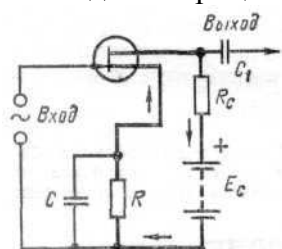


Рис. 141. Благодаря падению напряжения на резисторе R затвор становится отрицательным относительно истока. Протекающие по нагрузочному резистору R_c токи порождают напряжения, которые с усилительного каскада подаются через конденсатор C_1 на следующий каскад.

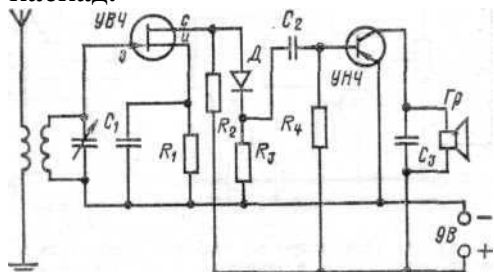


Рис. 142. Схема транзисторного приемника, состоящая из каскада УВЧ на полевом транзисторе, полупроводникового диода и одного каскада УНЧ.

128

Н. — Конечно, смещение получают с помощью анодного тока, создающего падение напряжения на резисторе, в результате чего катод становится положительным относительно сетки.

Л. — Точно так же мы сделаем и для нашего транзистора. Между его затвором и отрицательным полюсом батареи E_c включим резистор R и шунтируем его конденсатором C , предназначенным для пропускания переменных составляющих тока стока (рис. 141). Постоянная составляющая этого тока, проходя по резистору R , создает падение напряжения, которое делает исток транзистора положительным относительно отрицательного полюса батареи. Затвор же через источник переменного напряжения соединен как раз с этим полюсом. Таким образом, затвор становится отрицательным относительно истока.

На схеме я также изобразил резистор нагрузки R_c , на котором усиленные токи стока создают падения напряжения, передаваемые через конденсатор связи C_1 на следующий каскад.

Н. — Значит, нарисованная тобой схема представляет собой усилительный каскад?

РАДИОПРИЕМНИК НА ТРАНЗИСТОРАХ

Л. — Да, но очень схематично... Теперь, если ты хочешь, я могу показать тебе полную схему приемника, содержащую каскад УВЧ на полевом транзисторе, полупроводниковый диод в качестве детектора и каскад НЧ на обычном транзисторе (рис. 142).

Н. — Я с радостью констатирую, что эту схему я читаю с такой же легкостью и с таким же удовольствием, как и романы Виктора Гюго...

Резистор R_1 служит для того, чтобы сделать затвор первого транзистора отрицательным относительно истока. Принятые антенной сигналы ВЧ подаются на затвор этого транзистора.

Проходя по резистору R_2 , токи стока порождают на нем усиленное напряжение ВЧ; последние подаются на диод, который их детектирует. Полученные таким образом токи НЧ в свою очередь порождают напряжения НЧ на резисторе R_3 ; эти напряжения через конденсатор связи C_2 прилагаются между базой и эмиттером транзистора УНЧ. Отрицательное смещение на его базу подается в результате падения напряжения на резисторе R_4 , а его коллекторный ток приводит в движение диффузор громкоговорителя.

Не сказал ли я какой-нибудь глупости?

Л. — Нисколечко! Твой анализ схемы на 100% идентичен тому, какой сделал бы я сам. Я поздравляю тебя и, чтобы сохранить приятное впечатление, прерываю на этом нашу беседу.

129

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЕ

ТРИ ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ

Какие бы функции ни выполняли транзисторы, их применение всегда основано на использовании одной из трех описанных ниже схем, которые в известной мере аналогичны трем соответствующим схемам на лампах-триодах.

Разделяя чувства моего племянника Любознайкина, я с удовольствием отмечаю, что ты очень хорошо понял принцип работы полевых транзисторов. Поздравляю тебя, Незнайкин, с этим успехом.

А теперь вернемся к обычным транзисторам. Я объясню тебе три основные схемы, в которых они используются. И уж раз ты так хорошо уяснил аналогию между, транзистором и лампой-триодом, я в своем рассказе буду исходить из этого подобия.

ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРИОДА

Рассмотрим сначала три основные схемы, в которых используется триод. В каждой из этих схем один из трех электродов триода заземлен. Этим термином я обозначаю точку с постоянным потенциалом, к которой в ламповых приемниках подключают отрицательный полюс источника высокого напряжения.

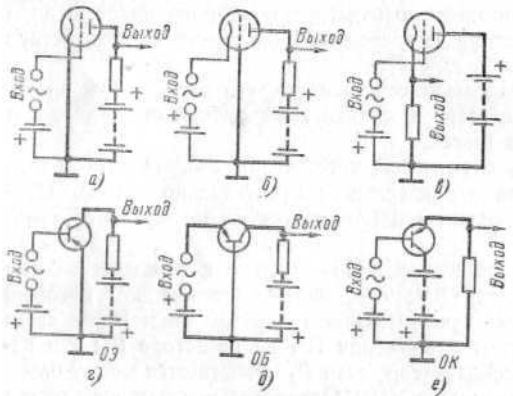


Рис. 143. Три основные схемы включения триода транзистора.

В классических схемах заземляется катод непосредственно или через резистор смещения. В нарисованных мною схемах для упрощения рисунка я подаю напряжение смещения на сетку с помощью специальной батареи (рис. 143). Жирной линией я провел путь, по которому протекает анодный ток. В эту цепь я включил резистор нагрузки, а переменные напряжения, порождаемые на нем анодным током, подаются на следующий каскад.

Схема рис. 143,а классическая: усиливаемый сигнал подается на сетку, а катод заземлен. Можно сделать и наоборот, как это показано на схеме рис. 143, б, где постоянен потенциал сетки, а усиливаемый сигнал подается на катод.

130

Можно сделать постоянным даже потенциал анода, заземлив его через источник высокого напряжения, как это показано на схеме рис. 143, в. В этом случае резистор нагрузки включают между катодом и корпусом.

Не удивляйся, Незнайкин, глядя на последнюю схему. Ведь ты уже знаком с нею - я просто несколько необычно нарисовал схему катодного повторителя.

СХЕМА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Теперь, когда ты, как я надеюсь, внимательно проанализировал три основные схемы включения триода, перейдем к аналогичным схемам на транзисторах. Я сразу же скажу, что они называются схемами с *общим эмиттером* (ОЭ), *общей базой* (ОБ) и *общим коллектором* (ОК).

Электрод называется общим, когда он одновременно принадлежит входной и выходной цепям и, кроме того, имеет постоянный потенциал, будучи заземлен непосредственно или через источник постоянного напряжения.

Наибольшее распространение из этих схем получила схема с ОЭ (рис. 143, г), аналогичная схеме триода с заземленным катодом. В этой схеме, как ты помнишь, сопротивление входной цепи относительно невелико: в лучшем случае 2000 Ом. Выходная же цепь включает весь транзистор от эмиттера до коллектора, поэтому ее сопротивление довольно высокое: от 10 до 100 кОм. Схема с ОЭ дает очень хорошее усиление. Колебания входного тока вызывают значительно большие (в пределах от 20 до 200 раз) изменения выходного тока. Что же касается коэффициента усиления по напряжению, то он достигает нескольких сотен. Это означает, что мощность (которая, как ты прекрасно знаешь, равна произведению напряжения на ток) усиливается здесь в несколько тысяч раз. Запомни также, в приведенной схеме колебания на входе цепи базы находятся в противофазе с колебаниями в выходной цепи коллектора. В самом деле, когда на вход усилителя поступает сигнал положительной полярности, то на выходе он имеет отрицательную полярность.

СХЕМА С ОБЩЕЙ БАЗОЙ

Рассмотрим теперь схему с ОБ (рис. 143, д). Здесь постоянным потенциалом обладает база, а усиливаемое переменное напряжение подается на эмиттер. Ты догадываешься, что колебания в цепи коллектора находятся в фазе с колебаниями цепи эмиттера, т. е. если на вход усилителя поступает сигнал положительной полярности, то и на выходе он имеет ту же полярность.

А теперь посмотрим, какое сопротивление имеет схема с ОБ. Приложенное между эмиттером и корпусом напряжение определяет величину тока в цепи эмиттера, тогда как в схеме с ОЭ во входной цепи протекает только ток базы, который и учитывается при расчете входного сопротивления.

В схеме с ОБ во входной цепи протекает весь ток эмиттера; он значительно больше тока базы, так как, кроме него, протекает и ток коллектора. Разделив в соответствии с законом Ома входное напряжение на величину тока эмиттера, получим довольно низкое входное сопротивление. Оно равно всего лишь нескольким десяткам ом и во всяком случае не превышает сотни ом.

Ток эмиттера (который, я позволю себе повторить, равен сумме токов базы и коллектора) значительно больше тока коллектора. Это означает, что здесь мы скорее имеем дело с ослаблением, нежели с усилением тока. Напряжение же, наоборот, подвергается здесь очень большому усилению. Это определяется тем, что выходная цепь имеет очень высокое сопротивление. Оно находится в пределах 0,5 — 2 МОм. При этом нагрузочный резистор также должен иметь значительное сопротивление. Малейшие изменения тока коллектора вызывают

большие изменения напряжения. Вот почему напряжение усиливается в несколько сотен, а то и тысяч раз.

Из-за высокого выходного сопротивления эту схему целесообразно применять перед цепями с высоким входным сопротивлением.

СХЕМА С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ

И, наконец, рассмотрим, как работает схема с ОК (рис. 143, *e*). Здесь входная цепь идентична выходной цепи схемы с ОБ, о которой мы только **что** говорили. Это означает, что ее входное сопротивление высокое. Оно может быть от нескольких сотен килоом до одного мегаома. И наоборот, сопротивление выходной цепи невелико; оно не превышает половины килоома.

Из всего сказанного ты можешь понять, что малые изменения входного тока вызывают значительно большие изменения выходного тока. Коэффициент усиления по току находится в пределах от 20 до 200. Однако здесь, как и в ламповом аналоге, выходное напряжение равно входному. Это объясняется тем, **что** на нагрузочном резисторе, который должен иметь низкое сопротивление, даже сильные изменения тока порождают лишь небольшие изменения напряжения.

Ты легко можешь убедиться, что выходное напряжение находится в фазе с входным.

Для чего может служить такая схема, где напряжение совершенно не усиливается? Она применяется в тех случаях, когда сигнал нужно подать на схему с низким входным сопротивлением, которая по этой причине требует значительного усиления по току. Как ты видишь, нужно всегда обеспечивать хорошее согласование между выходным сопротивлением одного каскада и входным сопротивлением следующего.

Теперь, когда ты познакомился с основными транзисторными схемами, тебе будет легче анализировать практические схемы, в которых используются транзисторы.

Желаю тебе удачи!

- О -

132

БЕСЕДА ДВЕНАДЦАТАЯ

СВЯЗЬ ВЫХОД — ВХОД. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Использование транзисторов связано с проблемой связи между каскадами, потому что в отличие от ламп входное сопротивление у них не бесконечно. Любознайкин рассказывает в настоящей беседе о решениях этой проблемы. Затем он рассматривает различные способы создания отрицательной обратной связи, имеющей целью устранить нежелательные явления, вызванные нагревом, и снизить уровень искажений.

АНАЛОГИЯ И РАЗЛИЧИЕ

Незнайкин. — Объяснения твоего дядюшки о трех основных схемах меня очень заинтересовали. Однако они касаются только транзисторов типа *p-n-p*. Я хотел бы знать, нельзя ли подобным образом включать транзисторы типа *n-p-n*.

Любознайкин. — Легко и просто при условии изменения полярности источников напряжения, используемых в каждой из этих схем. На практике используют только одну батарею; смещение на базу подается в результате падения напряжения на резисторе или с помощью делителя напряжения, состоящего из двух последовательно соединенных резисторов, подключенных к полюсам этой батареи.

Н. — Так как три основные схемы включения транзисторов аналогичны схемам на вакуумных триодах, я думаю, что все изученные нами схемы усиления ВЧ, НЧ, преобразования частоты и детектирования могут также использоваться в приемниках на транзисторах.

Л. — Твое заключение слишком поспешно. Аналогия не означает равнозначности. Не забывай, что по некоторым характеристикам транзисторы очень отличаются от электронных ламп. Последние имеют бесконечно большое входное сопротивление, тогда как у транзисторов оно может быть довольно низким. Поэтому при использовании ламп каждый каскад передает следующему за ним лишь усиленные напряжения. А в транзисторных схемах надлежит передавать некоторую мощность, так как напряжения предыдущего каскада создают токи во входной цепи следующего каскада.

Н. — Это действительно все меняет. Теперь я лучше понимаю, почему твой дядюшка во время своего последнего рассказа особенно акцентировал внимание на входном и выходном сопротивлениях каждой из основных схем. В заключение он сказал, что для обеспечения хорошего согласования между двумя следующими друг за другом каскадами нужно по мере возможности сделать равными выходное сопротивление первого и входное сопротивление второго.

133

СОГЛАСОВАНИЕ МЕЖДУ ИСТОЧНИКОМ И НАГРУЗКОЙ

Л. — Это очень важный принцип всех областей электротехники и электроники. Нужно всегда отличать *источник* тока от того, что представляет собой *нагрузку*. Так, батарею следует рассматривать как источник, а приемник — как нагрузку.

Однако источник сам обладает внутренним сопротивлением $R_{вн}$, которое может быть более или менее высоким. Вырабатываемое источником переменное или постоянное напряжение называется *электродвижущей силой* (э. д. с).

Н. — Иначе говоря, это напряжение, которое мы измеряем на зажимах батареи?

Л. — Нет, Незнайкин. Протекающий по батарее ток создает падение напряжения на ее внутреннем сопротивлении. Поэтому на зажимах батареи мы имеем напряжение, равное э. д. с, минус падение напряжения внутри источника.

Н. — Но если через батарею, когда к ней ничего не подключено, не протекает ток?..

Л. — В этом случае действительно на зажимах батареи появляется полностью вся э. д. с, так как падения напряжения на внутреннем сопротивлении не происходит. Вот почему вольтметр может измерить э. д. с. лишь в том случае, если он обладает очень высоким сопротивлением и поэтому потребляет ничтожный ток.

А теперь посмотрим, что произойдет, если к источнику подключить цепь нагрузки с входным сопротивлением $R_{вх}$ (рис. 144).

Н. — Я отмечаю, что внутреннее сопротивление источника $R_{вн}$ и сопротивление цепи нагрузки $R_{вх}$ соединены последова-



Рис. 144. К источнику напряжения E с внутренним сопротивлением $R_{вн}$ подключена нагрузка с входным сопротивлением $R_{вх}$; U — напряжение на выходе.

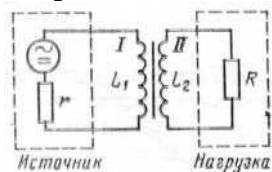


Рис. 14S. Применение трансформатора позволяет согласовать сопротивления нагрузки и источника.

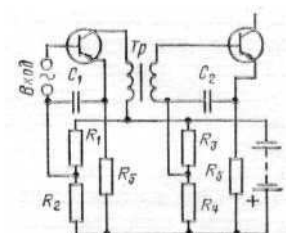


Рис. 146. Усилитель НЧ состоит из двух каскадов на транзисторах, соединенных через трансформатор, который обеспечивает согласование входного и выходного сопротивлений.

134

тельно, в результате чего ток, создаваемый э. д. с. E , поочередно протекает по этим сопротивлениям. Л. — Верно. И на каждом из этих сопротивлений он создает падение напряжения, тем больше, чем выше это сопротивление.

Н. — Согласен. Теперь я вижу, к чему ты хочешь подвести. Если сопротивление нагрузки $R_{\text{вх}}$ очень высокое, а внутреннее сопротивление источника невелико, то почти вся э. д. с. в виде напряжения U появится на сопротивлении нагрузки $R_{\text{вх}}$.

Именно это происходит в случае использования электронных ламп, имеющих бесконечно большое входное сопротивление. На их входе могут быть полностью приложены напряжения, создаваемые на выходе предыдущего каскада. Транзисторы же имеют достаточно низкое входное сопротивление. Следовательно, если выходное сопротивление предшествующего каскада относительно высокое, на входе другого получим лишь небольшое напряжение U .

Я думаю, что нужно так рассчитать схему, чтобы входное сопротивление было намного выше выходного сопротивления предшествующего каскада.

Л. — Неверный вывод, Незнайкин. Ты забываешь, что в транзисторных схемах на вход надо прилагать некоторую мощность, а не одно напряжение. А мощность не что иное, как произведение напряжения на ток. Следовательно, надо устроить так, чтобы по входному сопротивлению проходил некоторый ток (сопротивление не должно быть слишком высоким) и чтобы ток создавал на нем некоторое падение напряжения (сопротивление не должно быть слишком низким).

Мои объяснения должны помочь тебе понять, что наиболее целесообразно выбрать входное сопротивление такого же порядка, как и выходное сопротивление. Таким образом, получают напряжение и ток, достаточные для того, чтобы приложенная к входу транзистора мощность заставила его работать наиболее эффективно.

ИДЕАЛЬНОЕ СРЕДСТВО СОГЛАСОВАНИЯ ВЫХОД — ВХОД

Н. — Понял! Впрочем, я предполагаю, что сказанное тобою относится не только к активным сопротивлениям, но в более общей форме ко всем видам сопротивлений. Однако необходимость иметь примерно равные сопротивления на выходе предыдущего и на входе последующего каскадов должна существенно ограничивать возможность соединения различных схем.

Л. — Разве ты не догадываешься, Незнайкин, о существовании устройства, позволяющего преобразовывать сопротивления. Это делает возможным соединять два каскада, сопротивления которых нельзя было бы соединять непосредственно.

Н. — Не стоит даже думать, так как я все равно не вижу средства для достижения этой цели.

Л. — Это просто-напросто трансформатор (рис. 145). Индуктивное сопротивление его первичной обмотки должно иметь тот же порядок, что и внутреннее сопротивление источника; индуктивное сопротивление его вторичной обмотки должно быть при-

135

мерно равно сопротивлению нагрузки. В этом случае согласование происходит наилучшим образом.

Н. — Я помню, что индуктивное сопротивление обмотки пропорционально ее индуктивности. А та, в свою очередь, пропорциональна квадрату числа витков. Следовательно, если вторичная обмотка трансформатора L_2 имеет витков вдвое больше, чем первичная обмотка L_1 , то ее индуктивность, а значит, и индуктивное сопротивление будут в 4 раза больше. Такой трансформатор позволит

осуществить связь между двумя каскадами, из которых второй имеет входное сопротивление в 4 раза выше выходного сопротивления предыдущего каскада.

Л. — Я констатирую, что ты очень силен в математике. Поэтому я предлагаю тебе задачу. Вот схема с двумя каскадами УНЧ на транзисторах, включенных по схеме с ОЭ (рис. 146). Если выходное сопротивление первого каскада равно 36 кОм, а входное сопротивление второго каскада составляет 1 кОм, какой коэффициент трансформации должен иметь трансформатор связи?

Н. — Раз выходное сопротивление в 36 раз больше входного следующего каскада, индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора должно быть в 36 раз выше индуктивного сопротивления его вторичной обмотки. И раз индуктивное сопротивление пропорционально квадрату числа витков, нужно, чтобы в первичной обмотке витков было в 6 раз больше, чем во вторичной. Следовательно, коэффициент трансформации должен равняться 6. И я благодарю тебя за такой подбор сопротивлений, что извлечение квадратного корня из их соотношений не потребовало у меня никакого труда. В конечном счете вычисление коэффициента трансформации n по соотношению сопротивлений $R_{вх}$ и $R_{вых}$ производится по формуле

$$n = \sqrt{\frac{R_{вх}}{R_{вых}}}$$

Л. — Ты превосходно рассуждаешь, Незнайкин.

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПРОТИВ НАГРЕВАНИЯ

Н. — Увы, все же кое-что в твоей схеме я не понимаю. Я вижу, что смещение на базы транзисторов подается с помощью делителей напряжения, состоящих из резисторов R_1 и R_2 для первого транзистора и из резисторов R_3 и R_4 для второго транзистора. Из этого я делаю вывод, что конденсаторы C_1 и C_2 служат для пропускания переменных составляющих входных токов. Но какую функцию выполняют резисторы R_5 и R_6 , расположенные между эмиттерами и положительным полюсом батареи?

Л. — Они предназначены для уменьшения влияния температуры на коллекторный ток. Прохождение тока через переходы транзистора вызывает некоторое выделение тепла. А ты знаешь, что полупроводники чувствительны к изменениям температуры. Когда температура повышается, ток коллектора I_k возрастает. Это явление в германии ощущается значительно сильнее, чем в кремнии. Однако рост тока коллектора вызывает такое же увели-

136

чение тока эмиттера, который проходит через резистор, отделяющий эмиттер по полюсам батареи. Следовательно, увеличение этого тока приводит к увеличению падения напряжения на этом резисторе, что вызывает увеличение отрицательного потенциала на эмиттере. Постоянное же напряжение базы при этом остается неизменным. Значит, снижается разность потенциалов между базой и эмиттером, что вызывает уменьшение тока коллектора I_k . Н. — Очень забавна эта цепочка явлений, где увеличение тока в конечном итоге вызывает собственное снижение, и таким образом, несмотря на повышение температуры, ток остается постоянным.

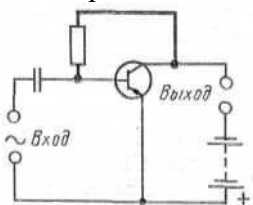


Рис. 147. Схема отрицательной обратной связи по напряжению.

Л. — Здесь мы наблюдаем явление *отрицательной обратной связи*, потому что ток I_k воздействует на себя не в направлении увеличения амплитуды своих колебаний, как это бывает при положительной обратной связи, а наоборот, он добивается их уменьшения до минимума.

То, что ты видел на моей схеме, называют отрицательной обратной связью *по току*. Но может быть и отрицательная обратная связь *по напряжению*, как показано на упрощенной схеме рис. 147.

Как видишь, здесь резистор отрицательной обратной связи R включен параллельно переходу база - коллектор. В результате часть напряжения из цепи коллектора через этот резистор подается обратно на базу. Когда из-за нагревания ток коллектора увеличивается, падение напряжения на его нагрузочном резисторе также растет; база через резистор R получает напряжение обратной связи в противофазе, что вызывает уменьшение отрицательного потенциала базы. И это уменьшение разности потенциалов эмиттер - база снижает ток коллектора.

Н. — Это мне так нравится, что я становлюсь поклонником отрицательной обратной связи.

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПРОТИВ ИСКАЖЕНИЙ

Л. — Раз это явление тебе так нравится, я могу сообщить, что его используют также для снижения искажений напряжений НЧ. В этом случае отрицательная обратная связь воздействует уже не на постоянную составляющую, а на переменную. Для этого переменная составляющая не отводится через конденсатор, включенный параллельно резистору отрицательной обратной связи, а пропускается по этому резистору, чтобы создать на нем падение переменного напряжения, противопоставляемое тому, в которое надлежит внести коррективы. . .

137

Н. — А в чем заключаются причины возникновения искажений и какое влияние они оказывают?

Л. — Как в усилителях на лампах, так и в транзисторных усилителях могут возникнуть искажения переменных напряжений НЧ. Так, например, достаточно колебаниям анодного тока быть не строго пропорциональным колебаниям напряжения, приложенного между сеткой и катодом, и звуки окажутся искаженными. Их воспроизведение не соответствует переданному звучанию. И что еще более важно, само качество звука может быть испорчено появлением *гармоник*, которых не было в первоначальном звуке в радиовещательной студии.

Н. — Что ты называешь гармониками?

Л. — Это составляющие звука, имеющие частоту в несколько **раз** выше его основной частоты. Наличие этих гармоник определяет тембр звучания различных музыкальных инструментов. Особенно богаты гармониками звуки скрипки, легко отличаемые от звуков флейты, имеющей одинаковую со скрипкой основную частоту. Если УНЧ порождает в переменных напряжениях гармоники, которых в них первоначально не было, то тембр воспроизводимых звуков изменяется.

Н. — Я понимаю, насколько подобные искажения опасны. А как можно с ними бороться средствами отрицательной обратной связи?

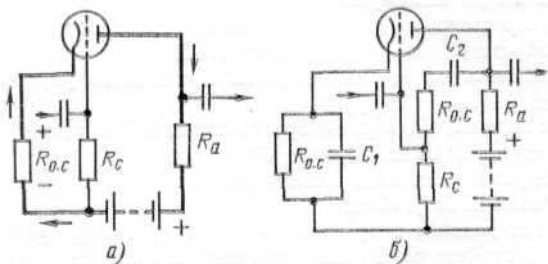


Рис. 148. Отрицательная обратная связь в каскаде на электронной лампе.

а — отрицательная обратная связь по току, создаваемая общим резистором $R_{г.с}$ в цепях сетки и анода; *б* — отрицательная обратная связь по напряжению, полученная благодаря подаче на сетку части переменного напряжения, выделяющегося на нагрузочном резисторе R_a . Последнее снимается с делителя, образованного резисторами $R_{г.с}$ и R_a .

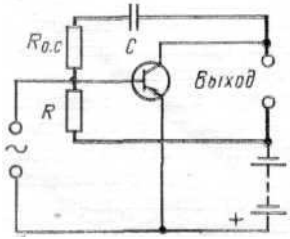


Рис. 149. Отрицательная обратная связь по напряжению в каскаде на транзисторе.
138

Л. — Очень просто: на вход подают в противофазе переменные напряжения, снятые с выхода. Таким образом, полученные в результате усиления напряжения подают на вход в противофазе, в результате чего искажения взаимно уничтожаются или по крайней мере значительно ослабляются.

Н. — А как практически осуществляется отрицательная обратная связь?

СХЕМЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Л. — Сначала я покажу тебе схемы, в которых используются лампы. Отрицательную обратную связь можно создать посредством включения между катодом и отрицательным полюсом источника высокого напряжения резистора $R_{o.c.}$, незашунтированного конденсатором (рис. 148, а). По нему протекает весь анодный ток. Его постоянная составляющая создает отрицательное напряжение смещения сетки, а переменная составляющая создает напряжения, противоположные тем, которые прилагаются на входе между сеткой и катодом. Таким образом снижают искажения.

Н. — Но мне кажется, что этим одновременно снижают и коэффициент усиления. Отрицательная обратная связь по своему воздействию противоположна положительной, где на вход подают напряжения, находящиеся в фазе с входными, что повышает усиление.

Л. — Да, Незнайкин, но нельзя одновременно получить хорошее звучание и большое усиление. С помощью отрицательной обратной связи обеспечивают качество звучания, но, естественно, в ущерб коэффициенту усиления.

А теперь я покажу тебе схему с отрицательной обратной связью (рис. 148, б), где для возвращения напряжения на сетку часть его снимают с анодного резистора R_a . Для этого через конденсатор C_2 напряжение направляют на делитель $R_{o.c.} R_c$. Соотношение сопротивлений между этими двумя резисторами позволяет установить уровень отрицательной обратной связи.

Н. — У меня складывается впечатление, что предыдущая схема, где отрицательная обратная связь создается резистором в цепи катода, подобна схеме транзисторного усилителя.

Л. — Ты прав. Это то, что, как в ламповых, так и в транзисторных схемах, называют *отрицательной обратной связью по току*, потому что она создается прохождением выходного тока.

Последняя схема на лампах, которую я тебе показал, содержит *отрицательную обратную связь по напряжению*. А вот как этот же способ создания отрицательной обратной связи может применяться в транзисторной схеме (рис. 149). Выходное переменное напряжение через конденсатор C передается на делитель напряжения $R_{o.c.} R_c$ и часть его направляется на вход.

Н. — Ну а я направляюсь к выходу, ибо, если я приду поздно, мне придется испытать на себе отрицательную обратную связь моих родителей.

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЮ

СХЕМЫ СВЯЗИ

Свойства транзисторов, весьма отличные от свойств электронных ламп, определяют необходимость применения особых схем связи между каскадами. Рассматривая различные способы обеспечения

связи, профессор Радиоль, в частности, показывает интересные двухтактные схемы, используемые в радиоприемниках.

Очень хорошо, мои дорогие друзья, что вы рассмотрели различные способы создания отрицательной обратной связи. Но это не оставило вам времени изучить различные схемы связи между каскадами на транзисторах.

Я признаю, что вы очень внимательно рассмотрели связь с помощью транзистора. Запомни, Незнайкин, что трансформатор можно использовать как в УВЧ, так и в УНЧ, а также и в каскадах усиления ПЧ.

ТРАНСФОРМАТОРЫ ВЧ И ПЧ

Вполне естественно, что в усилителях ВЧ и ПЧ для связи используют настроенные контуры, образующие первичную и вторичную обмотки трансформатора или по крайней мере одну из этих обмоток (рис. 150). В каскадах ВЧ эти контуры имеют переменную настройку, что позволяет настраивать приемник на соответствующую радиостанцию. В каскадах ПЧ настройка постоянная.

Здесь также возникает проблема согласования выходных и входных сопротивлений. Решить эту проблему удастся путем использования трансформаторов с коэффициентом трансформации, соответствующим соотношению этих сопротивлений. Для этой цели можно сделать отводы в одной из обмоток, которая ведет себя как *автотрансформатор*. Часть обмотки, по которой протекает входной ток, играет роль первичной обмотки, а вся обмотка представляет собой вторичную обмотку. На схеме, которую ты видишь, часть витков с отводами *a, b* служит первичной, а с отводами *a, c* — вторичной обмоткой трансформатора. А настоящая вторичная обмотка подвергается индуктивному воздействию всей первичной обмотки.

РЕЗИСТИВНО-ЕМКОСТНАЯ СВЯЗЬ

Будучи твердо убежденным в аналогии между электронными лампами и транзисторами, ты, конечно, не сомневаешься, что транзисторы также могут иметь связь с помощью резисторов и конденсаторов (рис. 151). На схеме видно, что R_1 служит нагрузочным резистором первого транзистора. Переменное напряжение, создаваемое на этом резисторе коллекторным током, через конденсатор C передается на базу второго транзистора; смещение на базу подается с делителя напряжения R_2, R_3 .

Ты, возможно, удивился, увидев условное обозначение электролитического конденсатора C . Зачем потребовалось использовать здесь конденсатор связи большой емкости? Причина заключается в характерном для транзисторов низком входном сопротивлении. Поэтому резисторы R_2 и R_3 должны иметь довольно низкое сопротивление (сотни ом), тогда как в ламповых схемах резисторы утечки сетки обычно имеют сопротивление 0,5 — 2 МОм.

В связи с тем что сопротивление резистора R_3 невелико, конденсатор C не должен иметь слишком большое емкостное сопротивление. В самом деле, создаваемое на R_1 выходное напряжение передается на базу второго транзистора

140

через своеобразный делитель напряжения, образованный из соединенных последовательно конденсатора C и резистора R_3 . Если емкостное сопротивление конденсатора C слишком велико по сравнению с сопротивлением резистора R_3 , то база получит лишь ничтожную часть выходного напряжения первого транзистора. Если возьмем электролитический конденсатор емкостью 10 мкФ, то для частоты 50 Гц его емкостное сопротивление составит 325 Ом. В этом случае все будет хорошо, так как наибольшая часть напряжения будет добросовестно передана на базу второго транзистора.

НЕПОСРЕДСТВЕННАЯ СВЯЗЬ

У тебя должно быть сложилось впечатление, что использовать полупроводниковые приборы значительно сложнее, чем электронные лампы. Так я успокою тебя и покажу, что в транзисторных схемах связь можно осуществить резистором и обойтись вообще без конденсатора (рис. 152).

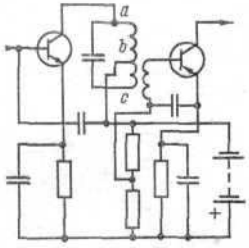


Рис. 150. Трансформаторная связь между каскадами ВЧ и ПЧ.

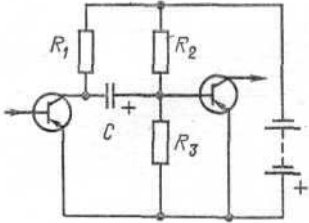


Рис. 151. Связь с помощью резисторов и конденсатора между двумя транзисторными усилительными каскадами.

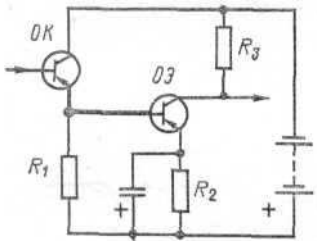


Рис. 152. Непосредственная связь с помощью резистора R_1 , включенного в выходную цепь первого транзистора и во входную цепь второго.

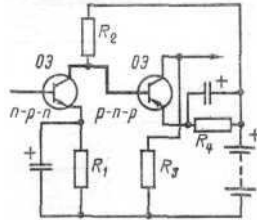


Рис. 153. Непосредственная связь между двумя транзисторами противоположных типов: *n-p-n* и *p-n-p*.

В самом деле, между двумя транзисторами можно установить непосредственную связь. Для этой цели первый транзистор включают по схеме с ОК, а второй — по схеме с ОЭ. На рисунке я провел жирную линию, непосредственно связывающую эмиттер первого транзистора с базой второго. В результате переменное напряжение, создаваемое на нагрузочном резисторе R_1 (по нему протекает ток коллектора), прилагается непосредственно к базе второго транзистора. А падение напряжения, создаваемое на резисторе R_1 постоянной составляющей

141

первого транзистора, делает базу второго транзистора отрицательной относительно его эмиттера. Тем не менее в этой схеме мы видим электролитический конденсатор. Он только шунтирует резистор R_2 , обеспечивающий отрицательную обратную связь, нейтрализующую температурные явления.

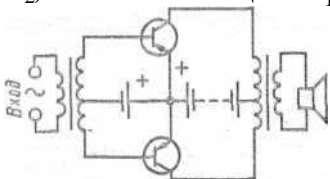


Рис. 154. Двухтактная схема. Транзисторы включены по схеме с ОЭ.

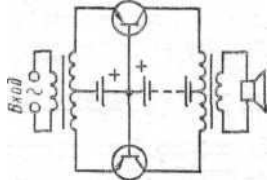


Рис. 155. Двухтактная схема. Транзисторы включены по схеме с ОБ.

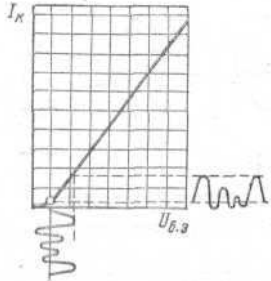


Рис. 156. Работа транзистора в режиме В. Кривая показывает величину тока в зависимости от напряжения база — эмиттер.

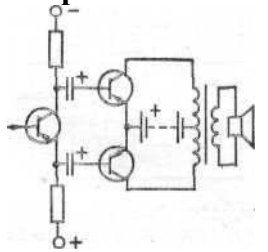


Рис. 157. Двухтактная схема с транзистором в качестве фазоинвертора.

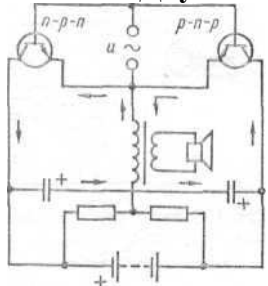


Рис. 158. Двухтактная схема с двумя транзисторами противоположных типов, на которые непосредственно подается входное напряжение.

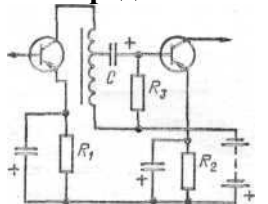


Рис. 159. Каскады НЧ с комбинированной связью, в которой используются автотрансформатор, конденсатор и резистор.

Можно также установить непосредственную связь между коллектором первого транзистора и базой второго, если использовать транзисторы противоположных типов. На схеме, которую ты видишь, первый транзистор относится к типу *n-p-n*, а второй — к типу *p-n-p*. Оба они включены по схеме с общим

эмиттером (рис. 153). Переменное напряжение, которое ток коллектора создает на резисторе R_2 , непосредственно прилагается к базе второго транзистора. Здесь мы также видим резисторы R_1 и R_4 температурной стабилизации, зашунтированные электролитическими конденсаторами.

Непосредственная связь, какую я показал тебе на двух последних рисунках, обладает большими преимуществами. Если в схеме присутствует конденсатор связи, его емкостное сопротивление изменяется в зависимости от частоты, причем на самых низких частотах это сопротивление становится колоссальным. При непосредственной связи эта проблема не возникает. Поэтому такую связь можно использовать даже при усилении постоянных напряжений. Под этим я понимаю малые и медленные изменения постоянного напряжения.

ДВУХТАКТНАЯ СХЕМА НА ТРАНЗИСТОРАХ

Вернемся, однако, к усилению переменных напряжений и рассмотрим работу каскадов НЧ. Связь между этими каскадами может осуществляться как с помощью трансформаторов с магнитопроводом, так и с помощью резисторов и конденсатора.

Наибольший интерес при использовании транзисторов представляет создание выходных каскадов, собранных по двухтактной схеме. Ты увидишь, что они имеют существенные отличия от ламповых схем.

Вот две двухтактные схемы, где сдвиг фазы осуществляется с помощью трансформатора со средним отводом во вторичной обмотке. В первом случае используются транзисторы, включенные по схеме с ОЭ (рис. 154), а во втором — по схеме с ОБ (рис. 155). Ради предельного упрощения схем я показал, что смещение подается на базы от специальной батареи.

В приведенных схемах смещение можно выбрать такой величины, что в случае отсутствия сигнала на входе ток коллектора будет почти равен нулю. В этих условиях при подаче сигнала на вход положительный полупериод вызовет ток в одном из транзисторов, а отрицательный полупериод — в другом.

Какую цель преследуют при подаче такого смещения? Это позволяет значительно сократить потребление энергии от батареи. Ведь в данном каскаде используют мощные транзисторы, потребляющие относительно большой ток. И если их заставить работать на прямолинейном участке характеристики, показывающей зависимость тока коллектора от напряжения база - эмиттер, то потребляемый ток окажется слишком большим даже в моменты отсутствия сигнала на входе усилителя. Поэтому лучше установить рабочую точку на нижнем изгибе этой кривой (рис. 156). Такой режим работы называют режимом *B*.

При использовании одного транзистора это было бы эквивалентно усилению при одновременном детектировании, так как усиливается только один полупериод из каждого полного периода. Но в двухтактном каскаде выходной трансформатор поочередно получает один усиленный полупериод с одного транзистора, а затем другой усиленный полупериод со второго транзистора.

Таким образом, усиление происходит без искажений, а потребление тока сведено до минимума, что позволяет более экономно использовать батареи.

С ФАЗОИНВЕРТОРОМ ИЛИ БЕЗ НЕГО

Можно обойтись и без трансформатора-фазоинвертора. Точно так же, как в ламповых схемах катодный повторитель позволяет изменять фазу напряжений, здесь можно получить напряжение в противофазе с помощью падения напряжения на нагрузочных резисторах, включенных в цепи эмиттера и коллектора (рис. 157).

143

А теперь я покажу тебе самую любопытную из всех двухтактных схем: схему, которая может обойтись вообще без изменяющего фазу устройства. Как? Да очень просто - в схеме используются два транзистора противоположных типов (рис. 158).

На рисунке, который ты видишь, транзисторы типов $n-p-n$ и $p-n-p$ включены по схеме с ОЭ. Когда во время одного из полупериодов обе базы положительны, ток коллектора транзистора типа $n-p-n$ увеличивается и протекает снизу вверх (по схеме) по первичной обмотке выходного трансформатора. При следующем полупериоде, когда базы становятся отрицательными, ток коллектора транзистора типа $p-n-p$ становится больше и протекает по первичной обмотке трансформатора на этот раз в противоположном направлении: сверху вниз (по схеме). Как видишь, здесь даже нет необходимости иметь средний отвод в первичной обмотке.

Как видишь, транзисторы тоже позволяют создать оригинальные схемы. И ты еще не все их знаешь...

КОМБИНИРОВАННАЯ СВЯЗЬ

В заключение я покажу тебе комбинированную связь для каскадов НЧ, для создания которой одновременно используют согласующий автотрансформатор, конденсатор и резистор (рис. 159). Посмотри повнимательнее на схему. Теперь ты имеешь достаточные знания, чтобы легко понять, как работает эта схема.

Желаю удачи!

- О -

144

БЕСЕДА ТРИНАДЦАТАЯ

СУПЕРГЕТЕРОДИН НА ТРАНЗИСТОРАХ

В этой беседе двое наших друзей обсуждают работу супергетеродина. Они рассматривают возможность осуществления автоматической регулировки усиления в транзисторных радиоприемниках. Заканчивают беседу изучением применения полупроводниковых приборов в различных каскадах приемника.

ДЕЙСТВИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Незнайкин. — С тех пор как твой дядюшка и ты сам рассказали мне о различных схемах на транзисторах, я испытываю любопытное ощущение: у меня такое впечатление, будто я прогуливаюсь по улице «полупроводниковых приборов», которая идет параллельно улице «электронных ламп». Обе улицы весьма похожи друг на друга, но когда начинаешь повнимательнее рассматривать здания, обнаруживаешь немало различий.

Любознайкин. — Не вижу ничего удивительного. Транзисторы должны выполнять те же самые функции, что и лампы. Ты уже знаешь, как они усиливают напряжения в разных диапазонах частот, и только что услышал, как устроены на них мощные каскады. Ты знаком с детектированием на полупроводниковых диодах и с различными способами осуществления отрицательной обратной связи.

Н. — Однако до сих пор ты не рассказал мне, как осуществляется в транзисторных схемах положительная обратная связь. Я помню, что в ламповых схемах для осуществления такой связи с выхода снимают часть усиленного тока и возвращают на вход посредством индуктивной связи между цепями анода и сетки.

Эта обратная связь неизменно заставляет меня думать о змее, кусающей себя за хвост... И я помню, что обратная связь позволяет увеличить коэффициент усиления, повышая тем самым чувствительность приемников. И если еще увеличить обратную связь, то начинается генерирование колебаний. Это явление используется не только в передатчиках для создания несущих токов ВЧ, но и в супергетеродинных приемниках для преобразования частоты посредством биений с токами, принятыми антенной.

Л. — Твоя память, мой дорогой друг, доставляет мне удовольствие и облегчит объяснения, которые я собираюсь дать.

Посмотри на эту схему, она совершенно аналогична ламповым схемам с обратной связью. Мы видим настроенный контур, включенный на вход транзистора между базой и эмиттером. С этими

электродами контур соединен через конденсаторы, пропускающие переменные составляющие (рис. 160).

145

Учитывая малое входное сопротивление транзистора, параллельно ему включили лишь часть катушки настроенного контура, чтобы он не оказался слишком зашунтированным, что снизило бы его избирательность.

Н. — Я вижу, что токи обратной связи наводятся в этой катушке обмоткой, которая связана с нею и по которой протекает усиленный ток коллектора.

Л. — Совершенно верно. Видишь, насколько это похоже на создание обратной связи в схемах на лампах? Здесь также можно создать регенеративный детектор, сделав связь между двумя обмотками регулируемой и подав на базу смещение, при котором транзистор обеспечивал бы детектирование.

Н. — Я никогда не видел приемников на транзисторах, в которых перемещают катушку обратной связи для регулирования величины этой связи.

Л. — То, что некогда применялось в ламповых приемниках, уже не применяется в транзисторных. Обратная связь используется в них в основном для генерирования колебаний, необходимых для преобразования частоты. В этом случае на вход подключают настроенный контур, который получает принятые антенной колебания, а в выходную цепь включают настроенную первичную обмотку первого трансформатора промежуточной частоты.

Н. — Вот мы и подошли к схеме супергетеродина. Однако, прежде чем ты начнешь говорить о деталях, я хотел бы задать

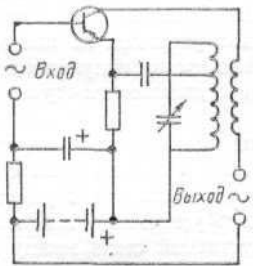


Рис. 160. Преобразователь частоты, в котором транзистор генерирует колебания, смешивающиеся с входными сигналами.

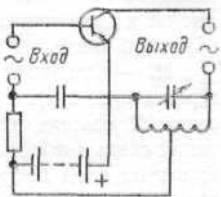


Рис. 161. Генератор по трехточечной схеме.

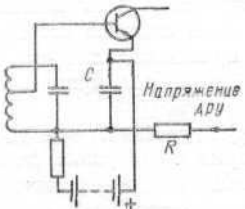


Рис. 162. Напряжение АРУ подается на базу транзистора.

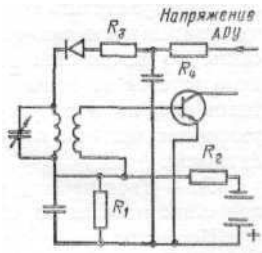


Рис. 163. Схема с демпферным диодом, включенным параллельно колебательному контуру.
146

нескромный вопрос: можно ли на транзисторе сделать схему, аналогичную ламповой трехточке, где усиленный выходной ток протекает по части катушки колебательного контура?

Л. — Нет ничего проще. Ты видишь, что в этой схеме ток коллектора проходит по части катушки колебательного контура (рис. 161).

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ

Н. — Когда мы говорили об обратной связи, я вспомнил об автоматической регулировке усиления. Здесь усиленные напряжения тоже снимаются после детектирования и направляются к усилительным лампам ВЧ или ПЧ, чтобы воздействовать на их переменную крутизну.

Можно ли воспользоваться подобным средством в транзисторных схемах?

Л. — Вполне. Крутизна транзистора зависит от величины его эмиттерного тока. А та, в свою очередь, изменяется в зависимости от потенциала базы. Следовательно, прилагая на базу напряжения АРУ, изменяют коэффициент усиления транзистора, повышая его, когда вследствие замирания напряжения ВЧ в антенне становится слабее.

Н. — Одним словом, АРУ осуществляется здесь так же просто, как в приемниках на лампах. Продетектированное напряжение выравнивается резистором R и конденсатором C и затем подается на базы транзисторов УВЧ и УПЧ (рис. 162).

Л.—Увы, Незнайкин, с транзисторами все это намного сложнее, чем с лампами. Не забывай, что входная цепь здесь имеет относительно небольшое сопротивление, включенное параллельно с настроенным контуром. Когда же напряжение АРУ изменяет потенциал базы, изменяется не только коэффициент усиления транзистора, но и его входное сопротивление. Затухание в колебательном контуре снижается, и его избирательность возрастает.

Н. — Тем лучше!

Л. — Нет, мой друг, ибо избыточная избирательность слишком ограничивает ширину полосы частот, пропускаемых этим контуром. В результате частоты, отстоящие дальше от несущей частоты, оказываются ослабленными или вообще срезанными. Это выражается в ослаблении или даже в исчезновении высоких звуков.

ДИОД, ВНОСЯЩИЙ ПЕРЕМЕННОЕ ЗАТУХАНИЕ

Н. — Как исправить эту печальную ситуацию?

Л. — Это удастся сделать включением параллельно настроенному контуру одного демпферного диода (рис. 163). Схему рассчитывают так, что при малом напряжении АРУ диод не пропускает ток и поэтому не вносит затухания. Но когда сигналы становятся сильными, напряжение АРУ превышает потенциал общей точки резисторов R_1 и R_2 , которые образуют

делитель напряжения, В этом случае диод пропускает ток. Это означает, что его сопротивление перестает быть бесконечным и становится тем меньше, чем выше напряжение АРУ. Снижение

сопротивления цепи, обозначенной на схеме жирной линией, вносит затухание в настроенный контур, благодаря чему его избирательность остается неизменной.

Н. — Очень хитрая схема! Я констатирую, что специалистам по электронике удастся исключительно оригинально решать самые сложные проблемы.

ПРИЕМ В НЕСКОЛЬКИХ ДИАПАЗОНАХ ВОЛН

Л. — Поверь мне, в каждой области радиотехники есть немало сложных проблем. Так, желание принимать в нескольких диапазонах волн обязывает иметь столько же разных индуктивностей в схемах настройки ВЧ, включая и схему гетеродина в каскаде преобразователя частоты. Так, например, чтобы перейти с приема в диапазоне ДВ на прием в диапазонах СВ или КВ, нужен переключатель, позволяющий подключать к схеме соответствующие катушки. Можно установить несколько отдельных катушек, но чаще используют катушки, соединенные последовательно. Катушка, имеющая самое малое количество витков, служит для приема КВ; она же, соединенная последовательно со следующей катушкой, позволяет настроиться на СВ, а все три соединенные последовательно катушки используются для приема передач на ДВ.

Н. — А антенна должна соединяться с каждой из этих катушек?

Л. — Да, но в большинстве современных приемников традиционная антенна служит лишь для приема КВ. Средние и длинные волны принимают с помощью миниатюрных ферритовых антенн, состоящих из катушек, надетых на электромагнитные сердечники. Я позволю себе напомнить, что сердечники представляют собой прекрасные проводники магнитных силовых линий и поэтому концентрируют в себе поля электромагнитных волн. Благодаря этому эти маленькие собиратели волн эквивалентны рамочным антеннам без сердечника значительно больших размеров.

КАРМАННЫЙ ПРИЕМНИК

Н. — Теперь-то я понимаю, как принимают передачи далеких радиостанций крохотным карманным радиоприемником. Однако какой должна быть схема, уместяемая в такой маленький объем?

Л. — Это вполне может быть супергетеродин, состоящий из преобразователя частоты, двух каскадов УПЧ, детектирующего диода и двух каскадов УНЧ, причем выходной каскад может быть собран по двухтактной схеме.

Н. — Ты просто смеешься надо мною, Любознайкин! Как можно в таком крохотном корпусе уместить полдюжины транзисторов, один или два диода, два конденсатора переменной емкости,

148

множество катушек, конденсаторов и резисторов, не говоря уже о соединительных проводах и батареях питания...

Л. — Ну хорошо, я попрошу моего дядюшку объяснить тебе различные методы миниатюризации и микроминиатюризации. Они применяются повсеместно, за одним только исключением.

Н. - Каким?

Л. — Не удалось микроминиатюризовать человеческое существо. Вот почему конструкторы вынуждены не слишком уменьшать размеры органов управления, таких как вращающиеся ручки, кнопки и т. п.

Н. — На мой взгляд, это очень счастливое исключение.

149

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ

ПЕЧАТНЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

В наши дни во всей выпускаемой серийно электронной аппаратуре используют печатные платы, что сокращает затраты труда и стоимость монтажа. Кроме того, все шире используются методы

микроэлектроники, основанные на применении интегральных схем. Какую роль играют печатные и интегральные схемы, как они устроены и как их производят—все это объясняет здесь профессор Радиоль.

Мои дорогие друзья! Знаете ли вы, что производство радиоприемников требует много монтажных работ? Еще недавно все соединения между различными компонентами выполнялись медным проводом, который для создания прочного контакта припаивали к нужным точкам схемы.

В настоящее время все соединения выполняют печатным способом. Серийное производство печатных схем обходится значительно дешевле. Кроме того, они обеспечивают более надежные контакты.

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Как изготавливают печатные платы в наши дни? Ты поймешь, Незнайкин, это совсем не сложно.

Печатные платы делают из пластинок из изоляционного материала, покрытых с одной стороны тонким слоем меди. Части поверхности этого проводящего слоя, которые будут служить соединительными проводниками, надлежит покрыть защитным лаком. Затем пластинку опускают в раствор кислоты, который стравливает незащищенные участки меди. Во всех точках, где должны быть соединения, сверлят отверстия. С другой стороны пластинки устанавливают компоненты, контактные выводы которых вставляют в соответствующие отверстия. Теперь остается лишь соединить пайкой эти выводы и находящиеся вокруг них участки меди. Все пайки выполняют одновременно — для этого покрытую медью сторону пластинки окунают в расплавленное олово.

ФОТО НА СЛУЖБЕ ЭЛЕКТРОНИКИ

Видишь, насколько это проще и дешевле, чем прокладка множества соединений монтажным проводом. Но ты, несомненно, спрашиваешь себя, каким образом покрывают защитным лаком те участки слоя меди, которые должны остаться, когда все остальное исчезнет под воздействием кислоты.

Ну так вот, здесь тоже прибегают к фотографическому методу. Сначала рисуют общую картину расположения соединительных проводников, которые должны быть на печатной схеме. Затем этот рисунок фотографируют и получают негатив на прозрачной пленке. Эту пленку накладывают на медную пластинку, предварительно покрытую светочувствительным слоем. Последний под воздействием света становится нерастворимым в кислоте, которая в обычных условиях легко его растворяет.

Проецируя сильный свет через негатив, делают нерастворимыми все участки светочувствительного слоя, которые соответствуют черным местам оригинального рисунка и которые на пленочном негативе вышли прозрачными.

Теперь, как ты догадываешься, остается опустить нашу пластинку в раствор, который растворит все участки слоя, не подвергшиеся воздействию света. После этой операции получим пластинку, все сохранившиеся участки

150

медного слоя которой защищены противокислотным слоем. Другой растворитель позволяет легко удалить этот лак.

Вот, мой дорогой Незнайкин, как изготавливают печатные платы, которые освобождают нас от наибольшей части монтажных работ.

УСТРОЙСТВО ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

После появления полупроводниковых приборов методы, разработанные для производства печатных плат, облегчили конструирование и изготовление *интегральных схем*. Но еще раньше, я надеюсь, что ты не забыл моих объяснений по этому вопросу, эти методы позволили наладить производство транзисторов по планарной технологии.

Что называют интегральной схемой? Это кусочек полупроводника, в котором создаются схемы, содержащие несколько активных и пассивных компонентов. То, что в полупроводнике создают такие компоненты, как транзисторы и диоды, тебя, конечно, не удивляет. Но то, что интегральная схема содержит также сопротивления, емкости, небольшие индуктивности и различные соединяющие их проводники, наверняка покажется тебе маловероятным. И тем не менее это так.

Но самое поразительное во всем этом — так называемая плотность компонентов, которая характеризует количество компонентов, содержащихся в интегральной схеме. Именно благодаря ей микроминиатюризация достигла поразительного прогресса. Знай, что в наши дни удалось получить интегральную схему величиной с булавочную головку и содержащую сотню транзисторов!!! Такие интегральные схемы используют в электронных вычислительных машинах.

СОЗДАНИЕ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Посмотрим, как изготавливают эти крохотные схемы. Как полупроводник превращают в транзисторы и диоды, ты уже знаешь. Но как создаются пассивные компоненты?

Для создания резисторов в массу полупроводника методом сплавления или диффузии вводят соответствующим образом дозированное количество примесей, благодаря чему участки определенной длины и сечения приобретают необходимое удельное электрическое сопротивление. Резисторы можно также сформировать, покрывая полупроводник тонким изолирующим слоем кварца и нанося поверх него резистивное вещество; для получения необходимой длины линии этого вещества ему часто придают самую причудливую форму.

Для создания конденсаторов полупроводник покрывают тонким слоем диэлектрика и поверх него наносят слой металла, образующего вторую обкладку. Небольшие емкости можно получить с помощью простых диодов, напряжения на которые подают в противоположном их проводимости направлении. При этом переход выполняет роль диэлектрика, разделяющего две обкладки конденсатора.

Труднее всего получить в интегральной схеме индуктивности. Однако удается сделать очень маленькие индуктивности, работающие на сверхвысоких частотах (СВЧ). Для этой цели на изолирующий слой кварца наносят металл в форме плоской спирали.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ БИС

Конечно, не во всех интегральных схемах микроминиатюризация достигла уровня, о котором я только что говорил. Имеются средние интегральные схемы. В них плотность размещения компонентов значительно ниже, чем

151

в больших интегральных схемах (БИС). Последние могут содержать несколько тысяч компонентов. Как удастся выполнять такие операции, как нанесение на заданные участки изолирующих или проводящих слоев, ввод методом сплавления или диффузии в некоторые участки полупроводника строго дозированных примесей? Как можно справиться с такой задачей, особенно при производстве БИС?

И в этом случае основную роль играет фотография. В самом деле, для каждой операции первоначально создается рисунок, изображающий форму поверхностей, которые должны подвергнуться той или иной обработке. Но эти рисунки в сотни или даже тысячи раз крупнее тех элементов, которые должны создаваться на полупроводнике. Затем рисунки фотографируют с большим уменьшением; в результате этой операции получают негативы на прозрачной пленке. Эти негативы, в свою очередь, с большим уменьшением проецируют на поверхность полупроводника, покрытую светочувствительным лаком.

Как ты мог убедиться, здесь прибегают к помощи тех самых фотографических процессов, которые используют в производстве печатных плат. Светочувствительный слой защищает те участки полупроводника, которые под воздействием света через негатив становятся нерастворимыми.

Самое удивительное то, что длина волны обычного света оказывается слишком большой для производства некоторых микроэлектронных схем. Самая короткая волна видимого света — у фиолетового цвета; она равна 380 нм (миллиардных долей метра). Это слишком много для изготовления некоторых БИС. В этом случае приходится брать на вооружение ультрафиолетовые лучи, волна которых значительно короче волны фиолетового света.

Наиболее сложно в процессе изготовления интегральных схем установить выводы для подключения их к другим устройствам. Для этого все точки интегральных схем, которые должны иметь внешние выводы, соединяют тонкими золотыми или алюминиевыми проволочками с контактами на корпусе, в который помещают всю интегральную схему. Эта операция очень тонкая, поэтому выполняют ее под микроскопом.

ПРИЧИНЫ МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИИ

Дорогой Незнайкин, ты, должно быть, спрашиваешь себя, какие серьезные причины заставили исследователей придумать эти сложные процессы микроминиатюризации. Действительно ли требуется выиграть место, до такой степени снижая объем интегральных схем? Даже в карманном приемнике это не кажется столь необходимым.

Развитие микроэлектроники определяется прежде всего прогрессом электронной вычислительной техники. ЭВМ содержат тысячи компонентов. Исследователи стремятся всемерно уменьшить размеры компонентов не только для того, чтобы выиграть место, но и для того, чтобы машины могли работать быстрее. Ведь некоторые операции в машинах производятся за доли наносекунды. А какой длины путь проходит электрический ток за одну наносекунду, даже если он движется со скоростью света? Он проходит за это время только 30 см. Это должно показать тебе, что, если хотят обеспечить максимальное быстродействие ЭВМ, необходимо до минимума сократить расстояния между компонентами.

Однако не будем слишком углубляться в вычислительную технику. Тебе, Незнайкин, предстоит еще немало изучить в области звукозаписывающей и телевизионной техники.

- О -

152

БЕСЕДА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

В чем заключаются принципы частотной модуляции? Почему передачи с частотной модуляцией должны производиться на метровых волнах? Какими преимуществами обладает частотная модуляция по сравнению с классической амплитудной модуляцией? Как осуществляется частотная модуляция в передатчиках? Все эти вопросы обсуждаются в этой беседе.

СКОЛЬКО ПЕРЕДАТЧИКОВ МОЖЕТ РАБОТАТЬ В КАЖДОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН?

Незнайкин.— В мой день рождения родители сделали мне подарок, который привел меня в восторг; чудесный переносный радиоприемник довольно больших размеров. Он имеет три диапазона: ДВ, СВ и УКВ. Третий диапазон обозначен буквами ЧМ, смысла которых я, по правде говоря, не понял, а на шкале для настройки обозначены частоты от 65,8 до 73 МГц. Я рассчитал, что эти частоты соответствуют волнам длиной от 4,56 до 4,11 м. Это ужасно узкий диапазон. И тем не менее мне удалось принять передачи нескольких станций. Самое любопытное то, что эти передачи отличаются изумительной чистотой звучания.

Любознайкин. — Буквы ЧМ обозначают, что передачи в этом диапазоне ведутся с частотной модуляцией. По сравнению с амплитудной модуляцией (АМ), используемой на длинных и средних волнах, частотная модуляция обеспечивает более высококачественное воспроизведение принимаемых программ.

Но прежде чем приступить к объяснению, я хочу отметить, что диапазон, в котором ведутся передачи с ЧМ, совсем не так узок, как ты сказал.

Н. — Мой дорогой друг, я достаточно силен в математике, чтобы утверждать, что интервал между 4,11 и 4,56 составляет всего-навсего 45 см. Тогда как диапазон СВ простирается от 185 до 580 м, что составляет почти 300 м. Я уже не говорю о диапазоне ДВ, растянувшись на 800 м.

Л. — Мне хотелось бы, чтобы ты иначе рассматривал длину волн. Давай произведем некоторые расчеты.

Помнишь, что объяснял мой дядюшка относительно ширины полосы частот при АМ? Полоса передаваемых звуковых частот ограничена 4500 Гц. Она образует по обе стороны несущей волны полосы модуляции шириной 4500 Гц. Это означает, что каждая передача с АМ занимает в общей сложности полосу частот шириной 9 кГц.

153

Н. — Я помню. По этой причине частоты несущих волн передающих станций разнесены на 9 кГц.

Л. — Совершенно верно. Сможешь ли ты подсчитать, сколько станций с разнесенными таким образом частотами может уместиться в диапазоне ДВ, занимающем полосу частот от 150 до 350 кГц?

Н. — Рассчитать легко. Ширина диапазона составляет 200 кГц. Разделив эту величину на 9 кГц, я определил, что в этом диапазоне волн могут работать 22 передатчика.

Л. — А теперь проделай эти же расчеты для диапазона СВ, частоты которого находятся в пределах от 500 до 1650 кГц.

Н. — Хорошо. Здесь располагаем полосой 1150 кГц. Если я разделю это число на 9, то получу почти 128. Вот какое количество станций может одновременно работать в диапазоне СВ на различных частотах несущих волн.

А теперь и без просьбы с твоей стороны я проделаю эти же расчеты для диапазона ЧМ, имеющего частоты от 65,8 до 73 МГц. Ширина диапазона равна 7,2 МГц, или 7200 кГц. Деление этого числа на 9 дает 800. Просто чудовищно! Я никогда бы не подумал, что на этом пространстве в 45 см можно разместить такое большое количество передатчиков, частоты которых различаются между собой на 9 кГц.

ШИРИНА БОКОВЫХ ПОЛОС ПРИ ЧМ

На самом же деле, дорогой Незнайкин, в этом интервале может уместиться лишь несколько больше 20 передатчиков с ЧМ, имеющих разные несущие частоты. Дело в том, что они должны разноситься уже не на 9, а на 300 кГц.

Н.— Почему такой чудовищный разнос? Неужели ширина каждой боковой полосы достигает 150 кГц? Ведь диапазон слышимых частот не превышает 20 кГц.

Л. — Это верно, но в ЧМ отклонения частоты от несущей определяются не частотой модулирующих звуков, а их амплитудой. И когда амплитуды очень велики, частоты отклоняются на 100 кГц по обе стороны от несущей. Таким образом, общая полоса, занимаемая каждым передатчиком, достигает 200 кГц. И чтобы избежать интерференции между волнами двух передатчиков, предпочитают разнести их несущие на 300 кГц.

ДАЛЬНОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕТРОВЫХ ВОЛН

Н. — Одним словом, несмотря на этот чудовищный разнос, можно иметь несколько больше 20 передающих станций с длиной волны в пределах от 4,11 до 4,56 м.

Л. — На практике же их значительно больше. Ведь можно иметь несколько передатчиков с одной и той же несущей частотой. Нужно только, чтобы они были расположены достаточно далеко друг от друга. Ты же знаешь, что дальность распространения метровых волн весьма ограничена. Она не превышает сотни километров.

Н. — Да, я вспоминаю, что эти волны ведут себя подобно световым. Они распространяются прямолинейно и не отра-

154

жаются ионосферой, как это происходит со средними волнами, которые благодаря этому могут обнаруживаться на больших расстояниях.

Н. — В самом деле, метровые волны легко проникают в ионосферу, где и поглощаются. Для обеспечения достаточной дальности распространения необходимо антенну располагать как можно более высоко. Так, например, в Париже три программы ЧМ передаются антеннами, установленными на вершине Эйфелевой башни.

ПРИНЦИП И ПРЕИМУЩЕСТВА ЧМ

Н. — Не можешь ли ты объяснить мне теперь, в чем заключается принцип ЧМ и какими преимуществами обладает она по сравнению с АМ?

Л.— При ЧМ амплитуда несущей волны не изменяется. В зависимости от мгновенных значений передаваемых звуковых сигналов изменяется частота излучаемых волн, а величина этих частотных изменений определяется амплитудой сигналов НЧ (рис. 164).

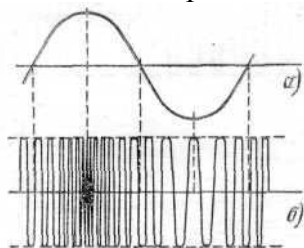


Рис. 164. Модулирующий сигнал низкой частоты (а) и модулированный по частоте ток высокой частоты — его амплитуда остается неизменной (б).

Н. — Именно это и объясняет чудовищную ширину боковых полос модуляции, которые, как ты мне сказал, могут достигать 100 кГц.

Л.— Разумеется, и благодаря этому можно получить очень высокое соотношение между *фортиссимо* и *пианиссимо* передаваемых звуков.

Н. — Почему? Ведь при АМ можно иметь удвоенные амплитуды, а на другом конце волны амплитуды почти равны нулю.

Л.— Эта последняя возможность... невозможна. Нельзя чрезмерно снижать амплитуду волн, так как они должны оставаться выше уровня *фонового шума*.

Н.— Что ты так называешь? Не своеобразный ли свист, слышимый в приемнике при отсутствии передачи?

Л. — Точно. Это вызывается целым комплексом внутренних и внешних факторов. Во-первых, существуют атмосферные и промышленные помехи; во-вторых, в самом приемнике (в полупроводниковых приборах и в резисторах) наблюдается тепловое движение, порождающее этот свист, уровень которого должны превосходить даже самые слабые ноты передаваемой музыки. Это означает, что соотношение между самыми сильными и самыми слабыми звуками, передаваемыми с АМ, относительно ограничено (рис. 165),

155

Н. — А каково наибольшее соотношение между *фортиссимо* и *пианиссимо* оркестра, когда мы его слушаем в зале?

Л.— Оно может достигать десяти тысяч. Даже при ЧМ при приеме нельзя воспроизвести такого высокого соотношения. Однако удается получить вполне достаточное соотношение в громкости звуков.

Итак, подведем итоги: ты видишь, что модулированная по частоте волна имеет постоянную амплитуду. Ее частота изменяется в соответствии с частотой модулирующих сигналов. Если, например, используются сигналы с частотой 1000 Гц, то частота излучаемой волны изменяется 1000 раз в секунду.

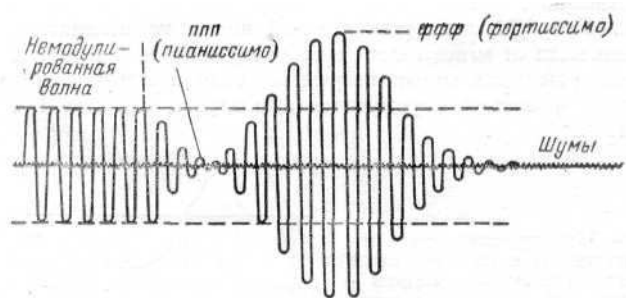


Рис. 165. При АМ пределы модуляции ограничиваются удвоенной амплитудой немодулированной волны по максимуму и внутренними шумами (по минимуму).

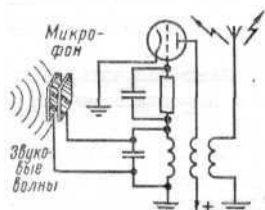


Рис. 166. Для осуществления ЧМ можно использовать в качестве микрофона конденсатор, емкость которого изменяется под воздействием звуковых волн и тем самым заставляет изменяться частоту передатчика.

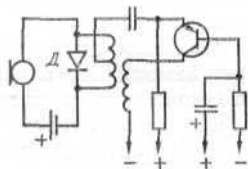


Рис. 167. Диод *Д* под воздействием микрофонных сигналов изменяет частоту колебательного контура.

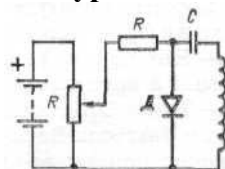


Рис. 168. Диод *Д*, включенный в противоположном его проводимости направлении, выполняет роль конденсатора, емкость которого изменяется в зависимости от напряжения и таким образом изменяет настройку контура.

156

А размах этих изменений частоты зависит от амплитуды модулирующих сигналов.

Н. — Если я правильно понял, здесь частота передаваемых звуковых сигналов не ограничена полосой 4500 Гц, как при АМ.

Л. — Разумеется. И именно в этой ширине передаваемой полосы частот, а также в неограниченном соотношении их амплитуд заключается несомненное превосходство ЧМ над АМ. Кроме того, стабильность амплитуды волн обеспечивает прекрасный коэффициент полезного действия (к. п. д.) передатчиков.

КАК МОДУЛИРУЮТ ЧАСТОТУ?

Н. — Как осуществляют в передатчике модулирование несущей волны по частоте? Я предполагаю, что здесь нужно изменять настройку колебательного контура генератора высокой частоты.

Л.— Твое предположение логично и справедливо. А ты знаешь, от чего зависит частота настройки этого контура?

Н. — Разумеется. От величины его индуктивности и емкости. Но как удастся изменять их в зависимости от токов НЧ?

Л. — Изменяют емкость. Для этой цели можно даже сделать микрофон в виде конденсатора, одна из обкладок которого жесткая, а другая достаточно эластичная, чтобы вибрировать под воздействием звуковых волн (рис. 166). Однако такой микрофон страдал бы недостаточной верностью воспроизведения звуков. Поэтому используют схемы, в которых внутренняя емкость между двумя электродами электронной лампы изменяется под воздействием напряжений НЧ, приложенных к ее управляющей сетке. Схему этого устройства я рисовать не буду.

Н. — А нельзя ли для этой цели использовать полупроводниковые приборы?

Л. — Можно, так как существуют полупроводниковые диоды, представляющие собой настоящие конденсаторы. Если к ним приложить напряжение в направлении, противоположном тому, в котором они пропускают ток, то переход выполняет роль диэлектрика, разделяющего две обкладки конденсатора. Однако в зависимости от величины приложенного напряжения переход становится более или менее «тонким», что изменяет емкость этого оригинального конденсатора. Чем выше напряжение, тем «толще» становится переход, и меньше емкость.

Н. — Следовательно, если на такой диод подать создаваемые микрофоном напряжения НЧ (рис. 167) и если диод-конденсатор является частью колебательного контура генератора ВЧ передатчика, можно осуществить ЧМ, не так ли?

Л.— Я констатирую, что ты прекрасно понял принцип частотной модуляции, и поздравляю тебя с успехом.

Н. — Но я спрашиваю себя, не обладает ли этот диод переменной емкости другими способностями, помимо осуществления ЧМ? Нельзя ли его использовать для настройки контуров вместо классического конденсатора переменной емкости с вращающимися обкладками? В этом случае было бы достаточно поставить потенциометр, позволяющий регулировать напряжение, которое нужно было бы подать на диод, вклю-

157

ченный в контур настройки приемника (рис. 168). Не сказал ли я какой-нибудь глупости?

Л.— Совсем нет. Такие диоды переменной емкости действительно используют для настройки на очень высоких частотах, но только в некоторых приемниках, объем которых должен быть очень небольшим. Основная же область их применения — схемы с автоматической настройкой. Так называют приемники, в которых достаточно приблизительно настроить приемник на частоту принимаемой станции и дальнейшая настройка производится самим приемником автоматически. Для этой цели диод переменной емкости включают параллельно конденсатору настройки и подают на него напряжения, которые, изменяя емкость, обеспечивают точную настройку.

Н.— Это в известной мере средство, позволяющее упростить управление приемником. Но я хотел бы знать, как работает приемник, позволяющий принимать передачи с ЧМ.

Л. — Я объяснил тебе принципы передачи. Сегодня уже слишком поздно, чтобы продолжать нашу беседу. Поэтому я предоставляю моему дядюшке возможность заняться этой проблемой.

158

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ **ПРИЕМ ПЕРЕДАЧ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

Принцип приема передач с частотной модуляцией намного сложнее, чем с амплитудной. Во-первых, из-за очень высокой частоты несущих волн и значительной ширины полосы модуляции, а во-вторых,

из-за трудности преобразования частотно-модулированных колебаний в колебания, модулированные по амплитуде. Все эти проблемы, а также различные способы их решения рассматриваются здесь.

Хорошо ли ты, Незнайкин, понял, почему передачи с частотной модуляцией ведутся на метровых волнах? Я думаю, что после расчетов, которые ты так хорошо выполнил во время последней беседы с моим дорогим племянником, это представляется тебе очевидным. В принципе несущая частота всегда должна в какое-то количество раз превышать ширину полосы модулирующих ее частот.

Когда ты начнешь изучать телевидение, то узнаешь, что полоса частот, позволяющая передавать так называемые «видеосигналы», достигает 6 МГц. Тогда тебя не удивит сообщение, что некоторые телевизионные передатчики работают на дециметровых волнах, т. е. используют несущие частоты в несколько сотен мегагерц.

УСИЛЕНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ

Само собой разумеется, что радиоприемники, рассчитанные на прием передач с ЧМ, представляют собой супергетеродины. Однако, как ты сам хорошо понимаешь, их каскады УПЧ не могут быть настроены на 465 кГц, как это имеет место в приемниках АМ колебаний.

Для того чтобы каскады УПЧ могли пропустить полосу модуляции шириной 300 кГц, их настраивают на частоту 6,5 МГц. Коэффициент усиления этих каскадов небольшой, и поэтому усилитель содержит три каскада.

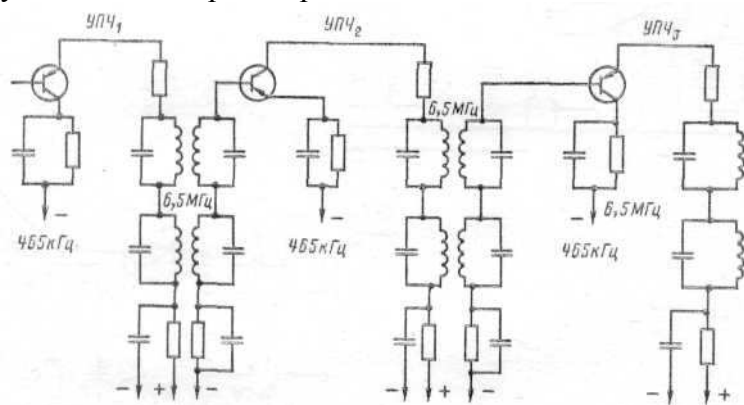


Рис. 169. Один и тот же УПЧ служит для приема передач как с АМ (контуры ПЧ настроены на 465 кГц), так и с ЧМ (контуры ПЧ настроены на 6,5 МГц).

159

Не думай, что в радиоприемниках, способных обеспечивать прекрасное воспроизведение передач как АМ, так и ЧМ, имеется два отдельных УПЧ. Для усиления ПЧ 465 кГц и 6,5 МГц удастся использовать одни и те же лампы или транзисторы.

Как этого достигают? Очень просто, включая последовательно контуры, настроенные на 6,5 МГц, с контурами, настроенными на 465 кГц (рис. 169); первые должны размещаться ближе к усилительным лампам или транзисторам.

Когда в усилитель поступают токи с несущей частотой 465 кГц, они без каких бы то ни было трудностей проходят через контуры, настроенные на 6,5 МГц. Что же касается напряжений этой частоты, то для них контуры, настроенные на 465 кГц, представляют высокое сопротивление.

На рисунке изображена схема УПЧ на трех транзисторах. Как видишь, трансформаторы связи для частоты 465 кГц имеют настроенную первичную обмотку, а для частоты 6,5 МГц — обе настроенные обмотки. Рассмотрите эту схему повнимательнее, в ней нет ничего сложного.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ И УВЧ

По логике, прежде чем говорить тебе о промежуточной частоте, я должен был рассказать об усилении ВЧ и о преобразовании частоты. Для начала запомни, что метровые волны принимаются обычной антенной. Переносные приемники оснащаются так называемой телескопической антенной, которую для приема ЧМ передач нужно выдвинуть.

Преобразователю частоты обычно предшествует один каскад усиления ВЧ. В ламповых приемниках в таком каскаде используют триод, так как на ВЧ он обеспечивает лучший, чем пентод, коэффициент усиления. В преобразователе частоты предпочитают иметь отдельный от смесительной лампы местный

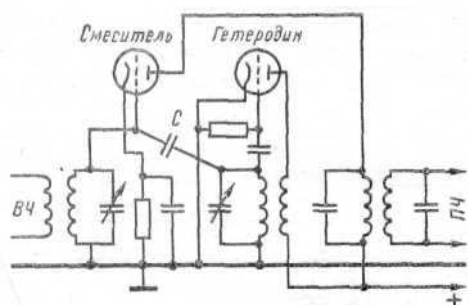


Рис. 170. Преобразователь частоты с отдельным гетеродином, колебания которого подаются на сетку триода-смесителя.

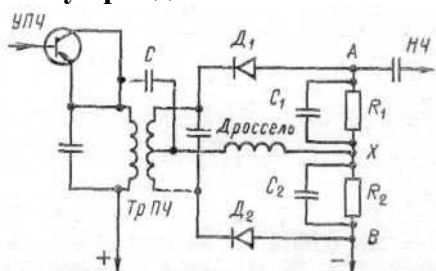


Рис. 171. Схема дискриминатора, служащего для демодуляции усиленных колебаний промежуточной частоты.

160

гетеродин (рис. 170). Для этой цели можно все-таки использовать двойной триод; связь между гетеродином и смесителем в этом случае осуществляется через междуэлектродную емкость, через которую очень высокие частоты легко проходят.

ЧАСТОТНЫЙ ДЕТЕКТОР

Наиболее специфичной и существенно более сложной частью в ЧМ приемнике является устройство, служащее для *демодуляции*. Какова его роль? Она прямо противоположна роли, которую модулятор играет в передатчике.

Демодулятор получает усиленные напряжения промежуточной частоты, которые, за исключением случаев воздействия помех или явления замирания, имеют постоянную амплитуду, но у которых частота изменяется в весьма широких пределах. Эти колебания частоты надлежит преобразовать в пропорциональные им колебания амплитуды. Таким образом, получают сигналы НЧ.

Существует несколько различных способов демодуляции. Я опишу тебе Лишь наиболее распространенные средства, а именно *дискриминатор* и *детектор отношений*. В каждой из этих схем используют два диода; это могут быть как вакуумные, так и полупроводниковые диоды.

ДЕМОДУЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ДИСКРИМИНАТОРА

Схема дискриминатора (рис. 171) связана с последним каскадом УПЧ с помощью трансформатора, первичная и вторичная обмотки которого настроены на промежуточную частоту. Кроме того, появляющиеся в первичной обмотке трансформатора усиленные напряжения через конденсатор С подаются на отвод от середины вторичной обмотки. Каждый из диодов D_1 и D_2 выпрямляет напряжения, появляющиеся в одной половине вторичной обмотки. После выпрямления они создают на резисторах R_1 и R_2 падения напряжений, имеющие противоположную полярность.

В отсутствие модуляции усиленные напряжения промежуточной частоты имеют только частоту 6,5 МГц, на которую настроены обе обмотки последнего трансформатора связи. При этом напряжения на

обеих половинах вторичной обмотки равны между собой. Поэтому после выпрямления они создают на резисторах R_1 и R_2 одинаковые постоянные напряжения, а так как они противоположны по фазе, то взаимно аннулируются, и напряжение между точками A и B равно нулю.

В тех же случаях, когда частота отклоняется от 6,5 МГц, равновесие нарушается. Теперь емкостное сопротивление конденсатора, согласующего вторичную обмотку трансформатора связи, уже не равно индуктивному сопротивлению этой обмотки. В результате напряжение на одном из концов обмотки относительно средней точки отличается в большую или меньшую сторону от напряжения на другом конце обмотки. Поэтому и выпрямленные диодами D_1 и D_2 напряжения уже не равны по величине; между точками A и B появляется разность потенциалов, равная разности между этими двумя напряжениями. Это напряжение тем выше, чем больше поступающая из УПЧ частота отличается от частоты 6,5 МГц, на которую настроен трансформатор связи. А величина этого напряжения изменяется в соответствии с изменением частоты усиленных колебаний.

Это означает, что между точками A и B мы получаем то самое напряжение НЧ, которое в передатчике модулировало частоту несущих колебаний. Остается лишь усилить его известными тебе способами, чтобы затем подать на громкоговоритель.

161

ДЕТЕКТОР ОТНОШЕНИЙ

Схема другого демодулятора, получившего название детектора отношений, похожа на только что изученную нами схему дискриминатора. Но в этой схеме диоды включены не навстречу, а в одном направлении (рис. 172). Таким образом, все напряжения, наведенные во вторичной обмотке трансформатора, выпрямляются и создают между точками A и X и между точками X и B два напряжения, которые складываются. Их сумма, образованная между точками A и B , заряжает электролитический конденсатор C_3 , емкость которого несколько микрофард. Благодаря этой большой емкости напряжение между точками A и B остается неизменным даже в случае быстрых изменений амплитуды, вызываемых атмосферными помехами, и последние не ощущает радиослушатель.

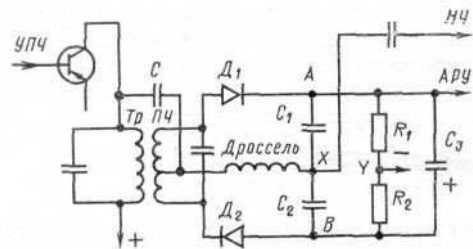


Рис. 172. Демодулятор типа детектора отношений.

Однако это постоянное напряжение между точками A и B изменяется, если вследствие замирания ослабляется электромагнитное поле принимаемых волн. Вот почему это напряжение можно использовать для АРУ.

Что же касается выпрямленных напряжений, появляющихся на обкладках конденсаторов C_1 и C_2 , то они зависят от величин напряжений, наводимых на каждой из половин вторичной обмотки трансформатора ПЧ. Во время изучения работы дискриминатора мы отметили, что эти напряжения идентичны, когда в отсутствие модуляции промежуточная частота не изменяется и равна 6,5 МГц, и различаются между собой, когда промежуточная частота модулирована. В рассматриваемом сейчас случае потенциал точки X изменяется относительно потенциалов точек A и B в такт с изменениями частоты, а амплитуда этих колебаний пропорциональна отклонению частот. Это означает, что в точке X мы имеем демодулированный сигнал НЧ.

Ты убедился, что ЧМ требует создания приемников более сложных, чем АМ. Но эти усложнения заслуживают внимания, так как благодаря им получают такую верность воспроизведения звука, какую АМ обеспечить не может.

- О -

162

БЕСЕДА ПЯТНАДЦАТАЯ.

АНАЛИЗ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В этой беседе освещаются основные принципы современных телевизионных методов передачи изображений. Любознайкин рассказывает своему другу о способе последовательной передачи элементов изображения, рассматривает ширину полосы частот видеосигнала, объясняет причины чересстрочной развертки и упоминает об основных телевизионных стандартах, принятых в разных странах.

КИНЕМАТОГРАФ — ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЙ ВО ВРЕМЕНИ

Незнайкин. — Как всегда, я с большим интересом и вниманием прослушал записанный на магнитную ленту последний монолог твоего дядюшки. С его слов я, надо сказать не без удивления, узнал, что телевизионные сигналы занимают полосу частот чудовищной ширины — целых 6 МГц. Их называют видеосигналами. Я предполагаю, что это название происходит от латинского «я вижу».

Любознайкин. — Я убедился, что ты обладаешь хорошими знаниями латинского языка. Однако, как мне кажется, ты не знаешь самых элементарных принципов телевидения.

Н. — На этот раз, мой дорогой друг, ты несправедлив по отношению ко мне. Я знаю, что в телевидении в секунду передается 25 кадров, что более чем достаточно.

Недавно я прочитал статью об истории изобретения кино. Из статьи я узнал, что братьям Луи и Огюсту Люмьерам удалось создать кино, потому что, на наше счастье, человек обладает способностью запоминать зрительные ощущения. Эти ощущения сохраняются примерно одну десятую часть секунды, но не на сетчатке глаза, как это часто говорят, а в нашем мозгу.

Л. — Совершенно верно. Поэтому первоначально в немом кино показывали по 16 кадров в секунду. Из-за сохранения зрительных ощущений каждый кадр не воспринимался отдельно от предшествующего ему и следующего за ним кадров. Непрерывность восприятия была полностью обеспечена.

С 1930 г. после появления звукового кино скорость чередования кадров повысили до 24 в секунду, что несколько отличается от частоты, принятой в телевидении.

Н. — Сказанное тобой позволило мне понять, почему сейчас при демонстрации по телевидению фильмов, снятых в эпоху немого кино, нас приводит в величайшее изумление чрезмерная скорость всех движений и жестов людей. Объяснение этому

163

явлению очень простое: фильмы, снятые с частотой 16 кадров, показывают со скоростью 25 кадров в секунду. Но все это ни в коей мере не объясняет колоссальной ширины полосы видеосигнала.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЯ В ТЕЛЕВИДЕНИИ

Л. — Пойми, Незнайкин, что между кино, передающим движущиеся изображения во времени, и телевидением, передающим их в пространстве, имеется небольшая разница: каждый кинокадр появляется весь целиком, тогда как в телевидении он образуется в результате последовательного появления всех составляющих его элементов.

Н. — Что ты называешь элементом?

Л. — Этим словом обозначается самая маленькая частица изображения, имеющая настолько крохотную поверхность, что ее яркость можно принять одинаковой. Эти элементы настолько малы,

что их даже называют «точками». Разумеется, что этот термин не точен, так как по данному в геометрии определению точка не имеет ни ширины, ни длины, тогда как последовательно передаваемые элементы изображения имеют конечные размеры.

Н.— А в каком порядке передают элементы изображения?

Л. — Точно в том же, в каком ты читаешь книгу. В каждой строке слева направо ты пробегаешь глазами элементы текста — буквы. Дойдя до конца строки, твой взгляд немного опускается и быстро возвращается влево к началу следующей строки, после чего возобновляется просмотр букв.

Н. — Одним словом, если я правильно понял, каждый передаваемый по телевидению кадр соответствует странице книги? И таких страниц прочитывают по 25 в секунду?

Л. — Совершенно верно.

Н. — Но при скорости 25 страниц в секунду я бы прочитал несколько тысяч страниц полного собрания сочинений Виктора Гюго всего за каких-нибудь несколько минут!.. А какое количество строк содержит телевизионная страница, я хочу сказать — кадр, и сколько букв умещается в каждой строке? Иначе говоря, сколько там точек или элементарных участков поверхности?

Я предчувствую, что твои ответы объяснят чудовищную ширину полосы видеочастот.

ОТСУТСТВИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО СТАНДАРТА

Л. — Твоя интуиция, Незнайкин, тебя не подвела. Теперь же я должен уведомить тебя об отсутствии в области телевидения хорошей международной стандартизации. Характеристики передачи, увы, весьма различны и зависят от страны, где эта передача производится. Так, если в странах Европы частота кадров составляет 25 кадров в секунду, то в американских странах она достигает 30. Это различие объясняется тем, что

164

на нашем континенте частота тока осветительной сети 50 Гц, а по ту сторону Атлантического океана 60 Гц.

Но еще более важно разнообразие стандартов в вопросе количества строк в кадре. В Европе за основную характеристику приняли *четкость изображения* в 625 строк в кадре, а во Франции, кроме передач с четкостью 625 строк, ведутся передачи и с четкостью 819 строк. В Америке четкость изображения составляет 525 строк.

Н. — Я знаю, что единства нет и в области цветного телевидения: американские страны и Япония приняли систему, носящую название NTSC, тогда как европейцы разделились между франко-советской системой SECAM и западногерманской системой PAL.

Л. — Да, мой друг. В наше время, когда прогресс техники обеспечивает все более тесные связи между всеми странами мира и это происходит благодаря быстрому развитию авиации и радио, народы оказались разделенными не только вследствие неудачного строительства Вавилонской башни (и недостаточного распространения практики такого международного языка, как эсперанто), но и различиями в телевизионных стандартах.

Вернемся, однако, к нашим кадрам, разлагаемым на 625 строк. При передаче 25 кадров в секунду скорость передачи строк достигает $625 \times 25 = 15\,625$ строк в секунду.

ПОЛОСА ВИДЕОЧАСТОТ

Н. — А сколько «точек» содержит каждая строка?

Л. — Ширина телевизионного кадра на одну треть больше его высоты (рис. 173). Следовательно, если мы предположим, что каждый элемент изображения представляет собой крохотный

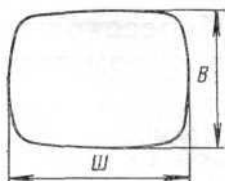


Рис. 173. Ширина III телевизионных кадров на одну треть больше их высоты B .

квадрат, сторона которого равна расстоянию между двумя соседними строками, то количество таких квадратов в строке будет на одну треть больше количества строк в кадре. Следовательно, при разложении изображения на 625 строк каждая из них содержит 833 элемента.

Н. — Позволь мне подсчитать, сколько таких элементов передается в одну секунду. В секунду передается 15 625 строк, и каждая из них содержит 833 элемента, это составляет... Боже мой! Я получил больше 13 миллионов точек в секунду. Чтобы их передать, требуется видеосигнал, имеющий такое чудовищное количество периодов в секунду.

Л. — Нет, так как считают, что каждый элемент может передаваться одним полупериодом видеосигнала. При этом каждый из периодов сигнала способен передать два элемента.

165

Н. — О, мне легче дышать! Значит, 6,5 миллионов периодов в секунду могут обеспечить передачу кадров с разложением на 625 строк.

Л. — На практике довольствуются шириной полосы в 6 МГц.

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ПЕРЕДАЧА

Н. — Поскольку частота несущей волны должна в определенное количество раз превышать ширину передаваемой полосы частот, я предполагаю, что в телевидении должны использоваться еще более короткие волны, чем в радиовещании с частотной модуляцией.

Л.— Не всегда. Действительно, существуют телевизионные передатчики, работающие на метровых волнах с частотами от 41 до 68 МГц, а также от 162 до 230 МГц. Но построенные в последнее время передатчики работают на дециметровых волнах в полосе частот от 470 до 582 МГц.

Н. — Волны, соответствующие этим последним частотам, имеют длину немногим меньше 30 см. Я не сомневаюсь, что реальная дальность действия передатчика на подобной частоте не должна быть очень большой.

Л. — Действительно, в лучшем случае она достигает 50 км. Вот почему каждая сеть телевизионных станций, передающих ту или иную программу, должна иметь довольно большое количество ретрансляторов. Последние соединяются с главным передатчиком волноводами (это линии из металлических труб, по которым распространяются сантиметровые волны) или радиорелейными линиями. В этих линиях также используют очень короткие волны, которые направляют в виде узкого пучка на приемные антенны.

ЧЕРЕССТРОЧНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Н. — Итак, ты дал мне общую идею о том, каким образом передаются телевизионные изображения. Теперь мы могли бы перейти к изучению конкретных используемых аппаратов.

Л.— Пока еще нет, так как я не рассказал тебе об одном из основных аспектов телевизионной техники: о *чересстрочном разложении* изображения.

Н. — Что ты понимаешь под этим термином? Какую цель это разложение преследует?

Л.— Если передавать 625 строк каждого кадра последовательно от первой до последней, как я объяснил тебе вначале, то возникает риск, что передаваемое изображение будет колебаться, как морские волны. Дело в том, что, несмотря на сохранение зрительных ощущений, интервал в 1/25 с до появления на этом же месте новой строки несколько велик. Создается впечатление мерцания.

Н. — Какое же решение следует принять?

Л. — Оно заключается в переплетении строк. Вместо последовательной передачи всех строк передают сначала все нечетные

166

строки, что занимает 1/50 с, а затем за следующие 1/50 с передают все четные строки (рис. 174).

Н. — Одним словом, сначала просматривают строки 1, 3, 5, 7, 9 и т. д. до 625, а затем строки 2, 4, 6, 8, 10 и т. д. до 624. Правильно ли я тебя понял?

Л. — Ты совершенно правильно воспринял мои объяснения. Каждое изображение передается в виде двух *полукадров*: полукадр с нечетными и полукадр с четными строками. У телезрителя складывается впечатление, что он воспринимает 50 кадров в секунду, что полностью устраняет эффект мерцания.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Н. — Совсем неглупо! К счастью, чересстрочный метод не принят выпускающими книги типографиями; в противном случае чтение превратилось бы в сложное занятие: сначала читать нечетные строки, а потом четные...

А теперь я попытаюсь догадаться, как изображения преобразуются в передаваемые сигналы и как в приемнике производится восстановление изображений. Твой дядюшка объяснял мне, что имеются полупроводники, чувствительные к свету. Поэтому я предполагаю, что при передаче используют полупроводниковый фотоэлектрический элемент, на который поочередно проецируют элементы изображения. В зависимости от яркости этих элементов получают большие или меньшие токи и таким образом формируют видеосигналы. В приемном устройстве эти сигналы, вероятно, воспроизводят свет, яркость которого изменяется в зависимости от амплитуды сигналов. Модулированный таким образом световой луч направляется на экран телевизора, по которому он движется синхронно с разложением изображения на строки в передатчике.

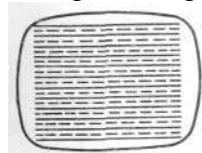


Рис. 174. Чересстрочная развертка при передаче кадров. Сначала передаются нечетные строки (сплошные линии), затем — четные (пунктирные линии), после чего весь цикл возобновляется.

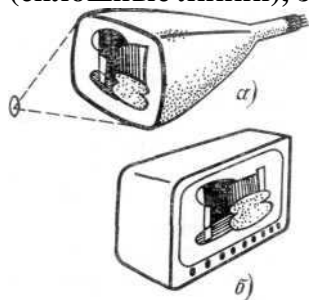


Рис. 175. Передаваемое изображение с помощью объектива проецируют на светочувствительную поверхность передающей электронно-лучевой трубки (а). Телевизионный приемник оснащен электронно-лучевой трубкой с люминесцентным экраном (б)

167

Прав ли я? Верны ли мои гипотезы?

Л. - Огорчен, но мне придется тебя разочаровать. Передача и прием происходят не так. Чтобы передать 625 строк 25 раз в секунду, пришлось бы заставить световой луч совершить в секунду 15 625 путешествий туда и обратно.

Такие быстрые прогулки как в передатчике, так и в приемнике совершают электронные лучи, перемещающиеся в вакууме *электронно-лучевой трубки*. Мой дядюшка объяснит тебе, как устроены и как работают такие трубки. А сейчас лишь прими к сведению, что на стороне передатчика электронный луч просматривает поверхность, на которую объектив проецирует передаваемое изображение. Будучи выполненной из фотоэлементов, эта поверхность изменяет интенсивность

электронного луча в зависимости от яркости каждого из элементов изображения. Таким образом создаются видеосигналы (рис. 175).

В приемнике электронный луч совершает такой же путь, а его интенсивность управляется принятым от передатчика видеосигналом.. Электроны ударяют о *люминесцентный экран* и порождают на нем свет, пропорциональный интенсивности луча. Вот в чем заключается основной принцип телевидения.

Н. — Это представляется мне очень увлекательным. Я с нетерпением буду ждать объяснений, которые мне любезно даст профессор Радиоль.

168

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

Используемая как для передачи, так и для приема электронно-лучевая трубка снабжена устройством, испускающим электронный луч, а также устройствами, обеспечивающими управление его интенсивностью, фокусировку и отклонение. Здесь рассказывается обо всех этих операциях. В заключение профессор Радиоль заглядывает в будущее телевидения.

Итак, мой любезный Незнайкин, я должен объяснить тебе устройство и принципы работы электронно-лучевой трубки, так как она применяется в телевизионных передатчиках и приемниках. Электронно-лучевая трубка существовала задолго до появления телевидения. Она использовалась в осциллографах — измерительных приборах, позволяющих наглядно увидеть формы электрических напряжений.

ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА

Электронно-лучевая трубка имеет катод обычно с косвенным накалом, который испускает электроны (рис. 176). Последние притягиваются анодом, имеющим положительный относительно катода потенциал. Интенсивностью потока электронов управляет потенциал другого электрода, установленного между катодом и анодом. Этот электрод носит название *модулятора*, имеет форму цилиндра, частично охватывающего катод, а в его дне есть отверстие, через которое проходят электроны.

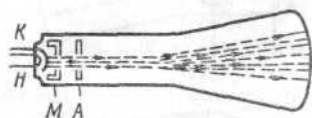


Рис. 176. Пушка электронно-лучевой трубки, испускающая пучок электронов.

H — нить накала; *K* — катод; *M* — модулятор; *A* — анод.

Я чувствую, что ты сейчас испытываешь определенное недовольство мною. «Почему он не сказал мне, что это просто-напросто триод?!» — возможно, думаешь ты. В самом деле, модулятор играет ту же самую роль, что и сетка в триоде. А все эти три электрода вместе образуют *электронную пушку*. Почему? Стреляет она чем-нибудь? Да. В аноде проделано отверстие, через которое пролетает значительная часть притягиваемых анодом электронов.

В передатчике электронный луч «просматривает» различные элементы изображения, пробегая по светочувствительной поверхности, на которую проецируется это изображение. В приемнике луч создает изображение на флуоресцирующем экране.

Чуть позже мы более подробно рассмотрим эти функции. А сейчас я должен изложить тебе две основные проблемы: как концентрируется луч электронов и как заставляют его отклоняться, чтобы обеспечить просмотр всех элементов изображения.

СПОСОБЫ ФОКУСИРОВКИ

Фокусировка необходима для того, чтобы сечение луча в месте его соприкосновения с экраном не превышало размеров элемента изображения. Луч в этой точке соприкосновения обычно называют *пятном*.

169

Для того чтобы пятно было достаточно малым, луч нужно пропустить через электронную линзу. Так называют устройство, использующее электрические или магнитные поля и воздействующее на электронный луч так же, как двояковыпуклая стеклянная линза на световые лучи.

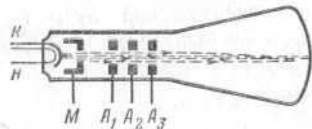


Рис. 177. Благодаря воздействию нескольких анодов электронный луч фокусируется в одну точку на экране.

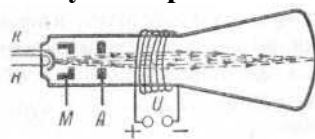


Рис. 178. Фокусировка электронного луча обеспечивается магнитным полем, создаваемым катушкой, к которой приложено постоянное напряжение.

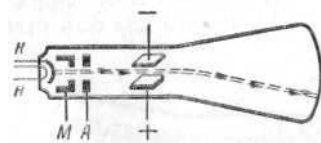
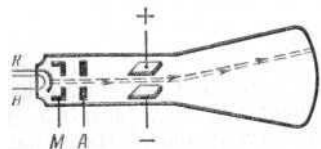


Рис. 179. Отклонение электронного луча переменным полем.

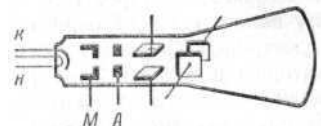


Рис. 180. Две пары пластин позволяют отклонять электронный луч в вертикальном и горизонтальном направлениях.

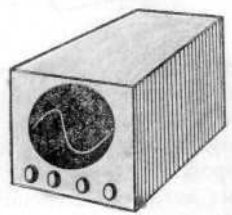


Рис. 181. Синусоида на экране электронного осциллографа, в котором на горизонтальные отклоняющие пластины приложено переменное напряжение, а на вертикальные пластины — линейное напряжение такой же частоты.

Фокусировка осуществляется электрическими силовыми линиями, для чего за первым анодом устанавливают второй (также снабженный отверстием), на который подают более высокий потенциал. Можно также установить за вторым анодом третий и подать на него еще более высокий потенциал, чем на второй. Разность потенциалов между анодами, через которые проходит электронный луч, воздействует на электроны наподобие электрических силовых линий, идущих от одного анода к другому. И это воздействие имеет тенденцию направить к оси луча все электроны, траектория которых отклонилась

(рис. 177).

Потенциалы анодов в используемых в телевидении электронно-лучевых трубках часто достигают нескольких десятков тысяч вольт. Величина же анодных токов, наоборот, очень небольшая. Из сказанного ты должен понять,

170

что мощность, какую нужно отдать в трубке, не представляет собой ничего сверхъестественного.

Сфокусировать луч можно также воздействием на поток электронов магнитным полем, создаваемым протекающим по катушке током (рис. 178).

ОТКЛОНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ

Итак, нам удалось настолько сфокусировать луч, что его пятно на экране имеет крохотные размеры. Однако неподвижное пятно в центре экрана не дает никакой практической пользы. Нужно заставить пятно пробегать по чередующимся строкам обоих полукадров, как это объяснил тебе Любознайкин во время вашей последней беседы.

Как обеспечить отклонение пятна, во-первых, по горизонтали, чтобы оно быстро пробегало по строкам, и, во-вторых, по вертикали, чтобы пятно переходило с одной нечетной строки на следующую нечетную или же с одной четной на следующую четную? Кроме того, нужно обеспечить очень быстрый возврат с конца одной строки к началу той, которую пятно предстоит пробежать. Когда же пятно закончит последнюю строку одного полукадра, оно должно очень быстро подняться кверху и занять исходное положение в начале первой строки следующего полукадра.

В этом случае отклонение электронного луча может также осуществляться изменением электрических или магнитных полей. Позднее ты узнаешь, какую форму должны иметь управляющие разверткой напряжения или токи и как их получить. А сейчас посмотрим, как устроены трубки, отклонение в которых осуществляется электрическими полями.

Эти поля создают путем приложения разности потенциалов между двумя металлическими пластинами, расположенными по одну и другую сторону от луча. Можно сказать, что пластины представляют собой обкладки конденсатора. Ставшая положительной обкладка притягивает электроны, а ставшая отрицательной — их отталкивает (рис. 179).

Ты легко поймешь, что две расположенные горизонтально пластины определяют отклонение электронного луча по вертикали. Для перемещения луча по горизонтали нужно использовать две пластины, расположенные вертикально (рис. 180).

В осциллографах как раз и используют этот способ отклонения; там устанавливают как горизонтальные, так и вертикальные пластины. На первые подают периодические напряжения, форму которых нужно определить, — эти напряжения отклоняют пятно по вертикали. На вертикальные пластины подают напряжение, отклоняющее пятно по горизонтали с постоянной скоростью и почти мгновенно возвращающее его к началу строки.

При этом появляющаяся на экране кривая отображает форму изменения изучаемого напряжения. По мере перемещения пятна слева направо рассматриваемое напряжение заставляет его подниматься или опускаться в зависимости от своих мгновенных значений. Если ты будешь таким образом рассматривать напряжение сети переменного тока, то на экране электронно-лучевой трубки увидишь красивую синусоидальную кривую (рис. 181).

ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ ЭКРАНА

А теперь пора тебе объяснить, что экран электронно-лучевой трубки изнутри покрыт слоем *флуоресцентного вещества*. Так называют вещество, которое под воздействием ударов электронов светится. Чем мощнее эти удары, тем выше вызываемая ими яркость.

171

Не путай флуоресценцию с фосфоресценцией. Последняя присуща веществу, которое под воздействием дневного света или света электрических ламп само становится светящимся. Именно так светятся ночью стрелки твоего будильника.

Телевизоры оснащают электронно-лучевыми трубками, экран которых сделан из полупрозрачного флуоресцентного слоя. Под воздействием электронных лучей этот слой становится светящимся. В черно-белых телевизорах производимый таким образом свет - белый. Что же касается цветных телевизоров, то в них флуоресцентный слой состоит из 1500000 элементов, одна треть



Электронно-лучевая трубка

Рис. 182. Под воздействием магнитного поля магнита (тонкие стрелки) электроны отклоняются в перпендикулярном ему направлении (толстые стрелки).



Рис. 183. Катушки, создающие магнитные поля, обеспечивают отклонение электронного луча.

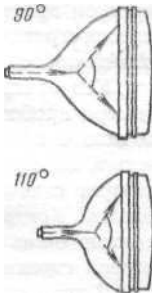


Рис. 184. По мере увеличения угла отклонения трубку делают короче.

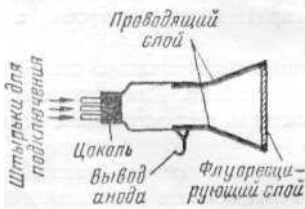


Рис. 185. Размещение проводящего слоя, необходимого для отвода с экрана во внешнюю цепь первичных и вторичных электронов.

которых излучает красный свет, другая треть светится синим светом, а последняя треть — зеленым. Позднее тебе объяснят, как комбинации этих трех цветов позволяют получить всю гамму самых разнообразных цветов, в том числе и белый свет.

МАГНИТНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ

Вернемся к проблеме отклонения электронного луча. Я описал тебе способ, основанный на изменении электрических полей. В настоящее время в телевизионных электронно-лучевых трубках используется отклонение луча магнитными полями. Эти поля создают электромагниты, расположенные вне трубки.

Напомню, что магнитные силовые линии стремятся отклонить электроны в направлении, которое образует с ними прямой угол. Следовательно, если полюсы намагничивания расположены слева и справа от электронного луча,

172

то силовые линии идут в горизонтальном направлении и отклоняют электроны сверху вниз. А полюсы, расположенные сверху и снизу от трубки, смещают электронный луч по горизонтали (рис. 182). Пропуская по таким магнитам переменные токи соответствующей формы, заставляют луч совершать требующийся путь полной развертки изображений.

Итак, как ты видишь, электронно-лучевая трубка окружена немалым количеством катушек. Вокруг нее находится соленоид, обеспечивающий фокусировку электронного луча. А отклонением этого луча управляют две пары катушек: в одной витки расположены в горизонтальной плоскости, а в другой — в вертикальной. Первая пара катушек отклоняет электроны справа налево, вторая — вверх и вниз (рис. 183).

Угол отклонения луча от оси трубки раньше не превышал 45° , полное же отклонение луча составляло 90° . В наши дни изготавливают трубки с полным отклонением луча до 110° . Благодаря этому длина трубки уменьшилась, что позволило изготовить телевизоры меньшего объема, так как глубина их футляра уменьшилась (рис. 184).

ВОЗВРАЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Ты, может быть, спрашиваешь себя, каков конечный путь электронов, ударившихся о флуоресцентный слой экрана. Так знай, что этот путь заканчивается ударом, вызывающим испускание вторичных электронов. Совершенно недопустимо, чтобы экран накапливал первичные и вторичные электроны, так как их масса создала бы отрицательный заряд, который стал бы отталкивать другие излучаемые электронной пушкой электроны.

Для предотвращения такого накопления электронов внешние стенки колбы от экрана до анода покрывают проводящим слоем. Таким образом, приходящие на флуоресцентный слой электроны притягиваются анодом, имеющим очень высокий положительный потенциал, и поглощаются (рис. 185).

Контакт анода выводят на боковую стенку трубки, тогда как все другие электроды соединяют со штырьками цоколя, расположенного на противоположном относительно экрана конце трубки.

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ОПАСНОСТЬ ВЗРЫВА?

Еще один вопрос, несомненно, рождается в твоём мозгу. Ты, должно быть, спрашиваешь себя, с какой силой атмосфера давит на эти большие вакуумные трубки, устанавливаемые в телевизорах. Ты знаешь, что на уровне земной поверхности атмосферное давление составляет около 10^5 Н/м². Площадь же экрана, диагональ которого равна 61 см, составляет 1500 см². Это означает, что воздух давит на этот экран с силой $14,7 \cdot 10^3$ Н. Если учесть остальную часть поверхности колбы в ее конической и цилиндрической частях, то можно сказать, что трубка выдерживает общее давление, превышающее $39 \cdot 10^3$ Н.

Выпуклые участки трубки легче, чем плоские, выдерживают высокое давление. Поэтому раньше трубки изготавливали с весьма выпуклым экраном. В наши дни научились делать экраны достаточно прочными, чтобы даже при плоской форме они успешно выдерживали давление воздуха. Поэтому риск взрыва, направленного внутрь, исключен. Я умышленно сказал взрыва, направленного внутрь, а не просто взрыва, так как если разрывается электронно-лучевая трубка, то ее осколки устремляются внутрь.

В старых телевизорах из предосторожности перед экраном устанавливали толстое защитное стекло. В настоящее время обходятся без него.

173

ПЛОСКИЙ ЭКРАН БУДУЩЕГО

Ты молод, Незнайкин. Перед тобой открывается будущее; ты увидишь эволюцию и прогресс электроники во всех областях. В телевидении, несомненно, наступит такой день, когда электронно-лучевая трубка в телевизоре будет заменена плоским экраном. Такой экран будут вешать на стену как простую картину. А все схемы электрической части телевизора благодаря микроминиатюризации будут размещены в раме этой картины.

Использование интегральных схем даст возможность до минимума сократить размер многочисленных схем, составляющих электрическую часть телевизора. Применение интегральных схем уже получило широкое распространение. И наконец, если все ручки и кнопки управления телевизором придется размещать на окружающей экран раме, то наиболее вероятно, что для регулировки телевизора будут применяться дистанционные устройства управления. Не поднимаясь со своего кресла, телезритель сможет переключать телевизор с одной программы на другую, изменять яркость и контрастность изображения и громкость звукового сопровождения. Для этой цели у него под рукой будет маленькая коробочка, излучающая электромагнитные волны или ультразвуки, которые заставят телевизор произвести все заданные переключения и регулировки. Впрочем, такие устройства уже существуют, но пока не получили широкого распространения...

А теперь вернемся из будущего в настоящее. Я предоставляю Любознайкину возможность объяснить тебе, как электронно-лучевые трубки в настоящее время используются для передачи и приема телевизионных изображений.

174

БЕСЕДА ШЕСТНАДЦАТАЯ

ГЕНЕРАТОРЫ РАЗВЕРТОК

Какова форма токов, обеспечивающих развертку электронных лучей? Как получают такие токи? Каким образом электронные лучи в телевизионных приемниках синхронизируются с электронными лучами, пробегающими по передаваемому изображению? Все эти проблемы служат предметом настоящей беседы.

ОТКЛОНЕНИЕ ПИЛООБРАЗНЫМ ТОКОМ

Незнайкин. — Теперь благодаря объяснениям твоего дядюшки я знаю, как устроены применяемые в телевизорах электроннолучевые трубки. Я спрашиваю себя, какие же токи, протекая по отклоняющим катушкам, заставляют пятно пробегать по всем строкам кадра. Я даже занялся небольшими расчетами. В телевизоре моих родителей ширина экрана равна 50 см. Следовательно, каждый раз, проходя по одной строке туда и обратно, пятно совершает путь длиной 1 м. При 625 строках, огибаемых 25 раз в секунду, общий путь, проходимый за 1 с, составит 15625 м. При такой скорости наше пятно обежало бы весь земной экватор минут за сорок.

Любознайкин. — Ты учитывал среднюю скорость пятна. На самом же деле она немного ниже во время прохождения строки, а по завершении ее воспроизведения пятно возвращается к началу следующей строки со скоростью, в десяток раз большей.

Н. — Но тогда скорость достигает 150 км/с; фантастическая стремительность!.. При такой скорости наше пятно могло бы за 40 мин достичь Луны. Но вернемся на Землю. Какую форму должны иметь токи, чтобы, протекая по отклоняющим катушкам, они смогли обеспечивать постоянную скорость луча при просмотре строки, а затем такое быстрое возвращение назад? Или же, если отклонение осуществляется электрическими полями, какой формы должны быть напряжения, прикладываемые на отклоняющие пластины?

Л. — В обоих случаях для прохождения пятна по строке нужно иметь токи или напряжения, возрастающие линейно, т. е. пропорционально времени. Затем они очень быстро должны упасть до

своего первоначального значения. Вот на этом рисунке воспроизведение строки происходит за отрезок времени t_1 , а возвращение пятна занимает время t_2 (рис. 186).

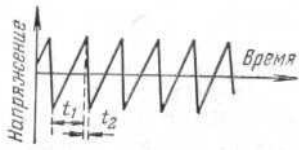


Рис. 186. форма напряжений, прилагаемых на отклоняющие пластины. Время t_1 движения луча по строке значительно больше времени t_2 , затрачиваемого на его возвращение.

175

Н.— Эта форма напряжения похожа на зубья пилы. Л.— Именно по этой причине говорят о пилообразных токах или напряжениях.

ОСНОВНАЯ СХЕМА РАЗВЕРТКИ

Н.— А как создают, располагая лишь источником постоянного напряжения, токи или напряжения такой причудливой формы?

Л.— Существует множество разнообразных схем. Все они имеют один и тот же основной принцип: постепенный заряд конденсатора через резистор, а затем его быстрый разряд замыканием накоротко (рис. 187).

Н.— Действительно, на твоей схеме я вижу, что э. д. с. E , заставляя ток проходить через резистор R , заряжает конденсатор C . При этом заряд конденсатора происходит, несомненно, замедленно.

Л.— Скорость заряда тем меньше, чем больше сопротивление резистора R и емкость конденсатора C . Чем выше сопротивление, тем большее противодействие прохождению тока.. оно оказывает, и чем больше емкость конденсатора, тем большее количество электронов нужно ввести в отрицательную обкладку и снять их с положительной. Вот почему при расчетах учитывают произведение RC , которое называют *постоянной времени*. Н.— Я предполагаю, что в конце каждой строки замыкают изображенный на твоей схеме переключатель, что позволяет быстро разрядить конденсатор. И этот же процесс, но только с частотой 50 периодов в секунду, несомненно, применяется в схеме развертки полукадров.

Л.— Безусловно. Но ты, конечно, не сомневаешься, что в генераторах пилообразных сигналов используют не механический переключатель. Существует немало различных электронных способов, использующих для этой цели вакуумные или газонаполненные лампы или полупроводниковые приборы. Но прежде чем заняться изучением этих устройств, рассмотрим, какую форму имеют напряжения, которые наша схема развертки позволяет получить на выводах конденсатора.

ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ

Н.— А разве ты не сказал мне о необходимости иметь линейную зависимость напряжения?

Л.— В самом деле, это стремятся получить. Однако, к сожалению, заряд конденсатора через резистор не имеет желаемой формы. В начале заряда ток нарастает слишком быстро. Затем, по мере того как конденсатор заряжается и напряжение на его обкладках повышается, разность между э. д. с. E и упомянутым напряжением сокращается. Это означает, что разность потенциалов между выводами резистора R убывает. Соответственно снижается и величина протекающего по нему тока.

Н.— Но при таком положении процесс никогда не закончится. Чем больше конденсатор зарядился, тем медленнее происходит дальнейшее накопление заряда.

176

Л. — Действительно, теоретически это должно продолжаться вечно. Зарядная кривая называется *экспоненциальной* (рис. 188), а формула, определяющая значение напряжения U в любой момент времени t , имеет вид:

$$U = E \left(1 - e^{-t/RC} \right).$$

Буквой e обозначают основание натуральных логарифмов. Запомни, что e приблизительно равно 2,718.

Н. — Я не очень силен в математике. Однако я заметил, что по истечении времени $t = RC$, т. е. постоянной времени, напряжение U достигает примерно $2/3 E$.

Л. — Bravo, Незнайкин! И если ты продолжишь свои вычисления, то увидишь, что каждый раз по истечении отрезка времени, равного постоянной времени, это напряжение возрастает на две трети разности между э. д. с. и ранее достигнутым напряжением.

Н. — Да, это все замедляющийся рост, который никогда не заканчивается, так как напряжение конденсатора никогда не достигнет полной величины E . А если изменить форму этой кривой, чтобы получить прямую линию?

Л.— Ее можно было бы сделать менее изогнутой, подключив последовательно резистору R катушку индуктивности. Но так не делают. Решение проблемы заключается в том, что используют лишь начальный участок кривой, где она почти прямая.

ДЕЙСТВИЕ СИГНАЛОВ СИНХРОНИЗАЦИИ

Н. — А что управляет возвращением пятна к началу строк или полукадров?

Л. — Сигнал синхронизации, который при передаче выдается в конце каждой строки и каждого полукадра. Этот сигнал вызывает очень быстрое падение сопротивления электронной лампы или полупроводникового прибора, которое шунтирует конденсатор.

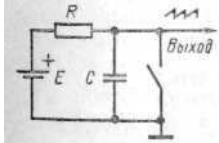


Рис. 187. Для получения напряжений пилообразной формы конденсатор C заряжают через резистор R , а затем разряжают, замыкая переключатель.

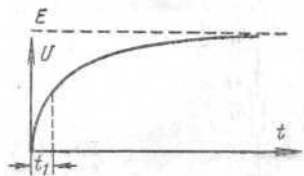


Рис. 188. Экспоненциальная кривая показывает нарастание напряжения U на выводах конденсатора, заряжаемого через резистор источником напряжения E . Используется лишь небольшая часть кривой (t_1), которая по своей форме приближается к отрезку прямой.

177

Схема устроена так, что это снижение напряжения может происходить автоматически и повторяться периодически с частотой, чуть меньшей частоты смены строк или полукадров (рис. 189). Это означает, что сигналы синхронизации лишь ускоряют процесс, который все равно бы завершился.

Н.— Не можешь ли ты теперь сказать, как лампа может быстро снизить напряжение.

ИОНИЗАЦИЯ ТИРАТРОНА

Л. — Посмотри на схему, где изображен газонаполненный триод (рис. 190). Лампа эта наполнена нейтральным газом, таким как аргон, неон или гелий. Ее называют *тиратроном*.

Как видишь, ее промежуток катод — анод включен параллельно конденсатору C , который заряжается через резистор R .

Н. — Однако я вижу два резистора, включенных последовательно с этим промежутком. Переменный резистор R_3 , возможно, служит для подачи на сетку отрицательного относительно катода смещения, этому ты научил меня во время бесед о ламповых схемах. Но какую роль играет резистор R_2 ?

Л.— Сопротивление этого резистора не превышает несколько сотен ом. Резистор служит для ограничения тока разряда, протекающего через тиратрон, чтобы последний не подвергся разрушению.

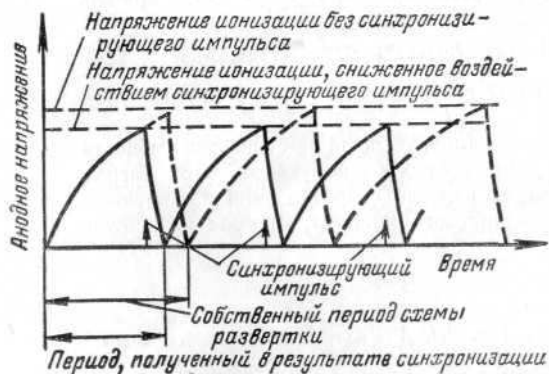


Рис. 189. Процесс синхронизации схемы развертки. Приходящие на сетку лампы положительные синхронизирующие импульсы вызывают преждевременный разряд конденсатора.

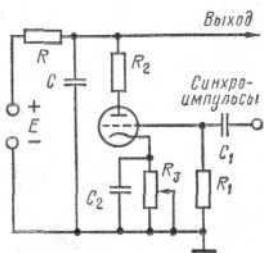


Рис. 190. Генератор пилообразных сигналов на тиратроне.
178

Н. — Но я не вижу, что может вызвать разряд.

Л.— Это производит ионизация содержащегося в лампе газа. Когда заряд конденсатора C повышает напряжение на аноде до определенной величины, скорость электронов, притягиваемых анодом с катода, возрастает настолько, что они разбивают молекулы газа. Каждая молекула разделяется на некоторое количество электронов и положительных ионов. Это вызывает мощный ток: электроны идут к аноду, а положительные ионы окружают сетку, притягиваемые ее отрицательным потенциалом.

Н.— Я понимаю, в этот момент сопротивление лампы становится почти равным нулю, что вызывает разряд конденсатора C . Когда в результате этого разряда напряжение анода становится низким, ионизация прекращается, и все начинается сначала.

Л. — Совершенно верно. Но нужно также видеть, какую роль во всем этом играет сетка. Ведь ее потенциал определяет напряжение ионизации промежутка катод — анод. Чем менее отрицательна сетка, тем легче пропускает она электроны с катода к аноду, тем выше их скорость при одном и том же анодном напряжении. Следовательно, ионизация, определяемая скоростью электронов, начинается при менее высоком анодном напряжении.

Н. — Из сказанного я делаю вывод, что, изменяя сопротивление резистора R_3 , можно регулировать величину анодного напряжения, вызывающего ионизацию. Иначе говоря, таким образом определяют продолжительность заряда конденсатора C .

Л. — Возникает вопрос, Незнайкин, не съел ли ты в эти дни несколько килограммов рыбы, которая насытила тебя фосфором и сделала столь сообразительным, логичным и умным... Действительно, изменением сопротивления резистора R_3 регулируют длительность заряда конденсатора C . Но теперь обрати внимание на то, что через конденсатор C_1 на сетку подаются сигналы синхронизации. Это короткие импульсы, делающие сетку положительной.

Н.— Принимая во внимание твои объяснения, я думаю, что эти сигналы поступают на сетку на мгновение раньше того момента, когда тиратрон стал бы ионизированным вследствие достижения напряжения на аноде соответствующей величины. Делая сетку менее отрицательной, эти сигналы снижают величину анодного напряжения, способного вызвать ионизацию. И ионизация немедленно вызывается синхронизирующим сигналом. Не сказал ли я какую-нибудь глупость?

ПОЛЬЗА НАСЫЩЕНИЯ

Л. — Ничего подобного. Твой фосфор продолжает действовать эффективно... Поэтому ты легко поймешь, что форму отклоняющих токов можно сделать практически линейной, если нагрузочный резистор R заменить устройством, которое пропускает ток лишь постоянной величины.

Н. — Я совершенно не представляю себе, каким должно быть это устройство.

Л. — Им может быть любой диод, работающий в условиях насыщения. В случае использования лампы предпочтение следует

179

отдать лампе с прямым накалом. Путем регулировки напряжения накала ограничивают количество испускаемых электронов, иначе говоря, определяют максимальную величину тока.

Н.— Нельзя ли использовать пентод, подав на его экранирующую сетку достаточно высокий потенциал, чтобы все электроны доходили до анода, что также сделает ток постоянным.

Л.— Не пытайся получить патент, так как эта идея уже известна и используется в некоторых телевизорах.

СХЕМА РАЗВЕРТКИ С БЛОКИНГ-ГЕНЕРАТОРОМ

Н.— А часто ли газонаполненные лампы используют для быстрого разряда конденсатора?

Л. — Уже много лет эти лампы перестали применять в телевизорах. Они не долго служат, и поэтому их заменили электровакуумными лампами. В настоящее же время в схеме разверток используют преимущественно полупроводниковые приборы.

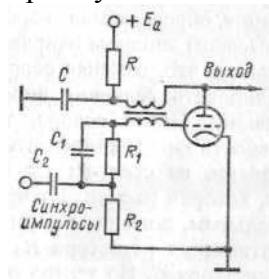


Рис. 191. Схема развертки, в которой разряд конденсатора C вызывается триодом с приходом на его сетку синхронизирующего сигнала.

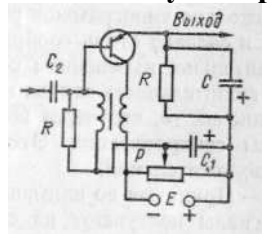


Рис. 192. Схема блокинг-генератора на транзисторе.

Н. — Что ты называешь схемой развертки?

Л. — Этим термином обозначают любую схему, создающую напряжения или токи пилообразной формы, служащие для отклонения луча в электронно-лучевых трубках.

Вот схема развертки на вакуумном триоде (рис. 191). Ты увидишь здесь знакомый конденсатор C , который заряжается через резистор R и затем очень быстро разряжается через триод.

Н.— Но этот триод включен как автогенератор, ибо анодный ток через трансформатор наводит напряжение в цепи сетки. Я предполагаю, что между обеими обмотками создается положительная, а не отрицательная обратная связь.

Л.— И ты не ошибся. Но этот генератор выдает совсем не синусоидальные колебания. Это получается потому, что связь между обмотками цепей анода и сетки очень глубокая. По мере того как конденсатор C заряжается через резистор R , напряжение на аноде возрастает, что вызывает увеличение анодного

180

тока. Благодаря индуктивной связи он делает сетку все менее и менее отрицательной, а лучше сказать, более положительной. В этот момент внутреннее сопротивление триода становится очень низким, и конденсатор C разряжается через промежуток катод — анод, ставший превосходным проводником.

Н.— Но как этот конденсатор сможет потом вновь зарядиться, будучи накоротко замкнутым триодом?

Л.— Подумай о том, что происходит в триоде, когда сетка становится положительной. Тогда она притягивает часть эмиттированных катодом электронов. А эти электроны заряжают конденсатор C_1 , в результате чего сетка очень быстро изменяет полярность и становится отрицательной. Она достигает такого состояния, что анодный ток прекращается и наш триод оказывается запертым или, как иногда говорят, заблокированным. Вот почему эта схема называется *блокинг-генератором*.

Н.— Но он должен немедленно деблокироваться, потому что конденсатор C_1 разряжается через резистор R_1 , включенный параллельно с ним.

Л. — Этот разряд происходит медленнее, чем ты предполагаешь, так как резистор R_1 имеет высокое сопротивление. Во время этого разряда конденсатор C вновь постепенно заряжается.

Н. — В итоге мы получаем на этом конденсаторе напряжение, имеющее пилообразную форму. Сначала оно постепенно нарастает, затем вызывает падение внутреннего сопротивления лампы, в результате чего это напряжение быстро падает, потом все повторяется сначала.

Л. — Я вижу, ты хорошо понял, как работает блокинг-генератор. Обрати внимание на то, что синхронизирующие импульсы, поступая на сетку через конденсатор C_2 , создают на резисторе R_2 напряжения, делающие сетку более положительной, что вызывает падение внутреннего сопротивления триода на какое-то мгновение раньше, чем это явление произошло бы самостоятельно без сигналов синхронизации.

Н. — Я констатирую, что и здесь применяют тот метод, согласно которому собственный период пилообразных сигналов немного продолжительнее периода вызывающих их импульсов... А нельзя ли сделать такой блокинг-генератор, заменив вакуумную лампу транзистором?

БЛОКИНГ-ГЕНЕРАТОР НА ТРАНЗИСТОРЕ

Л. — Разумеется, можно. Посмотри на соответствующую схему (рис. 192). Ты увидишь, что здесь конденсатор C заряжается через транзистор. В отличие от всех схем, которые ты до сих пор видел, наклонная и относительно длинная сторона зуба пилы создается здесь разрядом конденсатора; заряд же конденсатора, который, как ты увидишь, происходит почти мгновенно, вызывает быстрый возврат луча с конца строки или с конца полукадра.

Н. — Я предполагаю, что относительно продолжительный разряд происходит тогда, когда транзистор заблокирован; в это время конденсатор C элементарно просто разряжается через

181

резистор R . Что же касается быстрого заряда, то, как я догадываюсь, он вызывается тем, что база транзистора становится достаточно отрицательной, чтобы пропустить от эмиттера к коллектору ток насыщения. Но как происходит здесь блокирование, а затем насыщение транзистора?

Л. — Рассмотрим это, начиная с момента, когда конденсатор C полностью заряжен. Тогда его обкладка, соединенная с эмиттером, имеет дополнительный отрицательный потенциал, блокирующий транзистор.

Обрати внимание на то, что потенциал базы регулируется потенциометром R таким образом, чтобы обеспечить хорошее запирающее действие транзистора. Этот потенциал оказывается устойчивым, ибо в качестве развязки используется электролитический конденсатор C_1 большой емкости.

По мере разряда конденсатора C потенциал эмиттера становится более положительным, благодаря чему через транзистор начинает протекать ток. Проходя по подключенной к коллектору обмотке, этот ток наводит в обмотке, соединенной с базой, напряжение, делающее эту базу более отрицательной.

Н. — Я понял, что происходит! Чем более отрицательной становится база, тем сильнее возрастает ток коллектора, тем больше наводимое им через трансформатор напряжение, делающее базу более отрицательной, тем больше... Но все это, несомненно, происходит очень быстро. Таким путем ток транзистора стремительно достигает насыщения. А конденсатор C почти мгновенно оказывается заряженным. Затем все возобновляется.

Л. — Чтобы рассуждать так хорошо, ты, должно быть, проглотил не форель, а по крайней мере целого осетра, который наполнил твой мозг фосфором... Ты догадываешься, что, регулируя потенциометром R потенциал базы, устанавливают продолжительность периода каждого заряда и разряда конденсатора C . А этот период должен быть чуть больше интервала между синхронизирующими импульсами, которые через конденсатор C_2 подаются на базу. Эти импульсы отрицательные и вызывают насыщение транзистора...

Существует множество других схем разверток. Но у меня не хватает времени объяснить тебе их все. Необходимо знать лишь то, что пилообразные сигналы всегда создаются зарядом и разрядом конденсатора. Я не хочу чрезмерно перегружать твою память. Отдыхай спокойно...

182

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ ПЕРЕДАЮЩИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ ТРУБКИ

Какое устройство в телевизионных передатчиках преобразует световое изображение в электрические видеосигналы? Профессор Радиоль дает здесь объяснения; сначала он описывает иконоскоп — предшественник современных передающих трубок, затем переходит к различным моделям трубок, основанных на использовании материалов с фотоэмиссией или фотопроводимостью.

Теперь, дорогой Незнайкин, ты понял, как работает электронно-лучевая трубка, используемая как в телевизионных приемниках, так и в передатчиках. Электронный луч необходимо сфокусировать и заставить его отклоняться как по горизонтали, так и по вертикали, чтобы обеспечить просмотр строк и кадров. Но само собой разумеется, что в этих двух случаях пробегающий по строкам луч выполняет совершенно различные функции: если в приемниках он заставляет экран трубки светиться и при этом яркость каждого из элементов экрана пропорциональна интенсивности электронного луча, то в передающих трубках луч, пробегая по экрану, на который проецируется изображение, определяет изменения электрических сигналов в зависимости от яркости элементов передаваемого изображения.

КАЧЕСТВА, КОТОРЫМИ ДОЛЖНА ОБЛАДАТЬ ПЕРЕДАЮЩАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ТРУБКА

К передающим телевизионным трубкам предъявляется ряд требований, обеспечить которые очень нелегко. Трубки должны обладать высокой чувствительностью к свету, чтобы можно было передавать слабо освещенные сцены, а также выдавать видеосигналы, строго пропорциональные широкой гамме яркостей; иначе говоря, их уровень насыщения должен быть как можно выше, и до его достижения кривая, характеризующая видеосигнал в зависимости от яркости просматриваемого элемента, должна быть как можно ближе к прямой. Кроме того, видеосигналы должны изменяться столь же быстро, как изменяется яркость последовательно просматриваемых элементов изображения. И если яркость какого-либо элемента изменяется, что нередко бывает при передаче подвижных изображений, то при следующей передаче этого элемента (что происходит всего лишь через 0,04 с) электрический сигнал должен соразмерно изменяться.

Как видишь, в требованиях, предъявляемых к передающей телевизионной трубке, недостатка нет. Ты догадываешься, что, кроме уже перечисленного, желательно, чтобы трубка не была слишком большой, чтобы она служила долго и при этом ее характеристики не изменялись, чтобы ею можно было легко пользоваться.

Посмотрим, как удастся удовлетворить столько жестких условий.

ФОТОЭМИССИЯ И ФОТОПРОВОДИМОСТЬ

Для преобразования яркости в электрические сигналы можно использовать вещества, обладающие *фотоэмиссией* или *фотопроводимостью*. Первые под воздействием света испускают электроны. У вторых же, когда на них падают световые лучи, снижается удельное электрическое сопротивление. К этой группе, в частности, относится селен, из которого делали самые первые фотоэлементы.

183

К веществам, обладающим фотоэмиссией, относятся прежде всего щелочные металлы, такие как литий, натрий, рубидий и цезий. Последний употребляется чаще других, потому что его чувствительность очень близка к спектральной чувствительности человеческого глаза: она идет от красного к фиолетовому и достигает максимума на участке зеленого, т. е. как раз посередине спектра видимого света.

Вещества, обладающие фотоэмиссией, часто называют *фотокатодными* веществами. В самом деле, под воздействием световых лучей они эмиттируют электроны, количество которых пропорционально интенсивности света.

Мишень, на которую объектив проецирует передаваемое изображение, должна быть покрыта мозаикой, состоящей из нескольких миллионов фотоэмиттирующих ячеек. Таким образом, каждый элемент изображения покрывает несколько ячеек.

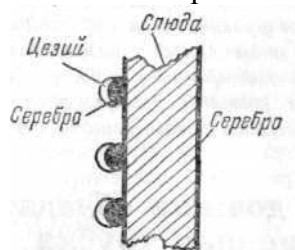


Рис. 193. Конструкция фотоэмиттирующей мишени.

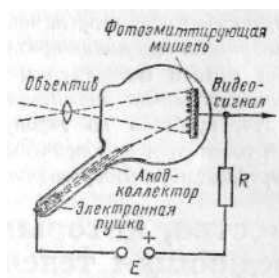


Рис. 194. Передающая телевизионная трубка — иконоскоп, созданная в 1931 г. Владимиром Зворыкиным.

Ты, конечно, спрашиваешь себя, как удастся сделать подобную мозаику. Для этого на очень тонкую пластинку слюды напыляют крошечные капельки серебра. Затем поверх их осаждают пары цезия. Этот металл очень тонким слоем покрывает каждую капельку серебра. Так формируются эти микроскопические фотоэмиттирующие ячейки, хорошо изолированные друг от друга (рис. 193). На другую сторону пластинки наносят сплошной слой серебра. Как ты, несомненно, догадываешься, каждая фотоэмиттирующая ячейка образует с этим слоем серебра своеобразный микроконденсатор. А теперь посмотрим, как такая фотоэмиттирующая мишень может использоваться в передающей телевизионной трубке.

ИКОНОСКОП — ПРЕДШЕСТВЕННИК СОВРЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЮЩИХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ТРУБОК

Самая первая электронная передающая телевизионная трубка, известная под названием *иконоскопа*, была изобретена в 1931 г. русским исследователем Владимиром Зворыкиным. Он был ассистентом Бориса Розинга, который в 1907 г. в своей лаборатории первым использовал электронно-лучевую трубку для приема изображений. Фотоэмиттирующая мишень размещалась в глубине задней части вакуумной колбы, имеющей довольно своеобразную форму. Через плоскую стенку расположенный вне колбы объектив проецирует передаваемое изобра-

184

жение на фотоэмиттирующую мозаику. Каждая ячейка мозаики в зависимости от интенсивности освещающих ее световых лучей испускает большее или меньшее количество электронов. Вылетающие электроны притягиваются анодом-коллектором, представляющим собой осажденный металлический слой, покрывающий боковые стенки колбы; положительный потенциал этого анода притягивает элементарные отрицательные заряды — электроны (рис. 194).

Из сказанного ты легко поймешь, что каждая фотоэмиттирующая ячейка в зависимости от количества отданных ею электронов становится более или менее положительной. Следовательно, она притягивает некоторое количество электронов к обкладке, которой служит проводящий слой, нанесенный на заднюю поверхность слюдяной пластинки.

А теперь посмотрим, в чем заключается действие электронов, посылаемых электронной пушкой. Сфокусированный луч под воздействием развертки совершает движение по строкам и полукадрам. Управляемый электрическими или магнитными полями, он пробегает по изображению, проецируемому на мозаику. Что же тогда происходит? Какое действие оказывает электронный луч на каждую фотоэмиттирующую ячейку, если обегает их все за 0,04 с?

Так вот, эти электроны нейтрализуют положительный заряд, который свет создает на каждой ячейке в интервале между двумя последовательными прохождениями луча. Потеряв положительный заряд, ячейка перестает притягивать электроны из металлической обкладки, расположенной на обратной стороне слюдяной пластинки. Освобожденные таким образом электроны проходят через резистор R , соединяющий эту обкладку с положительным полюсом источника высокого напряжения. Протекающий по резистору ток порождает изменения потенциала на выводе резистора, соединенном

с обкладкой. А эти изменения потенциала пропорциональны положительному заряду ячеек, т. е. интенсивности освещающего их света.

Как ты, вероятно, уже догадался, эти изменения потенциала и представляют собой видеосигнал, характеризующий яркость элементов изображения. Остается лишь усилить его и использовать для модулирования несущих волн телевизионного передатчика.

СУПЕРИКОНОСКОП

Иконоскоп, однако, имеет недостатки. Самый серьезный из них связан с эмиссией вторичных электронов. В этом случае, как и в триоде, — я надеюсь, что ты не забыл этого явления, — удар электронов луча, направленного на ячейки мишени, выбивает из них немало вторичных электронов. Часть этих электронов, к счастью, притягивается анодом-коллектором. Но основная часть распределяется по ячейке, где они притягиваются созданным светом положительным зарядом.

Поэтому иконоскоп заменили трубкой несколько иной конструкции, получившей название *иконоскопа с переносом изображения*, или *супериконоскопа*. В этой трубке изображение проецируется на первую фотоэмиттирующую мишень. Вторичные электроны с нее направляются на другую мишень, сделанную из мозаики, подобной той, которую я только что описал, рассказывая об иконоскопе. В результате действия вторичных электронов на мозаике создаются положительные заряды.

Я не вижу смысла подробно описывать устройство и принцип работы супериконоскопа, который в наши дни больше уже не применяется. Отмечу лишь, что большая по сравнению с простым иконоскопом чувствительность определяется тем, что мишень, на которую проецируется световое изображение, покрыта сплошным слоем цезия и не имеет мозаичной структуры.

185

СУПЕРОРТИКОН

Самая совершенная передающая трубка с фотоэмиттирующей мишенью — *суперортикон* (рис. 195). В этой трубке изображение проецируется на фотоэмиттирующий катод, которому сообщается большой отрицательный потенциал относительно расположенной за ним мишени. Мишень сделана из чрезвычайно тонкой (0,1 мм) стеклянной пластинки, способной благодаря наличию солей металлов проводить электрический ток.

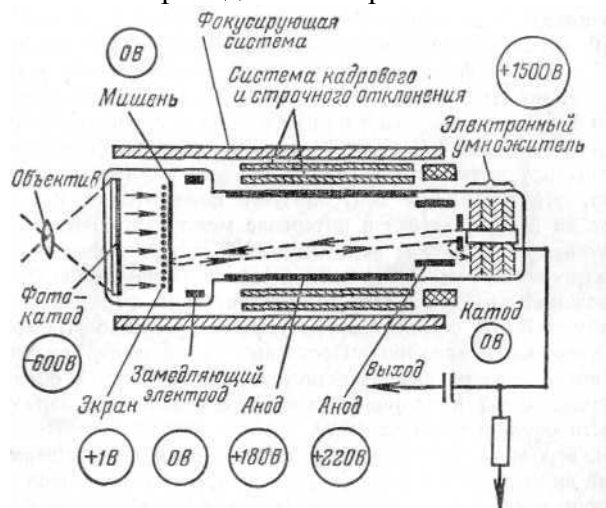


Рис. 195. Конструкция суперортикона. В кружках показаны потенциалы на различных электродах.

Как ты догадываешься, эта мишень эффективно притягивает все электроны, исходящие с фотоэмиттирующего катода. Бомбардировка притягиваемыми таким образом электронами вызывает интенсивный вылет вторичных электронов, которые тут же улавливаются очень тонкой сеткой, установленной между фотокатодом и мишенью на расстоянии сотых долей миллиметра.

В результате вылета вторичных электронов на мишени создаются положительные заряды, величина которых тем больше, чем сильнее освещены соответствующие элементы фотокатода. Эти заряды проходят сквозь тонкую мишень и нейтрализуются электронами перемещающегося луча, направляемого на мишень электронной пушкой.

Самое важное заключается в том, что, достигая мишени, эти электроны не вызывают эмиссии вторичных электронов. Электрод, расположенный около мишени и имеющий небольшой потенциал, ведет себя как настоящий тормоз, замедляющий движение электронов. Поэтому они лишь легонько ударяют по мишени, что предотвращает появление вторичных электронов. Часть электронов остается на мишени и нейтрализует ее положительно заряженные элементы. Остальные возвращаются к электронной пушке, притягиваемые большими положительными потенциалами ее анодов.

186

ЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

Подумав, ты легко придешь к заключению, что интенсивность возвращающегося электронного луча обратно пропорциональна яркости соответствующих элементов изображения. Ведь мы уже отметили, что чем ярче элемент, тем больше положительный заряд соответствующей ему точки на мишени; поэтому он больше поглощает электронов из приходящего луча и, следовательно, меньше их остается в возвращающемся луче.

А что делается с этими электронами, которые достигают анода пушки? Здесь происходит необычный процесс усиления, выполняемый *электронным умножителем* (рис. 196).

Что это такое? Это устройство, основанное на использовании явления вторичной эмиссии. Целая цепочка электродов, обладающих все возрастающим положительным потенциалом, последовательно притягивает электроны. Вылетевший с первого электрода электрон попадает на второй и выбивает, скажем, пять новых электронов. Бомбардируя третий электрод, каждый из этих элект-

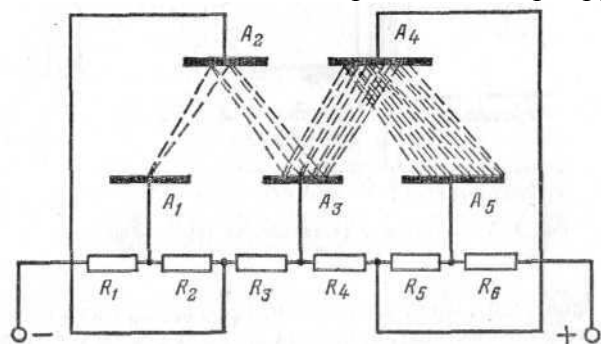


Рис. 196. Электронный умножитель, содержащий пять анодов с последовательно возрастающими потенциалами.

ронов выбивает по пять других, в результате чего их общее количество вырастает до 25, и т. д.

Как видишь, Незнайкин, это явление приносит здесь большую пользу, во многих других случаях оно приносит много вреда.

Благодаря большому усилению, обеспечиваемому электронным умножителем, суперортикон обладает очень хорошей чувствительностью. Однако его применение для передачи очень ярких изображений не дает достаточно хороших результатов, так как количество излучаемых мишенью вторичных электронов оказывается слишком большим и сетка не может их все перехватить. Некоторая часть этих электронов вновь падает на мишень, что вносит искажения в выдаваемые трубкой видеосигналы.

По этой причине в современных моделях передающих телевизионных трубок чаще используют эффект фотопроводимости, нежели фотоэмиссии.

ВИДИКОН

Одной из наиболее широко используемых передающих телевизионных трубок стал *видикон* (рис. 197). Изображение здесь проецируется на металлическую пластинку, причем настолько тонкую, что она просвечивается. Да,

187

Незнайкин, металлическая пластинка пропускает световые лучи к фотопроводящему слою, покрывающему ее обратную сторону. Этот слой, состоящий из селена или сульфида сурьмы, обладает проводимостью, пропорциональной интенсивности падающего на него света.

На мишень такой конструкции подают положительный потенциал, на несколько десятков вольт превышающий потенциал катода электронной пушки. Электронный луч фокусируется одновременно несколькими анодами и магнитным полем, расположенным вокруг трубки катушки, которую я на своем рисунке не изобразил. Катушки, обеспечивающие отклонение электронного луча, я также не нарисовал.

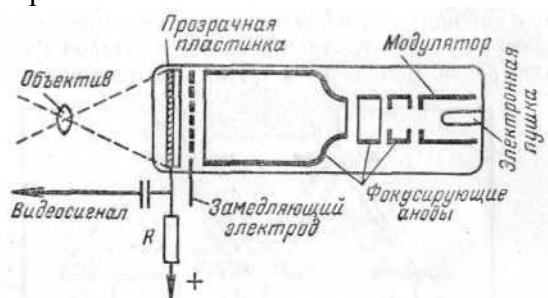


Рис. 197. Передающая телевизионная трубка — видикон.

Что же происходит, когда изображение проецируется на мишень? Проходя сквозь очень тонкую пластинку, лучи света придают участкам фотопроводящего слоя большую или меньшую проводимость. Таким образом, положительный потенциал пластинки притягивает большее или меньшее количество электронов луча через слой ее на обратной стороне. В результате эта сторона приобретает положительную поляризацию, и каждый элемент имеет положительный потенциал, пропорциональный интенсивности света на соответствующей точке изображения.

Ты легко поймешь, что электроны луча, пробегающего по этой поверхности, поглощаются в большем или меньшем количестве в соответствии с положительным потенциалом каждого элемента изображения.

Прежде чем попасть на фотопроводящий слой, электроны луча проходят через очень тонкую сетку, относительно низкий потенциал которой замедляет их движение. После такого торможения они не вызывают эмиссии вторичных электронов. А те из них, которые не были поглощены фотопроводящим слоем, где они нейтрализуют положительные заряды, возвращаются на сетку, которая отводит их к пушке.

В заключение ты можешь констатировать, что в зависимости от освещенности передаваемой в данный момент точки большее или меньшее количество электронов проникает через фотопроводящий слой к тонкой металлической пластинке; затем они проходят по резистору R и создают на его выводах переменные потенциалы, представляющие собой не что иное, как видеосигналы.

Я надеюсь, что ты, Незнайкин, был очень внимателен к тому, что я тебе объяснил, и хорошо все понял.

188

БЕСЕДА СЕМНАДЦАТАЯ

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ ПЕРЕДАТЧИКИ И ПРИЕМНИКИ

Какова форма видеосигналов и сигналов синхронизации? Как совокупностью этих сигналов модулируют несущую волну? Каким образом передается звуковое сопровождение? Все эти вопросы служат темой настоящей беседы, в ходе которой двое наших друзей рассматривают структурные схемы монохромных телевизионных передатчиков и приемников.

АМПЛИТУДА ВИДЕОСИГНАЛОВ

Незнайкин. — Благодаря объяснениям твоего дядюшки и твоим, мой дорогой друг, мне кажется, что я в общих чертах представляю, как работает телевизионный передатчик. В самом деле, я уже знаю, как устроены различные передающие трубки, каким образом генерируются пилообразные сигналы, которые заставляют электронный луч подобно метле проходить по строкам и полукадрам изображения.

Полученные таким образом видеосигналы верно отражают яркость последовательно передаваемых элементов изображения. Эти сигналы, как мы видели, занимают очень широкую полосу частот. Для наших передач с разложением на 625 строк ширина полосы достигает 6 МГц.

Любознайкин. — Широкая полоса модулирующих частот требует использования волн, имеющих частоты в несколько десятков раз более высокие. Во время одной из предыдущих бесед мы назвали полосы частот, соответствующие используемым в телевидении очень коротким волнам.

Н. — И мы видели, что производится амплитудная модуляция, так как частотная модуляция привела бы к еще большему расширению полосы частот.

Я предполагаю, что наиболее яркие элементы изображения поднимают амплитуду до пикового значения несущей волны, а черные элементы уменьшают ее до нуля.

Л. - Твое предположение близко к истине. Но гамма яркостей простирается не от нуля до амплитуды, которую несущая волна имеет при отсутствии модуляции, а от 25% этой амплитуды до ее максимального значения. Ниже этих 25% располагается, если можно так выразиться, область ультрачерного.

Н. — А почему бы для отражения всей гаммы яркостей не использовать полностью всю амплитуду? Для чего служит эта четверть пиковой амплитуды, находящаяся ниже уровня черного?

Л. — Там размещают сигналы синхронизации, управляющие обратным движением луча по строкам и полукадрам. Ты пре-

189

красно понимаешь, что во время обратного хода электронный луч, просматривающий изображение в передающей телевизионной трубке, не должен «прочитывать» яркостей строк. А в приемнике электронный луч, возвращающийся в исходное положение после просмотра строки или полукадра, не должен оставлять на экране светящегося следа.

Н. — Это напоминает мне процесс письма. Дойдя до конца строки или страницы, я приподнимаю перо и только после этого возобновляю работу...

Итак, вся гамма яркостей характеризуется тремя четвертями амплитуды несущей волны.

Л. — Ты прав. Кроме того, Незнайкин, если во Франции и Бельгии модуляция положительная, то в других странах, например в Советском Союзе, Англии, США, она отрицательная.

Н. — Что ты под этим подразумеваешь?

Л.— В этих странах модуляция осуществляется так, что чем ярче элемент изображения, тем меньше амплитуда соответствующих ему колебаний волны. Иначе говоря, выдаваемый передающей телевизионной трубкой сигнал при воздействии на несущую волну больше или меньше снижает ее амплитуду.

Таким образом, в европейском стандарте с четкостью 625 строк наиболее яркие белые участки изображения соответствуют примерно одной десятой пикового значения амплитуды, а темные — 75% этой амплитуды.

Н. — Я догадываюсь, что ультрачерное размещается между 75 и 100%. А обратный ход луча после просмотра строки или полукадра происходит как раз в то время, когда сигнал находится в зоне ультрачерного.

ФОРМА СИГНАЛОВ СИНХРОНИЗАЦИИ

Л. — Во всех стандартах стремятся сделать так, чтобы сигналы синхронизации размещались между уровнями черного и ультрачерного.

Н. — А какова форма этих сигналов? Описывая генераторы пилообразных сигналов, ты говорил о «синхронизирующих импульсах».

Л. — Действительно, это очень короткие и почти прямоугольные сигналы. Строчные сигналы состоят из одного импульса, длительность которого в десяток раз короче общего времени, затрачиваемого лучом на прохождение прямого и обратного хода по строке. Перед этим импульсом и после него подаются гасящие сигналы - горизонтальные площадки, расположенные на уровне черного. Предшествующая импульсу площадка намного короче той, которая следует за ним.

Я нарисовал тебе кривую, характеризующую изменение амплитуды модулированной волны во время движения луча по строке и во время сигналов синхронизации. Время, указанное в микросекундах, соответствует советскому стандарту с четкостью 625 строк (рис. 198).

А теперь мне нужно объяснить тебе строение кадровых синхронизирующих сигналов. Их длительность составляет 192 мкс в советском стандарте с четкостью 625 строк. В данном слу-

190

чае я говорю тебе о длительности прямоугольных синхронизирующих импульсов. Весь же набор сигналов (кадровых гасящих, уравнивающих, врезок, кадровых синхронизирующих), передаваемых между двумя последовательными полукадрами, превышает длительность передачи одной строки от 23 до 25 раз (рис. 199).

Н. — Это составляет около 0,0015 с. Для нас это очень короткое время. В электронике же, как мне кажется, таким временем пренебрегать нельзя. Что же происходит в этот интервал времени?

Л. — Наряду с кадровыми синхронизирующими импульсами исправно продолжают подаваться строчные синхронизирующие импульсы.

Н. — А зачем, если в этот интервал времени изображение не развертывается и не воспроизводится?

Л. — Если не управлять разверткой строк, то в начале следующего иолукадра они окажутся несинхронизированными, что приведет к искажению изображения.

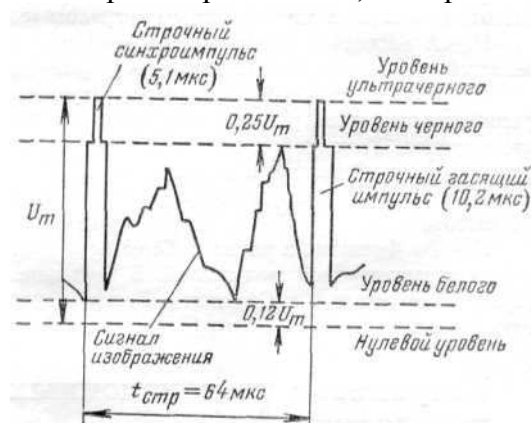


Рис. 198. Форма видеосигналов и соответствующие значения яркости.

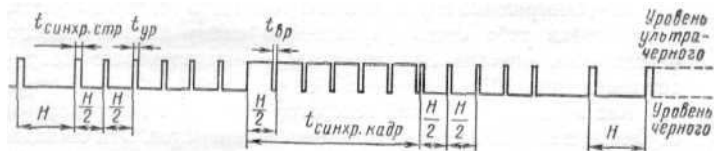


Рис. 199. Форма синхрои́мпульса. Период строчной развертки $H = 64$ мкс; длительность строчного синхрои́мпульса $t_{\text{синхр.стр.}} = 5,1$ мкс; длительность уравнивающего импульса $t_{\text{ур}} = 2,55$ мкс; длительность врезки $t_{\text{вр}} = 2,55$ мкс; длительность кадрового синхрои́мпульса $t_{\text{синхр.кадр.}} = 192$ мкс

191

ВОЛНЫ, МОДУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛАМИ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЗВУКА

Н.— Я констатирую, что волны, излучаемые телевизионными передатчиками, имеют дьявольски сложную форму. Во время передачи каждой строки их амплитуда изменяется в зависимости от ярких просматриваемых элементов изображения. В конце строки пятно становится черным. Затем синхронизирующий импульс возвращает его к началу следующей строки, и после короткой черной площадки гасящего импульса оно вновь становится светящимся. И когда за время $0,02$ с завершается передача полукадра, начинается передача цепочки кадровых синхронизирующих сигналов. Пятно поднимается вверх, пересекая при этом несколько десятков строк.

Кроме того, я думаю о чудовищной ширине полосы модуляции, занимающей несколько мегагерц. К тому же она создает две широкие боковые полосы по обе стороны от несущей волны.

Л. — Совершенно верно. Однако я могу успокоить тебя тем, что принимают меры для того, чтобы сильно ослабить одну из этих боковых полос, что позволяет сократить общую полосу частот, занимаемых телевизионным сигналом (рис. 200).

Н. — А насколько близко от несущей изображения располагается волна, передающая звуковое сопровождение?

Л. — Близко. Несущая звука имеет такую частоту, что она располагается совсем рядом с неослабленной боковой полосой изображения. Таким образом, одна и та же антенна служит для приема изображения и звука.

Н. — А как модулируют несущую звука, по амплитуде или по частоте?

Л. — Во Франции, а также в Бельгии и Англии звук передается с амплитудной модуляцией. В большинстве же других стран, в том числе и в Советском Союзе, используют частотную модуляцию.

УСТРОЙСТВО ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ

Н. — Я прекрасно понимаю, что телевизионный передатчик намного сложнее радиовещательного; впрочем, последний является небольшой составной частью телевизионного передатчика.

Л.— Совершенно верно, и чтобы обобщить то, что ты узнал, я нарисовал тебе очень упрощенную схему телевизионного передатчика, опустив для простоты блоки звукового сопровождения (рис. 201).

Как видишь, задающий генератор управляет генераторами строчных и кадровых синхронизирующих сигналов. Эти сигналы в свою очередь управляют генераторами отклоняющих токов, обеспечивающих развертку изображения в передающей телевизионной трубке.

Эти же сигналы синхронизации подводятся к схеме, где они смешиваются с предварительно усиленными видеосигналами.

192

Таким образом получают сложную совокупность изменений напряжений, где напряжения, характеризующие яркость элементов каждой строки, чередуются с напряжениями, управляющими

обратным ходом луча по строкам и кадрам. Этими сложными напряжениями и модулируют колебания несущей. После мощного усиления эти модулированные колебания поступают в передающую антенну, чтобы создать соответствующие волны.

Н. — На твоей схеме имеются также блоки, выдающие строчные и кадровые гасящие сигналы. Они управляются соответствующими сигналами синхронизации и соединены с модулятором передающей телевизионной трубки.

Я предполагаю, что их роль заключается в том, чтобы сделать этот электрод достаточно отрицательным, чтобы электронный луч оказался существенно ослабленным и не смог при обратном ходе «прочитать» соответствующие элементы изображения.

Л. — Совершенно верно. Благодаря этим устройствам передающая телевизионная трубка «закрывает глаза» на то время, когда луч совершает обратный ход по строкам и кадрам. И уж раз мы заговорили о «глазах», то запомни, что для

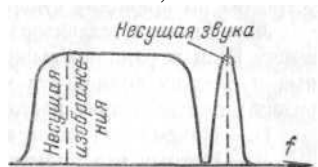


Рис. 200. Полоса частот, занятая волнами, передающими изображение и звук.

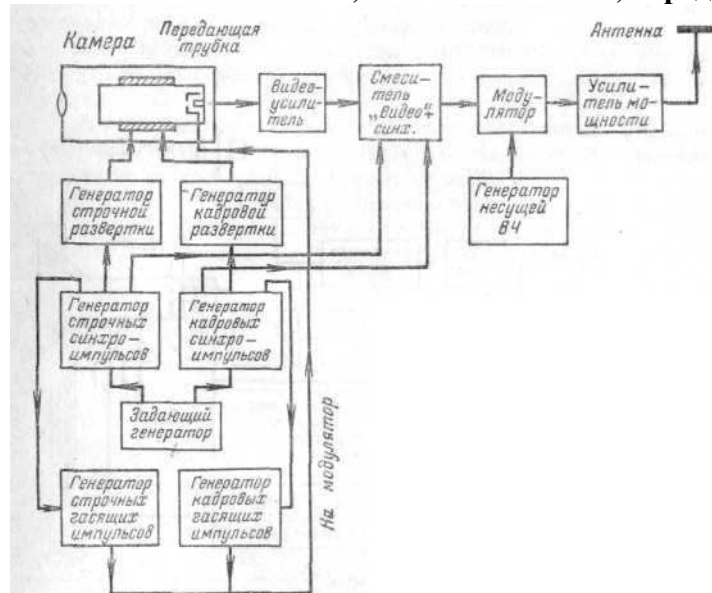


Рис. 201. Структурная схема телевизионного передатчика. Стрелками показано направление сигналов.

193

оператора, работающего с передающей телевизионной камерой, сделан специальный видоискатель, который по своей конструкции совершенно не похож на видоискатель фотоаппарата. В телевизионной камере устанавливается не оптический, а электронный видоискатель: это очень упрощенный телевизионный приемник. Он получает видеосигналы и отклоняющие токи непосредственно с соответствующих блоков передатчика. Пользуясь этим видоискателем, оператор видит точно такое же изображение, каким оно появляется перед телезрителями.

УСТРОЙСТВО ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПРИЕМНИКОВ

Н. — Раз уж ты начал говорить о телезрителях, мне было бы приятно, наконец, в самой общей форме узнать, как устроены телевизионные приемники. Я предполагаю наличие некоторой аналогии между радио- и телевизионными приемниками.

Л. - Само собой разумеется. В телевизоре слабые токи очень высокой частоты, наводимые волнами в антенне, сначала усиливаются, а затем подаются на преобразователь частоты (рис. 202).

Н.— Следовательно, телевизоры, как и радиоприемники, устроены по принципу супергетеродина.

Л. — Да, но в телевизорах промежуточная частота намного выше. Если в радиоприемниках для приема передач на длинных и средних волнах эта частота ниже 500 кГц, то в телевизорах она достигает нескольких десятков мегагерц.

Н.— Почему она такая высокая?

Л.— Потому что промежуточная частота должна передать полосу видеочастот, составляющую несколько мегагерц.

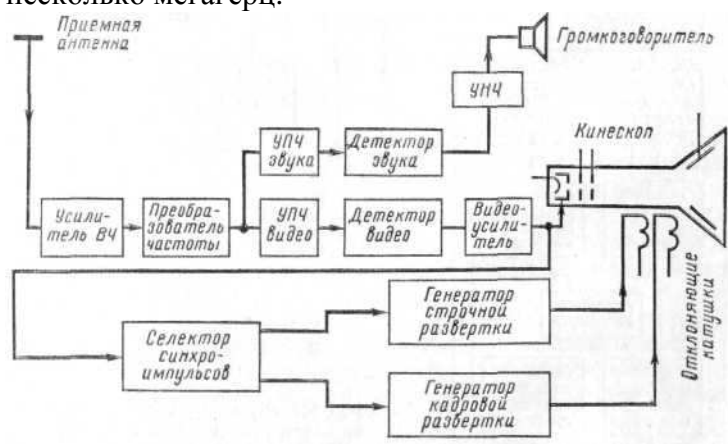


Рис. 202. Структурная схема телевизора.

194

Н. - На твоей очень упрощенной схеме я вижу, что после преобразователя частоты имеются, во-первых, УПЧ изображения и, во-вторых, УПЧ звука. Чем вызывается это разделение?

Л. — Разве ты забыл, что звук передается несущей частотой, отстоящей на несколько мегагерц от частоты, передающей видеосигналы? Так, в советских передатчиках, работающих с разложением на 625 строк, несущая частота звука на 6,5 МГц выше несущей видеочастоты.

Н.— Теперь я понимаю, что на выходе преобразователя частоты разделяются на ПЧ звука и ПЧ изображения.

Л.— Вот почему УПЧ звука настроен на 31,5 МГц, а УПЧ изображения — на 38,0 МГц.

Н. — Это объясняет четкое разделение сигналов звука и изображения. Первые после усиления в УПЧ детектируются, проходят УНЧ и подаются на громкоговоритель.

Что же касается видеосигналов, то я вижу, что они также усиливаются в УПЧ, затем детектируются, усиливаются на собственной видеочастоте и подаются на модулятор электроннолучевой трубки с целью управления интенсивностью электронного луча (изменения яркости и свечения элементов экрана). Кроме того, я вижу, что после детектирования они подаются на устройство, выделяющее сигналы синхронизации. Эти сигналы управляют генераторами строчной и кадровой развертки. Но я не вижу, как осуществляется подобное выделение.

Л. - Разве ты забыл, что сигналы синхронизации имеют амплитуду, отличную от амплитуды сигналов изображения? Это и позволяет производить выделение. Сигналы подают на каскады с постоянным смещением, позволяющим пропускать лишь сигналы, укладываемые между двумя строгими границами. Это, само собой разумеется, границы амплитуд, между которыми находятся сигналы синхронизации.

Н. — Сказанное тобою напомнило мне решето, позволяющее рассортировать смесь камней — оно пропускает лишь самые мелкие.

Л. — Запомни еще, что кадровые синхронизирующие сигналы отделяются от строчных синхронизирующих импульсов по длительности: вторые намного короче первых.

Н. — Теперь я в самых общих чертах понял устройство монохромного телевизора. Но как устроены цветные телевизоры?

Л.— Этот вопрос мы рассмотрим в другой раз.

195

БЕСЕДА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

ФИЗИКА ЦВЕТА И ФИЗИОЛОГИЯ ЗРЕНИЯ

Прежде чем профессор Радиолы изложит принципы передачи цветных изображений, Любознайкин объяснит своему другу состав белого света и лучей различного цвета спектра. Затем он рассмотрит физиологические аспекты восприятия цвета и определит принцип трехцветного способа получения цветных изображений, лежащий в основе цветного телевидения.

СПЕКТР ЦВЕТОВ

Любознайкин. — Мой дядюшка Радиоль сейчас путешествует и поэтому не смог записать на магнитофоне очередной из своих рассказов, в которых объясняет тебе, дорогой друг, различные аспекты электронной техники.

Незнайкин. — Досадно, что он в отъезде. Это лишило его такого удовольствия, какое испытал я, рассматривая чудесную радугу, украсившую сегодня небо; возможно, что ты тоже ее видел.

Л. — Действительно, она пересекла значительную часть неба.

Н. — Я спрашиваю себя, почему солнце, которое обычно излучает белый свет, испускает красивую гамму цветов от красного до фиолетового и охватывает столько других тонов?

Л. — Разве ты, Незнайкин, не знаешь, что белый свет состоит из смеси всех этих цветов, которые, будучи разделенными, образуют радугу?

Н.— В этом я не сомневался, но не вижу, чем может быть вызвано такое разделение.

Л.— Два столетия тому назад знаменитому английскому математику, физику и астроному Исааку Ньютону удалось разложить белый свет на гамму цветных полос, пропуская свет через стеклянную призму (рис. 203). Цвет, как ты, вероятно, знаешь, определяется длиной волны света. Коэффициент преломления, т. е. угол, на который отклоняется луч при переходе из одной среды в другую, изменяется в зависимости от длины волны. Вот почему, проходя через призму, белый свет разлагается на составляющие его компоненты и на экране появляется спектр цветов, плавно переходящих один в другой.

Н.— Однако на твоём рисунке я вижу семь различных цветов: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный.

Л. — Каждый из этих терминов обозначает некоторую полосу тонов, а не один тон, порождаемый волной одной длины.

Видимый свет имеет волны длиной от 380 до 780 нм. Это соответствует частотам от 790 до 385 ГГц.

196

Н. — Так, значит, человеческий глаз воспринимает лишь узкую полосу частот электромагнитных волн. Световые лучи занимают только около одной целой октавы.

Л. — Да, Незнайкин. Волны длиннее волны красных лучей соответствуют инфракрасным лучам, которые для нас так же невидимы, как и ультрафиолетовые лучи, длина волны которых короче, чем у фиолетовых (рис. 204). К счастью, существуют фотоэлектрические элементы, чувствительные к невидимым для нас лучам.

Н. — Я вновь думаю о прекрасной радуге. Следует ли полагать, что она создана призмой, находящейся в верхних слоях атмосферы?

Л. - Разумеется, нет. В небе находится облако, состоящее из мельчайших капелек, на которых солнечные лучи претерпевают двойное преломление, что и определяет распределение различных цветов по длине волн.

Н. — Значит, не следует говорить о белом цвете, так как в действительности он состоит из целой гаммы цветов. И так как в физике обратимые явления встречаются очень часто, я предполагаю, что при рассматривании через стеклянную призму рисунка, представляющего собой весь спектр цветов от красного до фиолетового, у нас сложится впечатление, что мы видим белую поверхность.

Л.— Прими мои поздравления, Незнайкин! Твое предположение справедливо, но ни в одной из прочитанных мною книг

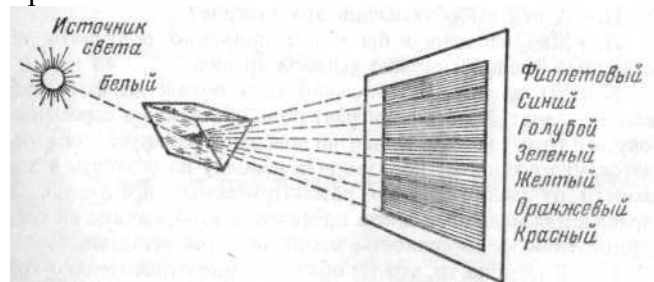


Рис. 203. При прохождении через призму белый свет разлагается на непрерывный спектр цветов.

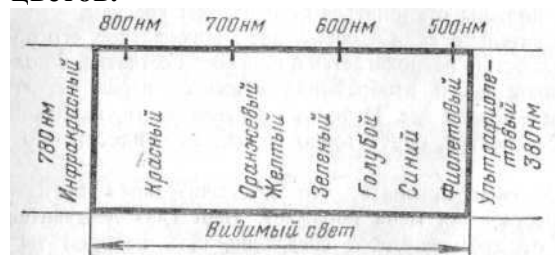


Рис. 204. Длина волны света различных цветов.

197

по физике я не нашел изложения такой гипотезы. Она в самом деле оригинальна.

Н. - Твоя оценка для меня очень лестна... Неужели ни у кого никогда не возникала идея поэкспериментировать со сложением различных цветов, чтобы получить белый?

Л. — Ну, разумеется, возникала. Уже Ньютон развлекался раскрашиванием диска семью различными цветами, он закрашивал ими различные сектора диска. При достаточно быстром вращении диск казался белым. Почему? Потому что цвета благодаря сохранению зрительных ощущений складываются в нашем восприятии и дают впечатление белого цвета.

СЛОЖЕНИЕ ЦВЕТОВ

Н.— Одним словом, сложение цветов во времени, производимое диском Ньютона, дает такой же эффект, как и их сложение в пространстве. Но во всех случаях для получения белого цвета необходимо располагать всей гаммой цветов спектра, не так ли?

Л.— Совсем нет! Ты можешь получить белый цвет, складывая только три цвета: красный, зеленый и синий. Это *основные цвета*, лежащие в основе того, что называют *трехцветным способом цветовоспроизведения*.

ФИЗИОЛОГИЯ ЗРЕНИЯ

Н. — А как ты объясняешь это явление?

Л. — Мне следовало бы более подробно объяснить тебе различные физиологические аспекты зрения.

Как ты знаешь, человеческий глаз похож на фотографический аппарат. Хрусталик играет роль объектива с переменным фокусным расстоянием. Кривизна поверхностей хрусталика изменяется, что позволяет производить наводку на резкость в зависимости от расстояния до рассматриваемых предметов. Эта управляемая мышцами линза проецирует изображение на светочувствительную поверхность, какой является сетчатка.

Н. — Вспомнив то, что ты объяснил мне относительно коэффициента преломления, изменяющегося в зависимости от цвета лучей при переходе из одной среды в другую, я спрашиваю себя, насколько совершенно действие нашего хрусталика. Подобно линзе он, несомненно, ведет себя как призма. Фиолетовые лучи должны отклоняться больше, чем красные.

Следовательно, если изображение многоцветное, его проекция не полностью располагается в плоскости сетчатки. Фиолетовые и синие части изображения окажутся перед сетчаткой, а красные — позади нее. И только зеленая часть, находящаяся посередине спектра, будет точно совпадать с плоскостью сетчатки.

Л. — Должен признать, что исключительная логичность твоего рассуждения меня поражает. Наш глаз действительно страдает от *хроматической аберрации*, суть которой ты так хорошо доказал в ходе своих рассуждений. Поэтому мы с трудом различаем мелкие детали цветных изображений.

198

Н. — А какие светочувствительные элементы находятся в сетчатке?

Л. — Существует два типа таких элементов, которые из-за своей формы получили названия *колбочек* и *палочек*. Колбочки чувствительны к цвету. В сетчатке их насчитывается около 6 миллионов. Основная часть этих колбочек расположена в центральной части сетчатки, носящей название желтого пятна (рис. 205).

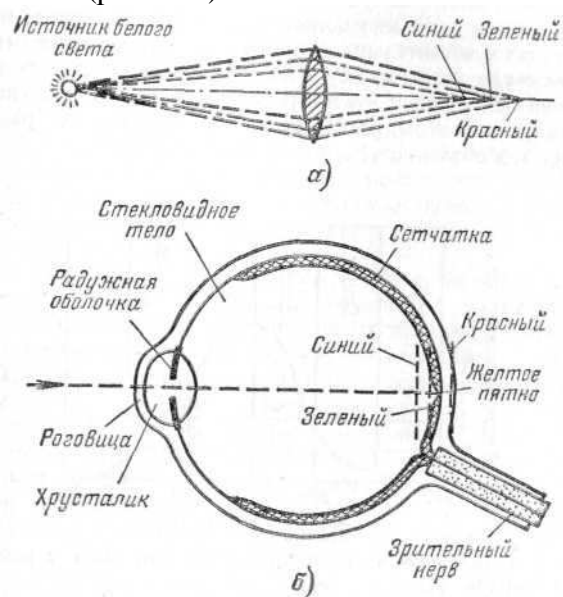


Рис. 205. Прохождение лучей разного цвета через линзу (а) и схематический разрез глаза (б).

Изображение многоцветного предмета образуется в нескольких плоскостях; если кривизна хрусталика такова, что зеленое изображение оказывается в плоскости сетчатки, то синее изображение располагается впереди, а красное — позади сетчатки.

Что же касается палочек, обладающих чувствительностью в несколько тысяч раз более высокой, чем колбочки, то в сетчатке их содержится примерно 120 миллионов. Они чувствительны к интенсивности световых лучей, но не различают их цвета.

Н. — Я предполагаю, что существует множество типов колбочек, так как должны существовать элементы, чувствительные к каждому из различных цветов спектра.

Л.— Раньше действительно так думали, но в конечном счете пришли к тому, что существуют лишь три категории колбочек: одни чувствительны к синему цвету, другие к зеленому и третьи — к красному.

199

ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТОВ

Н.— Это, как я предполагаю, объясняет возникновение трехцветного способа цветовоспроизведения.

Л.— Совершенно верно. Наибольшей чувствительностью обладают колбочки, принимающие зеленые лучи, а наименьшей — колбочки, принимающие синие лучи. Впрочем, вот как выглядит хроматическая чувствительность человеческого глаза

(рис. 206).

Н.— Здесь одно мне остается непонятным. Если колбочки наших глаз чувствительны лишь к трем цветам, то как мы воспринимаем другие цвета? Судя по кривой, наши глаза в большей или меньшей степени чувствительны ко всем цветам спектра. Я убеждаюсь в этом, разглядывая многоцветные изображения. Как ты это объяснишь?

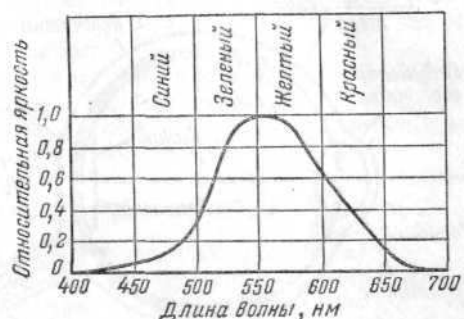


Рис. 206. Кривая относительной чувствительности глаза к различным цветам спектра.

Л.— Очень просто. Дело в том, что смешивание трех основных цветов — красного, зеленого и синего — позволяет получить всю гамму видимых цветов. Вот несколько примеров, приведенных для тебя в арифметической форме:

красный + зеленый = желтый;

красный + синий = пурпурный;

зеленый + синий = голубой;

красный + зеленый + синий = белый.

Само собой разумеется, что, дозируя интенсивность каждого из основных цветов, можно получить все желаемые оттенки.

Н.— Теперь я лучше понимаю, как в типографии удается напечатать репродукции цветных картин. Рассматривая цветные отпечатки в лупу, я убедился, что, кроме черного контура, они состоят еще из трех цветных: красного, желтого и синего. За исключением желтого, это как раз три твоих основных цвета.

Л.— Действительно, в этом способе типографской печати, именуемом *четырёхкрасочным способом цветовоспроизведения*, зеленый цвет получают путем наложения синего на желтый.

200

ПЕРЕДАЧА ЦВЕТОВ В ТЕЛЕВИДЕНИИ

В цветном телевидении используют три основных цвета, воспринимаемых сетчаткой глаза: красный, зеленый и синий. При приеме передач можно выделить сигналы, соответствующие каждому из трех цветов. Но передаются также и сигналы, характеризующие сумму этих цветов.

Н.— Я не вижу, какую пользу могут принести эти последние сигналы. Я думаю, что в телевизоре необходимо иметь экран, на котором подобно типографским цветным отпечаткам содержатся

люминесцентные элементы, соответствующие каждому из этих трех цветов. Поэтому достаточно иметь сигналы, соответствующие каждому из них.

Л. — Твое рассуждение справедливо. Однако ты не учишь принципов совместимости, сформулированных известным французским специалистом в области телевидения Жоржем Валенси. Он высказал принципы совместимости между монохромным телевидением (которое не совсем правильно называют «черно-белым») и цветным.

В соответствии с его идеями цветные передачи должны приниматься не только цветными телевизорами, но также и черно-белыми, на которых они, разумеется, появляются без разнообразия цветов.

Валенси не ограничился высказыванием этих требований совместимости. Он также сформулировал основной принцип, позволяющий их удовлетворить; этот принцип лежит в основе всех современных систем цветного телевидения: передача одновременно содержит три основных цвета и сигнал яркости. Последний идентичен видеосигналу монохромного телевидения и, следовательно, позволяет принимать эти передачи цветными телевизорами.

Н. — Эта совместимость — очень хорошая штука, но она должна привести к очень сложной конструкции, потому что в итоге приходится передавать четыре сигнала: три цвета плюс яркость.

Л. — Успокойся: при передаче цветных программ научились обходиться только тремя сигналами. Мой дядюшка объяснит тебе, как это осуществляется на практике.

201

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ ЦВЕТНЫЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ ПЕРЕДАЧИ

Как можно передать всю гамму цветов спектра с необходимой интенсивностью каждого цвета? Эта сложная проблема решена с использованием принципа трехцветного способа цветопроизведения. Цветная телевизионная передача должна, однако, быть совместимой, чтобы ее можно было принимать и на черно-белые телевизоры. Для этой цели несущую волну модулируют сигналами яркости. Подробно об этом расскажет профессор Радиоль.

Я предполагаю, Незнайкин, что после беседы с Любознайкиным ты немало подумал над проблемой, возникшей в конце беседы: каким образом, располагая только тремя каналами, передают четыре сигнала. Это сигнал яркости и сигналы трех основных цветов (красного, зеленого и синего).

ЯРКОСТЬ — СУММА ЦВЕТОВ

В конечном итоге ты должен был найти решение, заключающееся в формировании яркости путем сложения трех основных цветов. Действительно, если мы наложим друг на друга красный, зеленый и синий лучи, дозируя при этом их интенсивность в соответствии с чувствительностью глаза к каждому из этих цветов, то получим белый свет.

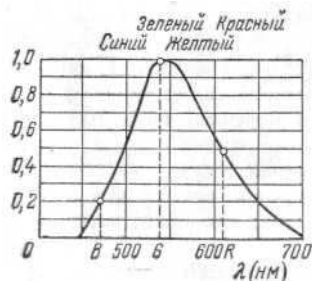


Рис. 207. Дозировка трех основных цветов: R (красного), G (зеленого) и B (синего) — в зависимости от чувствительности человеческого глаза.

Обозначим буквой Y яркость, а буквами R , G и B — три основных цвета, которым соответствуют следующие длины волн: R (красный) — 610 нм, G (зеленый) — 540 нм, B (синий) — 470 нм.

Взяв кривую хроматической чувствительности человеческого глаза и измерив величину, соответствующую каждому из трех основных цветов, ты убедишься, что чувствительность к

красному цвету ниже чувствительности к зеленому в 2 раза, а чувствительность к синему составляет всего лишь пятую часть чувствительности к зеленому, которую мы принимаем равной 1 (рис. 207). Ты достаточно силен в арифметике, чтобы сложить чувствительности к зеленому, красному и синему цветам: $1 + 0,5 + 0,2 = 1,7$.

А теперь рассчитаем удельный вес каждой из этих чувствительностей в полученной сумме. Для зеленого цвета мы должны 1 разделить на 1,7, что дает нам 0,59. Для красного получим: $0,5:1,7=0,30$. И для синего: $0,2:1,7 = 0,11$.

При желании получить яркость Y , соответствующую хроматической чувствительности глаза, мы должны сложить три основных цвета в только что

202

полученном нами соотношении. Поэтому для всех систем телевидения принята следующая формула: $Y=0,30.R+0,59G+0,11B$.

Передай в таком соотношении три основных цвета, и на экране телевизионного приемника получишь точно такие же тона и такую же яркость, как при непосредственном восприятии передаваемого изображения. Если интенсивность каждого из основных цветов одинакова, то сложение их в соотношении, указанном в формуле, даст белый свет. Если же величины R , G и B не равны, то в результате сложения получатся различные цвета, изменяющиеся в зависимости от соотношения этих основных цветов.

СИГНАЛЫ, ПЕРЕДАВАЕМЫЕ В ЦВЕТНОМ ТЕЛЕВИДЕНИИ

Теперь ты убежден в правоте своей гипотезы, т. е. в том, что в цветном телевидении передают основные цвета R , G и B и обеспечивают необходимую яркость, дозируя их по только что выведенной нами формуле. К великому моему огорчению, должен сказать тебе, что так поступать не следует, потому что черно-белый телевизионный приемник не сможет воспроизвести изображения, переданные в такой форме. Он не обладает схемами, позволяющими дозировать по нашей формуле и складывать сигналы R , G и B , чтобы получить яркость, которую одну он и способен воспроизвести.

Для обеспечения совместимости во всех цветных телевизионных системах передают сигналы яркости Y .

Этот сигнал не отличается от видеосигнала монохромного телевидения и служит для получения полноценного изображения на экранах черно-белых телевизоров. На первых этапах разработки совместимых систем цветного телевидения кроме яркостного сигнала Y передавались сигналы основных цветов — красный (R) и синий (B), необходимые для создания цветного изображения на экранах цветных телевизоров. Но на экранах черно-белых телевизоров сигналы R и B создавали помеху в виде мелкоструктурной сетки, относительно медленно перемещающейся по диагонали.

И вот для уменьшения неприятного действия этой помехи сейчас во всех, вещательных системах цветного телевидения вместо тройки сигналов Y , R и B используют сигналы Y , $R-Y$, $B-Y$, где сигналы цветности $R-Y$ и $B-Y$ называются цветоразностными.

Почему использование цветоразностных сигналов $R-Y$ и $B-Y$ вместо R и B уменьшает помехи? Дело в том, что на неокрашенных участках изображения цветоразностные сигналы обращаются в нуль. А так как даже в цветных телевизионных передачах неокрашенные или бледноокрашенные участки составляют не менее 60—70%, то на эту же цифру снижаются эти мелкоструктурные помехи.

Теперь я объясню, почему цветоразностные сигналы на неокрашенных участках изображения обращаются в нуль. С этой целью воспользуемся таким примером. Пусть перед камерой цветного телевидения расположен монохромный объект передачи — газетный лист. Исходящий от него свет дихроичными зеркалами и светофильтрами расщепляется на три потока основных цветов R , G и B . При помощи трех передающих трубок и соответствующих усилителей создаются видеосигналы R , G и B . Далее эти сигналы поступают на матрицы.

203

Матрицы — это схемы, осуществляющие алгебраическое сложение сигналов в нужной пропорции и полярности (рис. 208). Например, матрица, формирующая сигнал яркости Y , содержит четыре резистора с правильно подобранными их сопротивлениями. Поступающие на три входа этой матрицы сигналы R , G и B , сложившись в нужной пропорции, создадут яркостный сигнал $Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B$.

Точно так же в соответствующих матрицах образуются цветоразностные сигналы $R-Y$ и $B-Y$. Знак минус для сигнала Y в этих матрицах реализуется поворотом фазы этого сигнала на 180° при помощи лампового или транзисторного каскада.

Теперь вернемся к неокрашенному изображению газетного листа. Для такого изображения $R=G=B=1$, следовательно, $Y = 0,30 \cdot 1 + 0,59 \cdot 1 + 0,11 \cdot 1 = 1$, поэтому $R-Y=0$ и $B-Y=0$.

Для получения сигналов красного и синего цветов достаточно на каждый из этих цветоразностных сигналов наложить сигнал яркости:

$$(R-Y) + Y = R; (B-Y) + Y = B.$$

Но как же получить сигнал G ? Займемся немного математикой. Теперь, когда, кроме сигнала Y , имеем значения R и B , мы можем из формулы $Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B$ вывести, что $0,59G = Y - 0,30R - 0,11B$.

Разделив обе части этого равенства на $0,59$, получим:

$$G = 1,7Y - 0,51R - 0,19B.$$

Как видишь, при передаче сигнала яркости Y и цветоразностных сигналов $(R-Y)$ и $(B-Y)$ можно восстановить третий основной цвет G . Эти сложные функции выполняет *декодирующее устройство*, являющееся частью цветного телевизора,

ЦВЕТНАЯ ПЕРЕДАЮЩАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ КАМЕРА

А теперь посмотрим, как при передаче создают сигналы трех основных цветов R , G и B , а также и сигналы яркости Y . Запомни сразу же, что нет необходимости получать сигнал яркости независимо от трех других, потому что его можно получить сложением их в соотношении, указанном формулой.

Для преобразования в электрические сигналы каждого из трех основных цветов нужно использовать одну из трех передающих телевизионных трубок. Перед каждой из этих трубок следует установить фильтр соответствующего цвета, т. е. прозрачную пластинку, окрашенную в красный, зеленый или синий цвет. Само собой разумеется, что изображение на все эти три передающие телевизионные трубки должно подаваться от одного и того же объектива. Каким образом это достигается?

Передаваемое изображение проецируется сначала на первое *дихроичное зеркало*, установленное под углом 45° относительно оси объектива. Знаешь ли ты, что так называют? Дихроичное зеркало представляет собой полупрозрачную пластинку; оно пропускает половину световых лучей, а другую их половину отражает. Отраженные лучи попадают на обычное зеркало, которое направляет их на передающую телевизионную трубку, предположим, снабженную синим светофильтром.

Прошедшие же через дихроичное зеркало лучи попадают на второе дихроичное зеркало, которое разделяет их на две части: отраженная часть лучей падает на обычное зеркало, направляющее их на передающую телевизионную

204

трубку с красным светофильтром, а другая часть лучей, прошедшая через дихроичное зеркало, достигает передающей телевизионной трубки, снабженной зеленым светофильтром. Таким образом, с помощью обычных зеркал, а также таких необычных, как дихроичные, одно и то же изображение подается на все три передающие трубки и порождает там сигналы, соответствующие трем основным цветам (рис. 209).

Большинство передающих телевизионных камер для цветного телевидения имеет подобно описанному мною три трубки. Однако существуют камеры, имеющие четвертую трубку; эта трубка, перед которой нет цветного светофильтра, тоже получает изображение от единого объектива. Для этого в камере устанавливают дополнительно два зеркала, одно из которых дихроичное. В этом случае четвертая трубка служит для прямого формирования сигналов яркости. Но обычно сигналы Y получают путем сложения $(0,30R + 0,59G + 0,11B)$ соответствующих доз сигналов, поступающих от трех снабженных цветными светофильтрами передающих телевизионных трубок.

ПЕРЕДАЧА ТРЕХ СИГНАЛОВ

А теперь, Незнайкин, у тебя должен возникнуть вопрос, как передают три сигнала, а именно сигнал яркости Y и оба цветоразностных сигнала $(R-Y)$ и $(B-Y)$, которые получают подачей в противофазе каждой пары сигналов, подвергающихся вычитанию.

Естественно, что первой приходит в голову идея использовать для этой цели три несущие волны, каждая из которых модулируется одним из передаваемых сигналов. Но при таком решении пришлось бы занять слишком широкую полосу частот, а количество передатчиков стало бы настолько велико, что диапазона частот уже не хватило бы. Кроме того, такой метод передачи потребовал бы утроить входные контуры и блоки УВЧ цветных телевизоров, что сделало бы их еще более сложными и дорогими. Учти, что цветные телевизионные передатчики используют только одну несущую волну. Ее модулируют сигналами яркости Y , благодаря чему черно-белые телевизоры превосходно принимают передаваемые таким способом изображения.

А как же передают оба цветоразностных сигнала? Для этой цели используют *поднесущую волну*. Мне необходимо объяснить тебе, почему ее так называют.

В телевидении несущая волна имеет частоту несколько десятков или даже сотен мегагерц. Ее модулируют по амплитуде сигналом с частотой 4,43 МГц.

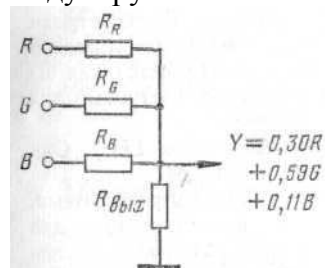


Рис. 208. Матрица, формирующая сигнал яркости.



Рис. 209. В передающей цветной телевизионной камере зеркала распределяют изображение между тремя передающими трубками, перед которыми установлены фильтры основных цветов.

205

В результате возникают две полосы частот по одну и другую сторону от несущей. Как ты помнишь, одна из полос модуляции сильно подавлена. Таким образом, появляется только одна поднесущая, находящаяся в неослабленной боковой полосе.

Величина 4,43 МГц принята для всех цветных передач в Европе.

Какую же функцию выполняет эта поднесущая? Так вот, именно она и передает оба цветных сигнала. В американской системе NTSC и в западногерманской системе PAL поднесущая модулируется по амплитуде цветоразностными сигналами. В системе SECAM она модулируется по частоте.

При любом способе модуляции ее частота ограничена полосой 1,5 МГц. Таким образом, внутри широкой полосы частот, являющейся результатом модуляции несущей сигналами яркости, размещается полоса частот $2 \times 1,5$ МГц, расположенная симметрично относительно поднесущей (рис. 210).

Полоса 1,5 МГц невелика, но ее вполне достаточно для передачи цвета. Не забывай, что человеческий глаз не так хорошо различает мелкие детали по цвету изображения, как по яркости. Сигнал же яркости в цветных передачах передается так же полно, как и в монохромных. Поэтому ограничение частот в области цвета не снижает качества изображений, воспринимаемых телезрителями.

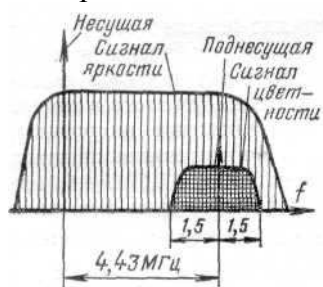


Рис. 210. Спектр частот, занимаемый передающими сигналами яркости и цветности СИСТЕМЫ NTSC, SECAM, PAL

А теперь, мой дорогой Незнайкин, тебя, должно быть, интересует, как одна эта поднесущая без чрезмерной нагрузки может передавать два независимых сигнала ($R-Y$) и ($B-Y$). Именно в используемом для этой цели способе заключается главное различие между тремя существующими в мире системами цветного телевидения.

Самой первой была разработана система NTSC (сокращение от National Television System Committee). В системе модулируемые сигналы сдвинуты по фазе один относительно другого на четверть периода. Для этого один из сигналов задерживают относительно другого.

Название системы SECAM (Sequence de Couleurs Avec Memoire) обозначает: последовательность цветов с запоминающим устройством. В этой системе сигналы цветности передаются поочередно. Во время передачи одной строки поднесущая модулируется по частоте сигналом $R-Y$, а во время передачи следующей строки — сигналом $B-Y$. Запомни, что при приеме удается, как бы парадоксально это ни показалось, восстановить оба сигнала цветности для каждой строки.

И, наконец, система PAL (сокращение от Phase Alternation Line). Она представляет собой своеобразный синтез систем NTSC и SECAM.

Достойно сожаления, что в мире не принята единая для всех стран система. Но мы уже видели, сколь различны нормы, принятые в этих странах для монохромного телевидения. Поэтому существование трех различных систем передачи цветных изображений не должно тебя удивлять.

206

БЕСЕДА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ ЦВЕТНЫЕ ТЕЛЕВИЗОРЫ

В ходе этой беседы Любознайкин объясняет своему другу, как устроены и как работают электронно-лучевые трубки, на экранах которых появляется цветное изображение. Затем он рассказывает о различных способах, используемых для передачи на одной поднесущей обоих цветоразностных сигналов. В заключение Любознайкин рассматривает используемое в системе SECAM хитроумное устройство — линию задержки.

ЦВЕТНОЙ ТЕЛЕВИЗОР, СКОНСТРУИРОВАННЫЙ НЕЗНАЙКИНЫМ

Незнайкин; — На этот раз, мой дорогой друг, мы можем поменяться ролями. Сегодня я хотел бы объяснить тебе, как принимают цветные телевизионные изображения.

Любознайкин.— Уж не прочитал ли ты книгу по этому вопросу?

Н.— Нет, но я много думал о рассказе твоего дядюшки. И без какого бы то ни было труда догадался, как при приеме восстанавливаются цветные изображения.

Здесь, как и во всех разделах физики, мы воспользуемся принципом обратимости явлений. Следовательно, главной частью приемника должны служить три кинескопа, интенсивность электронных лучей которых, а значит, и интенсивность излучаемого ими света управляется сигналами R , G и B , полученными после декодирования и поданными на модуляторы этих кинескопов. В этом телевизоре один кинескоп воспроизводит красную составляющую изображения, второй — зеленую и третий — синюю. Перед каждым из этих трех кинескопов установлен соответствующий цветной фильтр. Все три составляющие с помощью обычных и дихроичных зеркал через один объектив проецируются на экран, где, накладываясь друг на друга, верно воспроизводят цветное изображение. Устройство из кинескопов, фильтров и зеркал идентично тому, которое описал твой дядюшка, когда говорил о цветной передающей телевизионной камере. Достаточно на приведенном им рисунке изменить направление стрелок на противоположное, и мы получим схему воспроизводящего устройства. Разве я не прав?

ЦВЕТНОЙ КИНЕСКОП С ТЕНЕВОЙ МАСКОЙ

Л. — К сожалению, дорогой Незнайкин, должен тебя огорчить, но такая система никогда не использовалась. Ее сложность, слишком большой объем аппаратуры и высокая стоимость не позволили бы оснастить ею миллионы цветных телевизоров.

207

Изображение восстанавливается с помощью только одной электронно-лучевой трубки. Наибольшее распространение получила модель, содержащая три электронные пушки.

Н. — Должен признать, что я не думал о такой возможности. Каждая из этих пушек, несомненно, служит для создания одного из компонентов для трехцветного способа цветовоспроизведения. Один из модуляторов получает сигнал R , второй — G , а сигнал B подается на модулятор третьей электронной пушки. Но что же воспроизводит каждый из трех основных цветов? Используют ли здесь специальные фильтры?

Л. — Нет, Незнайкин. Три основных цвета излучает сам люминесцентный экран кинескопа. Для этой цели он состоит из громадного множества люминесцентных точек, называемых *люминофорами*, которые располагаются группами по три элемента. Каждая из таких групп (их называют *триадами*) содержит три люминофора: один светится красным светом, второй — зеленым, а третий — синим.

Н. — Сколько же таких триад содержит экран кинескопа?

Л.— Около 500000.

Н. — Возможно ли это? В этом случае общее количество люминофоров, расположенных на экране, должно составлять 1500000. Какой же диаметр имеет каждый из них?

Л. — Он немного превышает 0,4 мм.

Н. — Элемент действительно не очень велик. У меня возникает вопрос, каким же образом удастся направить на каждый люминофор электронный луч, соответствующий его цвету. Этим я хочу сказать, как достигнуть, чтобы на все красные люминофоры попадал только электронный луч, исходящий из пушки, на модулятор которой подаются напряжения R ; как

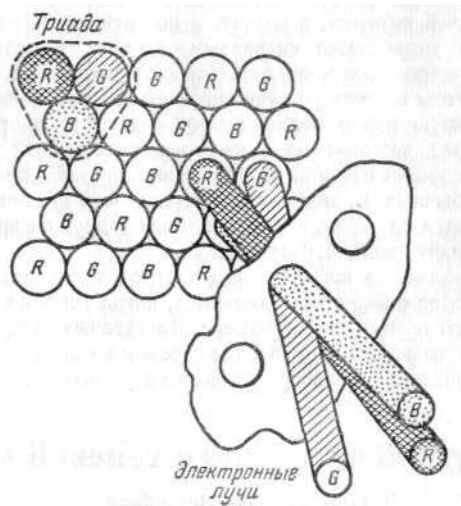


Рис. 211. Путь электронных лучей, которые, проходя через отверстие в маске, попадают на люминофоры соответствующего им одного из трех основных цветов.

208

зеленые люминофоры бомбардируются пушкой, управляемой напряжениями G , и как обеспечивают, чтобы на синие люминофоры попадали только электроны из пушки, управляемой сигналами B .

Л.— Для этого позади экрана, на расстоянии около 15 мм от него, устанавливают так называемую теньевую маску (рис. 211). Это очень тонкая стальная пластина, в которой сделано столько отверстий, сколько триад на экране. Каждое отверстие диаметром 0,25 мм располагают напротив центра каждой из триад люминофоров.

Н.— Скажи мне, как же расположены в кинескопе эти три электронные пушки?

Л.— Они расположены вокруг оси кинескопа под углом 120° друг к другу.

Н.— Ясно! Теперь я догадался, как работает этот кинескоп. Из пушки R через маску видны лишь красные люминофоры. Точно так же лучи, испускаемые пушкой G , проходя через отверстия в маске, попадают лишь на зеленые люминофоры. Такая же картина характерна и для пушки B (рис. 212).

Л.— Bravo, Незнайкин! Ты очень хорошо понял роль маски и установил исключительные связи между люминофорами каждого цвета и соответствующей пушкой. Учти, что в действительности каждый электронный луч имеет диаметр, значительно больший диаметра отверстия в маске; поэтому он одновременно проходит через несколько соседних отверстий, попадая при этом только на люминофоры одного цвета.

Н.— Я думаю, что значительная часть электронов каждого луча не может пройти через отверстия и оседает на самой маске. Так ли это?

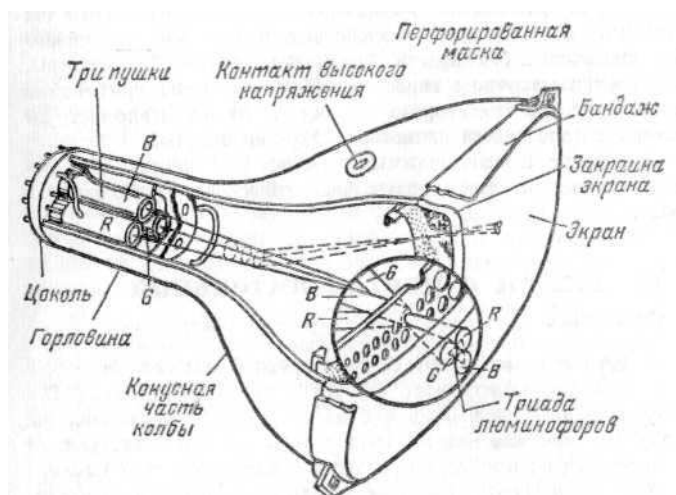


Рис. 212. Схематическое изображение цветного кинескопа с перфорированной теневой маской.
209

Л. — Увы, да. В этом заключается один из самых существенных недостатков кинескопа с теневой маской. Около 80 % электронов задерживается маской. Их энергия нагревает маску и тем самым вызывает ее расширение. Малейшее смещение отверстий вызывает искажение цветов, так как в этом случае электронные лучи могут попасть на люминофоры, не соответствующие их сигналам. Поэтому для предотвращения подобной деформации принимают соответствующие меры.

Кроме того, то обстоятельство, что только пятая часть всех испускаемых электронов достигает люминофоров, объясняет малую яркость свечения экрана. Для доведения яркости до достаточного уровня на аноды прилагают напряжения значительно большие, чем в монохромных кинескопах. При напряжении 25 000 В удается придать электронам достаточное ускорение, чтобы получить хорошую яркость свечения экрана.

ВЫСОКАЯ ТОЧНОСТЬ

Н. — Я предполагаю, что все три луча одновременно пробегают по строкам и электроны каждого из них через отверстия в маске попадают на соответствующие люминофоры. Таким образом три основных цвета появляются на экране.

Л. - Да, именно так воспроизводится все цвета спектра, так как в нашем глазу сливаются воедино ощущения, возникающие от соседних люминофоров.

Н. — Я восхищен изумительной точностью, с которой изготавливается кинескоп с теневой маской. Ведь для того, чтобы испускаемые каждой из трех пушек электроны попадали только на люминофоры соответствующего цвета, необходимо расположить 500000 отверстий в маске и 1500000 люминесцентных точек с исключительно высокой точностью... Да и сами электронные лучи должны быть надежно ограждены от какого бы то ни было отклоняющего воздействия. Я невольно спрашиваю себя, имеются ли в армии столь же точные бомбардиры, как пушки в масочном кинескопе. И если земное притяжение воздействует на траекторию снарядов, то не отклоняет ли магнитное поле нашей планеты электронные лучи?

Л. — Это действительно имеет место. Вот почему для предотвращения этого влияния масочные кинескопы нужно экранировать.

КИНЕСКОП С ЦВЕТОДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТКОЙ

Н. - А нет возможности создать цветной кинескоп без этой маски, которая задерживает большую часть электронов? По моему мнению, следовало бы найти способ, позволяющий направлять луч каждой из трех пушек на соответствующие люминофоры, не прибегая при этом к использованию маски.

Л. — Уже немало лет в этом направлении проводятся исследования. Представляется, что наилучшее решение заключается в *кинескопе с цветоделительной сеткой*, эксперименты с которым

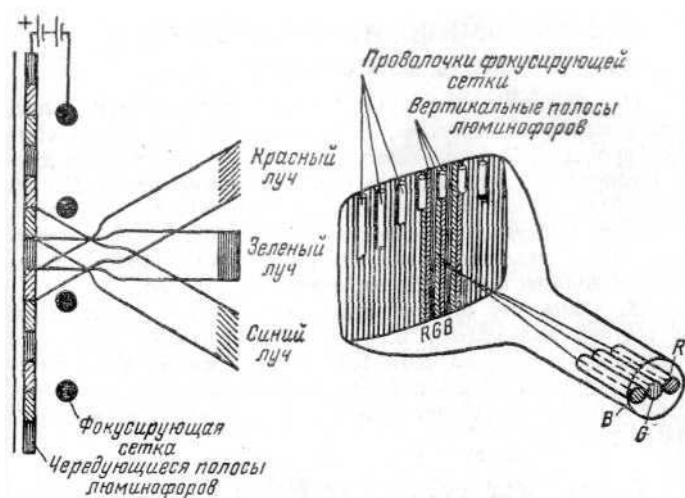


Рис. 213. Схематическое изображение кинескопа типа хроматрон, в котором электронный луч проходит сквозь сетку.

дали положительные результаты*. В этом кинескопе, получившем название *хроматрон*, экран состоит из очень узких вертикальных полосок красного, зеленого и синего люминофоров, которые, многократно повторяясь в такой последовательности, покрывают всю его поверхность. Позади экрана установлена сетка из очень тонких проволочек, располагающихся против линий, разделяющих красные и синие полосы. Следовательно, эти проволочки находятся против вертикальных полос люминофоров (рис. 213).

Н.— А не представляют ли эти проволочки препятствие для прохождения электронов, как это происходит в случае использования маски?

Л.— Нет, так как на сетку подается потенциал, значительно меньший потенциала экрана. Поэтому экран притягивает все электроны, излучаемые тремя пушками. Благодаря разности потенциалов между экраном и сеткой последняя обеспечивает фокусировку электронных лучей, сужая и направляя каждый из них на полосу люминофора соответствующего ему цвета.

* Промышленное производство кинескопов с цветоделительной сеткой оказалось технологически весьма сложным и от него пришлось отказаться. В настоящее время широкое распространение получили кинескопы с планарным расположением пушек, которые иногда называют кинескопами с самосведением. Все три электронные пушки размещаются горизонтально. Маска вместо множества мелких круглых отверстий имеет вертикальные щели, которым на экране соответствуют полосы люминофоров трех цветов. Основное достоинство этой конструкции кинескопа заключается в более простых схемах сведения лучей, что дает возможность сократить количество используемых электронных деталей, упростить регулировку цветного телевизора и сделать его работу более надежной и устойчивой. (Прим. пер.)

МОНОХРОМНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ЦВЕТНОМ КИНЕСКОПЕ

Н.— Яркость в этом случае, несомненно, значительно выше, чем в масочном кинескопе. Я надеюсь, что вскоре мы сможем приобрести такой кинескоп. А пока у меня возник другой вопрос. То, что цветные передачи можно принимать на черно-белые телевизоры, меня не удивляет: ведь несущая

волна модулируется яркостным сигналом Y . Но как обеспечивается другой аспект совместимости, согласно которому цветные телевизоры должны принимать монохромные передачи?

Л. — Здесь нет ничего необычного. В этом случае один и тот же видеосигнал подают на модуляторы всех трех пушек. Следовательно, люминофоры трех цветов дают идентичную яркость свечения. А это означает, надеюсь, ты не забыл, что их сумма дает белый свет большей или меньшей интенсивности.

СИСТЕМЫ NTSC И PAL

Н. — Я все больше восхищаюсь теми достижениями, которые удалось реализовать в такой сложной области, как цветное телевидение. Но я хотел бы, наконец, узнать, каким чудом одна поднесущая волна может передавать два разностных сигнала: $R-Y$ и $B-Y$.

Л. — Именно в используемых для этой цели способах заключается основное различие между существующими в настоящее время тремя системами цветного телевидения. В системе NTSC два модулирующих по амплитуде поднесущую сигнала сдвинуты по фазе один относительно другого на четверть периода поднесущей. Однако при приеме иногда возникают изменения фазы, вызывающие искажение цветовых тонов.

Этот недостаток весьма остроумно устранен в системе PAL, где поднесущая также модулируется двумя сигналами, сдвинутыми один относительно другого на четверть периода, но у одного из них поочередно в ритме передачи строк меняют фазу на противоположную, в результате чего он то опережает другой сигнал, то отстает от него.

Н. — А какой способ сдвига фазы принят в системе SECAM?

ПРИНЦИП СИСТЕМЫ SECAM

Л. — Никакой. В обеих рассмотренных выше системах оба сигнала цветности передаются одновременно; в системе SECAM они передаются поочередно: во время передачи одной строки передается сигнал $R-Y$, а во время передачи следующей строки — сигнал $B-Y$. Каждый из этих сигналов модулирует поднесущую по частоте, и поэтому фазовые или амплитудные искажения не оказывают никакого влияния на цветовой тон изображения.

Н. — Это мне совершенно не нравится. Если во время передачи строки передается лишь один из двух сигналов цвет-

212

ности, мы получим на экране чередование красных и синих строк. Такую картинку рассматривать просто неприятно.

Л. — Успокойся, Незнайкин. Во всех строках на экране телевизионного приемника действуют люминофоры всех трех цветов. Какая хитрость позволяет достичь такого результата? Секрет заключается в устройстве «памяти», хранящем сигналы цветности предыдущей строки во время передачи следующей. Так, например, запоминаются сигналы цветности, соответствующие красному цвету, когда принимаются сигналы цветности, соответствующие синему.

Н. — Должен признаться, я не понял, для чего служит эта «память».

Л. — Она служит для того, чтобы показать на экране телевизора одни и те же изменения одного из основных цветов (красного или синего) во время передачи двух следующих друг за другом строк. Так, когда передатчик передает только сигнал $R-Y$, служащий для воздействия на красные люминофоры одной строки, «память», встроенная в телевизор, приводит в действие синие люминофоры, передавая на них те же цветовые изменения, что были в предыдущей строке, когда принимался сигнал $B-Y$.

Н. — Я начинаю понимать. Но хочу спросить тебя, насколько хорошо иметь одни и те же изменения цветов на двух последовательно передаваемых строках.

Л. — Это не ухудшает качества изображения, потому что четкость восприятия цветов человеческим глазом не столь высокая, как четкость восприятия яркости.

Н. - Значит, если я тебя правильно понял, события происходят следующим образом.

Когда передается сигнал $R-Y$, он управляет модулятором соответствующей пушки. А в это время «память» служит для управления лучом, который на этой же строке высвечивает синие люминофоры. Во время передачи следующей строки принимается сигнал $B-U$, управляющий модулятором пушки B . А «память» сохранила для нас сигнал $R-Y$, благодаря чему красные люминофоры светятся точно так, как на предшествующей строке.

Какова же длительность запоминания и, что еще в большей степени меня интересует, как устроена эта «память»?

ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

Л. — Длительность запоминания равна времени передачи одной строки. Следовательно, в телевидении с разложением на 625 строк длительность запоминания составляет 64 мкс.

Роль «памяти» выполняет *линия задержки*. Я объясню тебе, как сделано это устройство, из которого поданные на его вход сигналы выходят с запозданием ровно на 64 мкс. Запомни, что во время обратного хода луча после каждой строки производится двойная коммутация, чтобы направить приходящий сигнал на соответствующую электронную пушку, а сигнал, выходящий из линии задержки, направить на электронную пушку,

213

которая непосредственно получала прямой сигнал во время передачи предыдущей строки.

Я нарисовал для тебя механические коммутирующие устройства. В телевизоре переключения, естественно, выполняются электронными методами и управляются сигналами, подающимися в конце строки (рис. 214).

Н. — Я предполагаю, что линия задержки сделана из очень длинного проводника электричества: он должен быть настолько длинным, чтобы сигналы затрачивали на прохождение по нему 64 мкс.

Л.— В этом случае потребовался бы изолированный провод длиной около 20 км. Однако используемая в телевизорах линия задержки имеет длину всего лишь 20 см. Из сказанного ты должен сделать вывод, что по ней проходят не электрические сигналы, а нечто другое.

Н. — Могу ли я предположить, что здесь мы имеем дело со звуковыми волнами?

Л. — Точнее, здесь используется ультразвук. Сигналы с частотой, изменяющейся от нуля до 1,5 МГц, порождают на входе линии задержки соответствующие механические колебания, которые на прохождение затрачивают 64 мкс. Затем они вновь преобразуются в электрические сигналы.

Н.— Позволь задать тебе два вопроса: из чего состоит эта линия задержки, по которой проходят колебания, и как осуществляется преобразование электрических колебаний в механические и наоборот.

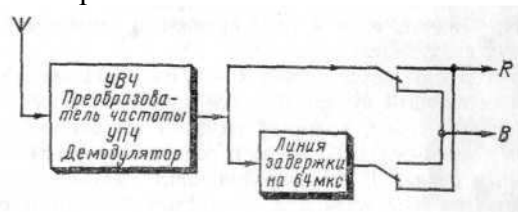


Рис. 214. В системе SECAM сигнал последовательно переключается на R (красный) или на B (синий).

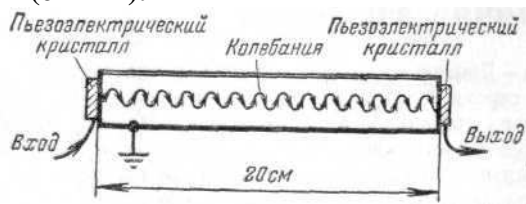


Рис. 215. Схематическое изображение линии задержки: на входе электрические сигналы преобразуются пьезоэлектрическим кристаллом в механические колебания, а на выходе с помощью другого кристалла вновь восстанавливаются электрические сигналы.

214

Л.— Линия задержки представляет собой стальной или стеклянный стержень (рис. 215). Что же касается электромеханического преобразования, то оно основано на явлении пьезоэлектричества. В некоторых кристаллах, как, например, кварц или титанат свинца, возникают колебания, если к ним приложить изменяющиеся электрические напряжения. И наоборот, если их заставить колебаться, то на их поверхностях появляются соответствующие электрические напряжения.

Н. — Я понимаю, что в линии задержки к каждому концу стального стержня прикреплен пьезоэлектрический кристалл. Установленный на входе кристалл преобразует электрические сигналы в механические колебания. Эти колебания распространяются вдоль стержня и через 64 мкс достигают второго пьезоэлектрического кристалла, где порождают электрические сигналы такой же формы, какие были приложены на вход.

Л. — Поздравляю тебя, Незнайкин, с тем, что ты без задержки догадался, как работает эта линия. Теперь ты знаешь основные принципы цветного телевидения. На практике устройство передатчиков и телевизоров намного сложнее. Но я не хочу вдаваться в детали конструкции и подробности работы этой аппаратуры. Если это тебя интересует, ты узнаешь все необходимое, прочитав специальные книги.

215

КОММЕНТАРИЙ ПРОФЕССОРА РАДИОЛЯ

ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА И ИЗОБРАЖЕНИЯ

С помощью электроники можно преобразовать звуковые или световые волны в электрические колебания. Это позволяет записать их. Благодаря обратным преобразованиям можно воспроизвести заложенные таким образом на хранение звуки и изображения. Ниже описываются различные способы записи и воспроизведения.

До сих пор мы изучали лишь способы передачи звуков и изображения в трехмерном пространстве. Благодаря радио и телевидению мы можем слышать и видеть происходящее далеко от нас, в том числе и других городах и странах, на других континентах и даже на небесных телах.

Но звуки и изображения могут также передаваться и в четвертом измерении — во времени. Любопытно отметить, что еще задолго до появления электроники человечество решило проблему передачи изображений во времени, когда удалось сделать первые фотографии.

ТРИ ВИДА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В наши дни существует несколько способов записи и воспроизведения звуков. Каждый из них основан на преобразовании электрических колебаний в колебания иного рода, которые могут легко сохраняться и вновь преобразовываться в электрические.

Какие основные виды преобразований используют? Механическое, оптическое и магнитное. Ты прекрасно осведомлен, Незнайкин, как легко электрические колебания преобразуют в механические. На этом принципе основаны громкоговорители.

Теперь мы займемся рассмотрением трех видов записи и воспроизведения звука.

ПРЕДКИ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРОИГРЫВАТЕЛЕЙ

Надо сказать, что механический способ передачи звуков во времени родился целое столетие назад, т. е. задолго до появления электроники. *Фонограф* был изобретен в 1878 г. Эдисоном. В этом пред-

шественике современных электропроигрывателей запись производилась на цилиндр, покрытый тонким слоем олова. При этом цилиндр вращался и медленно перемещался вдоль своей оси.

Записываемые звуки улавливались широким рупором из листового металла, в вершине которого располагалась мембрана; в центре мембраны был укреплен резец, опиравшийся на цилиндр. Звуковые волны заставляли резец колебаться, и он вырезал на оловянном покрытии цилиндра канавку переменной глубины. Комбинированное движение (вращение и перемещение вдоль оси) придавало канавке форму цилиндрической спирали.

Для воспроизведения записанного таким образом звука было достаточно вернуть резец в начало канавки и вновь начать вращать цилиндр. Изменение рельефа канавки вызывало механические колебания, порождавшие звуковые волны. Нужно ли мне говорить, что это не было высококачественное воспроизведение звука?..

216

Качество звучания фонографов улучшилось, когда цилиндры заменили пластинками и особенно когда изобретателям пришла светлая идея производить запись не глубинную, а поперечную, оставляя глубину канавки постоянной.

ЗАПИСЬ ЗВУКА НА ГРАМПЛАСТИНКУ

Однако только с появлением электроники грампластинка стала прекрасным средством записи и воспроизведения. Ты догадываешься, что при записи используют микрофон, токи которого до подачи на механический резец усиливают. Записывающее устройство (рекордер) сделано по тому же принципу, что и громкоговоритель: оно состоит из постоянного магнита, между его полюсами помещен электромагнит, сердечник которого способен колебаться вокруг своей оси (рис. 216). Когда по электромагниту протекает усиленный микрофонный ток, он приводит в колебательные движения сердечник электромагнита с укрепленным внизу стальным резцом, острие которого вырезает канавку на пластинке, вращающейся под этим механическим записывающим устройством (рис. 217).

Рекордер установлен на винте, который его медленно перемещает к центру диска. Этот диск представляет собой стальную пластинку, покрытую слоем воска. Диск вращается с частотой $33\frac{1}{3}$ об/мин, а длительность звучания составляет около получаса. Это означает, что канавка насчитывает примерно тысячу витков, причем внутренние имеют диаметр около 12 см. Расстояние между двумя соседними витками канавки меньше 0,1 мм. При поперечной записи звука количество изгибов канавки на единицу ее длины определяет частоту звуков, а от амплитуды этих изгибов зависит интенсивность звуков.

Ты прекрасно понимаешь, что чем меньше диаметр витка канавки, тем плотнее располагаются изгибы канавки при записи звука одной и той же частоты. Тем не менее на современных грампластинках даже на витках, расположенных ближе к центру, удается записать частоты, достигающие 15000 Гц.

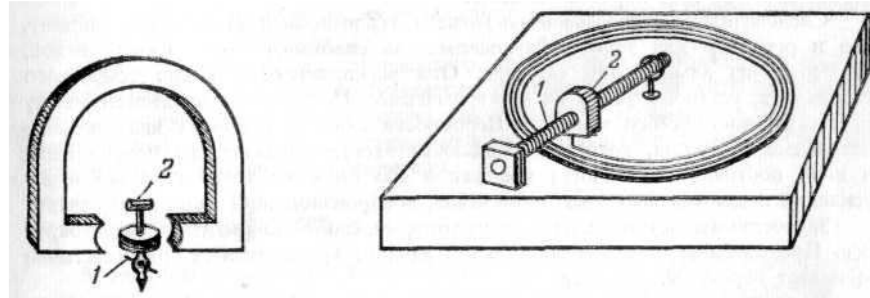


Рис. 216. Катушка помещена в магнитное поле постоянного магнита. Она укреплена на стержне, который может колебаться вокруг оси 1. Верхняя часть стержня удерживается эластичной подвеской в точке 2.

Если через катушку пропускать электрические сигналы, характеризующие звук, то колебания катушки можно использовать для записи звука на диске с помощью острого иглы, укрепленной на нижнем конце стержня. И наоборот: если стержень приводится в колебания в результате движения иглы по канавке грампластинки, то в катушке наводятся соответствующие электрические сигналы.

Рис. 217. Увлекаемый бесконечным винтом 1 рекордер 2 перемещается вдоль радиуса диска с восковым покрытием, на котором и записывается звук.

217

ПРОИЗВОДСТВО ГРАМПЛАСТИНОК

Таким образом осуществляется запись звука. Но ты, вероятно, спрашиваешь себя, каким способом запись с этого оригинального диска переносят на миллионы грампластинок, поступающих в продажу. Для этого с оригинального диска прежде всего снимают медную копию: диск с записью покрывают тонким слоем графитового порошка (он проводит электрический ток) и опускают в ванну с раствором сульфата меди, в которой против диска устанавливают медную пластину.

Между диском, подключенным к отрицательному полюсу, и медной пластиной, соединенной с положительным полюсом, пропускают постоянный ток. Происходящий процесс называется *гальванопластикой*; атомы меди покидают пластину и после довольно сложных электрохимических реакций осаждаются на диске. Таким образом получают обратную, можно сказать «негативную», копию диска. Метод гальванопластики позволяет получить с этой копии другую, на этот раз позитивную, т. е. полностью подобную оригинальному диску. С позитивной копии снимают несколько негативных, которые используют в качестве матриц для производства грампластинок, предназначенных для продажи.

Процесс производства пластинок заключается в том, что пластинки из поливинилхлорида прессуют дисками-матрицами, нагретыми до достаточно высокой температуры, чтобы размягчить поливинилхлоридные диски, которые в результате такого воздействия приобретают рельеф записанной пластинки.

ЗВУКОСНИМАТЕЛИ

Теперь ты знаешь, как изготавливают грампластинки. И несомненно догадываешься, как они считываются на электропроигрывателе. Обратимость физических явлений тебе хорошо знакома.

Следовательно, *звукосниматель* может быть выполнен по тому же принципу, что и рекордер для записи. Звукосниматель снабжают очень тонкой иглой, сделанной из алмаза или сапфира. Она укрепляется на конце тоненького стерженька, установленного на электромагните. Последний расположен между полюсами постоянного магнита. Неровности канавки приводят иглу в колебательные движения, которые передаются электромагниту: его перемещения в поле постоянного магнита наводят в его обмотке токи, которые после усиления подаются на громкоговоритель, воспроизводящий записанные звуки.

Звукосниматель укреплен на конце тонарма, свободно вращающегося вокруг оси. Прохождение иглы по спиральной канавке вращающейся грампластинки вызывает перемещение тонарма.

Звукосниматель должен очень легко опираться на грампластинку, чтобы не вызывать ее износа. Для того чтобы оказываемое звукоснимателем давление было в пределах $(19,6 — 49,0) \cdot 10^3$ Н, тонарм поддерживается пружиной или уравнивается противовесом, установленным на конце, противоположном тому, где находится звукосниматель.

Запомни, Незнайкин, что вместо электромагнитного звукоснимателя очень часто используют пьезоэлектрические (рис. 218). В таком звукоснимателе колебания иглы через связывающую эластичную подвеску передаются пьезоэлектрическому кристаллу. А кристалл выдает напряжения, которые точно соответствуют получаемым им механическим колебаниям.

218

ЗВУКОВЫЕ КИНОФИЛЬМЫ

Я сказал тебе, что звук можно также записать и воспроизвести оптическими средствами. Последние практически используют только в кинофильмах, благодаря чему с 1930 г. кинематограф перестал быть немым.

Звуковой фильм имеет у края пленки узкую дорожку, содержащую теньевые зоны, частота и интенсивность которых соответствуют частоте и амплитуде записанных звуков. Существует два типа звуковых дорожек. В одном случае ширина дорожки постоянная, а переменной является ее прозрачность. В другом случае дорожка имеет однородную прозрачность на всем своем протяжении, но ширина дорожки изменяется (рис. 219).

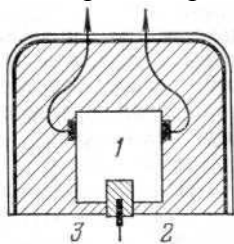


Рис. 218. Пьезоэлектрический звукозаписывающий прибор, в котором кристалл 1 воспринимает колебания, передаваемые ему иглой 2 через эластичный держатель 3.

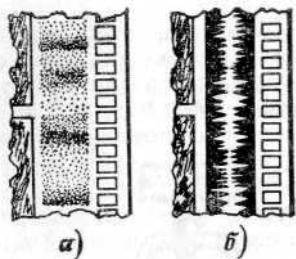


Рис. 219. Звуковые дорожки на киноленте.

а — дорожка переменной прозрачности ; *б* — дорожка переменной ширины.

Для записи звука на этих дорожках луч света направляют через диафрагму, отверстие которой изменяется под воздействием электрических напряжений, или подают эти напряжения на источник света, интенсивность свечения которого, таким образом, изменяется.

Воспроизведение звука, записанного на звуковой дорожке кинофильма, осуществляется с помощью фотоэлемента, воспринимающего свет, проходящий через звуковую дорожку. Изменения яркости света вызывают в цепи фотоэлемента соответствующие изменения напряжения или тока, которые усиливают и затем подают на громкоговоритель.

МАГНИТОФОНЫ

А теперь займемся третьим способом передачи звука во времени. Именно этим способом пользуюсь я в настоящую минуту и воспользуешься ты, Незнайкин, когда будешь слушать запись моего рассказа. Да, мой дорогой друг, речь идет о магнитофоне, который позволяет мне слушать твои беседы с моим племянником и дает мне возможность объяснять интересующие тебя вопросы.

Существует множество типов магнитофонов, но все они основаны на одних и тех же принципах. Запись ведется на магнитном материале. Вначале для этой цели использовали тонкую стальную проволоку. В наши дни пользуются пластмассовыми лентами, покрытыми тонким слоем очень мелкого порошка окиси железа.

Запись, как и воспроизведение, осуществляется с помощью электромагнита, кольцевой сердечник которого имеет очень узкий зазор, величиной в несколько микрометров. Магнитная лента равномерно протягивается, прижимаясь к зазору сердечника электромагнита (рис. 220). Усиленные микрофонные токи проходят по катушке электромагнита и создают переменные магнитные поля, соответствующим образом намагничивающие проходящую перед зазором сердечника ленту.

При воспроизведении ленту пропускают перед подобным электромагнитом. Ее магнитные поля наводят в обмотке электромагнита переменные токи, которые после усиления приводят в действие диффузор громкоговорителя. В зависимости от назначения электромагнит, применяемый при записи или воспроизведении, называется воспроизводящей или записывающей магнитной головкой.

Некогда скорость протяжки ленты составляла 760 мм/с. Затем, по мере того как удавалось уменьшить зазор сердечника и улучшить качество ленты, скорость протяжки стало возможно уменьшить вдвое. Так перешли к 381, а впоследствии к 190,5; 95,3; 47,6 и 23,8 мм/с. Даже на скорости 95,3 мм/с прекрасно воспроизводятся самые высокие звуковые частоты.

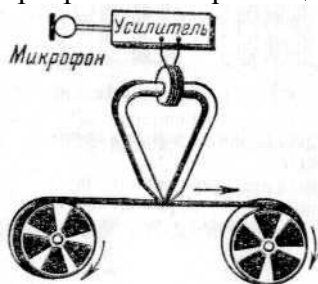


Рис. 220. Запись звука с помощью магнитофона.

Магнитная дорожка довольно узкая, и одна лента может содержать две или даже четыре дорожки, идущие параллельно. Ширина ленты равна 6,25 мм.

Магнитофон может иметь три магнитные головки: одна служит для записи, другая — для воспроизведения, а третья — для стирания. Последняя операция производится с помощью напряжения с частотой 25-60 кГц. Это же самое напряжение подмешивается к записываемым сигналам, чтобы «подмагнитить» зерна окиси железа в ленте и сделать запись более эффективной.

Во многих магнитофонах устанавливают только две головки, одна из которых благодаря соответствующим переключениям может служить как для записи, так и для воспроизведения, а другая — для стирания.

ВИДЕОМАГНИТОФОНЫ И ВИДЕОПЛАСТИНКИ

Перейдем теперь от звука к изображению. Как можно передавать изображение во времени?

В данном случае также можно воспользоваться механическими, оптическими или магнитными способами. Оптические способы ты хорошо знаешь — это фотография и кино. Здесь электронику совершенно не используют. Напротив, электронику очень широко используют при магнитной записи и воспроизведении изображений. Аппарат, выполняющий эти функции, называется *видеомагнитофоном*. Принцип его работы очень похож на принцип работы аппарата для записи и воспроизведения звука.

220

В видеомагнитофоне на магнитную ленту записывают видеосигнал. Следует различать два случая: непосредственную запись и запись телевизионных передач. В первом случае необходимо использовать передающую телевизионную камеру и усилитель выдаваемых ею сигналов. При записи же телевизионных передач на записывающую головку видеомагнитофона подают видеосигналы, полученные после детектирования. Само собой разумеется, что здесь приходится иметь дело с полосой частот, значительно более широкой, чем при записи звука. Как же зафиксировать изменения магнитного поля с частотой в несколько мегагерц на ленте, движущейся со скоростью несколько десятков сантиметров в секунду?

Для этого записывающие головки перемещают в направлении, перпендикулярном направлению движения ленты. В видеоманитофоне устанавливают три или четыре записывающие головки, вращающиеся вокруг оси; дорожки записи располагаются на магнитной ленте в виде множества косых полос. Частоту вращения головок выбирают с таким расчетом, чтобы каждая косая полоса соответствовала одной строке телевизионного кадра. Можно сказать, что при четкости изображения 625 строк записывающая головка прочерчивает косую полосу на магнитной ленте ровно за 64 мкс.

Существуют также видеоманитофоны, оснащенные только одной записывающей головкой, которая остается неподвижной, как и в обычном манитофоне для записи звука. Дорожка записи имеет здесь форму непрерывной линии. Записать широкую полосу частот удастся благодаря действительно микроскопической величине рабочего зазора головки.

При воспроизведении изображений считывание записи производится теми же головками, которые использовались для записи. Надлежащим образом усиленные видеосигналы подаются на кинескоп телевизора.

Как правило, для записи изображения и для его воспроизведения с помощью видеоманитофона пользуются телевизором. Видеоманитофон получает с телевизора принятые, усиленные и протектированные им видеосигналы. А при воспроизведении изображения видеоманитофон подает сигналы на телевизор.

Мне часто случается отсутствовать в то время, когда по телевидению передается очень интересная для меня программа.

В этих случаях я произвожу запись автоматически, используя для этой цели часы, включающие, а затем выключающие телевизор с видеоманитофоном в установленное мною время. Таким образом, передача записывается в мое отсутствие, и я могу ее воспроизвести на экране своего телевизора, когда у меня будет свободное время, чтобы спокойно ее просмотреть.

И наконец, можно ли записать видеосигналы механическим способом? На первый взгляд, это кажется невозможным. Тем не менее в 1970 г. чудо совершилось: исследователи сумели сделать видеопластинку. Затем они добились еще большего: год спустя они уже демонстрировали модели, производящие цветные изображения.

Эти диски вращаются с колоссальной частотой (1500 об/мин) и на каждом миллиметре по радиусу содержат 140 витков канавки. Длительность записи на такой видеопластинке составляет 5 мин. За это время игла считывающего устройства совершает по канавке с глубинной записью путь длиной 15 км. Какими будут другие чудесные достижения техники видеозаписи? Будущее, несомненно, станет все богаче и богаче подобными новинками.

221

БЕСЕДА ДВАДЦАТАЯ И ПОСЛЕДНЯЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОНИКИ

В наши дни электроника стала поистине универсальной техникой. Она эффективно применяется во всех сферах человеческой деятельности.

Не вдаваясь в подробности обсуждаемых вопросов, Любознайкин рассказывает в настоящей беседе о применении различных электронных средств.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Незнайкин. — Я не перестаю думать обо всем том, что ты, мой дорогой друг, и твой ученый дядюшка мне объяснили. Я убедился, что можно преобразовать звуки и свет в электрические сигналы и что возможно также обратное преобразование.

Но скажи мне, пожалуйста, не пытались ли преобразовать в электрические сигналы другие формы энергии?

Любознайкин. — Не только пытались, но и достигли превосходных результатов во всех областях. Благодаря этому электроника чрезвычайно широко используется в самых различных областях науки

и техники и других сферах человеческой деятельности.

Н. —

Не можешь ли ты мне сказать, как удается преобразовать в электрические сигналы такие формы энергии, как теплоту или механические явления?

Л. — Если говорить о теплоте, то разве ты забыл, как она влияет на полупроводниковые приборы? Существуют такие полупроводниковые приборы, омическое сопротивление которых при повышении температуры снижается. Такие приборы называют *терморезисторами*. Они-то и позволяют измерять температуру.

Н. — Я догадываюсь, что для этой цели устанавливают настоящий омметр. К терморезистору прилагают постоянное напряжение и с помощью амперметра измеряют пропускаемый им ток.

Л. — Совершенно верно. А шкалу амперметра градуируют В градусах.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Н. — А можно ли таким способом измерять температуру человеческого тела?

Л. — Конечно, но для этой цели нет ничего лучше самого обычного термометра. Другие же электронные средства с большой пользой применяются в различных областях медицины как для диагностики, так и для лечения.

222

Так, некоторые болезни излечиваются прогреванием глубоко расположенных тканей тела электрическими полями высокой частоты. Для этого по обе стороны подвергающейся воздействию части тела устанавливают электроды, на которые подают напряжение высокой частоты. Таким образом во всех участках тела, расположенных между электродами, выделяется тепло, необходимое для лечения ряда заболеваний.

РАДИОЛОКАТОР

Н. — Значит, развитие электроники способствует укреплению здоровья человека. Это намного важнее развлечений, которые дают нам радио и телевидение.

Л. — Электроника не только улучшает здоровье, но и эффективно обеспечивает безопасность человека во время его путешествий. Благодаря *радиолокатору* корабли и самолеты избегают столкновений. Радиолокатор позволяет точно определить местонахождение самолета, а командно-диспетчерские пункты на аэродромах получают возможность наиболее рационально управлять полетами.

Н. — Я слышал о радиолокаторе, но не знаю, как он работает.

Л. — Эта установка излучает узкий пучок очень коротких волн: метровых, дециметровых или даже сантиметровых. Этот пучок, или, лучше сказать, луч, отражается от объектов, местоположение которых хотят определить, и возвращается в исходную точку, где отраженные волны принимаются специальным приемником.

Н. — Я предполагаю, что радиолокационный луч не остается неподвижным. Чтобы луч мог попасть на корабль или самолет, местоположение которых хотят определить, он должен просматривать большое пространство.

Л. — Совершенно верно, именно так и работает радиолокатор. Излучаемые волны фокусируются металлическим параболомидом, а движения этого параболоида заставляют луч просматривать пространство.

На корабле луч совершает такие движения справа налево от направления движения судна и просматривает лежащий впереди участок моря. Если в поле действия этих волн попадает другой корабль, то отраженные от него волны позволяют определить его местонахождение и предотвратить столкновение.

Н. — Я предполагаю, что в тех случаях, когда нужно определить местонахождение самолета, описываемый лучом путь должен быть более сложным.

Л.— Да, в этом случае луч пробегает по спирали, охватывающей все участки неба. Измеряя интервал времени между излучением и приемом волн, определяют также и расстояние до отразившего их объекта.

Н.— Чудесно! Я предполагаю, что таким способом можно проследить путь космических кораблей.

Л.— Разумеется. Больше того, показания радиолокатора могут записываться и даже использоваться для автоматического управления движением кораблей и самолетов.

223

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, АВТОМАТИКА И ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ

Н.— Я с удовлетворением отмечаю, что электроника позволяет заменить человека на работе различными аппаратами.

Л.— Промышленность широко использует эти возможности, так как большинство производственных процессов может выполняться средствами электроники, которые удачно и выгодно заменяют мозг и мышцы человека.

Н.— Не преувеличиваешь ли ты достоинства этой техники, когда говоришь, что она может заменить наш мозг? В том, что двигатели заменяют мышцы, нет ничего удивительного, и этот процесс начался с изобретения паровой машины. Но мозг...

Л.— Область электроники, получившая название *вычислительной техники*, не выполняет всех видов работ, которые способен производить наш мозг, но во многих случаях она может оказать ему весьма существенную помощь. Так, электронные вычислительные машины способны производить расчеты с чудовищной скоростью, умножение многозначных чисел продолжается всего лишь несколько микросекунд.

Электроника может также облегчить работу нашей памяти. Она позволяет записать на магнитной ленте или на других носителях колоссальные объемы информации, которая используется для проведения различных математических и логических операций на электронных вычислительных машинах, представляющих собой настоящий электронный мозг. Первая такая машина была создана около 30 лет назад и занимала несколько комнат; в наши дни существуют модели электронных вычислительных машин, которые можно поставить на рабочий стол.

Н.— С радостью отмечаю, что электроника позволяет не только передавать в пространстве и времени звуки и изображения, как это осуществляют радио, телевидение, магнитофоны и видеомагнитофоны, но и хранить во времени то, что обычно хранится в человеческой памяти.

Кроме того, с некоторых пор электроника используется для управления на расстоянии космическими аппаратами, а также самоходными лабораториями, доставляемыми на поверхность Луны или других планет. Это *телеуправление*, осуществляемое с помощью проходящих через космос электромагнитных волн, приводит меня в восхищение.

Л.— Да, Незнайкин. Своими победами в космосе человек в значительной мере обязан электронике. Но она существенно облегчает ему проведение научных исследований в самых различных областях. Электронные средства дали нам возможность изучать части Вселенной, удаленные от нас на миллионы световых лет, и в то же время позволили проникнуть в сердце атома с помощью *электронного микроскопа*.

Как видишь, электроника действительно универсальна. Благодаря нашим беседам и рассказам моего дядюшки Радиоля ты теперь знаешь ее основы. Это позволит тебе более подробно изучить те области электроники, которые тебя интересуют и о которых мы вскоре поговорим.

Мне остается лишь пожелать тебе успеха.

224