

Н . Д . П А Н Ф И Л О В

УСИЛИТЕЛИ КИНОУСТАНОВОК

Соболев Виктор
Николаевич

арт 3021
ЗАК 2130

26/ХІ 69г

г- Одесса

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИСКУССТВО» МОСКВА 1968



Книга «Усилители киноустановок» написана для учащихся школ и училищ по подготовке киномехаников II категории и для лиц, самостоятельно занимающихся повышением квалификации.

По содержанию книгу можно условно разделить на три части.

В первой части излагаются принципы работы и устройства вакуумных, газонаполненных и полупроводниковых приборов, используемых в усилительных устройствах низкой частоты киноустановок. В этой части даны и краткие сведения о звуке.

Во второй части рассматриваются схемы выпрямителей и усилительных каскадов напряжения и мощности, обратная связь, входные цепи, коррекция частотных характеристик в усилителях, а также принципы работы и устройства электроакустической аппаратуры: громкоговорителей, телефонов, микрофонов и звукоснимателей.

В третьей части рассматриваются комплекты звуковоспроизводящих устройств киноустановок КУУП-56 и новая унифицированная аппаратура «Звук».

Все замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: Москва, К-51, Цветной бульвар, 25, издательство «Искусство», редакция литературы по фотографии и кинотехнике.

ЗВУК

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ЗВУКОЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ ЗВУКА

Запись и последующее воспроизведение звука представляет собой одну из форм звукопередачи, особенностью которой является то, что звук, записанный на носителе, может быть воспроизведен по прошествии длительного времени, чего не позволяет сделать ни одна другая форма звукопередачи (по проводным каналам связи, по радио, по телевидению).

Звукозапись может быть осуществлена несколькими методами. Практическое применение нашли механический, оптический (фотографический) и магнитный методы записи и воспроизведения звука.

Механический метод записи звука изобретен в 1877 г., когда Т. А. Эдисон впервые построил фонограф. В фонографе запись движений мембраны, в центре которой укреплялся сапфировый резец, производилась на движущемся барабане, покрытом листом станиоля, а в дальнейшем — на восковых валиках. Запись получалась в виде ряда углублений, расположенных по винтовой дорожке на поверхности цилиндра (глубинная запись).

В 1894 г. Э. Берлинер предложил новый прибор для записи звука, названный им граммофоном, в котором звук записывался на восковом диске, причем колебания реза происходили не в глубину, а поперек канавки, которая спирально вилась по диску (поперечная запись).

Этот способ получил большое распространение благодаря удобству размножения записей прессованием пластинок с матриц. Запись при помощи граммофона и в настоящее время может считаться одной из лучших технических форм звукозаписи.

Граммофонная запись воспроизводится акустическим или электрическим способом.

При акустическом способе игла,двигающаяся по канавке граммофонной пластинки, совершает колебательные движения. Другим своим концом игла через системы рычагов передает движение центру диска мембраны, закрепленной по краям. Мембрана помещена в предрупорной камере, присоединенной к горлу рупора. Колебания воздуха в предрупорной камере усиливаются рупором. В патефонах применен свернутый рупор, который размещается конструктивно в чемодане вместе с механизмом патефона.

При электрическом способе используют звуко сниматель, представляющий собой преобразователь механических колебаний иглы в электрические колебания. Электрические колебания усиливаются *усилителем* до необходимой мощности и подводятся к громкоговорителю, преобразующему электрические колебания в акустические или звуковые колебания.

Оптический метод записи звука заключается в том, что светочувствительный слой (кинопленка) освещается пучком света, изменяющимся по ширине (поперечная запись) или по силе света (интенсивная запись). В результате получается оптическая фонограмма, в которой имеются участки различной плотности (рис. I-1).

Оптическая запись воспроизводится следующим образом. Фонограмма (в кинотеатрах — фильмокопия с фонограммой) движется мимо узкой освещенной щели — светового штриха. При этом изменяется величина светового потока, прошедшего через фонограмму на *фотоэлемент*. Фотоэлемент преобразует колебания светового потока в колебания электрического тока той же частоты. Но колебания тока, развиваемые фотоэлементом, ничтожно малы и не в состоянии заставить работать громкогово-

ритель. Поэтому их предварительно подводят к *усилителю*, который усиливает электрические колебания от фотоэлемента до мощности, необходимой для работы громкоговорителя.

Оптический метод записи и воспроизведения звука наибольшее применение находит в звуковом кино. В СССР он был впервые разработан П. Г. Тагером (1927 г.) и А. Ф. Шориным (1928 г.).

Магнитный метод записи звука основан на свойстве стальной проволоки или ферромагнитной ленты намагни-

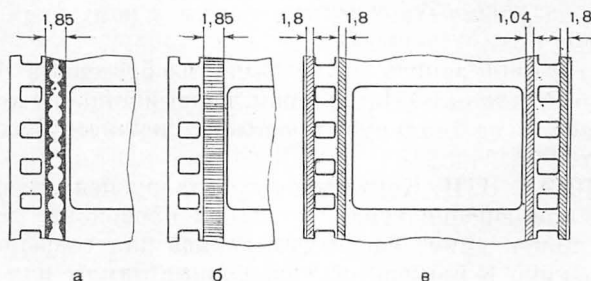


Рис. 1-1. Фонограммы кинофильмов: а — оптическая переменной ширины; б — оптическая интенсивная; в — магнитная

чиваться под действием переменного магнитного поля и сохранять некоторую остаточную намагниченность. Намагничивание производится с помощью записывающей магнитной головки.

Записывающая магнитная головка представляет собой незамкнутый магнитный сердечник той или иной конструкции, имеющий обмотку, по которой проходит ток звуковой частоты*. Ток звуковой частоты развивается *микрофоном*, преобразующим звуковые колебания воздуха в электрические, которые усиливаются *усилителем*, прежде чем подаются на записывающую головку.

Звуконоситель в форме ленты или проволоки движется относительно записывающей головки. В результате каждый элемент звуконосителя подвергается намагничиванию мгновенным магнитным полем.

* Помимо тока звуковой частоты по обмотке записывающей головки протекает ток подмагничивания или ток высокочастотного смещения.

Произведенная магнитная запись выявляется во внешнем пространстве, окружающем звуконоситель в форме магнитного поля, имеющего переменное (то или иное) значение поверхностной (внешней) остаточной индукции.

Воспроизводящая магнитная головка представляет собой ферромагнитный сердечник кольцевого типа с обмоткой. Воспроизведение звукового сигнала с магнитной фонограммы основано на изменении магнитного поля воспроизводящей головки движущейся магнитной лентой с записью. Эти изменения магнитного потока индуктируют на концах обмотки головки э.д.с., которая и подается на *усилитель* с подключенным к нему громкоговорителем.

Магнитная запись звука была изобретена в 1898 г. датским физиком В. Паульсеном, первый аппарат которого для записи на стальную проволоку демонстрировался в 1900 г.

В 1920 г. В. И. Коваленков предложил использовать на основе применения тонкой стальной проволоки, заделанной в кинолентку, магнитную запись для создания звукового кино и применить электронные лампы для усиления сигналов как при записи, так и при воспроизведении.

Разработка порошковых магнитных лент и методов ультразвукового смещения позволила широко внедрить магнитный метод, и в первую очередь в процессах первичной записи звука при производстве фильмов. Применение магнитного метода в кинематографии по сравнению с оптическим дает следующие преимущества: высокое качество звучания, возможность оперативного контроля произведенной записи путем немедленного прослушивания, отсутствие промежуточных процессов обработки фонограммы, дешевизна магнитной ленты и возможность многократного ее использования, отсутствие процессов печати фонограмм и связанных с этим искажений.

Магнитная запись имеет и недостатки: нельзя рассматривать фонограмму на ленте, что затрудняет визуальный контроль и монтаж, усложнено совмещение фонограммы и изображения на одной пленке, возможно появление копирэффёкта, изнашиваются магнитные головки.

Преимущества магнитного метода записи звука обусловили широкий переход от фотографической звукозаписи к магнитной на киностудиях, в массовых копиях широкоэкранных, панорамных и широкоформатных сте-

реофонических фильмов, а также в 16-мм фильмах. Применение магнитной звукозаписи значительно сократило технологический процесс звукозаписи.

На рис. 1-2 показаны три схемы, соответствующие воспроизведению грамзаписи (а), фотографической (б) и магнитной (в) фонограмм. На них видно место усилителя

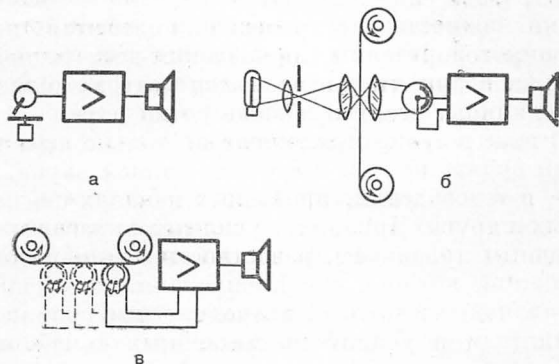


Рис. 1-2. Схемы воспроизведения звука грамзаписи (а); с фотографической (б) и магнитной (в) фонограмм

в общем тракте звуковоспроизведения. Необходимость усилителя становится понятной, если сопоставить мощность, развиваемую звукоснимателем, фотоэлементом и магнитной звуковоспроизводящей головкой с мощностью электрических колебаний, подводимых к громкоговори-телю современного кинотеатра.

Так, например, э.д.с. магнитной головки невелика — примерно 1,5 мв на частоте 1000 гц. Если головка нагружена на активное сопротивление 100 ом, то мощность составляет:

$$P = \frac{U^2}{R} \cdot 10^{-6} = \frac{2,25 \cdot 10^{-6}}{100} = 2,25 \cdot 10^{-8} \text{ вт},$$

т. е. 0,0000225 мвт.

Фотоэлемент чувствительностью 200 мка/лм развивает переменную составляющую тока, равную 2 мка. При сопротивлении нагрузки фотоэлемента $R=150\ 000$ ом (это сопротивление принято для массовой стационарной аппаратуры) мощность будет равна:

$$P = I^2 \cdot R = (2 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 150\ 000 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ вт},$$

т. е. 0,0000006 вт.

Несколько бóльшую мощность развивает пьезоэлектрический звукосниматель. Э.д.с. звукоснимателя 200 мв. При сопротивлении нагрузки звукоснимателя $R = 200\,000$ ом мощность будет равна:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(200 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 10^5} = 0,0002 \text{ вт.}$$

Однако мощность электрических колебаний, подводимая к громкоговорителям для создания достаточной громкости звука в зрительном зале кинотеатра, должна составлять единицы, десятки и даже сотни ватт.

Усилители широко применяют не только при воспроизведении звука, но и в процессах записи звука, радиопередаче, в телевидении, проводных каналах связи, измерительных и других приборах. Усилители классифицируют по различным признакам, в частности по диапазону частот колебаний, которые они пропускают. Различают усилители низкой частоты, широкополосные усилители — видеоусилители и усилители медленных колебаний, условно называемые усилителями постоянного тока.

Усилители низкой частоты предназначены для усиления колебаний звуковой частоты от 16 до 20 000 гц, но их изготавливают на несколько меньший диапазон: от 40 гц до 15 000 гц, что упрощает конструкцию. Эти усилители широко используют в звуковом кино.

За последнее десятилетие техника кинематографа получила значительное развитие. Появились новые, более совершенные виды кинематографа — широкоэкранное, широкоформатное и панорамное кино. Значительные изменения произошли и в системах записи и воспроизведения звука. Для того чтобы легко разобраться в схемах и аппаратуре записи — воспроизведения различных систем, познакомимся с некоторыми методами звукопередачи.

Рассмотренные методы звукозаписи позволяют получить моноуральную и стереофоническую звукопередачу.

Моноуральная звукопередача (одноканальная звукозапись) осуществляется любым методом звукозаписи, но с использованием одного электроакустического тракта — одного канала. Это значит, что звук записывается с помощью одного или группы микрофонов, токи которых попадают на вход только одного усилителя, и поэтому на звуконосителе (магнитной ленте, восковом диске, киноплёнке) записывается одна фонограмма. Схема одноканаль-

ной звукозаписи показана на рис. I-3, а. Микрофон M подключается к микшерскому пульту, на котором имеются регуляторы уровня каждого микрофонного входа и общий регулятор уровня PY . С микшерского пульта токи звуковой частоты подводятся к усилителю записи $УЗ$,

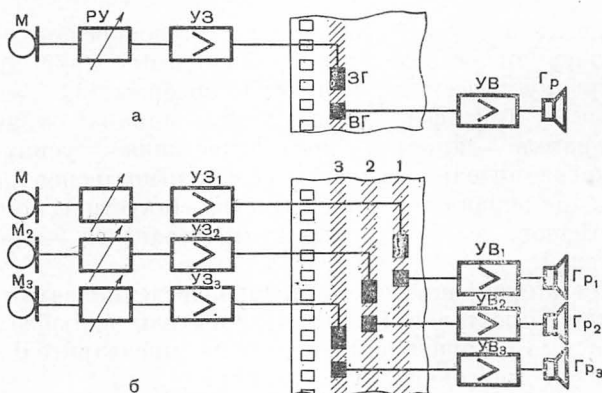


Рис. I-3. Скелетные схемы звукозаписи и звуковоспроизведения: а — одноканальная, б — стереофоническая (трехканальная)

на выходе которого включен тот или иной звукозаписывающий аппарат, например записывающая головка $ЗГ$.

Моноуральная звукопередача вносит определенную условность в процесс звукопередачи, особенно заметную в звуковом кино, что проявляется в несоответствии перемещения исполнителя, показываемого на экране, с неподвижной точкой расположения источника звука — громкоговорителя. Хотя благодаря психофизиологическим особенностям нашего восприятия зритель связывает зрительный образ с образом звуковым, моноуральная звукопередача не дает пространственного и натурального звучания.

Стереофоническая звукопередача (многоканальная) может быть получена любым из методов звукописи путем одновременной записи звука с использованием нескольких отдельных электроакустических трактов от микрофона до звукозаписывающего аппарата с получением нескольких (соответственно числу каналов) отдельных звуковых дорожек или фонограмм (исключая двухканальный метод стереофонической грамзаписи, где всего одна звуковая дорожка).

При стереофонической звукозаписи создают условия, аналогичные непосредственному слуховому восприятию естественных источников звука, когда человек различает направление прихода звуковых волн и до некоторой степени определяет положение источника звука в пространстве.

Идеальная стереофоническая звукопередача требует большого числа отдельных, независимых друг от друга электроакустических каналов, содержащих основные звенья: микрофон — усилитель — аппарат записи — фонограмма — аппарат воспроизведения — усилитель — громкоговоритель. При этом необходимо тесное расположение в первичном пространстве (акустическом поле) микрофонов, а во вторичном пространстве — громкоговорителей.

Для стереофонического воспроизведения звука с сохранением пространственной перспективы в любое время, независимо от оригинального звука, предварительно производится многоканальная запись.

Стереофоническая звукозапись строится по принципу записи звукового сигнала одновременно на двух, трех и более дорожках звуконосителя, каждой из которых соответствует свой канал звукопередачи (рис. 1-3, б). Звуковая волна от источника звука достигает трех микрофонов: M_1 , M_2 и M_3 — с некоторыми отличиями по силе, времени и фазе. Сигналы, воспринятые микрофонами, после усиления усилителями $УЗ_1$, $УЗ_2$ и $УЗ_3$ записываются на отдельные магнитные дорожки 1, 2 и 3. Магнитный метод является наиболее удобным для этих целей. Звук воспроизводится с трех магнитных фонограмм одновременно по отдельным каналам, и после усиления усилителями воспроизведения $УВ_1$, $УВ_2$ и $УВ_3$ сигналы поступают в громкоговорители $Гр_1$, $Гр_2$ и $Гр_3$. Они работают одновременно и воспроизведут сигнал так, как он был воспринят тремя микрофонами.

Таким образом, звуковое поле, создаваемое громкоговорителями, будет таким же, каким было поле в зоне расположения микрофонов. Благодаря этому в месте прослушивания звучание воспринимается более интенсивно, чем при обычной одноканальной передаче.

Точность передачи возрастает с увеличением числа каналов, но опытным путем установлено, что и при ограниченном числе каналов (два, три) достигается значительный положительный эффект. Это позволило строить двух-

канальные стереофонические системы: электропроигрыватели и массовые магнитофоны, которые все больше и больше входят в наш быт.

Помимо указанных различают также однополосную (широкополосную) и двухполосную запись.

При **широкой полосе** записываемых частот возникают технические трудности высококачественного воспроизведения с использованием обычных однополосных громкоговорителей. Громкоговоритель не может одинаково хорошо работать в области низких и высоких частот. Для получения высокого качества звуковоспроизведения одноканальных фонограмм используют системы двухполосного воспроизведения звука.

Простой системой двухполосного воспроизведения являются современные радиоприемники, где на выход усилителя подключены громкоговорители низких и высоких частот.

Двухполосная запись — отдельная запись звуковых колебаний высоких и низких частот с получением фонограммы в форме отдельных записей. Такая запись может быть применена для последующего двухканального воспроизведения и позволяет улучшить качество звука. Она дает возможность осуществить сквозную двухканальную систему записи — воспроизведения звука, что является дальнейшим развитием существующей системы двухканального звуковоспроизведения.

Электроакустическая система с отдельным усилением и акустическим воспроизведением колебаний высокой и низкой частоты с обычной фонограммы разработана в СССР и широко применяется в современных кинотеатрах.

Но еще большие достоинства могут быть выявлены тогда, когда двухканальное воспроизведение звука с разделением колебаний высокой и низкой частоты производится не с обычной фонограммы, а с фонограммы в форме отдельных записей колебаний высокой и низкой частоты. При сквозной системе записи — воспроизведения не только в звеньях тракта воспроизведения, но и в звеньях записывающего тракта могут быть уменьшены нелинейные искажения, получены более широкие возможности регулировки относительных уровней колебаний высокой и низкой частоты, что обеспечивает лучшую передачу высоких частот и улучшает тембр передаваемого звукового материала.

§ 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКА

Источники и распространение звука.

Звуком, или звуковыми колебаниями, называются такие колебания среды, которые могут воздействовать на слуховой аппарат человека. Колебанием, в свою очередь, называется переменное-возвратное движение какого-либо тела.

Простой пример колебательного движения — движение маятника стальных часов, который отклоняется то в одну, то в другую сторону относительно неподвижного положения, соответствующего состоянию равновесия.

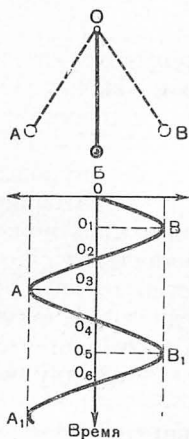


Рис. 1-4. Графическое изображение процесса колебаний маятника

Процесс колебаний показан на рис. 1-4. В верхней части показаны три возможных положения маятника: A , B и B , из которых два крайних (A и B) соответствуют наибольшим отклонениям от положения равновесия, а среднее (B) соответствует положению равновесия. В нижней части дан график движения маятника. По горизонтальной оси отложена величина отклонения маятника от состояния равновесия, по вертикальной — время. Вертикальная линия соответствует положению равновесия маятника.

При движении маятника вправо точка, изображающая движение маятника на графике, также будет двигаться вправо. Дойдя до крайнего правого положения B , маятник остановится, а затем начнет двигаться в обратном направлении. Изображающая точка проделает то же самое: дойдет до крайнего положения B и начнет двигаться в обратном направлении. Пройдя положение равновесия, маятник дойдет до крайнего левого положения A , остановится там, снова начнет двигаться вправо и так далее. Изображающая точка проделает такой же путь.

Таким образом, движение изображающей точки на графике полностью соответствует движению маятника. Легко видеть, что картина на графике после возвращения изображающей точки в положение O_4 начнет повторяться. Такой повторяющийся процесс называется периодическим.

Колебательное периодическое движение маятника, как и всякое колебательное периодическое движение, характеризуется: 1) величиной максимального отклонения маятника от положения равновесия (амплитуда колебаний — на графике линия O_1B или O_3A); 2) числом полных колебаний за одну секунду (частота колебаний). Полное колебание совершается за время, в течение которого маятник возвращается в исходную точку, двигаясь в том же самом направлении (линия O_1B и O_3A).

Время, в течение которого совершается полное колебание, называется периодом колебаний; изображается оно отрезком OO_4 . Если бы мы продолжали рассматривать движение маятника дальше, то на графике получили бы

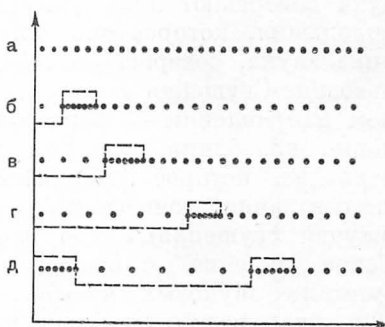


Рис. 1-5. Условное изображение колебаний частиц воздуха

целый ряд полных колебаний, причем периоды, т. е. участки OO_4 , для каждого из них были бы равны. Частота обозначается обычно буквой f и измеряется в герцах. Если, например, тело совершает десять полных колебаний в одну секунду, то это значит, что частота их равна 10 $гц$ (герц). Частота колебаний и период колебаний — обратные величины, т. е. $f = \frac{1}{T}$ и $T = \frac{1}{f}$, где T — период колебаний. Так, например, если частота колебаний маятника 10 $гц$, то одно полное колебание совершится за 0,1 $сек$.

Звук представляет собой колебательный процесс. Из состояния равновесия частицы выводятся каким-либо звучащим телом, а возвращаются в состояние равновесия благодаря упругости среды, например воздуха. На рис. 1-5, а условно показан целый ряд частиц воздуха, находящихся в состоянии равновесия.

Если толкнуть левую частицу вправо, она начнет двигаться, достигнет следующей частицы и толкнет ее. Вторая частица так же начнет двигаться по направлению к третьей, толкнет ее и т. д. В результате несколько частиц сблизятся, образовав сгущение (рис. 1-5, б). Но частица может сдвинуться вправо только до известного предела.

после чего в силу упругости воздуха она начнет двигаться в обратном направлении. Таким образом, сгущение передается дальше, а там, где раньше было сгущение, теперь будет разрежение.

Частицы воздуха движутся сначала слева направо, доходят до известного предела и движутся в обратном направлении — справа налево и т. д., т. е. частицы воздуха совершают периодические колебания относительно положения, которое они занимали до включения источника звука, совершая колебания около положения равновесия. Сгущения и разрежения движутся только в одном направлении — слева направо. Следовательно, звуковые колебания, распространяясь в воздухе, создают давление, которое либо больше давления, существовавшего в данной точке при отсутствии звуковых колебаний (случай сгущения), либо меньше (случай разрежения). Такое давление, отличающееся от нормального (при отсутствии звуковых колебаний), называется звуковым. Оно, воздействуя на барабанные перепонки ушей человека, вызывает ощущение звука.

Сила звука зависит от давления: чем оно больше, тем больше сила звука, причем если оно возрастает вдвое, сила звука увеличивается в четыре раза, а если звуковое давление возросло в три раза, сила звука увеличивается в девять раз и т. д.

Энергия, которую несут в себе звуковые волны, также зависит от звукового давления (или от силы звука); при увеличении силы звука в несколько раз звуковая энергия возрастает в такое же число раз. Звук распространяется в воздухе с определенной скоростью, которая при нормальном атмосферном давлении и температуре воздуха 15°C составляет 340 м/сек . Зная скорость распространения звуковых колебаний и их частоту, легко определить наикратчайшее расстояние между двумя точками периодического колебательного процесса, находящимися в одном и том же положении. Это расстояние называется длиной волны и обозначается обычно греческой буквой λ .

Длину волны легко определить из формулы:

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ м,}$$

где c — скорость звука, равная 340 м/сек ; f — частота колебаний в $гц$.

Так, для крайних звуковых частот, еще воспринимаемых ухом человека, длина волны составляет: для частоты 16 гц $\lambda = \frac{340}{16} = 21,4 \text{ м}$; для частоты 20 000 гц $\lambda = \frac{340}{20\ 000} = 0,017 \text{ м} = 1,7 \text{ см}$.

Длина волны определяется отрезком OO_4 (см. рис. I-4), или AA_1 , или BB_1 и т. д., т. е. расстоянием между двумя точками, изображающими колебательный процесс, находящимися в одинаковых положениях.

В газах (воздух) и в жидкостях звук распространяется в виде продольных волн (рис. I-6), когда колебание частиц происходит в направлении распространения звуковой волны.

Скорость распространения звука в твердых телах, газах и в жидкостях различна, что объясняется различием структуры и физических свойств разных твердых тел, например металлов, дерева, резины, и зависит от физического состояния газов: температуры и давления. Из различных понятий, объединяемых обобщенным термином «звук», разъясним следующие термины (рис. I-7).

Т о н. Тон называется звуковое ощущение, вызванное синусоидальным или гармоническим колебанием. Высота тона определяется числом колебаний в секунду (частотой колебаний), сила звука — величиной амплитуды колебаний.

Синусоидальные колебания характеризуются помимо частоты периодом колебаний — временем, в течение которого совершается одно полное колебание частицы или тела относительно положения равновесия (покоя).

Источником чистого тона служат электронные генераторы синусоидальных колебаний, называемые генераторами

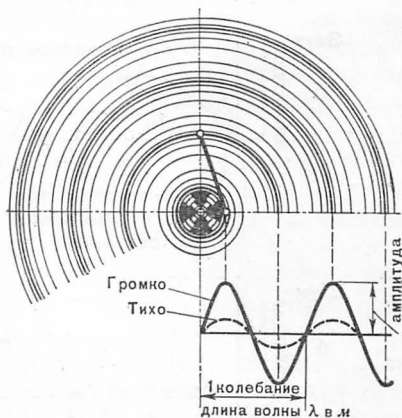


Рис. I-6. Схема звукового поля удара колокольчика: распространение звука аналогично картине распространения волн по воде от брошенного камня. В воздухе звук распространяется по поверхности шара



Рис. I-7. К пояснению некоторых акустических терминов

звуковых колебаний, выходное напряжение которых подают на громкоговорители.

Из музыкальных приборов близкие к синусоидальным колебаниям (чистому тону) создают камертон и свисток.

З в у к. Сложный (обычный) тон состоит из ряда чистых тонов — одного основного тона (первой гармонике) и серии обертонов (вторая, третья гармонике и т. д.). От числа и интенсивности сопровождающих основной тон обертонов зависит звуковая окраска — тембр речи людей и тембр музыкальных инструментов. Обычные тона создают все музыкальные инструменты.

Ш у м состоит из непериодических колебаний и представляет собой очень сложный конгломерат всех видов колебаний.

И м п у л ь с з в у к а (удар, хлопок, взрыв) — очень короткий (менее $\frac{1}{150}$ сек) звук большой громкости. Особенностью импульса звука является содержание в нем огромного числа различных тонов. Он широко используется для наблюдения явления реверберации (затухания) звука в закрытом помещении. Время затухания импульса звука называют временем реверберации.

Для характеристики акустических свойств помещения и их сравнения в различных помещениях используется понятие времени стандартной реверберации. Оно показывает, за сколько секунд звуковая энергия уменьшится в миллион раз относительно своего первоначального значения.

Б и е н и я возникают в результате сложения двух чистых тонов, весьма близких по частоте. Результирующая звуковая волна имеет частоту, среднюю между двумя составляющими частотами, и амплитуду, изменяющуюся периодически от разности до суммы амплитуд обеих составляющих частот. Когда обе составляющие в одинаковой фазе, амплитуда достигает максимума, равного сумме амплитуд составляющих частот, а когда составляющие противоположны по фазе, результирующая амплитуда имеет минимум, равный разности амплитуд обеих составляющих частот. Количество максимумов и минимумов в секунду называется частотой биений и равно разности частот обеих составляющих звуковых волн.

Биения очень сильно ощущаются как помехи при звукопередаче — прослушивается разностный тон.

Р е з о н а н с представляет собой явление, получающееся в результате совпадения или синхронизации сво-

бодных колебаний тела и колебаний, сообщенных ему извне. Когда внешние колебания совпадают по частоте с одной из собственных частот тела, реагирование колеблющегося тела очень заметно, как говорят, тело резонирует при данной частоте.

Не следует смешивать понятия резонанс и реверберация. Часто говорят о помещении с чрезмерной реверберацией, как имеющем большой резонанс, что неверно.

Д и ф р а к ц и я — явление изменения направления распространения звуковых волн у краев преграды, что приводит к огибанию преграды звуковой волной. Если на пути распространения звуковой волны встречается препятствие в виде щита, то оно будет обойдено. Это особенно заметно на нижних частотах, которые имеют большую длину волны, и, следовательно, настоящей преградой для них может служить только очень большая поверхность.

И н т е р ф е р е н ц и я — явление суммирования двух звуковых волн одинаковой частоты в пространстве. В результате интерференции результирующее колебание может либо увеличиваться по амплитуде, либо уменьшаться, что зависит от соотношения амплитуд и фаз колебаний.

§ 3. ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКА

Человек воспринимает звуковые возбуждения в другом плане, чем воспринимают их измерительные приборы. Только благодаря огромному числу экспериментов установлены связи между физическими величинами и физиологическими оценками звуковых раздражений, которые мы воспринимаем.

Основы этих связей лежат в области физиологии.

Чувствительность уха. Восприятие звука ограничено определенными пределами как по частоте, так и по интенсивности. Ухо чувствительно к частоте в диапазоне от 16 до 20 000 *гц* (диапазон частот). По интенсивности, или звуковому давлению, восприятие звука также ограничено (рис. I-8).

Чувствительность уха к разным частотам различна: так, в пределах частот от 1000 до 5000 *гц* она примерно в 10 000 раз больше, чем на крайних частотах слышимого диапазона.

При возрастании силы звука громкость тоже увеличивается, причем громкость пропорциональна логарифму изменения силы звука. Это значит, что если сила звука возрастет, например, в тысячу раз, то громкость увеличится только в три раза, а если сила звука возрастет в миллион раз, громкость увеличится в шесть раз и т. д. Такое свойство уха позволяет воспринимать звуки, отличающиеся одно от другого по силе в огромное число раз.

Так, сила самого громкого звука в миллион раз больше силы самого слабого слышимого звука. Но увеличивать силу звука беспредельно нельзя. Существует предел, называемый болевым порогом, после чего уже увеличение силы звука вызывает болезненное ощущение. Существует еще так называемый порог слышимости, который определяет нижний предел слухового восприятия. Когда сила звука ниже этого предела, слуховое восприятие прекращается.

Таким образом, слуховой аппарат человека воспринимает звуковые колебания, изменяющиеся по давлению в некотором диапазоне, который называют динамическим. Динамический диапазон ограничен порогом слышимости (при едва слышимых звуках) и порогом болевых ощущений (при чрезмерно громких звуках).

Давление звуковых волн характеризуется величиной силы, приходящейся на 1 см^2 площади, и измеряется в барах (*бар*). Один бар равен одной дине на 1 см^2 (одна дина равна приблизительно $0,001 \text{ г}$).

Звуковое давление на пороге слышимости равно $0,0002 \text{ бар}$ (т. е. давление равно двум десятимиллионным долям атмосферы). По этой цифре можно судить о том, сколь слабое давление звуковых колебаний воздуха воспринимается нашим ухом как слышимый звук. Давление, соответствующее очень громкому звуку, достигает 200 бар и более.

Оказывается, ухо человека воспринимает как увеличение или уменьшение громкости звука не изменение абсо-

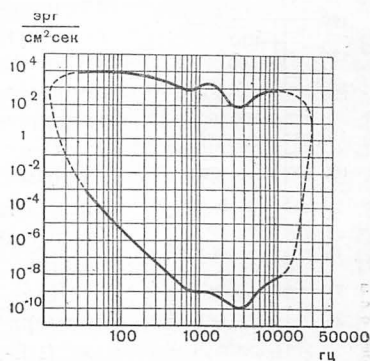


Рис. 1-8. Область слухового восприятия

лютного значения звукового давления, а его относительное изменение. Иными словами, мы чувствуем, не на сколько изменилось давление, а во сколько раз оно стало больше или меньше. Например, если давление повысилось с 0,1 до 0,2 бар, то мы заметим определенное повышение громкости. Точно такое же изменение громкости мы заметим, если давление увеличится от 1 до 2 бар. Одинаковый

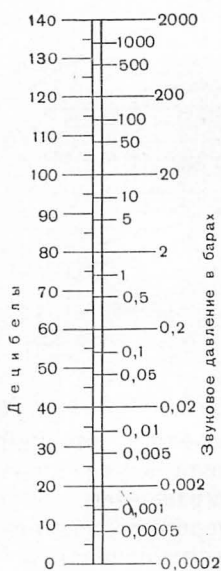


Рис. 1-9. Шкала децибел

слышимый эффект роста громкости получится и при росте давления от 10 до 20 бар и от 100 до 200 бар. В первом примере давление увеличилось только на 0,1 бар, в последующих на 1, 10 и 100 бар. Как видно, абсолютные значения давления изменялись существенно, а слышимый эффект увеличения громкости был одинаков.

Дело в том, что в приведенных примерах давление увеличивалось каждый раз точно вдвое, т. е. на 100%, и так как относительные изменения были одинаковы, то и слышимый эффект изменения громкости также был одинаков.

Ухо человека способно четко отличить различие громкости только тогда, когда изменение давления равно примерно 12%. При изменении давления в меньшей степени (до 12%) нам кажется, что громкость практически не меняется. Следовательно, мелкие градации изменения давления нас не интересуют.

Можно построить шкалу, деления на которой будут соответствовать изменению давления звука не на определенное число единиц, а в определенное число раз. Но так как шкала градуируется в единицах относительного изменения давления, то требуется какое-то исходное давление, от которого следует начинать отсчет. За такую исходную величину условно принято пороговое давление, равное 0,0002 бар. И если от этого давления наносить отметки через 12% прироста, то окажется, что нужно всего 120 делений от порога слышимости до самого громкого звука. Такая шкала охватывает весь динамический диапазон слухового восприятия (рис. 1-9).

За единицу относительного изменения звукового давления принят децибел (*дб*), соответствующий изменению на 12,2%. Одному децибелу соответствует такое изменение звукового давления, которое заметно на слух. Изменение давления менее чем на один децибел нами практически не ощущается. Весь диапазон восприятия ухом человека составляет приблизительно 120 *дб*.

Линейная шкала децибелов, соответствующая логарифмической шкале звуковых давлений, близко совпадает с логарифмическим характером восприятия звука. Поэтому децибелами пользуются очень широко.

Поскольку децибел — относительная единица, то при увеличении звукового давления по отношению к числу децибел принято добавлять знак плюс, а при уменьшении звукового давления — знак минус. Если мы отсчитываем давление от исходного (0,0002 *бар*), принятого условно за нуль децибелов, то вся шкала децибелов имеет знак плюс и это можно не оговаривать. Если же мы отсчитываем количество децибел не от условного нуля, что допускается, а от какого-то большего давления в сторону уменьшения, то прибавление знака минус обязательно. Децибелы можно отсчитывать и не от условного нуля. Сравнивая два сильных звуковых давления, одно из которых больше другого, мы можем большее давление принять за нуль и сказать, что меньшее давление относительно большего имеет величину минус столько-то децибел. Только при этом обязательно надо указать, что децибелы отсчитаны от такого-то давления, иначе может возникнуть недоразумение.

Так как интенсивность звука в подавляющем большинстве случаев оценивается относительно интенсивности на пороге слышимости, то в этих случаях применяют термин «уровень звука» (уровень речи, уровень музыки, уровень шума).

На рис. I-10 показаны кривые равной громкости с интервалом в 10 *дб* с указанием на каждой из них уровня громкости в децибелах.

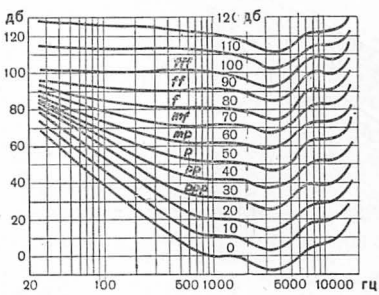


Рис. I-10. Кривые равной громкости

Чувствительность к изменению частоты называется тонкостью слуха.

В децибелах можно выразить отношение двух любых величин. Математически отношение двух величин выражается формулой:

$$N = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} \text{ дб},$$

где I_1 и I_2 — сила звука.

Так как сила звука I связана со звуковым давлением p отношением:

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c},$$

где ρ — плотность среды; c — скорость звука в ней, то отношение давлений будет таким:

$$N = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} = 10 \lg \frac{p_1^2}{p_2^2} = 20 \lg \frac{p_1}{p_2} \text{ дб}.$$

Точно так же подсчитываются отношения в децибелах для электрических величин (рис. I-11).

Отношение напряжений подсчитывают по формуле:

$$N = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} \text{ дб},$$

а отношение мощностей — по формуле:

$$N = 10 \lg \frac{w_1}{w_2} \text{ дб},$$

так как мощность $w = \frac{U^2}{R}$, где R — электрическое сопротивление.

Слуховой аппарат человека позволяет не только улавливать звуки, но и определять направление, откуда они приходят. Это явление называется бинауральным эффектом и получается из-за того, что звуки достигают правого и левого ушей не одновременно, а с некоторым запаздыванием относительно друг друга.

В современных звуковоспроизводящих установках с пространственной передачей звука благодаря бинауральному эффекту удается определить место, которое как бы является источником звука.

Стерефонический эффект также создает иллюзию пространственного воспроизведения звука и отчасти объясняется бинауральным эффектом.

При звукопередаче стереофонический эффект удается получить отдельной передачей естественного звукового поля по нескольким отдельным каналам звукопередачи.

Остановимся еще на одном свойстве уха — его инерционности. Если какой-либо источник звука выключить на 0,04—0,05 сек, а затем снова включить, то ухо не обнаружит паузы и будет все время ощущать звук. Это свойство уха как бы увеличивает протяженность звука на 0,04—0,05 сек играет важную роль в оценке акустических свойств помещений.

Речь, музыка и шумы.

Речь. Звуки человеческого голоса имеют разнообразную и сложную структуру и в целом не представляют собой строго периодического колебательного процесса. Речь человека состоит из сочетания гласных и согласных звуков. Особое значение для разборчивости речи имеют гласные звуки. Они занимают диапазон от 300 до 3000 *гц* и имеют наибольшую мощность.

Плохая передача согласных звуков (например, вследствие маскировки их шумом) также приводит к ухудшению разборчивости речи.

Сочетание согласных и гласных звуков образует слоги. Речь человека состоит из отдельных слогов, которые составляют слова. Слова и слога отделяются друг от друга паузами.

Нормальная скорость речи составляет несколько слогов в секунду.

Средняя мощность человеческого голоса (речи) имеет значение порядка 10 *мквт*, а тихого шепота — примерно 0,01 *мквт*. Мощность голоса у людей различна: встречаются голоса в 20 раз более слабые и в 8 раз более сильные, чем средние.

Качество передачи речи (ее разборчивость) тесно связано с тембром. Поэтому, чтобы речь была понятной, необходимо передавать (записывать и воспроизводить) более широкую полосу частот (80—8000 *гц*), т. е. не только

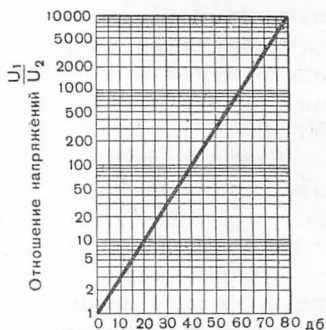


Рис. I-11. Номограмма для пересчета отношений величин в децибелах

основные частоты, но и их гармоник. В этом случае мы получим хорошую разборчивость и естественную передачу тембра речи.

Музыка. Музыкальные звуки простираются в более широкой области, чем речь, и содержат большое количество гармоник. Качество передачи музыки зависит от передачи всех гармоник, составляющих музыкальные звуки. По частоте музыкальные звуки занимают полосу от 30 до 16 000 *гц*. Различные музыкальные инструменты имеют свои диапазоны частот.

Опыт показал, что даже для высококачественной передачи звучаний музыки вообще и каждого музыкального инструмента в отдельности допустимо сокращать частотный диапазон. Для передачи музыки достаточен диапазон 50—8000 *гц*.

Средняя мощность симфонического оркестра составляет примерно 0,1 *вт*, а пиковая — около 70 *вт*. По сравнению с мощностью человеческого голоса мощность оркестра примерно в 10 000 раз больше.

Минимальную мощность развивает скрипка — порядка 4 *мвт*. Следовательно, пиковая мощность большого оркестра (75 исполнителей) на 72 *дб* превышает минимальную мощность скрипки, или, иначе говоря, динамический диапазон большого симфонического оркестра имеет значение 70—75 *дб*.

Шумы характеризуются длительными непериодическими процессами и по своей структуре представляют собой сплошной спектр. Многие шумы являются специфическими и характеризуют определенный источник их возникновения. Таково, например, хлопанье в ладоши, шум шагов, звон ключей, гул мотора и т. п.

Характерные и своеобразные шумы присущи работающим станкам, транспорту и т. д.

Шумы занимают почти весь частотный диапазон. К шумам относятся также многообразные свисты. Свисты характеризуются высокими частотами большой силы. По уровню громкости шумы весьма разнообразны и занимают весь динамический диапазон.

Уровни громкости некоторых шумов по отношению к порогу слышимости приведены в табл. 1.

Музыкальные определения. В музыке, в отличие от акустики, пользуются несколько иными определениями, характеризующими звуки: высотой тона, громкостью, тембром и долготой.

Таблица 1

Наименование источника шума	Уровень шума, дб
Шум в ателье для записи музыки	20
Шум в зрительном зале во время демонстрирования кинофильмов, на паузе	30—35
Очень тихая улица	50
Оживленное уличное движение	80
Разговор на расстоянии 1—2 м	68
Работа стационарного кинопроектора	75
Работа кинопередвижки КН-13	85
Работа вентилятора	80—90
Большой состав симфонического оркестра	110

1. *Высота тона.* Между частотой звуковой волны и ощущением высоты тона существует определенное логарифмическое соотношение при основании логарифма 2. Это отношение называют музыкальным интервалом. Можно сказать, что постоянное отношение частот соответствует постоянному музыкальному интервалу. Октава является интервалом между двумя тонами с частотным отношением 2:1. Кроме октавы наиболее широко используются в музыке следующие интервалы:

прима	1 : 1	малая терция	6 : 5
октава	2 : 1	большая секста	5 : 3
квинта	3 : 2	малая секста	8 : 5
кварта	4 : 3	большая септима	15 : 8
большая терция	5 : 4	малая септима	9 : 1

В результате выбора октавы как основного музыкального интервала и деления его на семь неодинаковых ступеней получен основной звукоряд классической музыкальной системы. Каждая ступень основного звукоряда имеет свое название (итальянское): «до», «ре», «ми», «фа», «соль», «ля», «си».

Высота тона зависит от частоты колебаний звучащего тона. Чем частота колебаний выше, тем выше высота звука. Мерилом (эталоном) высоты тона служит камертон.

В СССР за основной тон, обязательный для настройки музыкальных инструментов, принят тон «ля», соответствующий 440 гц при температуре 20° С (ГОСТ-7710).

2. *Громкость.* В музыке пользуются шкалой громкости, состоящей из семи ступеней, различающихся между

собой примерно на 10 дб (см. рис. I-10). Эти ступени от самых тихих до самых громких обозначаются:

пиано-пианиссимо	— ppp	меццо-форте	— mf
пианиссимо	— pp	форте	— f
пиано	— p	фортиссимо	— ff
меццо-пиано	— mp	форте-фортиссимо	— fff

3. *Тембр звучания* зависит от числа и соотношений величины сопровождающих основной тон колебаний. Ни один музыкальный инструмент не дает простых синусоидальных колебаний, соответствующих чистому тону. Помимо чистого тона всегда имеют место другие периодические колебания, называемые гармониками. Гармоники, имеющие частоты выше частоты основного тона, называют обертонами, а колебания с меньшей частотой — унтертонами. Частоты гармоник относятся к частоте основного тона, как натуральный ряд чисел.

4. *Долгота звука* применяется в музыке, где время измеряется не в секундах и минутах, а в долях времени звука целой ноты. Задаются темп, ритм (например: медленно, спокойно, быстро и т. п.). Одно и то же музыкальное произведение может исполняться несколько быстрее или медленнее. Мелодия при этом не изменится. Важно только, чтобы было сохранено правильное соотношение между длительностью основной музыкальной единицы и ее частей. В музыке пользуются шестью ступенями долготы звука, причем каждая нота обозначается как целое, половина, четверть, восьмая, шестнадцатая и тридцать вторая.

Искажения при звукопередаче. Мы познакомились с физической природой звука, источниками звука, с особенностями речи, музыки, шумов, с восприятием звука органами слуха, узнали, что, исходя из физических величин, характеризующих слух и источники звука, к аппаратуре записи и воспроизведения звука предъявляются соответствующие требования. Однако построить идеальную аппаратуру для записи и последующего воспроизведения звука не удастся по ряду технических причин.

Аппаратура записи, усиления и воспроизведения звука вследствие отклонения реальных характеристик от идеальных приводит к искажениям звука.

Как при любом методе звукопередачи (по проводным каналам связи, по радио), так и при записи звука с последующим воспроизведением выходной сигнал связан с входным сигналом цепью различных преобразований.

При магнитной записи звука преобразования сигнала происходят в микрофоне, усилителе, записывающей головке, магнитной ленте, воспроизводящей головке, усилителе воспроизведения и громкоговорителе. Каждое из этих звеньев в процессе преобразования искажает сигнал. Качество того или иного из них помимо чувствительности оценивается еще величиной искажений, которые им вносятся в передаваемый сигнал. Совершенно очевидно, что чем их больше, тем больше искажается сигнал.

Снижение искажений, меры и методы исправления искажений сигнала, передаваемого по какому-либо каналу, составляют одну из важнейших технических задач.

Какие же основные искажения звука или сигнала различают?

Это нелинейные, частотные, фазовые искажения и детонации.

Нелинейные искажения возникают при прохождении через тракт звукопередачи при наличии в одном из его звеньев нелинейной зависимости между входным и выходным сигналами, что может вызвать появление новых синусоидальных составляющих сигналов. Основным условием неискаженной передачи является правильная передача амплитуд и частот синусоидальных составляющих сигнала, а не формы кривой, представляющей этот сигнал во времени, так как последняя может быть искажена вследствие только лишь фазовых искажений.

Нелинейные искажения, возникающие в том или ином звене тракта, субъективно воспринимаются как дребезжание, хрипы и изменения тембра. Нелинейные искажения являются важнейшим показателем качества любого звена или всего тракта звукопередачи. Они оцениваются коэффициентом нелинейных искажений, минимальное значение которого составляет примерно 4%, когда при передаче речи и музыки начинают восприниматься на слух.

Частотные искажения возникают в случае изменения на выходе соотношения амплитуд колебаний в зависимости от частоты при одинаковых амплитудах колебаний различных частот на входе. Частотные искажения оцениваются с помощью частотной характеристики — графика зависимости одного из показателей устройства или материала (например, для магнитной ленты) от частоты (рис. I-12). Идеальная частотная характеристика представляет собой прямую линию, параллельную оси абсцисс в заданном диапазоне частот.

Наиболее распространен способ нанесения частотной характеристики на сетку, у которой по оси ординат откладываются значения исследуемой величины в линейном масштабе, а по оси абсцисс — частоты в логарифмическом масштабе.

Частотная характеристика может быть представлена также в табличной форме. Часто указывается только ве-

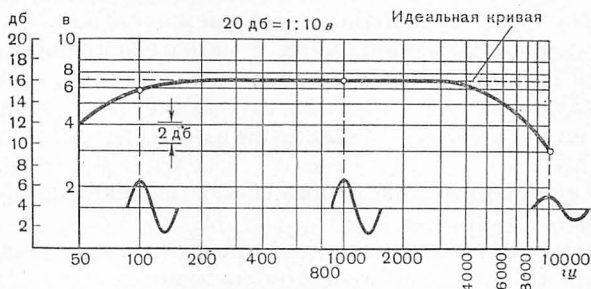


Рис. 1-12. Частотная характеристика

личина отклонения от прямой (неравномерность частотной характеристики) в заданном диапазоне частот.

Так как каждое звено тракта звукопередачи вносит частотные искажения, может оказаться, что частотные искажения всего тракта или устройства будут превышать допустимую величину. Для того чтобы передача амплитуд сигнала на всех частотах была одинаковой, вводят специальные корректирующие цепи или элементы с такой частотной характеристикой, чтобы результирующая частотная характеристика удовлетворяла поставленным требованиям. Чаще всего такие цепи или элементы (каскады) вводят в усилители.

В современных усилителях записи и воспроизведения звука часто результирующей характеристике придают такую форму, чтобы получить лучшее качество воспроизведения звука, учитывая частотные искажения, создаваемые в других звеньях тракта звукопередачи: магнитной лентой, громкоговорителями, магнитными головками и т. п. Такое исправление результирующей частотной характеристики тракта звукопередачи называется коррекцией частотной характеристики.

На слух частотные искажения ощущаются как изменение тембра звука, бубнения, более приглушенного или

звонкого звучания, подчеркивания свистящих и шипящих звуков. Почти все устройства звуковоспроизведения имеют регуляторы тембра, позволяющие менять частотную характеристику устройства.

Фазовые искажения оказывают малое влияние на качество передачи звука в звуковой кинематографии и радиовещании, и потому мы на них останавливаться не будем. (Они имеют большое значение в телевидении.)

Кроме этих основных искажений при записи звука может ощущаться детонация — отклонение от нормальной высоты тона. При вокальном исполнении детонация чаще всего означает понижение высоты звука. При воспроизведении фонограмм детонация возникает из-за непостоянства скорости продвижения ленты в месте чтения. Колебания скорости вызывают искажения звука, подразделяющиеся на детонации первого и второго рода.

К детонации первого рода относятся низкочастотные колебания 10—12 *гц*, которые воспринимаются как «плавание» звука. К детонациям второго рода относятся высокочастотные колебания от 12 до 300 *гц*. Детонации второго рода могут вызываться рядом причин, в частности проскальзыванием ленты в магнитофонах.

Допустимые значения детонаций, не воспринимаемых нашим слухом, тем больше, чем меньше громкость и чем меньше частота воспроизводимого звука. Например, при одинаковой громкости допустимые значения для частоты 1000 *гц* составляют 0,15—0,2%, а для частоты 125 *гц* — около 2,5%.

В области воспроизводимых частот искажения, обусловленные колебаниями скорости фонограммы $+0,2\div-0,3\%$, не воспринимаются.

В целях уменьшения детонаций применяют стабилизаторы скорости (маховики) и механические фильтры.

На других видах звуковых искажений, имеющих сложную природу и практически менее важных, мы останавливаться не будем.

§ 4. АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ

Звук распространяется прямолинейно, как пучок света. Если на пути распространения звука возникнет препятствие, например стена, то часть звуковой энергии отразится обратно, часть пройдет сквозь стену,

а часть поглотится самой стеной. На рис. I-13 схематично изображен процесс отражения и поглощения звука.

Если обозначить звуковую энергию, падающую на препятствие, через $I_{\text{пад}}$, поглощенную энергию через $I_{\text{погл}}$, а отражаемую энергию через $I_{\text{отр}}$, то отношение $\frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}} = \beta$ называется коэффициентом отражения звука, а отношение $\frac{I_{\text{погл}}}{I_{\text{пад}}} = \alpha$ называется коэффициентом поглощения звука.

Коэффициенты α и β зависят от материала, на который падает звук, и определяются его физическими свойствами.

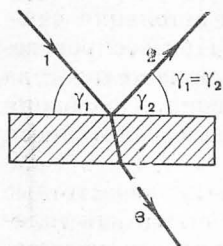


Рис. I-13. Процесс отражения и поглощения звука: 1 — падающая звуковая энергия; 2 — отраженная; 3 — прошедшая; γ_1 — угол падения; γ_2 — угол отражения

Необходимо отметить, что коэффициент β всегда меньше единицы. Это значит, что любой материал не может полностью отразить звуковую энергию и часть энергии неизбежно поглощает.

При отражении от препятствия звук подчиняется двум законам: 1) угол падения равен углу отражения и 2) падающий и отраженный звук лежат в одной плоскости.

Если на пути распространения звука возникнет препятствие, то не всегда звук отразится от него. Когда размеры препятствия меньше, чем половина длины волны, падающие на него звуковые волны обогнут это препятствие и будут распространяться дальше. Это явление огибания препятствий называется *дифракцией*.

Распространение звука в закрытом помещении. Если источник звука и слушатель находятся на открытом воздухе, то до слушателя доходят звуковые волны только непосредственно от источника звука (прямые звуковые волны). Если же вблизи находится какая-либо отражающая поверхность, например стена дома, то помимо прямых звуковых волн до слушателя могут доходить волны, отраженные от стены.

В закрытом помещении отражающих поверхностей по меньшей мере шесть: потолок, пол и четыре стены. В каком бы направлении ни распространялась звуковая волна, она неизбежно достигнет отражающей поверхности, отразится и, изменив свое первоначальное направление, снова будет двигаться до встречи с препятствием, затем

опять отразится и т. д. Если бы не было потерь звуковой энергии на границах отражений, то этот процесс продолжался бы бесконечно долго. Но так как при всяком отражении часть энергии поглощается, то процесс отражений постепенно прекратится.

Рассмотрим картину, возникающую в какой-либо точке помещения в момент включения источника звука. Прежде всего до слушателя дойдут прямые звуковые волны, так как путь их наиболее короткий. Через некоторое время уха слушателя достигнут отраженные волны, прошедшие более длинный путь. Затем прибавятся еще новые отраженные волны, прошедшие еще более длинный путь, и т. д.

Значит, сила звука, воспринимаемого слушателем, будет все время увеличиваться за счет прибавки звуковой энергии от отраженных волн. Но так как чем позже приходит отраженная волна, тем меньше она несет в себе энергии (ибо раз она позже приходит, значит, она претерпела больше отражений, а следовательно, потеряла больше энергии), процесс прироста звука все меньше и меньше заметен и, наконец, практически совсем прекращается.

Точно такая же картина имеет место в любой другой точке помещения и, следовательно, во всем помещении.

Этот процесс заполнения помещения звуковой энергией прекратится тогда, когда количество звуковой энергии, излучаемой источником звука в определенный промежуток времени, уравнивается количеством энергии, которая теряется за тот же промежуток времени в результате поглощения отражающими поверхностями. Такое состояние называется стационарным и продолжается оно до тех пор, пока включен источник звука.

Как только источник звука выключится, звуковая энергия начнет убывать, ибо процесс поглощения отражающими поверхностями продолжается, а потери энергии не восполняются. Слушатель сначала перестает слышать прямые волны, затем отраженные и т. д.

Таким образом, как процесс заполнения помещения звуковой энергией, так и процесс убывания ее происходят постепенно. Теоретически эти процессы происходят скачками, но ввиду того, что эти скачки малы и быстро следуют друг за другом, практически считают, что процесс идет непрерывно.

Процессы нарастания звука, спадания его, а также стационарный режим показаны на рис. I-14. Следовательно, всякий звук в помещении длится дольше, чем на

открытом воздухе. Это затягивание звука называется *реверберацией*, которая и определяет в основном слуховое впечатление о помещении. В гулких, больших помещениях реверберация больше, чем в маленьких, заглушенных комнатах. Если поместить человека с закрытыми глазами в каком-либо помещении, он определит, в каком помещении находится. Значит, между реверберацией и характерис-



Рис. I-14. Картина нарастания и спадания звука в закрытом помещении

тикой самого помещения существует какая-то связь. Прежде чем установить ее, выясним еще одно обстоятельство.

Если выключить источник звука в каком-либо помещении, в течение некоторого времени еще слышен отзвук (реверберация), который становится все тише и тише и наконец совсем перестанет быть слышимым, когда звуковая энергия его станет ниже предела, определяющего порог слышимости слушателя. Очевидно, чем больше сила звука источника звука, тем дольше будет отзвук и, наоборот, — слабый звук дает меньшее время отзвука.

Характеристика помещения не может зависеть от того, с какой громкостью произносится в нем звук. Чтобы исключить влияние на реверберацию начального уровня звука, вводится понятие так называемого *времени стандартной реверберации*, которое показывает, за сколько секунд звуковая энергия уменьшится в миллион раз относительно своего первоначального значения. Следователь-

но, безразлично, какой уровень звуковой энергии в момент выключения источника звука будет в помещении, а важно, за какое время этот начальный уровень звуковой энергии уменьшится до одной миллионной своей первоначальной величины.

Теперь можно установить связь между временем стандартной реверберации T и параметрами помещения:

$$T = 0,164 \frac{V}{\alpha_{\text{ср}} \cdot S},$$

где T — время стандартной реверберации в *сек*; V — объем помещения в м^3 ; S — площадь всех поверхностей помещения, т. е. площадь потолка, стен и пола в м^2 ; $\alpha_{\text{ср}}$ — средний коэффициент поглощения.

Средний коэффициент поглощения $\alpha_{\text{ср}}$ определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n}{S},$$

где $S_1, S_2, S_3 \dots S_n$ — площадь поверхностей помещения, имеющих различные коэффициенты поглощения, т. е. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и т. д.

Легко видеть, что, чем больше объем помещения, тем дольше стандартная реверберация. Чем меньше коэффициент поглощения, т. е. чем больше отражается энергия от поверхности, тем также больше стандартная реверберация. Значит, изменяя коэффициенты поглощения, обрабатывая поверхность помещения тем или иным звукопоглощающим материалом, можно в известной степени влиять на время стандартной реверберации.

Способы оценки акустических свойств помещения. Если время реверберации большое, то после каждого произнесенного слова или слога существует длительный отзвук. Следующий слог или слово, накладываясь на отзвук, будет как бы сливаться с предыдущим словом или слогом, в результате разборчивость речи понизится. Если время реверберации мало, речь воспринимается четко и ясно, но исчезает естественность передачи звука. То же примерно можно сказать и о музыке. Значит, существует какое-то время стандартной реверберации, удовлетворяющее наиболее естественной передаче музыки и речи. Такое время стандартной реверберации принято называть оптимальным.

Уже давно выяснено, что оптимальная реверберация зависит от объема помещения: чем больше объем, тем боль-

ше должна быть стандартная реверберация в нем. Зависимость оптимальной реверберации от объема помещения определялась экспериментально. В течение ряда лет складывалась оценка помещения по мнению слушателей. На основании большого количества измерений был построен график зависимости оптимальной реверберации от объема помещения или от вместимости (рис. I-15).

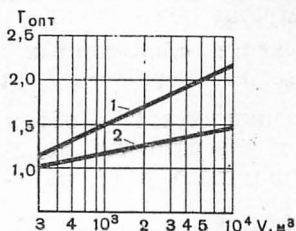


Рис. I-15. Зависимость оптимального времени в реверберации от объема зала кинотеатра в соответствии с нормами СН30-58 для частот 128 гц (1) и 512 гц(2)

Необходимо учесть, что отклонение реверберации на $\pm 10\%$ от оптимальной величины практически мало заметно. Таким образом, зная объем помещения, определяют необходимое для него время оптимальной реверберации. Если в каком-либо помещении время реверберации не соответствует оптимальному, то помещение «корректируют» обработкой стен и

потолка помещения звукопоглощающим материалом. Измерения времени стандартной реверберации производят специальными приборами.

На основании изложенного может сложиться убеждение, что акустические свойства помещения (т. е. условия для нормального и естественного восприятия речи и музыки) зависят только от времени реверберации, которую мы можем относительно легко менять. Однако оптимальная реверберация, хотя и необходимая, но не достаточное условие для создания нормальных акустических свойств помещения. В настоящее время нет еще таких методов оценки помещений, которые полностью характеризовали бы его с точки зрения акустических свойств. Наибольший интерес представляет наметившаяся в последнее время тенденция исследовать помещения при помощи звуковых импульсов. Остановимся на этом несколько подробнее.

Так как каждое произносимое слово состоит из отдельных слогов, речь можно представить как последовательность звуковых импульсов. Они длятся очень мало и следуют друг за другом очень быстро. Кроме того, в закрытом помещении за каждым импульсом образуются отражения. Поэтому интересно проследить, как эти импульсы доходят до слушателя. Для этого служит специальная аппаратура, которая позволяет излучать звуковые импульсы. Прием-

ником звука вместо слушателя является микрофон, а импульсы наблюдаются на экране электронно-лучевой трубки осциллографа. Импульс представляет собой «пакет», заполненный звуковой частотой.

На открытом воздухе импульсы передаются без искажений. А это означает, в свою очередь, что и речь и музыка также не будут искажены при передаче.

В помещении получается совершенно иная картина: в зал излучается такой же импульс, как и на открытом

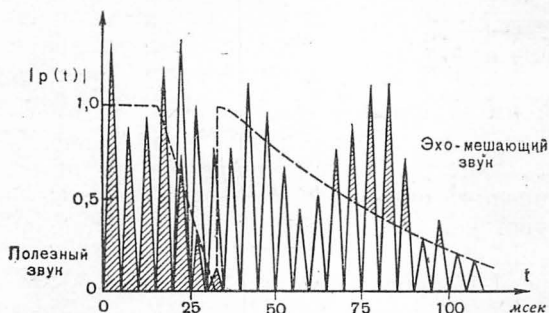


Рис. I-16. Форма импульса на выходе приемника звука (микрофона) в закрытом помещении. Указана полезная и вредная энергия

воздухе, но на выходе микрофона помимо прямого импульса звука имеется еще большое число отраженных от потолка, стен, пола и других поверхностей. Нам уже известно, что реверберация объясняется последовательным приходом отраженной звуковой энергии к уху слушателя (или к микрофону). Здесь наблюдается та же самая картина. Громкоговоритель излучил импульс, который длится очень мало времени, предположим $0,02 \text{ сек}$. Прямая энергия достигла микрофона, и на экране осциллографа появился импульс. Прямой энергии больше нет. Но начинают приходить отражения, которые также видны на экране осциллографа. Так как чем позже приходит отраженный импульс, тем меньше он несет в себе энергии, то и на экране мы видим растянутый импульс (рис. I-16), постепенно убывающий по величине. Импульс исказился. Значит ли это, что и передача звука будет искаженной?

Мы говорили об одном из свойств уха — его инерционности. Опыты показывают, что если отражения достигли уха не позднее чем через $40\text{--}50 \text{ мсек}$ после прямого звука,

то они усиливают прямой импульс. Зато отражения, приходящие позже 50 мсек, сильно влияют на качество восприятия звуковой передачи. На рис. I-16 импульс разбит на две части: первая часть, лежащая в области 50 мсек, — полезная энергия, и вторая, правая часть, — нежелательная энергия.

Таким образом, мы выяснили, что некоторые отражения не только не мешают, а, наоборот, увеличивают силу прямого звука и тем самым являются полезными. При передаче звука в помещении обязательно будет импульс, так сказать, с двумя половинами, значит, опять будут искажения при передаче. Оказывается, это не так. Все зависит от соотношения силы звука в левой и правой половинах. Если импульс спадает быстро, то правая часть, лежащая за 40 мсек, будет значительно меньше, чем левая, и ухо не «заметит» этого маленького вредного сигнала. Но если вредный сигнал будет иметь большую величину, то ухо почувствует его, а следовательно, и искажение импульса.

На рис. I-16 приведен импульс, где во второй его части имеется звук с большой энергией, почти с такой же, как прямой, который создает эхо при передаче. Значит, этот сигнал уже нежелателен и от него надо избавиться.

В настоящее время можно по импульсной картине и чертежам помещения определить те поверхности, которые создают такие сильные отражения. Можно избавиться от подобных отражений, если обработать эти поверхности поглощающим звук материалом.

Звукопоглощающие материалы и конструкции. Если распространяющаяся звуковая волна встречает на своем пути препятствие в виде перегородки, то одна часть энергии звука отражается, другая поглощается.

Как происходит поглощение звуковой энергии?

Существуют два пути. Часть звуковой энергии, падающей на перегородку, проходит сквозь нее, причем такой переход объясняется тем, что под действием звукового давления упругая перегородка приходит в колебательное движение и работает как мембрана, передавая звуковую энергию на другую сторону перегородки. При этом потери звуковой энергии могут быть значительными, что позволяет использовать это свойство для устройства жестких поглотителей (звукопоглощающих панелей, щитов и т. п.).

Второй путь — это тепловые потери в материале. Часть звуковой энергии переходит в тепло при проникно-

вении в толщу материала, причем объясняются эти потери тремя причинами. Изменение звукового давления приводит в колебательное движение воздух в порах материала, на трение которого о стенки пор тратится звуковая энергия, которая, как и всегда при трении, превращается в тепло. Кроме того, под действием звукового давления происходит деформация частиц материала, например сжатие, однако при последующем разрежении частица не возвращается в свое первоначальное состояние. Следовательно, на сжатие затрачивается бóльшая работа, чем та, которая отдается частицей при неполном переходе в первоначальное состояние.

Наконец, третий вид потерь звуковой энергии объясняется тем, что под действием звуковой волны давление воздуха, имеющегося в порах материала, увеличивается, что приводит к повышению его температуры, при этом часто тепло передается стенкам пор.

Таким образом, потери звуковой энергии зависят от структуры и теплопроводных свойств материала, на который падает звуковая волна. Материалы, имеющие пористую и волокнистую структуру, обладают наиболее эффективными звукопоглощающими свойствами.

Звукопоглощающие свойства оценивают коэффициентом поглощения звука α . Принято характеризовать звукопоглощение материала величиной его коэффициента звукопоглощения на одной из средних частот (500 или 1000 *гц*). Однако для практики такая величина недостаточна, так как звукопоглощающие свойства материала зависят от частоты звука. Поэтому кроме коэффициента поглощения на средних частотах пользуются частотной характеристикой звукопоглощающего материала.

Коэффициент звукопоглощения материала зависит также от того, падает ли звук на него перпендикулярно или под углом. Обычно в помещении, обработанном звукопоглощающим материалом, происходит одновременный приход звуковых волн из разных направлений и под разными углами. Поэтому на практике пользуются усредненным коэффициентом поглощения и только в особых случаях — его направленной характеристикой в зависимости от угла падения звука.

Если известен коэффициент звукопоглощения материала, то может быть определена поглощающая способность поверхности путем перемножения коэффициента поглощения α на площадь поверхности S . Поглощающая способ-

ность поверхности измеряется в условных единицах поглощения. Например, поглощение кирпичной стены, покрытой штукатуркой и краской ($\alpha=0,02$), площадью $S=100 \text{ м}^2$ составит:

$$\alpha S = 0,02 \cdot 100 = 2 \text{ единицы.}$$

Поглощающая способность отдельных предметов определяется коэффициентом поглощения, отнесенным на один предмет. Например, количество поглощения, внесенное 100 стульями ($\alpha=0,02$), составит: $0,02 \cdot 100 = 2$ единицы.

Обычными строительными материалами обрабатывают большинство помещений кинотеатров и клубов, которые позволяют в ряде случаев обеспечить необходимые акустические условия. В помещениях, где применены специальные акустические звукопоглощающие материалы, значительная часть поверхности обрабатывается также обычными строительными материалами.

Коэффициент звукопоглощения гипсовой штукатурки по кирпичной стене на частоте 1000 *гц* весьма невелик и равен 0,013, а в области 4000 *гц* — 0,05.

Значения коэффициента поглощения стандартных строительных материалов приведены в табл. 2. Все эти материалы являются малоэффективными поглотителями звука. Когда требуется заглушить помещение, т. е. снизить время реверберации в нем, необходимо обрабатывать поверхности другими, более эффективными поглощающими звуком материалами. Звукопоглощающие свойства выражены у пористых материалов. Однако пористые материалы имеют неравномерную частотную характеристику поглощения и некрасивы. Поэтому помимо пористых материалов широко применяются акустические и архитектурно-акустические конструкции.

Пористые звукопоглощающие материалы разделяют на рыхлые и твердые. К рыхлым относятся: древесные волокна, волокна сахарного тростника и кокосовых пальм, минеральная шерсть (шлаковата), асбестовая вата, стеклянная вата и др. Наибольшее применение для акустической обработки получила минеральная шерсть ($\alpha=0,7$ на частоте 1000 *гц* для слоя 1 *см*). Звукопоглощение для других частот видно на рис. 1-17. Для выравнивания частотной характеристики, т. е. получения высокого коэффициента звукопоглощения в области низких частот, необходимо увеличивать толщину слоя до 10—15 *см*.

Коэффициент звукопоглощения обычных строительных материалов на разных частотах

Наименование материалов	Частота, гц					
	128	256	512	1024	2048	4096
Мрамор	0,01	—	0,01	—	0,015	—
Бетон и железобетон гладкий	0,01	0,012	0,015	0,019	0,023	0,035
Кирпичная стена нештукатуренная	0,024	0,025	0,032	0,042	0,049	0,070
Штукатурка гипсовая гладкая по кирпичу	0,013	0,015	0,020	0,028	0,040	0,050
То же, окрашенная	0,012	0,013	0,017	0,02	0,023	0,025
Штукатурка цементная по дереву, шероховатая	0,025	0,045	0,060	0,085	0,043	0,058
То же, гладкая	0,024	0,027	0,030	0,037	0,019	0,034
Деревянная обшивка (сосна)	0,098	0,11	0,10	0,084	0,082	0,011
Паркет	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Стекло одинарное	0,025	—	0,027	—	0,02	—

Твердые пористые материалы изготовляют в виде плит путем прессовки волокнистых материалов, часто с примесью цементирующих веществ. К ним относятся: инсулит, арборит, вермикулит, ЗП-5 и др. Инсулит и арборит прессуют из отходов бумажной массы и пропитывают огнестойким составом. Выпускают в виде плит толщиной 2 см. Объемный вес $125-150 \text{ кг/см}^3$ ($\alpha=0,2-0,4$ при равномерной частотной характеристике). Вермикулит изготовляют из мелких кусочков обожженной слюды, смешанной с клеем, и прессуют в виде плит. Он негорюч и негигроскопичен ($\alpha=0,3-0,5$).

Звукопоглощающий материал ЗП-5 представляет собой застывшую пену мочевиноформальдегидной смолы с примесью небольшого количества древесных опилок. ЗП-5 очень легкий — объемный вес $15-17 \text{ кг/м}^3$ ($\alpha=0,5-0,7$). Выпускается в виде плит $50 \times 50 \times 10 \text{ см}$. Им обрабатывают стены и потолки павильонов киностудий.

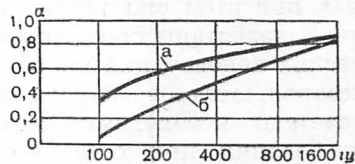


Рис. 1-17. Частотная характеристика звукопоглощающего материала (минеральная вата): а — толщина слоя 10 см; б — толщина слоя 1 см

Акустические штукатурки отличаются от обычных штукатурок наличием легкого заполнителя (пемза, дробленый котельный шлак и т. п.), благодаря чему повышается коэффициент звукопоглощения ($\alpha=0,3$ на частоте 1000 *гц*).

Жесткие поглотители обладают преимущественным поглощением на низких частотах. Это щиты Бекешы, представляющие собой деревянную раму, затянутую плотной лакированной тканью, на которую помещается слой минеральной шерсти толщиной 4—5 *см*. Размеры щита Бекешы 1×4 *м*, при этом $\alpha=0,8$ в области 125—250 *гц*. Перфорированные листы фанеры, железа, сухой штукатурки, фибролита и других тонких упругих материалов расположены на расстоянии 4—5 *см* от стены. Этот промежуток может быть заполнен рыхлым поглотителем, что резко увеличивает коэффициент звукопоглощения панели.

Архитектурно-акустические конструкции. Решение вопросов создания благоприятных акустических условий во вновь строящихся и реконструируемых кинотеатрах представляло значительные трудности, во-первых, ввиду отсутствия промышленного выпуска достаточно большого ассортимента звукопоглощающих материалов и, во-вторых, в силу трудностей сочетания красивой архитектуры с созданием хороших акустических условий при использовании существующих акустических материалов и конструкций. Внешний вид поглотителей звука не отвечает требованиям, предъявляемым к облицовочным материалам. Большинство из них даже нельзя окрашивать, так как при этом они теряют акустические свойства.

Разработаны стандартные блоки архитектурно-акустических конструкций для обработки зрительных залов кинотеатров, театров, клубов и других помещений, которые сочетают необходимые акустические и художественные требования при отделке помещений.

Основным элементом сборной конструкции является стандартный архитектурно-акустический блок. Сборность архитектурно-акустических конструкций значительно облегчает проведение строительных отделочных работ. Поэтому они широко применяются при строительстве новых кинотеатров и акустической реконструкции старых.

Рассмотрим устройство архитектурно-акустического блока (рис. I-18). Основа блока — деревянная рама заданной формы и размеров (высота 10—15 *см*). Одна сторона рамы затягивается сеткой Рабитца, по которой отли-

вается рельеф из гипса или цемента по выбранному рисунку. Отливка из гипса может быть заменена штампом из сухой штукатурки или папье-маше. Выбор рисунка обусловлен размером и формой свободных полей и отношением их площади ко всей площади блока.

С другой стороны на сетку наклеивается слой легкой окрашенной ткани, служащей фоном для рельефного



Рис. I-18. Архитектурно-акустический блок (разрез)

рисунка. На ткань по всей поверхности кладется слой в 10—12 см пористого поглотителя звука. Чаще всего применяется шлаковая вата марки М-150, но пригоден и другой пористый поглотитель.

Пористый звукопоглощающий материал расположен позади орнамента и ткани, а потому не виден. Гипсовый орнамент представляет собой как бы решетку, позади которой располагают эффективный поглотитель звука. Звук, падающий на такую решетку, частично отражается от элементов решетки и частично поглощается, пройдя через отверстия решетки.

Акустические свойства конструкции становятся понятными, если представить себе открытый ящик, наполненный пористым поглотителем с коэффициентом звукопоглощения $\alpha = 0,7$. Если закрыть ящик плитой с отверстиями, площадь которых составляет 50% поверхности плиты, то приблизительно можно считать, что поглощающая способность поверхности уменьшилась вдвое. Если площадь отверстий составляет 25% от площади поверхности такой решетки, то можно ожидать, что такая поверхность будет поглощать звук приблизительно в четыре раза меньше, чем открытый ящик с таким же наполнителем.

Таким образом, изменением отношения площади отверстий ко всей площади блока можно в некоторых пределах изменять коэффициент звукопоглощения блока. Это

дает возможность изготовить конструкции, состоящие из тех же материалов, но с различными акустическими свойствами.

Коэффициент звукопоглощения шлаковаты слоем 10—15 см в области средних частот равен 0,7. Практически путем изменения отношения открытой площади ко всей площади блока в пределах от 15 до 65% получают звукопоглощающие конструкции с коэффициентом поглощения от 0,1 до 0,5 на частоте 1000 *гц*.

Выбором размеров отверстий удастся получить частотную характеристику коэффициента поглощения таких конструкций с небольшим подъемом в области низких частот, что приводит к выравниванию частотной характеристики времени реверберации зрительных залов кинотеатров.

Разработаны архитектурно-акустические конструкции, предназначенные для подвески к потолку или для установки на стенах.

§ 5. АКУСТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КИНОТЕАТРУ

Посторонние звуки и шумы, проникающие в зрительный зал, мешают слушать музыку, затрудняют разборчивость речи, снижая тем самым эмоциональное воздействие фильма на зрителей.

Часть проникающих посторонних звуков, например игра оркестра в фойе, сигналы проходящего по улице транспорта и другие доносящиеся звуки, отвлекает зрителей от просмотра фильма. Наличие шума в зале заставляет зрителя напрягать слух, чтобы разобрать речь. В итоге двухчасового напряжения слуха зритель не только не отдыхает, а, наоборот, устает. Иногда посторонние шумы или регулярно повторяющиеся звуки вызывают даже раздражение у зрителей.

Если в кинотеатре работает вентиляционная система или другие агрегаты с повышенным уровнем шума, то зрители, с увлечением следящие за ходом событий на экране, не замечают шума, но стоит выключить вентиляцию во время демонстрации фильма, как зрители почувствуют облегчение. Этот пример показывает, что вопросы звукоизоляции в кинотеатре, предназначенном для качественного звуковоспроизведения, не должны оставаться без внимания.

Основные вопросы по изоляции зрительного зала от посторонних звуков и шумов должны быть решены еще в проекте при строительстве или реконструкции кинотеатра. Однако и при эксплуатации кинотеатров вопросы звукоизоляции играют весьма существенную роль.

Все сказанное относится также к условиям проведения киносеансов в клубах с кинопередвижкой, где обычно почти не принимается никаких мер по снижению уровня шума.

Что же является основными источниками шума в кинотеатрах? Помимо внешних шумов, проникающих с улицы, можно указать еще два постоянных источника: аппаратная камера и вентиляционная система.

Прохождение звуковых помех в любое закрытое помещение происходит тремя путями.

Во-первых, по воздуху через любые каналы (щели в дверях, окнах и стенах; смотровые и проекционные окна), соединяющие зрительный зал с улицей или шумным помещением (фойе, кинопроекторная). Даже через очень малое отверстие проходит очень много акустической энергии.

Поэтому при звукоизоляции основное внимание необходимо уделять ограждению зрительного зала от улицы и тщательной заделке прямых отверстий и каналов, связывающих зрительный зал с шумными соседними помещениями. Этим же путем передается шум работающих вентиляторов по вентиляционным каналам в зрительный зал. В целях ограждения зрительного зала от шумов вентиляционной системы необходимо акустически обработать вентиляционные каналы.

Во-вторых, внешние звуковые помехи передаются в зрительный зал через стены, пол и потолок, которые при воздействии приходящих из соседних помещений звуковых волн сами начинают колебаться и передают таким образом звук. Поэтому к устройству стен, перегородок, пола и перекрытия предъявляются специальные требования, обеспечивающие необходимую звукоизоляцию.

В-третьих, внешние звуки и шумы могут проникать также по стенам, перекрытиям и полу, но, в отличие от второго пути, не по воздуху, а по самим конструкциям. Например, на чердачное перекрытие установлен электродвигатель вентиляционной системы. При его работе возникают колебания (вибрации), которые передаются по перекрытию, стенам, окнам и в местах неплотного прилегания могут вызвать дребезжание.

Поэтому при установке стационарных двигателей (вентиляционных и отопительных систем, силовых трансформаторов и т. п.) необходимы специальные меры от проникновения акустических помех в зрительный зал.

Устройства искусственной вентиляции представляют собой двойную систему воздуховодов, проложенных через все основные помещения здания. По одним воздуховодам воздух вводится в вентилируемые помещения, по другим — забирается из них.

Сечение воздуховодов довольно велико и достигает $1,5 \text{ м}^2$. Воздуховоды такого большого сечения представляют собой хорошие звукопроводы, и по ним звуки легко проходят из одного помещения в другое. Таким путем в зрительный зал легко могут проникать звуки, например, из шумного фойе, аппаратной камеры и других помещений.

Чтобы исключить или значительно ослабить проникновение звуков по воздуховодам, принимаются специальные меры, например устраиваются отдельные, не связанные между собой вентиляционные системы для каждого из помещений с повышенными требованиями в отношении звукоизоляции.

При общей вентиляционной системе снижение уровня шума достигается внесением искусственного затухания звука в систему воздуховодов, которое может быть осуществлено: 1) уменьшением скорости прохождения звука в воздуховоде; 2) увеличением длины пути воздуха; 3) устройством колен и поворотов воздуховодов; 4) обработкой внутренних стенок части воздуховода звукопоглощающим материалом; 5) устройством на пути прохождения воздуха акустических фильтров.

Главным источником шума самой вентиляционной системы обычно служит вентиляционный агрегат, который состоит из электродвигателя и мощного вентилятора.

Чтобы избежать передачи вибрации агрегата по корпусу здания, его устанавливают на амортизаторах. Амортизаторами являются стальные пружины, бруски и прокладки из войлока, резины, пробки, на которые кладется тяжелая бетонная или железобетонная плита, служащая платформой для установки агрегата.

Кроме борьбы с передачей вибрации вентиляционной установки необходимо принимать меры против передачи звука по воздуховодам. В этих целях внутренние поверхности вентиляционной камеры и воздуховодов обрабатывают звукопоглощающими материалами. Для обработки

вентиляционных камер и воздуховодов применяют акустические штукатурки и другие твердые материалы.

Несмотря на сходство между помещениями обычных театров или концертных залов и кинотеатров, предъявляются различные требования в отношении их акустической обработки. Это вытекает из особенностей помещений, предназначенных для слушания звука, воспроизводимого электроакустической аппаратурой, по сравнению с помещениями, предназначенными для слушания естественного звука.

В театре слушатель видит исполнителя, находящегося на сцене. При передвижении исполнителя по сцене, благодаря бинауральным свойствам слуха слушатель легко определяет месторасположение исполнителя и, следовательно, воспринимает звучание стереофонически. Таким образом, в театре или концертном зале существует естественное восприятие звука слушателем и совпадают оси зрения и направления источника звука.

В кинотеатре система громкоговорителей всегда расположена в определенном месте — у экрана или позади него. Независимо от того, в какой части экрана находится в данный момент исполнитель и какой источник звука производится, система громкоговорителей излучает звук в определенном направлении, в соответствии с характеристикой направленности.

Таким образом, в обычном кинотеатре нарушается натуральность передачи звука, отсутствует стереофоничность передачи, что лишает слушателя восприятия эффекта перспективы и глубины звучания. Это различие приводит к необходимости снижать время реверберации в кинотеатрах, так как наиболее благоприятные акустические условия наступают при меньшем времени реверберации, чем в театрах такого же объема.

Другой особенностью является то, что в кинотеатрах может быть применена звуковоспроизводящая аппаратура значительной мощности, в то время как мощности естественных источников звука ограничены. В театрах и концертных залах равномерная слышимость в передних и задних рядах создается реверберацией помещения, которая должна быть достаточно велика. В кинотеатрах повышенная реверберация оказывает мешающее действие, так как равномерная слышимость в передних и задних рядах может быть обеспечена выбором необходимой мощности звуковоспроизводящей аппаратуры, формой зри-

тельного зала и расположением громкоговорителей с учетом их характеристик направленности.

Однако предполагать, что в кинотеатре можно получить благоприятные акустические условия без достаточной реверберации, было бы неправильно, так как в противном случае звучание получается приглушенным и неприятным.

Достижение необходимой реверберации является важным условием для создания благоприятных акустических качеств зала.

Следовательно, акустика кинотеатра должна удовлетворять следующим требованиям: звукоизоляция от посторонних звуков и шумов, оптимальное время реверберации в области средних частот, соответствие частотной характеристики рекомендуемой (рис. I-19), отсутствие эха, фоку-

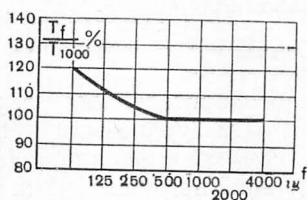


Рис. I-19. Частотная характеристика оптимального времени реверберации для зрительного зала кинотеатра

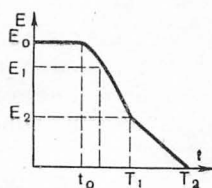


Рис. I-20. Вид кривой спадающей кривой уровня звуковой энергии в логарифмическом масштабе

сирования звука и «мертвых зон», наличие ломаной кривой спадающей уровня звуковой энергии с крутым начальным участком — 0,12—0,15 сек (что обеспечивает хорошую разборчивость речи) и пологим завершающим участком (что создает благоприятное восприятие музыки; рис. I-20). Такой характер кривой спадающей звуковой энергии получают обработкой эффективными звукопоглотителями потолка, верхних частей стен, а также нижних частей стен (ниже $\frac{1}{2}$ высоты подвеса громкоговорителей), что определяется расчетом.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими величинами определяется колебательное движение?
2. Как объясняется распространение звука?
3. С какой скоростью распространяется звук в воздухе?
4. Что называется звуковым давлением?
5. Что такое децибел и что измеряют в децибелах?

6. Что называют областью слухового восприятия и чем она ограничена?
7. Что называют тембром звука?
8. Какие искажения называются частотными и как они ощущаются?
9. Как прослушиваются нелинейные искажения и какими причинами они объясняются?
10. Как объясняется процесс заполнения помещения звуковой энергией?
11. Как объясняется процесс убывания звуковой энергии в помещении?
12. Как оценивают звукопоглощающие свойства материалов?
13. Что такое реверберация и время стандартной реверберации?
14. Напишите формулу для расчета стандартной реверберации.
15. Как зависит качество звучания в зрительном зале кинотеатра от времени стандартной реверберации зала?
16. Что понимают под акустической обработкой зрительного зала?
17. Что такое оптимальная реверберация?
18. Какие методы записи звука и его воспроизведения применяются на практике?

ВЕНТИЛИ

§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА И АТОМА. ВИДЫ ПРОВОДИМОСТИ

Развитие и совершенствование техники звукового кино в значительной мере обусловлено развитием электроники. Электроника особенно развивалась в последние десятилетия и наряду с усовершенствованиями электронных ламп обогатилась принципиально новыми средствами для преобразования и усиления электрических колебаний — полупроводниковыми приборами (диодами и транзисторами). В то время как работа электровакуумных приборов основана на законах движения электронов в высоком вакууме под действием сил постоянных и переменных электрических полей, работа полупроводниковых диодов и триодов основана на прохождении электрических зарядов через границы твердых тел, обладающих кристаллическим строением, и процессах, происходящих в атомах этих тел.

Чтобы отчетливее представить себе процессы, происходящие при работе электронных, ионных и полупроводниковых приборов, ознакомимся с современными представлениями о строении вещества и атома.

Атомы любого химического элемента состоят из тяжелого, но очень малого по размерам ядра, заряженного положительно, и легких отрицательных частиц — электронов, движущихся вокруг ядра по определенным траекториям — орбитам. Количество электронов у атомов различных элементов неодинаково, но в целом атом обычно электрически нейтрален, так как отрицательный заряд всех электронов уравнивается равным, но противоположным по знаку электрическим зарядом ядра.

Атомное ядро, в свою очередь, состоит из нейтральных и заряженных элементарных частиц (нейтроны, протоны и др.).

Природа электропроводности (являющейся одной из важнейших физических характеристик вещества) заключается в перемещении электрических зарядов внутри вещества. Электропроводность вещества тесно связана с состоянием, в котором находятся атомы, в частности с количеством (концентрацией) так называемых *свободных* электронов, легко теряющих связи с данным атомным ядром и беспрепятственно перемещающихся между атомами.

Число электронов атома соответствует его порядковому номеру в периодической системе Менделеева: атом водорода имеет 1 электрон; кислорода — 8, кремния — 14, германия — 32 электрона и т. д. Число электронов, движущихся вокруг ядра по определенным орбитам, не может быть произвольным. На ближайшей к ядру первой орбите не может быть более двух электронов (рис. II-1), на следующей, второй, орбите — не более восьми электронов, третья орбита не может иметь более восемнадцати электронов и т. д.

У движущихся электронов атома различные запасы энергии; не может быть более двух электронов, обладающих одинаковой энергией. Электроны на внешних орбитах обладают большими запасами энергии. Вместе с тем электроны, входящие в состав атома, не могут обладать любой энергией, а находятся лишь в строго определенных энергетических состояниях, называемых *уровнями*.

В некоторых условиях электрон может перейти с одной орбиты на другую. Если переход происходит с внешней орбиты на внутреннюю, выделяется строго определенная

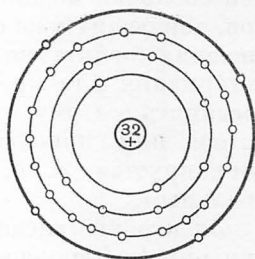


Рис. II-1. Модель атома германия

порция энергии в виде излучения. Для того чтобы электрон перешел с внутренней орбиты на внешнюю, нужно сообщить извне также строго определенную порцию энергии в виде тепла, или при помощи бомбардировки атома частицами, или воздействия внешнего электрического поля.

Если сообщаемой извне энергии достаточно, то из атомной оболочки можно выбить один или несколько электронов, теряющих уже связь с данным атомом и ядром. Если внешняя орбита не целиком заполнена, как, например, у германия или кремния, то имеется возможность присоединить к атому один или несколько электронов. При потере или приобретении добавочных электронов атом ионизируется, т. е. перестает быть электрически нейтральным.

Электроны внешнего слоя называются *валентными*; они определяют электропроводность вещества и, вступая во взаимодействие с другими ядрами, вызывают химические реакции.

Как построено вещество из атомов?

Все твердые тела, встречающиеся в природе, можно разделить по физическому строению на аморфные и кристаллические. Такие свойства аморфных тел, как теплопроводность, электропроводимость, показатель преломления света и другие, в отличие от кристаллических не зависят от направления, в котором определяются эти свойства.

Кристаллические вещества обладают упорядоченным строением. Мельчайшие частицы, отличающие данное вещество от других — атомы, молекулы и ионы кристаллов, — образуют в пространстве узлы правильно повторяющейся решетки. Обязательное тепловое движение частиц происходит все время в окрестностях этих узловых точек пространственной кристаллической решетки. Вид решетки зависит от частиц, из которых она построена. Частицы связаны между собой силами электрического взаимодействия. Когда вещество из расплавленного состояния переходит в твердое, частицы занимают в пространстве положение, соответствующее минимальной потенциальной энергии, таким образом, что образуют кристаллические структуры-решетки.

Особый интерес для нас представляют германий, кремний, углерод (алмаз), из которых изготавливают полупроводниковые приборы. У этих веществ четыре валентных

электрона. Схематическое объемное изображение кристаллической решетки алмаза показано на рис. II-2. Аналогичные решетки у германия и кремния. Каждый атом связан с четырьмя ближайшими к нему в пространстве атомами, расположенными симметрично и на одинаковых расстояниях.

Связи каждого атома с четырьмя ближайшими поддерживаются валентными электронами. Благодаря валентным связям вещество оказывается стабильным. Валентные связи между атомами кристаллической решетки видны на рис. II-3, где показаны в виде окружностей ядра атомов

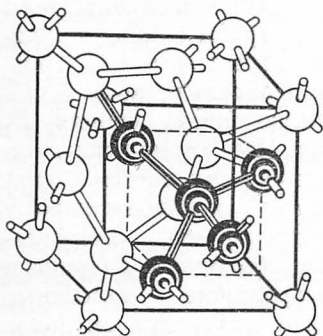


Рис. II-2. Модель кристаллической решетки алмаза

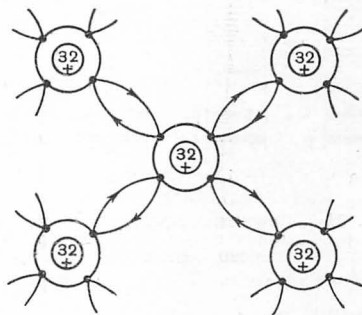


Рис. II-3. Валентные связи атома германия

германия и внешние орбиты, на которых находятся по четыре валентных электрона (промежуточные, «заполненные» орбиты для простоты не указаны).

Каждый из электронов любого атома связан с одним из электронов ближайшего атома — так образуются ковалентные связи, в которых участвуют по два электрона (показано на рисунке сплошными линиями). Тем самым каждый из атомов как бы получает более заполненную внешнюю орбиту, на которой находятся восемь электронов.

Поля отдельных близко расположенных атомов влияют друг на друга и в совокупности образуют внутри кристалла периодическое электростатическое поле. Электроны, участвующие в валентных связях, нормально покидать их не могут. Однако если каким-нибудь способом сообщить веществу дополнительную энергию (в форме энергии поля, тепла или света), то некоторое количество электронов вырывается из ковалентных связей и становится свободным.

Они принимают участие в процессе проводимости, перемещаясь, например, под действием внешнего электрического поля. Чем больше свободных электронов, тем больше электропроводность вещества.

Каждому электрону свойствен определенный энергетический уровень. Если атомы вещества близки друг другу, то значения уровней отдельных электронов из-за влияния полей несколько смещаются. В твердом теле с кристаллической структурой энергетических уровней может быть очень много — в совокупности они образуют как бы по-

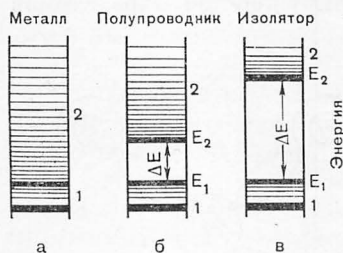


Рис. II-4. Энергетические уровни частиц в веществах с различной электропроводностью

высоких энергетических уровнях, простирающихся, например, выше E_2 . Уровни, расположенные выше E_2 , образуют зону 2 — возбуждения, или проводимости. Ширина энергетического зазора между E_1 и E_2 , равная ΔE , зависит от строения вещества — эта зона соответствует тем энергетическим уровням, которые не свойственны электронам данного вещества, и называется запрещенной, или недозволенных уровней.

Проводимость вещества определяется шириной запрещенной зоны. Если эта зона настолько широка, что никакими внешними воздействиями нельзя заставить электроны перемещаться из нормальной зоны в зону проводимости, то вещество представляет собой изолятор. К изоляторам относятся слюда, кварц, асбест, сера, некоторые керамики и др.

Если запрещенная зона отсутствует или зоны проводимости и нормальная перекрывают друг друга, это означает, что все валентные электроны могут легко перемещаться и участвовать в процессе проводимости. Такое вещество называется проводником (металлы).

лосу, или зону, возможных энергетических уровней. Валентные электроны и электроны с более низкими энергетическими уровнями образуют зону 1, лежащую ниже уровня E_1 (рис. II-4). Зона этих электронов называется нормальной или валентной.

Электроны, получившие добавочную энергию и разорвавшие валентные связи, находятся на более

Вещество, у которого запрещенная зона мала и под действием внешних факторов валентные электроны могут переходить в зону проводимости, называется *полупроводником* (рис. II-4, б). Электропроводность полупроводников неустойчива и сильно зависит от внешних факторов. К полупроводникам относятся гранит, селен, германий, кремний, теллур, большинство окислов металлов и их сернистых соединений и др.

Виды проводимости. Электропроводность вещества не исчерпывается перемещением свободных электронов, расположенных в зоне проводимости, хотя подобная *электронная* проводимость для некоторых веществ и играет решающую роль.

Существуют проводники с *ионной* проводимостью, например растворы солей, газы. В них носителями тока служат положительные или отрицательные ионы-атомы, временно потерявшие или присоединившие электроны. Ионная проводимость обычно связана с изменением положения атомов, т. е. с изменением физических или химических свойств. Ионная проводимость имеет место в различных газоразрядных приборах.

У полупроводников с электронной проводимостью при прохождении электрического тока атомы остаются в фиксированных положениях, в углах кристаллической решетки. Число электронов, участвующих в процессе проводимости, может изменяться, но структура и химический состав вещества неизменны.

Решающий фактор, определяющий электропроводность полупроводников, — тепловое движение частиц. Ширина энергетического зазора между нормальной зоной и зоной проводимости у большинства полупроводников составляет от 0,1 до 1 эв*. При обычной комнатной температуре средняя энергия частиц равна примерно 0,4 эв. Однако среди огромного количества частиц, участвующих в тепловом движении, существуют такие, энергии которых отличаются от среднего значения: чем больше энергии, тем меньше вероятность существования частицы с такой энергией.

Частицы с высокими значениями энергии при столкновении с соседними атомами могут нарушить валентные

* эв — электронвольт — единица энергии, соответствующая изменению энергии электрона при прохождении в электростатическом поле разности потенциалов 1 в.

связи и выбить электрон, сообщив ему достаточную энергию для перехода в зону проводимости. Вырванный из связи электрон будет избыточным по отношению к тем, которые обеспечивают ковалентные связи, так как ни в одну из завершенных связей он войти не может. Под действием приложенного электростатического поля избыточный электрон будет перемещаться в направлении положительного потенциала и создавать электрический ток.

Если из некоторой ковалентной связи удален один электрон, то атом окажется положительно заряженным, а в ковалентной связи образуется дырка. Понятие «дырка» имеет большое значение в теории полупроводников, и поэтому мы остановимся на нем несколько подробнее.

Не следует отождествлять дырку с положительно ионизированным атомом. Под дыркой понимается избыток положительного заряда в ковалентной связи, численно равный заряду электрона, т. е. дырка представляет собой понятие, удобное для описания особого вида электронной проводимости, так называемой дырочной проводимости.

Дырка в ковалентной связи может быть заполнена электроном соседнего атома, перешедшим в зону проводимости. Этот электрон, в свою очередь, оставляет дырку, которая также может быть заполнена другим электроном, образовавшим новую дырку, и т. д.

Этот процесс перемещения, «дрейфа» дырок можно представить как процесс перемещения внутри кристаллической решетки положительных зарядов, равных по величине зарядам электронов и движущихся в направлении отрицательного потенциала поля.

Среднее значение скорости перемещения дырок в чистом, беспримесном полупроводнике несколько меньше скорости перемещения электронов. Поэтому ток, обусловленный дырками, несколько меньше тока, обусловленного электронами. Это означает, что беспримесный полупроводник имеет слабо выраженную электронную проводимость.

Введение в чистый полупроводник даже ничтожных (миллионных) долей примесей других веществ снижает ширину зоны запрещенных энергий и вызывает появление избыточной проводимости, называемой примесной. Подробно примесная проводимость рассматривается в § 5 этой главы.

§ 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕНТИЛЕЙ И ИХ ПАРАМЕТРЫ

Электрическим вентиляем называют прибор, который проводит электрический ток в одном направлении значительно лучше, чем в другом. Можно сказать, что идеальным вентиляем называют прибор с односторонней проводимостью.

Вольтамперная характеристика идеального вентиля показана на рис. II-5. Для одного направления тока (назовем его прямым) сопротивление вентиля равно нулю, а для противоположного (назовем его обратным) — равно бесконечности. На рисунке показано условное обозначение вентиля и направление прямого и обратного токов. Такой прибор с односторонней проводимостью можно использовать для преобразования переменного тока в ток пульсирующий, т. е. в ток переменный по величине, но постоянный по направлению, причем осуществить такое преобразование без потерь энергии в вентиле напряжения на нем.

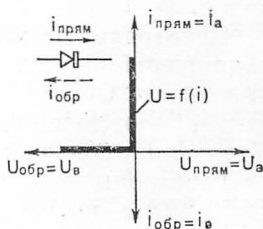


Рис. II-5. Вольтамперная характеристика идеального вентиля

Реальные вентили имеют вольтамперные характеристики, отличающиеся от идеальных. Это отличие состоит в том, что процесс преобразования переменного тока в постоянный сопровождается потерями энергии и напряжения на вентиле. Кроме того, реальные вентили имеют ограниченные пределы электрического режима работы.

Электрические вентили могут быть классифицированы по ряду признаков. Основным является характер проводимости, определяющийся средой, в которую помещены электроды вентиля. По этому признаку вентили разделяют на три группы:

- 1) электронные — кенотроны (диоды), трех- и многоэлектродные лампы;
- 2) ионные — газотроны, тиратроны, ртутные вентили и др.;
- 3) полупроводниковые — селеновые, германиевые, кремниевые, медно-закисные и др.

Вентили разделяют также на управляемые и неуправляемые. К неуправляемым вентилям относят: кенотроны,

газотроны, полупроводниковые диоды; к управляемым относят: электронные лампы с сетками, тиратроны и др.

Кроме того, вентили могут быть классифицированы по типу катода, характеру эмиссии, конструкции и т. п.

В киноустановках электрические вентили находят широкое применение как в схемах звуковоспроизведения в качестве электропитающих устройств, так и в стационарных киноустановках в схемах электрического питания дуговых ламп. Мы ограничимся рассмотрением кенотронов, газотронов и полупроводниковых приборов, которые используются в схемах звуковоспроизведения киноустановок.

Кенотроны могут применяться в широком диапазоне напряжений — от долей вольта до десятков и даже сотен киловольт. Область применения их по току более ограничена — от долей миллиампера до десятых долей ампера. Получение больших токов затруднительно.

Газотроны позволяют получить выпрямленный ток от 1 до $50 \div 70$ а, но уступают кенотронам в диапазоне напряжений. Для напряжений выше $15 \div 20$ кв газотроны не находят применения.

Полупроводниковые диоды имеют более широкое применение, так как позволяют получить токи от долей миллиампера до нескольких сот ампер и их можно использовать в диапазоне напряжений от долей вольта до нескольких киловольт.

Полупроводниковые вентили отличаются высокой механической прочностью, большим сроком службы, постоянной готовностью к действию и простотой в эксплуатации.

Все это позволяет широко внедрять полупроводниковые вентили в разнообразные схемы современных электронных устройств и приборов.

Параметрами всякого прибора называются определенные постоянные величины. К ним относятся следующие параметры вентиляей:

1. Внутреннее падение напряжения на вентиле или сопротивление вентиля в прямом направлении. Эти величины должны быть по возможности малы, так как с повышением падения напряжения на вентиле снижается к. п. д. выпрямителя и возрастает мощность потерь на тепло, выделяющееся внутри прибора, что ухудшает его тепловой режим. У всех типов вентиляей сопротивление в прямом

направлении зависит от величины проходящего тока, т. е. вольтамперная характеристика для прямого тока нелинейна.

2. Максимальное (амплитудное) значение прямого тока. Этот параметр важен главным образом для вентиля с накаливаемым катодом, у которых максимальное значение тока ограничено эмиссионной способностью катода.

3. Среднее значение прямого тока вентиля. Этот параметр характеризует нагрузочную способность вентиля, поскольку среднее значение тока вентиля непосредственно связано с величиной выпрямленного тока на выходе выпрямителя. Допустимый средний ток вентиля лимитируется тепловым режимом последнего, так как мощность, теряемая внутри вентилем на тепло, в основном определяется величиной среднего значения тока.

Указанные три параметра характеризуют свойства вентиля в проводящем направлении.

В непроводящем направлении свойства вентиля характеризуют следующие параметры:

4. Допустимое обратное напряжение на вентиле в непроводящую часть периода. Оно показывает электрическую прочность вентиля.

5. Обратный ток, что характерно для ионных и полупроводниковых вентилях.

В ионных вентилях обратный ток нормально существует в течение незначительной доли непроводящей части периода.

Чрезмерное повышение обратного тока при высокой напряженности электрического поля в вентиле в непроводящую часть периода приводит к возникновению вторичной эмиссии с анодов и пробую.

В полупроводниковых вентилях обратный ток является фактором, обуславливающим добавочное нагревание вентиля в связи с тем, что мощность потерь от обратных токов оказывается соизмеримой с мощностью потерь от тока прямого направления. Часто используется параметр — плотность обратного (или прямого) тока — величина тока, отнесенного к единице площади активной поверхности полупроводникового вентиля.

Одним из важнейших эксплуатационных параметров является срок службы вентиля. Наименьший срок службы имеют вентили с накаливаемым катодом (500—2000 час), что объясняется непрерывным износом (истощением) катода в процессе работы.

§ 3. ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕНТИЛИ (КЕНОТРОНЫ)

Кенотроном называют двухэлектродную электронную лампу. Она является наиболее простым электронным прибором. Поэтому целесообразно подробно рассмотреть ее устройство и работу, чтобы в дальнейшем облегчить изучение более сложных электронных приборов.

В электронных приборах используется поток свободных электронов, излучаемых раскаленным телом в безвоздушном пространстве (в вакууме) — термоэлектронная эмиссия.

Диод имеет два электрода: катод и анод. На рис. II-6 показано схематическое устройство диода. Внутри стеклянного баллона находятся изолированные друг от друга катод и анод. Катод накаливается от вспомогательного источника тока до температуры, при которой наступает термоэлектронная эмиссия ($1100 \div 1150^\circ \text{K}$ для оксидных катодов, $2200 \div 2500^\circ \text{K}$ — для вольфрамовых катодов). Катод представляет собой металлическую, например вольфрамовую, нить, по которой пропускают постоянный электрический ток от батареи накала или переменный ток от накальной обмотки трансформатора.

При пропускании тока через нить она накаливается и начинает излучать электроны.

Анод изготавливается из никеля, реже из молибдена или тантала в виде цилиндра, окружающего нить накала — катод. Из баллона, в котором помещены анод и катод, откачивают воздух до высокой степени вакуума (давление не превышает $10^{-6} - 10^{-7}$ мм рт. ст.). Благодаря этому в промежутке катод — анод обеспечивается чисто электронный характер проводимости, так как средняя длина свободного пробега электронов превышает расстояние между электродами, и встреча электрона с молекулами оставшихся в баллоне газов маловероятна — ионизации остатков газа не происходит.

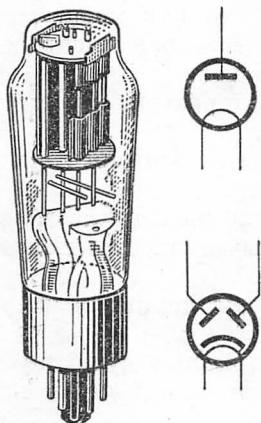


Рис. II-6. Устройство кенотрона 5Ц4С и условное обозначение одноанодного и двуханодного кенотронов

После откачки воздуха из лампы в ней сжигают геттер — таблетку магния или бария, который поглощает остатки газа и газы, содержащиеся в электродах, и тем самым повышают вакуум в лампе. Нагревают геттер в магнитном поле высокой частоты.

Однако, вылетая с раскаленного катода, только ничтожная часть электронов может достигнуть анода. Для того чтобы создать электронную проводимость на участке между катодом и анодом, к последнему необходимо подать положительный потенциал относительно катода. Для этого к аноду подключают анодную батарею (рис. II-7). Сплошными стрелками показано направление движения электронов в цепи накала (поток этих электронов образует ток накала), а пунктирными стрелками — по анодной цепи.

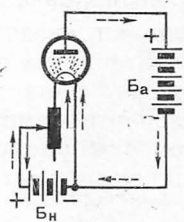


Рис. II-7. Направление движения электронов в двухэлектродной лампе

Условное направление электрического тока нужно было бы показать в противоположном направлении. Таким образом, мы видим, что двухэлектродная лампа имеет две электрические цепи: цепь накала и цепь анода (анодная цепь). У обеих цепей имеется общий участок — правая часть цепи накала, — по которому протекает как ток накала, так и анодный ток.

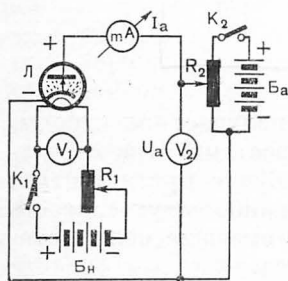


Рис. II-8. Схема для снятия характеристик с двухэлектродной лампы

Цепь накала — это обычная электрическая цепь, которая состоит из источника тока (батареи накала) и проводников электрического тока.

Анодная цепь состоит не только из источника тока (батареи анода), электрических проводников, но и имеет безвоздушное пространство между катодом и анодом.

Безвоздушный участок, имеющий место между катодом и анодом, в лампе, придает некоторым особым свойствам анодной цепи диода.

Исследование свойств диода производят, включив его по схеме рис. II-8, где L — диод; V_1 — вольтметр для измерения напряжения накала; V_2 — вольтметр для изме-

рения напряжения между катодом и анодом диода; mA — миллиамперметр, измеряющий величину анодного тока; B_n — батарея накала; B_a — анодная батарея. Реостатом R_1 можно изменять ток накала, а следовательно, температуру накала катода и величину тока эмиссии с катода. Потенциометр R_2 в цепи анода позволяет изменять потенциал анода относительно катода.

Установив с помощью реостата R_1 напряжение накала диода, соответствующее номинальному, указанному в паспорте лампы, начнем изменять напряжение, подводимое к аноду, и записывать показания вольтметра и миллиамперметра в анодной цепи в таблицу:

№ п/п	U_a	I_a
	вольты	миллиамперы
1	0	1
2	10	11
3	20	32
4	30	68
5	40	96
6	50	110
7	60	120
8	70	123

Раскаленный катод все время излучает электроны, которые вылетают с различными скоростями. При небольшом анодном напряжении к аноду будут притягиваться только те электроны, которые имели наибольшую скорость при вылете с катода. Электроны же, имевшие малую скорость при вылете, вернуться на катод.

Таким образом, если положительное анодное напряжение невелико, то большая часть электронов, излучаемых катодом, падает на него обратно. Но катод, будучи накаленным, продолжает непрерывно излучать электроны. В результате непрерывного излучения и обратного падения электронов на катод вокруг последнего образуется скопление электронов, окружающих катод, получившее название *пространственного заряда*.

Отрицательный пространственный заряд между катодом и анодом затрудняет притяжение электронов, вылетающих с катода к аноду, так как отталкивает их обратно на катод. Ввиду этого при малых анодных напряжениях

к аноду притягиваются лишь те электроны, которые находятся в верхних слоях пространственного заряда.

По мере увеличения анодного напряжения количество электронов, притягиваемых анодом, возрастает, возрастает и анодный ток. Одновременно ослабевает вредное действие пространственного заряда и анодный ток быстро возрастает. Однако при значительной величине анодного напряжения рост анодного тока замедляется, а потом совершенно прекращается, т. е. с какого-то момента увеличение анодного напряжения уже не вызывает увеличения анодного тока. Это явление объясняется тем, что величина тока эмиссии определяется количеством электронов, излучаемых с поверхности катода за единицу времени. Если все электроны, излученные катодом, достигают анода, то анодный ток равен току эмиссии. Обычно анодный ток всегда меньше

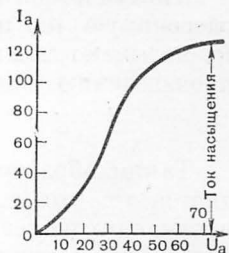


Рис. II-9. Характеристика двухэлектродной лампы

тока эмиссии. Если теперь по данным таблицы построить график зависимости анодного тока от напряжения на аноде при неизменном напряжении накала, то получим вольтамперную характеристику двухэлектродной лампы (рис. II-9).

Вольтамперная характеристика диода указывает на определенный закон изменения анодного тока в зависимости от изменения анодного напряжения. Из рассмотрения этого закона можно сделать вывод о том, что анодный ток проходит через диод только в том случае, когда анод имеет положительный потенциал по отношению к катоду, т. е. диод обладает односторонней проводимостью.

Ток в диоде может протекать только от анода к катоду.

Из курса электротехники известно, что если по сопротивлению протекает электрический ток, то на нем выделяется электрическая мощность, равная произведению силы тока на величину падения напряжения на этом сопротивлении.

Но мы знаем, что в анодной цепи имеется безвоздушный участок катод — анод, по которому протекает электрический ток. Так как безвоздушный участок не нагревается вследствие выделения на нем электрической мощности, то вся мощность выделяется на аноде лампы.

Физически это можно представить себе так: мощность, расходуемая анодной батареей на перемещение электронов в анодной цепи, почти полностью расходуется на перемещение электронов на участке катод — анод. В конце своего пути электроны приобретают большую кинетическую энергию и с большой силой бомбардируют анод, что приводит к его нагреванию.

Кинетическая энергия переходит в тепловую энергию, рассеянную на поверхности анода. Поэтому мощность P_a называют мощностью рассеяния на аноде. Она равна произведению анодного тока на анодное напряжение:

$$P_a = U_a \cdot I_a.$$

Таким образом, особенностью электронной лампы является то, что в отличие от проводника, где нагревание происходит по всей его длине, в электронной лампе местом потребления мощности и выделения тепла является только анод.

Мощность рассеяния на аноде — важнейший параметр электронной лампы. В паспорте лампы всегда указывается максимально допустимая мощность рассеяния на аноде. Дело в том, что при сильном нагревании из материала анода выделяются так называемые окклюдированные газы, — частицы газов, всегда имеющиеся в порах металла и которые не были удалены при откачке лампы. Выделение окклюдированных газов приводит к ухудшению вакуума внутри баллона лампы и возникает опасность ионизации этих газов. Ионизацию легко заметить по характерному фиолетовому свечению лампы. При этом может произойти резкое увеличение анодного тока, расплавление анода, разрушение катода и выход лампы из строя.

Температура и устройство катодов электронных ламп. Рассматривая зависимость анодного тока от анодного напряжения, мы говорили, что напряжение накала устанавливается в соответствии с указанным в паспорте лампы. Действительно, эмиссия электронов с катода начинается только при нагревании катода до какой-то определенной температуры и возрастает непропорционально с ее увеличением.

График зависимости излучения электронов от температуры для вольфрамового катода показан на рис. II-10, где по горизонтальной оси отложена температура катода, а по вертикальной оси — электронный ток эмиссии. Рабо-

чая температура вольфрамового катода 2400°C ; при более высокой вольфрам быстро испаряется и срок службы катода резко сокращается. Высокая рабочая температура вольфрамового катода и малая экономичность (отношение, показывающее, сколько миллиампер тока насыщения приходится на каждый ватт мощности, затрачиваемой на накал катода: $H = \frac{I_e}{P_n} \frac{\text{ма}}{\text{вт}}$) ограничивают применение вольфрамового катода для маломощных ламп.

Разработаны более экономичные оксидные катоды, которые получили широкое распространение. Оксидный катод устроен следующим образом: вольфрамовая проволока (кern) покрывается тонким слоем сплава меди с алюминием. Сверху слоя нанесен оксидный слой бария. Катоды с таким устройством обладают большим сроком службы (1500—2000 час) и большой экономичностью (80 ма/вт) при сравнительно низкой температуре катода ($650\text{—}850^{\circ}\text{C}$).

Существуют два способа накала катодов: прямой и косвенный, или подогревный.

Катод прямого накала представляет собой нить, которая накаливается проходящим по ней током накала. Катоды прямого накала имеют тот недостаток, что в большинстве случаев их невозможно питать переменным током. Изменения величины тока накала, как правило, влекут за собой изменения тока эмиссии и анодного тока, что при работе лампы в схеме усилителя приводит к появлению мешающего шума — фона переменного тока.

Подогревные катоды позволяют использовать переменный ток для питания накала ламп, который легко трансформируется и не требует дорогостоящих и громоздких батарей или аккумуляторов, как в случае питания постоянным током.

Устройство подогревных катодов показано на рис. II-11. Это либо фарфоровый цилиндр с двумя отверстиями, через которые продернута нить накала, либо нить накала, которая покрывается тестообразной массой из алундового порошка (алундовый катод) и высушивается. Сверху надевается катод, обычно оксидный. Подогрев-

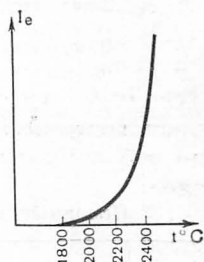


Рис. II-10. График зависимости излучения электронов от температуры для вольфрамового катода

ные катоды имеют большую поверхность и большой срок службы.

Маломощные диоды называют кенотронами и используют в технике звукового кино. Кенотроны чаще всего бывают двуханодными в виде лампы со стеклянным или металлическим баллоном, укрепленным на цоколе из изоляционного материала. Цоколь имеет металлические штырьки, которые вставляются в ламповую панель для соединения с элементами схемы.

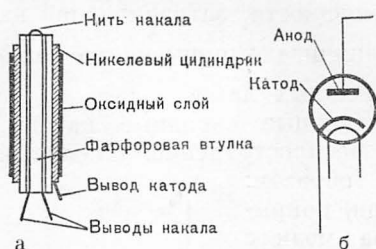


Рис. П-11. Устройство подогревных катодов (а) и условное обозначение подогревного катода (б)

Основные технические данные некоторых кенотронов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные технические данные некоторых кенотронов

Шифр	Накал			Число анодов	Максимальное значение прямого тока анода, ма	Среднее значение прямого тока анода, ма	Допустимое обратное напряжение, в	Среднее внутреннее сопротивление, ом	Срок службы, час
	тип накала	напряжение, в	ток, а						
1Ц1С	Прямой	0,7	0,185	1	5	0,5	15 000	7 500	500
5Ц3С	»	5,0	3,0	2	179×2	125×2	1 700	200	500
5Ц4С	Подогревный	5,0	2,0	2	375×2	62,5×2	1 350	150	500
6Ц4П	»	6,3	0,6	2	300×2	37,5×2	1 000	250	500
6Ц5С	»	6,3	0,6	2	300×2	37×2	1 375	500	500
30Ц6	»	30,0	0,3	2	500×2	60×2	500	150	500

§ 4. ИОННЫЕ ВЕНТИЛИ (ГАЗОТРОНЫ)

В отличие от электронных вентиляей, где электронная проводимость обусловлена наличием вакуума в лампе, в ионных вентилях электрический разряд происходит в парах ртути или инертном газе при пониженном давлении (0,1÷0,5 мм рт. ст.) внутри баллона.

Из большой группы ионных приборов остановимся на газотронах — двухэлектродных ионных вентилях с накаливаемым катодом.

Газотрон представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух и введено небольшое количество газа — аргона — или паров ртути. В баллоне помещены также накаливаемый вольфрамовый (или чаще всего оксидный) катод и никелевый анод (один или два) в виде диска. Двуханодный низковольтный газотрон ВГ-176 имеет катод прямого накала и плоские никелевые аноды.

Так же как и в электронной лампе, при нагревании катода происходит эмиссия электронов. Электроны, вылетевшие с катода, притягиваются анодом, если к нему приложено некоторое положительное анодное напряжение.

Рассмотрим типичную вольтамперную характеристику газотрона для прямого направления тока (рис. II-12). Будем постепенно, начиная от нуля, увеличивать напряжение на аноде.

При малых анодных напряжениях через газотрон протекает чисто электронный ток, не превышающий нескольких микроампер. Пока напряжение на аноде невелико, скорости электронов также невелики, и электроны обладают малой кинетической энергией. Столкновение такого электрона с молекулой газа, имеющей значительно бóльшую массу, носит характер упругого удара. Электрон при этом теряет свою кинетическую энергию и изменяет направление движения (отскакивает от молекулы), а молекула газа только незначительно изменяет свою скорость. Под действием электрического поля анода электрон снова начинает двигаться к аноду, постепенно увеличивая скорость. Пролетев некоторое расстояние, электрон вновь сталкивается с молекулой газа и опять теряет при этом скорость и т. д.

Таким образом, пока электрон достигнет анода, он многократно сталкивается с молекулами газа, но так как скорость его невелика, он всякий раз не может расщепить молекулу газа и ионизация не происходит. Этому процессу соответствует участок I вольтамперной характеристики.

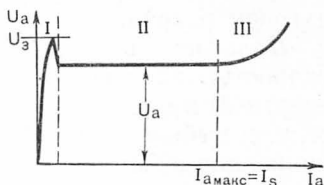


Рис. II-12. Вольтамперная характеристика газотрона для прямого направления тока

Здесь ток невелик, так как вокруг катода образуется электронное облачко — пространственный заряд, который препятствует потоку электронов достичь анода.

Однако при повышении анодного напряжения скорость электронов * возрастает, растет кинетическая энергия электрона и при некотором значении анодного напряжения, называемого *напряжением зажигания* ($U_3 = 20 \div 25$ в для газотрона), в приборе наступает ионизация и возникает дуговой разряд.

Ионизация возникает тогда, когда летящий с большой скоростью электрон (обладающий большой кинетической энергией) при столкновении с молекулой газа расщепляет ее, т. е. выбивает из этой молекулы электрон. После начала ионизации в баллоне лампы между анодом и катодом образуется большое количество положительных ионов, что резко меняет характер прохождения тока в газотроне.

Остановимся на этой части процесса несколько подробнее. С наступлением ионизации электроны продолжают притягиваться анодом, а положительные ионы — катодом. Но мы знаем, что масса электрона значительно меньше массы иона. Вследствие неравенства масс электрона и иона (при равенстве электрических сил, действующих на них в промежутке катод — анод) электроны будут иметь значительно большую скорость и достигнут анода быстрее, чем ионы катода. Благодаря этому вблизи катода образуется облачко положительных ионов, которое компенсирует своим зарядом отрицательный потенциал пространственного заряда и нейтрализует его.

Так, положительные ионы устраняют вредное влияние пространственного заряда, являющегося главной причиной большого падения напряжения в кенотроне. Таким образом, по сравнению с кенотроном газотрон имеет меньшую величину внутреннего сопротивления и, следовательно, меньшую величину падения напряжения внутри лампы.

Катод газотрона во время работы окружен как электронами, так и ионами, которые в совокупности образуют электронно-ионную плазму. Плазма электрически нейтральна и является хорошим проводником тока, поэтому падение напряжения в газотроне становится весьма малым ($13 \div 18$ в).

* Скорость электрона, движущегося в электрическом поле, в конце пути округленно равна $v \cong 600 \sqrt{U_a}$, т. е. зависит только от анодного напряжения. Удобно выражать ее в вольтах.

Рабочий участок характеристики II располагается практически горизонтально. После достижения нормального тока эмиссии катода I_s характеристика приобретает подъем (участок III). Падение напряжения на газотроне растет при увеличении силы тока, что происходит за счет усиленной бомбардировки катода ионами и может привести к разрушению катода. Отсюда следует, что ток, проходящий через газотрон, не должен превышать определенной величины $I_{a \text{ макс}} = I_s$, (I_s — ток насыщения).

Таким образом, введение небольшого количества газа или паров ртути в баллон лампы позволяет снизить внутреннее сопротивление, а вместе с тем и падение напряжения на участке катод — анод. Использование ионной проводимости в газоразрядной лампе позволяет получить значительную силу тока при небольшом напряжении. В этом и заключается основное принципиальное отличие газотронов от электронных ламп.

Важно знать, что происходит в газотроне, если к аноду приложено отрицательное напряжение по отношению к катоду, допустим, в отрицательный полупериод при использовании газотрона в схеме выпрямителя.

В момент появления на аноде отрицательного напряжения промежуток катод — анод еще заполнен плазмой: к аноду будут притягиваться положительные ионы, а к катоду — электроны. Возникнет обратный ток, т. е. ток, протекающий в обратном направлении. Это вредное явление. При конструировании газотронов путем уменьшения площади анода, подбора давления газа в баллоне лампы и т. п. добиваются того, чтобы величина обратного тока была невелика.

Недопустима большая величина обратного напряжения, так как в этом случае также возможно возникновение ионизации — *обратное зажигание*. Ток, проходящий через лампу при обратном зажигании, значительно превышает допустимую величину и газотрон выходит из строя.

Газотроны характеризуются следующими основными параметрами:

1) наибольшее (амплитудное) допустимое значение обратного напряжения $U_{\text{обр}}$ показывает, какое напряжение можно приложить к газотрону в непроводящую часть периода, не вызывая обратного зажигания;

2) наибольшее (амплитудное) допустимое значение анодного тока $I_{a \text{ макс}}$ показывает, какой ток можно пропускать через газотрон без порчи катода;

3) наибольшее значение выпрямленного тока I_{a0} показывает величину постоянной составляющей выпрямленного тока, которую можно получить от газотрона без нарушения его нормальной работы;

4) падение напряжения на газотроне U_a показывает разность потенциалов между анодом и катодом во время работы в полупериод проводимости;

5) потенциал зажигания U_z показывает величину напряжения, необходимого для возникновения зажигания. Кроме того, указываются напряжение накала U_n и ток накала I_n .



Рис. II-13.
Условное обозначение газотрона

В звуковоспроизводящей аппаратуре киноустановок находят применение низковольтные газотронные выпрямители с газотроном ВГ-176, заполненным аргоном (рис. II-13). Газотрон ВГ-176 (его иногда называют тунгаром) характеризуется следующими параметрами: $U_n=2,5$ в, $I_n=11$ а, время предварительного разогрева 0,5 мин; $I_{a0}=3a \times 2$; $I_{a \text{ макс}}=9$ а; $U_{\text{обр}}=150$ в; $U_a=14$ в; $U_z=15,7$ в. Так как в одном баллоне размещены два анода, то максимальное переменное напряжение между анодами ограничено 110 в. При таком режиме от выпрямителя можно получить постоянное напряжение 35—40 в (в зависимости от нагрузки).

Заметим, что при использовании газотрона в схеме выпрямления очень важно не допускать обратного зажигания. Поэтому, как мы увидим далее, нельзя нагружать газотронный выпрямитель на фильтр, начинающийся емкостью. Фильтр газотронного выпрямителя всегда начинается с дросселя.

Неоновая лампа представляет собой прибор с ионной проводимостью. В отличие от газотрона — прибора с горячим катодом — неоновая лампа является ионным прибором с холодным катодом (так называемый прибор тлеющего разряда). Лампа используется в качестве индикатора в ряде выпрямительных и усилительных устройств звукового кино.

Устройство и условное обозначение неоновой лампы показаны на рис. II-14. Стекланный баллон, из которого предварительно выкачан воздух, заполнен разреженным инертным газом — неоном. В баллоне помещены два электрода, выводы от которых присоединены к цоколю лампы. Лампа работает следующим образом: при подаче

напряжения до момента зажигания ток через лампу практически равен нулю, лампа при этом не светится. Дальнейшее увеличение напряжения до напряжения зажигания приводит к тому, что лампа вспыхивает, и ток через нее скачком возрастает.

В дальнейшем увеличение тока через лампу (путем уменьшения внешнего сопротивления нагрузки) не вызывает заметного изменения напряжения на электродах лампы. Но если увеличивать ток через лампу, то тлеющий разряд перейдет в дуговой, причем электроды могут расплавиться. Поэтому последовательно с лампой включают ограничительное сопротивление. Неоновая лампа работает как безынерционный прибор в широкой полосе частот — от нуля до $5000 \div 6000$ *гц*. При более высоких частотах начинает сказываться инерционность лампы.

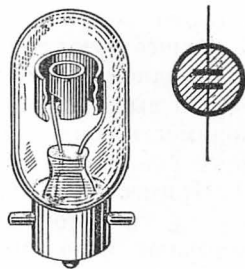


Рис. II-14. Устройство и условное обозначение неоновой лампы

§ 5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЕНТИЛИ

Рассматривая виды проводимости, мы установили, что в чистом полупроводнике имеется как электронная проводимость, обусловленная электронами, попавшими в зону свободных уровней, так и дырочная, обусловленная перемещением дырки. Образование пар электрон — дырка сопровождается их рекомбинацией, т. е. имеет место состояние динамического равновесия. Общее количество носителей тока — дырок и электронов — одинаково. Однако в связи со значительной шириной зоны запретных уровней энергии число (концентрация) этих носителей невелико и проводимость у чистых полупроводников не намного больше, чем у диэлектриков.

Проводимость полупроводника может существенно изменяться под влиянием даже ничтожных (миллионных) долей примесей других веществ. Так, для чистого германия ширина запрещенной зоны может быть уменьшена почти в 15 раз прибавлением малой доли примеси.

Современные полупроводниковые приборы основаны на применении *примесных полупроводников*, которые создаются путем введения атомов соответствующим образом подобранной примеси в кристаллическую решетку естественного полупроводника.

Существуют два вида примесей: вызывающие появление избыточной электронной проводимости (мышьяк, сурьма, бор) и вызывающие появление избыточной дырочной проводимости (индий или галлий). Первые из примесей называют *донорными*, а вторые — *акцепторными*.

Примесный полупроводник с проводимостью, обусловленной избыточными электронами в свободной зоне, называют *n*-полупроводником (*n* — от английского слова *negative* — отрицательный), или электронным полупроводником.

Полупроводники с акцепторными примесями, обладающие дырочной проводимостью, называются полупроводниками типа *p* (от английского слова *positive* — положительный).

Принято называть избыточные электроны *n*-полупроводника и избыточные дырки *p*-полупроводника основными носителями зарядов, которые обуславливают хорошую электропроводность. При этом не следует забывать, что у *n*-проводников имеется и дырочная проводимость, так же как у *p*-проводника — электронная проводимость, но они являются не основными и за их счет в полупроводниковых приборах возникает обратный ток.

Электронно-дырочный переход и выпрямительные свойства полупроводника. Замечательное свойство полупроводников, имеющих большое практическое значение для выпрямления переменного тока, возникает при соприкосновении полупроводников типа *p* и типа *n*. На границе раздела двух указанных типов полупроводников образуется так называемый *запорный слой*.

Если полупроводники типа *n* и типа *p* соприкасаются, то избыточные электроны из области *n* диффундируют (проникают) в область *p*, оставляя в пограничном слое *n*-полупроводника положительный пространственный заряд ионизированных и неподвижных примесных атомов доноров. Этот пространственный заряд отталкивает дырки *p*-полупроводника, находящиеся вблизи от границы раздела.

Таким же путем вследствие диффузии избыточных дырок из *p*-области в *n*-область ионами акцептора создается

отрицательный пространственный заряд вблизи границы в p -полупроводнике, который отталкивает электроны n -полупроводника.

На рис. II-15, *a* показана граница раздела двух типов полупроводников и знаками плюс и минус показаны пространственные заряды вблизи границы, образующие запирающий слой. Этот слой или поле препятствует дальнейшей диффузии электронов и дырок из одного полупроводника в другой. Толщина запирающего слоя составляет 10^{-15} см, область же получила название электронно-дырочного перехода, или $p-n$ -перехода.

Если к $p-n$ -переходу приложить внешнее напряжение от батареи так, чтобы p -полупроводник соединить с положительным полюсом батареи, то дырки, отталкиваясь, получают дополнительную энергию и устремляются в направлении области n , где подключен отрицательный полюс батареи. Электроны из области n , также получившие дополнительную энергию, будут устремляться в направлении области p . Действие батареи ослабляет действие пограничных объемных зарядов.

Таким образом, основные носители заряда легко могут перемещаться и электропроводность контактного слоя между n - и p -полупроводником оказывается хорошей. По цепи потечет ток; сопротивление перехода в этом случае мало. Если напряжение батареи увеличивается, то ток, протекающий по цепи, также увеличивается до тех пор, пока из-за обильного выделения тепла $p-n$ -переход не разрушится.

Если изменить полярность подключения внешней батареи, присоединив плюс источника к области n , а минус — к области p , мы увеличим толщину запирающего слоя.

В этом случае условия перехода электронов и дырок из одной области в другую резко ухудшаются и основные носители зарядов не могут создавать ток.

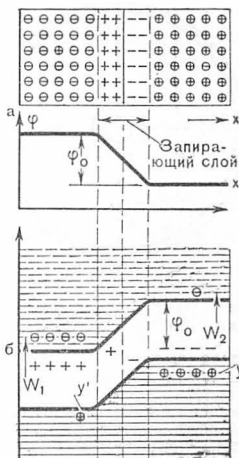


Рис. II-15. Граница раздела двух типов полупроводников

Мы уже говорили, что неосновные носители зарядов создают так называемый обратный ток.

Таким образом, контактный переход между полупроводниками типа p и n обладает различным сопротивлением,

в зависимости от направления тока, т. е. обладает вентильными свойствами.

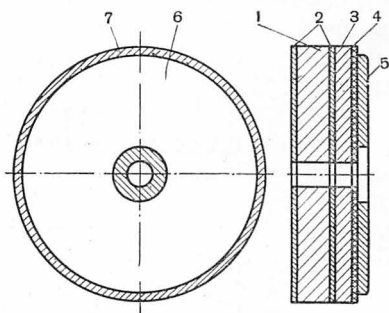


Рис. II-16. Устройство селенового выпрямительного элемента, изготовленного на стальной основе: 1 — металлическая основа (анод); 2 — тонкий слой никелевого покрытия; 3 — слой кристаллического селена; 4 — место запорного слоя (выпрямляющего слоя); 5 — катодный металлический слой (катод); 6 — активная поверхность, покрытая катодным сплавом; 7 — селеновый слой, не покрытый катодным сплавом

Устройство и характеристика селеновых элементов. Для выпрямительных устройств используются полупроводниковые элементы.

Селен — элемент темно-серого цвета. В аморфном (стекловидном) состоянии хрупок, как стекло. Температура плавления аморфного селена около 90°C , а кристаллического — 217°C . Добывается селен в основном из шлаков после

электролиза при получении чистой рафинированной меди гальваническим путем. Селен в аморфном виде является хорошим изолятором, а в кристаллическом виде — полупроводником. Кристаллический селен обладает дырочной проводимостью (типа p).

Селеновый выпрямительный элемент, схематическое устройство которого показано на рис. II-16 состоит из алюминиевой или стальной основы (от основы зависит технология изготовления элемента), покрытой тонким слоем кристаллического селена, поверх которого нанесен легкоплавкий катодный сплав, состоящий из кадмия, олова и висмута.

В слое селена, граничащего с катодным сплавом, образуется (в результате специальной термической обработки и электрической формовки) селенистый кадмий, являющийся электронным проводником типа n . Таким образом, в элементе образуется $p-n$ -переход, и он хорошо пропускает ток в направлении от основания к катодному сплаву (прямое направление тока) и плохо — в обратном направлении.

Выпрямительные пластины круглые диаметром 5 и 7,2 мм в виде «таблет» — для выпрямителей малых токов и диаметром 18, 25, 35, 45, 86 и 100 мм — для больших токов, а также прямоугольные 40×40, 60×60, 75×75, 90×90, 100×100, 100×200, 100×300, 100×400 мм — для мощных выпрямительных устройств.

Толщина диска или пластины составляет округленно 1—1,1 мм.

Типовая вольтамперная характеристика селенового элемента показана на рис. II-17, где по горизонтальной оси отложено прямое и обратное напряжение, а по вертикальной оси — плотность тока в прямом и обратном направлении.

Селеновые элементы среднего качества выдерживают запорное напряжение 20÷25 в (при плотности обратного тока 4 ма на 1 см²). При плотности прямого тока 40 ма/см² среднее падение напряжения на элементе составляет от 0,8 до 1,2 в.



Рис. II-18. Схема процесса выпрямления тока селеновым элементом: 1 — вольтамперная характеристика при протекании тока в прямом направлении; 2 — вольтамперная характеристика при протекании тока в обратном направлении; 3 — синусоида переменного напряжения; 4 — график выпрямленного тока

Отдельные селеновые элементы собираются в селеновые столбы на стальной изолированной шпильке. Между ними посредством металлических дистанционных шайб оставляется промежуток от 3 до 10 мм для охлаждения.

Ток со стороны катодного сплава подводится через пружинящие шайбы—звездочки. Схема процесса выпрямления тока селеновым элементом показана на рис. II-18.

На выходе выпрямителя, собранного по мостовой схеме с одним последовательно включенным селеновым эле-

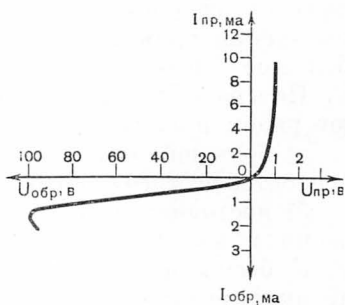


Рис. II-17. Типовая вольтамперная характеристика селенового элемента

ментом в плече, можно получить напряжение в среднем $20 \div 22$ в при однофазном выпрямлении. Если нужно выпрямлять большие токи, то каждое плечо моста собирается из нескольких ветвей, соединенных между собой параллельно, с тем расчетом, чтобы плотность тока не превышала допустимой для селенового элемента величины. В случае получения больших напряжений в каждое плечо моста большое число элементов включается последовательно.

По сравнению с лампами селеновые элементы обладают рядом преимуществ:

а) большой механической прочностью, надежностью в работе, не требуют наблюдения и ухода;

б) постоянно готовы к действию для мгновенного включения в работу;

в) бесшумны в работе и не создают ни электрических, ни акустических помех;

г) имеют высокий к. п. д., долговечны и могут работать без замены или ремонта более 25 000 час;

д) имеют малые габариты и работают при температуре окружающей среды в диапазоне $+40 \div -60^\circ \text{C}$.

К недостаткам селеновых элементов относятся:

а) чувствительность к влаге, которая, проникая через защитную краску, разрушает запорный слой, вызывает коррозию стали и, как следствие, самозакорачивание элемента и вывод его из строя;

б) потеря своих вентиляльных свойств при долгом хранении или простоях; расформированные элементы могут быть восстановлены последующей электрической формовкой;

в) чувствительность к перенапряжениям и повышенным токам нагрузки, при которых они могут пробиваться или перегреваться более нормы;

г) старение — увеличение сопротивления прямому току в течение первых 1000—1500 час работы.

Устройство и характеристики меднозакисных элементов. Меднозакисный (купроксный) выпрямительный элемент представляет собой диск или прямоугольную пластину из чистой (рафинированной) меди, на поверхности которого путем термической обработки создается слой закиси меди. На этот слой наносится серебряный верхний электрод. Закись меди является полупроводником с дырочной проводимостью, но в слое, непосредственно примыкающем к меди, легко отдающей электроны, образуется закись меди с электронной проводимостью, т. е. полупро-

водник типа *n*. Таким образом, в элементе образуется *p-n*-переход, хорошо пропускающий ток от закиси меди (анод) к меди (катод).

Меднозакисные элементы имеют обратное напряжение 6—8 в, плотность тока в прямом направлении 30—60 ма/см². Допустимая рабочая температура 45—55° С. Меднозакисные элементы подвержены старению, но не требуют формовки. Они имеют ограниченное применение в измерительных приборах. Изготавливаются на выпрямленное напряжение от 1,2 до 300 в и ток от 1 ма до 80 а.

Устройство и характеристики германиевых элементов.

Германий представляет собой твердый хрупкий материал серебристо-серого цвета с удельным весом 5,32 и температурой плавления 958° С. Он принадлежит к группе редких элементов и добывается как побочный продукт при производстве кокса, серебра и цинка.

Для изготовления германиевых выпрямительных элементов применяется сверхчистый монокристаллический (крупные кристаллы чистых материалов) германий, обладающий электронной проводимостью, с ничтожной посторонней примесью.

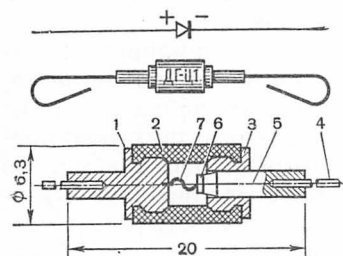


Рис. П-9. 1 Устройство германиевого диода с точечным контактом: 1 — металлические фланцы; 2 — керамическая втулка; 4 — вывод; 5 — кристаллодержатель; 6 — кристалл германия; 7 — вольфрамовая пружинка

Сверхчистый полупроводниковый германий получают в виде круглых стержней, из которых режут тонкие (0,4—0,5 мм) круглые пластинки различных диаметров и размеров, начиная с 1 мм — для диодов типа ДГ-Ц и кончая диаметром 30 мм — для мощных выпрямительных диодов.

Германиевые элементы по устройству разделяются на вентили с *точечным* или *плоскостным* контактом.

Устройство германиевого диода с точечным контактом показано на рис. П-19.

В вентилях с точечным контактом к кристаллу германия прикасается или приваривается вольфрамовая пружинка с заостренным концом. Кристалл германия является электронным полупроводником, а в месте соприкосновения с металлом образуется участок с дырочной проводимостью.

В вентилях с точечным контактом к кристаллу германия прикасается или приваривается вольфрамовая пружинка с заостренным концом. Кристалл германия является электронным полупроводником, а в месте соприкосновения с металлом образуется участок с дырочной проводимостью.

Пластика кристаллического германия типа *n* размером $1,5 \times 0,5 \times 1,5$ мм покрывается с одной стороны тонким слоем металла и припаивается к металлическому штырьку диода. После припайки наружная поверхность германия тщательно шлифуется, промывается и травится в особом химическом реактиве, способствующем образованию на поверхности электронного слоя. Пружина из вольфрама закрепляется во втором штырьке диода.

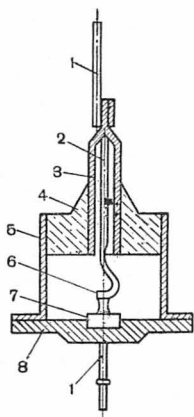


Рис. II-20. Конструкция плоскостного диода: 1 — наружный вывод; 2 — внутренний вывод; 3 — трубка; 4 — изолятор; 5 — корпус; 6 — электрод; 7 — кристалл германия; 8 — кристаллодержатель

Особенностью работы германиевого вентиля с точечным контактом является то, что вентильный эффект наблюдается не только на границе раздела двух полупроводников с разными проводниками, но также на поверхности однородного полупроводника, если поверхность соответствующим образом обработана.

Диоды, изготовленные таким способом, рассчитаны только на небольшую силу тока.

Для получения выпрямленного тока от нескольких десятых долей ампера до сотен ампер применяются вентили с плоскостным контактом.

На поверхность пластики германия наносится некоторое количество примеси, например капля индия, диффундирующей затем в толщу германия при нагревании. Германий с примесью индия обладает дырочной проводимостью, чистый германий — электронной.

Конструкция плоскостного диода показана на рис. II-20. К кристаллодержателю припаяна пластинка германия площадью 1×1 мм² и толщиной 0,3—0,4 мм. Индиевая капля, образующая переход, имеет диаметр 0,8 мм. Металлические проводники для припайки диода в схеме расположены на оси. Диоды этого типа рассчитаны на выпрямленный ток 300 ма при падении напряжения на диоде 0,5 в и для обратных амплитудных значений напряжений от 50 до 400 в.

Параметры некоторых плоскостных германиевых вентилях приведены в табл. 4.

Помимо германиевых применяются и кремниевые вентили, аналогичные по устройству. Кремниевые диоды по-

Таблица 4

Наименование величин	Типы вентиляей										
	ДГ-Ц21, Д7А	ДГ-Ц22, Д7Б	ДГ-Ц23, Д7В	ДГ-Ц24, Д7Г	ДГ-Ц25, Д7Д	ДГ-Ц27, Д7Е	ДГ-Ц27, Д7Ж	Д-302	Д-303	Д-304	Д-305
Амплитуда обратного напряжения, <i>в</i> . . .	50	100	150	200	300	350	400	200	150	100	50
Среднее значение прямого тока, <i>а</i>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1 *	0,1 *	0,1 *	1	3	5	10
Среднее значение прямого падения напряжения на венти- ле, <i>в</i>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,25	0,3	0,3	0,3
Среднее значение об- ратного тока, <i>ма</i> .	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	1	2	3	5

* Для вентиляей Д7Д, Д7Е, Д7Ж допустимый прямой ток составляет 0,3 *а*.

звоняют работать при высоких температурах (до +200° С). Прямое падение напряжения в кремниевых диодах составляет 1,5—2 *в*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается природа электропроводности вещества?
2. Какие виды проводимости вы знаете?
3. Что понимается под дырочной проводимостью?
4. Какие приборы называют электрическими вентилями?
5. На какие группы разделяются вентили по характеру проводимости?
6. Объясните назначение катода и анода электронного вентиля.
7. Какой параметр характеризует электрическую прочность вентиля?
8. Объясните принципиальное отличие анодной цепи электронной лампы от цепи накала.
9. При каких условиях возможно прохождение анодного тока через лампу?
10. Как возникает пространственный заряд в электронной лампе?
11. В чем проявляется влияние пространственного заряда на величину анодного тока?
12. Почему при малых анодных напряжениях анодный ток возрастает медленно, при дальнейшем увеличении анодного напряжения анодный ток возрастает быстрее, а при больших анодных напряжениях рост тока прекращается?
13. Как объяснить наличие тока насыщения?

14. Чем можно объяснить сильное нагревание анода при протекании анодного тока?
15. Что характеризует мощность рассеяния на аноде?
16. Что понимается под величиной максимально допустимой мощности, рассеиваемой на аноде, и каково практическое значение этой величины?
17. Какой внешний признак свидетельствует об ионизации в лампе?
18. Укажите преимущества и недостатки катодов прямого и косвенного накала.
19. Каково назначение газа в баллоне газотрона?
20. Отчего может происходить обратное зажигание газотрона?
21. Что происходит в газотроне, если анодный ток газотрона больше допустимой величины?
22. Как влияют примеси на проводимость полупроводника?
23. Объясните природу возникновения запирающего слоя на границе раздела при соприкосновении полупроводников типа n и типа p .
24. Что называется электронно-дырочным переходом?
25. В чем состоит основное свойство электронно-дырочного перехода?
26. В силу каких причин возникает опасность разрушения электронно-дырочного перехода?
27. Какими параметрами характеризуется полупроводниковый вентиль?
28. Какие химические элементы применяются для изготовления полупроводниковых вентиляей?
29. Как устроен точечный германиевый диод?

ВЫПРЯМИТЕЛИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

§ 1. ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Рассмотрим, как свойство односторонней проводимости вентилей используют для преобразования переменного однофазного тока в постоянный. Устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный, называется *выпрямителем* и состоит из трех основных частей (рис. III-1):

I — трансформатора, служащего для преобразования величины напряжения;

II — вентилей (одного или нескольких), посредством которого переменный ток преобразуется в пульсирующий;

III — фильтра, предназначенного для сглаживания пульсаций, т. е. ослабления переменной составляющей выпрямленного тока.

Вход выпрямителя подключается в сеть переменного тока, а к выходу выпрямителя подключается потребитель постоянного тока, который называют *нагрузкой*. Нагрузкой могут служить самые разнообразные приборы: в простейшем случае — активное сопротивление, например лампа накаливания, чаще — электронная лампа и т. п.

Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис. III-2.

Первичная обмотка трансформатора Tp включается в сеть переменного тока. Во вторичную обмотку последовательно включены вентиль B и нагрузка. Вентиль вклю-

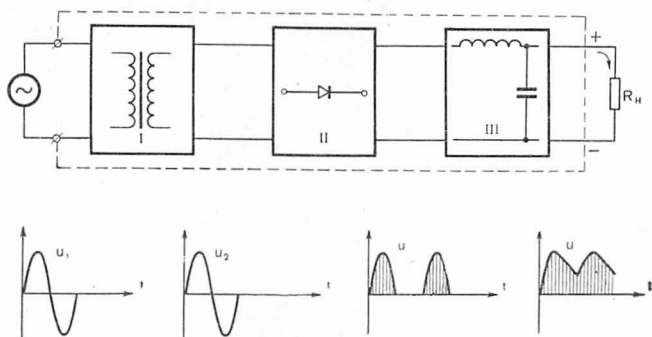


Рис. III-1. Структурная схема выпрямительного устройства и графики его работы

чают чаще всего катодом к нагрузке, а анодом — к обмотке трансформатора. В простейшем случае нагрузкой служит активное сопротивление R .

Когда в цепи действует переменное напряжение, на вторичной обмотке трансформатора индуцируется переменная э. д. с. e_2 , под действием которой ток в цепи может проходить только в течение тех полупериодов, когда анод вентиля имеет положительный потенциал относительно катода.

Вентиль пропускает ток в первый полупериод и не пропускает тока во второй, когда потенциал анода становится отрицательным. Благодаря этому ток во вторичной цепи протекает *только в одном направлении*, но с перерывами. Кроме того, величина тока в течение полупериода изменяется по величине от нуля до максимального значения $I_{в\ макс}$, а затем опять падает до нуля.

Ток, который протекает в одном направлении, но изменяется по величине, называется *пульсирующим* (рис. III-2, z).

Для практики важно знать среднее значение выпрямленного тока $I_{в}$, протекающего по сопротивлению нагрузки за период.

Оказывается, что при однополупериодном выпрямлении среднее значение выпрямленного тока I_B в 3,14 раза меньше максимального:

$$I_B = \frac{1}{\pi} \cdot I_{B \text{ макс}} = \frac{1}{3,14} \cdot I_{B \text{ макс}}$$

Среднее значение выпрямленного напряжения также в 3,14 раза меньше максимального.

Мощность выпрямителя определяется как произведение средних значений напряжения и тока.

Для характеристики схемы выпрямления имеет важное значение максимальное обратное напряжение на вентиле. Оно достигает амплитуды э. д. с. вторичной обмотки трансформатора (рис. III-2, б) и, следовательно, более чем в 3,14 раза выше среднего значения напряжения на нагрузке.

Без знания этих соотношений и величин нельзя подобрать необходимый вентиль для выпрямителя, работающего на заданную нагрузку.

При использовании схемы однополупериодного выпрямления вентиль должен допускать амплитудное значение тока и максимальное напряжение, по крайней мере в 3,14 раза превышающее средние значения тока и напряжения на нагрузке.

Из рис. III-2, в и г видно также, что частота пульсаций напряжений на вентиле и на нагрузке равна частоте сети, т. е. 50 гц.

Если обозначить отношение величины максимального значения первой гармоники к среднему значению выпрямленного напряжения коэффициентом пульсаций, то для схемы однополупериодного выпрямления эти относительные пульсации составляют 157%.

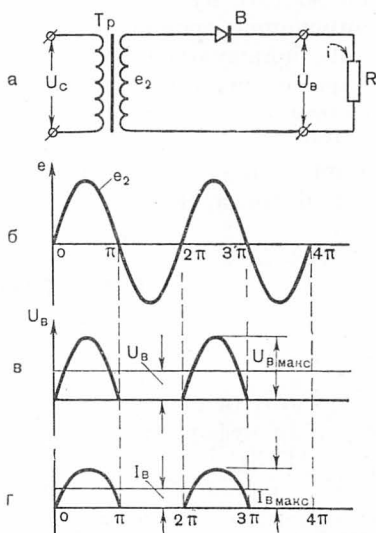


Рис. III-2. Схема (а) однополупериодного выпрямителя и графики (б, в, г), иллюстрирующие его работу

Из рассмотрения работы такого выпрямителя нетрудно видеть, что в схеме плохо используется трансформатор, так как ток во вторичной обмотке протекает в течение лишь одного полупериода за период.

Таким образом, однополупериодная схема выпрямления имеет ряд принципиальных недостатков:

- 1) низкое использование трансформатора;
- 2) большую величину относительных пульсаций выпрямленного напряжения и тока, составляющую 157% при частоте пульсаций, равной частоте сети, что требует применения громоздких фильтров для их сглаживания;
- 3) большую величину обратного напряжения на вентиле, в три с лишним раза превышающего среднее значение выпрямленного напряжения.

Все эти недостатки ограничивают использование схем однополупериодного выпрямления, и они применяются только тогда, когда потребляемый ток очень мал.

§ 2. ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Рассмотрим схему двухполупериодного выпрямителя с выводом нулевой точки от вторичной обмотки трансформатора и графики, поясняющие его работу (рис. III-3).

Первичная обмотка трансформатора включается в сеть однофазного переменного тока. Вторичная обмотка имеет вывод от средней точки и благодаря этому создает две э. д. с. равной величины, но противоположные по фазе.

Потенциал средней точки равен нулю, почему и сама точка получила название нулевой.

В этой схеме используются два вентиля. Нагрузка — активное сопротивление — включена между катодами вентиля и нулевой точкой. Когда в цепи действует переменное напряжение, вентили B_1 и B_2 работают поочередно: в течение первого полупериода положительный потенциал имеет анод вентиля B_1 , ток проходит через этот вентиль и сопротивление нагрузки к нулевой точке O трансформатора и далее через верхнюю половину его обмотки к аноду вентиля — цепь замкнута.

В течение второго полупериода положительный потенциал возникает на аноде вентиля B_2 и через этот вентиль и сопротивление нагрузки в том же самом направлении —

в направлении к нулевой точке трансформатора. После нулевой точки ток протекает по второй половине обмотки трансформатора к аноду вентиля B_2 .

Особенностью двухполупериодного выпрямителя является то, что выпрямленный ток проходит в нем в течение обоих полупериодов переменного тока и каждая половина вторичной обмотки трансформатора нагружена током только половину периода.

Среднее значение выпрямленного тока I_B , протекающего по сопротивлению нагрузки за период, равно:

$$I_B = \frac{2}{\pi} \cdot I_{B \text{ макс}} = \frac{2}{3,14} \cdot I_{B \text{ макс}}$$

т. е. величина выпрямленного тока в два раза больше по сравнению с выпрямленным током однополупериодного выпрямителя при одинаковых амплитудных значениях тока.

Среднее значение выпрямленного напряжения также в 1,57 раза $\left(\frac{2}{3,14}\right)$ меньше максимального.

Величина обратного напряжения на вентиле в двухполупериодном выпрямителе может быть найдена из рассмотрения рис. III-3, б и близка к величине, в два раза превышающей амплитуду фазной э. д. с. вторичной обмотки. Обратное напряжение на вентиле более чем в 3,14 раза превышает среднее значение выпрямленного напряжения.

В схеме двухполупериодного выпрямления лучше используется трансформатор, так как в течение периода то по одной половине, то по второй протекает ток.

Из графиков рис. III-3, д видно, что частота пульсаций выпрямленного тока в два раза выше частоты переменного тока питающей сети. Относительные пульсации при двухполупериодном выпрямлении составляют 67%, что зна-

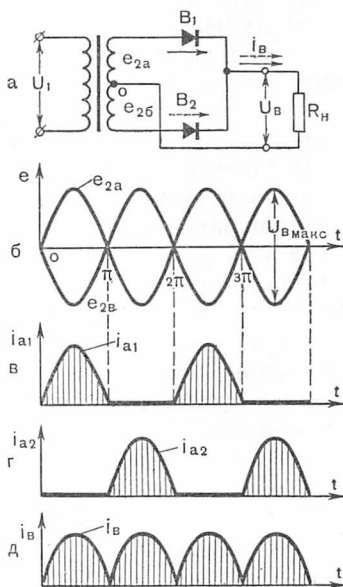


Рис. III-3. Схема (а) и графики (б, в, г, д), иллюстрирующие работу двухполупериодного выпрямителя с выводом нулевой точки

чительно упрощает создание сглаживающих фильтров по сравнению с фильтрами для однополупериодных схем выпрямления.

Таким образом, двухполупериодная схема имеет по сравнению с однополупериодной схемой выпрямления следующие преимущества:

- 1) лучшее использование трансформатора;
- 2) меньшую величину и в два раза более высокую частоту пульсаций выпрямленного напряжения;
- 3) в два раза большую величину среднего выпрямленного тока при одинаковом его амплитудном значении.

В отношении величины обратного напряжения на вентиле однополупериодная схема и схема с нулевым выводом равноценны, так как в обеих обратное напряжение в 3,14 раза больше среднего значения выпрямленного напряжения.

В двухполупериодной схеме выпрямления с нулевым выводом обычно используются двуханодные вентили: кенотроны, низковольтные газотроны и др. Двухполупериодная схема выпрямления является наиболее распространенной.

§ 3. МОСТОВАЯ СХЕМА ВЫПРЯМЛЕНИЯ

Помимо схемы двухполупериодного выпрямителя с выводом нулевой точки от вторичной обмотки трансформатора двухполупериодное выпрямление можно получить, используя мостовую схему.

Рассмотрим однофазную мостовую схему и графики, поясняющие работу такого выпрямителя (рис. III-4).

Первичная обмотка трансформатора включается в сеть переменного тока. К вторичной обмотке подключается мост, составленный из четырех вентилях, причем э. д. с., развиваемая вторичной обмоткой трансформатора, воздействует на диагональ моста $a - в$, а нагрузка включается в другой его диагонали — между точкой соединения катодов двух вентилях (положительный полюс выпрямителя) и точкой соединения анодов двух других вентилях (отрицательный полюс).

Путь тока во вторичной цепи показан на схеме стрелками: сплошной — за один и пунктирной — за другой полупериод. Как видно из схемы, вентили пропускают ток попарно: при положительном потенциале точки a ток

проводят вентили B_1 и B_3 , включенные последовательно, а в следующий полупериод работают вентили B_2 и B_4

Среднее значение выпрямленного напряжения и тока взятых по отношению к максимальным, вычисляется, как и для схемы с выводом нулевой точки.

Обратное напряжение на вентиле в мостовой схеме при холостом ходе (при наихудших условиях) достигает амплитуды э.д.с. вторичной обмотки трансформатора. В этой схеме полностью используется трансформатор, так как по вторичной обмотке ток проходит в течение обоих полупериодов, причем кривая тока синусоидальна.

Мостовая схема позволяет сделать выпрямитель без трансформатора, если подводимое к ней переменное напряжение соответствует напряжению, которое должно быть подано на вход выпрямителя. Мостовые схемы выпрямителей находят все более и более широкое применение в звуковоспроизводящей аппаратуре и обычно собираются на полупроводниковых вентилях.

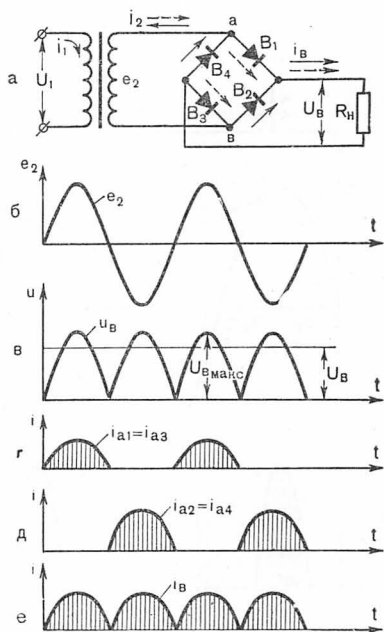


Рис. III-4. Схема (а) и графики (б, в, г, д, е), иллюстрирующие работу однофазного мостового выпрямителя

§ 4. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Рассматривая схемы выпрямителей и графики, поясняющие работу схем, мы видим, что на нагрузке протекает пульсирующий ток. Однако он практически не находит применения. Для питания усилительных устройств необходимо иметь источник высокого постоянного напряжения с пульсациями, которые не должны превышать сотых и даже тысячных долей процента.

Для сглаживания пульсаций в реальных схемах используется третий элемент выпрямителя (см. рис. III-4) — сглаживающий фильтр, который включается между выпрямителем и нагрузкой.

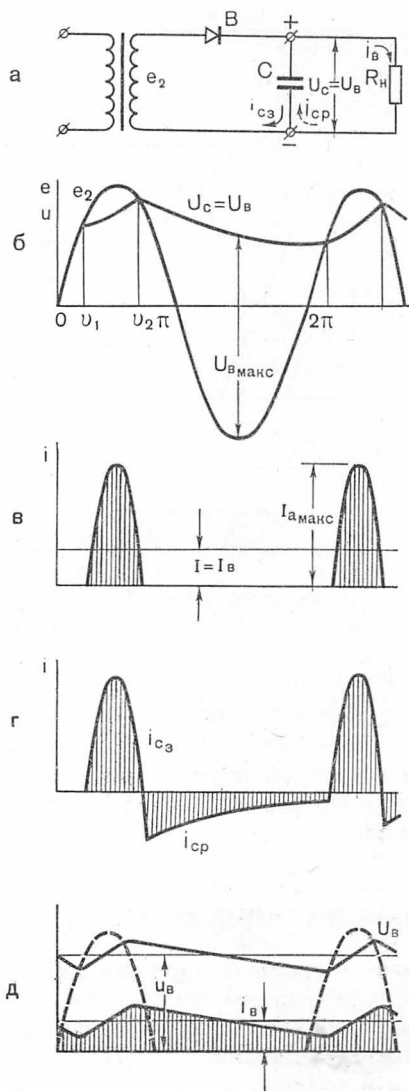


Рис. III-5. Схема (а) и графики (б, в, г, д) работы однополупериодного выпрямителя на емкость и активное сопротивление

Так как пульсирующий ток является суммой двух токов — постоянного и переменного, — действующих в одной и той же цепи, задача построения фильтра сводится к созданию таких условий, при которых постоянная составляющая тока свободно бы проходила в нагрузку, а переменная составляющая — встречала на своем пути большое сопротивление, вследствие чего эти пульсации уменьшались бы в большое число раз.

Такое разделение постоянной и переменной составляющих пульсирующего тока можно выполнить, если параллельно нагрузке включить конденсатор большой емкости. Подобный конденсатор является простейшим сглаживающим фильтром.

Рассмотрим работу схемы однополупериодного выпрямителя на емкость и активное сопротивление в установившемся режиме (рис. III-5).

Во время положительного полупериода

напряжение, развиваемое вторичной обмоткой трансформатора e_2 , начиная с какого-то момента v_1 больше напряжения на конденсаторе u_c , анод вентиля положителен и вентиль пропускает ток. Этот ток разветвляется: часть его i_b проходит в нагрузку, а большая часть представляет собой зарядный ток конденсатора i_{c3} (рис. III-5, в, г).

Напряжение на заряжающемся конденсаторе и равное ему выпрямленное напряжение повышаются вплоть до момента v_2 . Напряжение u_c меньше э. д. с. обмотки трансформатора, так как часть напряжения теряется на сопротивлении вентиля и трансформатора. После момента v_2 э. д. с. вторичной обмотки трансформатора становится меньше, чем напряжение на конденсаторе, т. е. анод вентиля приобретает более низкий потенциал, чем катод. Вентиль прекращает проводить ток раньше, чем заканчивается положительный полупериод.

Начиная с момента v_2 , можно считать, что конденсатор и сопротивление нагрузки отключены от трансформатора (рис. III-6). Конденсатор заряжен и разряжается на сопротивление нагрузки R_n . Разряд конденсатора происходит по экспоненциальному закону, причем направление тока разряда, конечно, противоположно направлению зарядного тока, но по сопротивлению нагрузки ток разряда проходит в том же направлении, что и ток в период проводимости вентиля.

Если параллельно нагрузке установлен конденсатор достаточно большой емкости, то постоянная времени (произведение $R_n \cdot C$), от которого зависит время разряда конденсатора по экспоненциальному закону*, велика и конденсатор не успевает разрядиться полностью к моменту v_2 , начиная с которого явления повторяются.

Таким образом, сущность сглаживающего действия конденсатора заключается в том, что за счет запаса энергии, накопленной в электрическом поле за время заряда, конденсатор, разряжаясь, поддерживает напряжение и ток в нагрузке в течение того промежутка времени, когда вентиль не работает.

На рис. III-5, д видно, что кривая выпрямленного напряжения u_b имеет значительно меньшую переменную

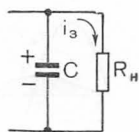


Рис. III-6.
Схема разряда конденсатора на сопротивление

* См.: П. Федосеев, Электротехника, М., «Искусство», 1963.

составляющую, чем при чисто активной нагрузке. На рис. III-5, *г* показана форма зарядного и разрядного тока конденсатора. Среднее значение тока за период равно нулю, так как постоянная составляющая тока через емкость проходить не может.

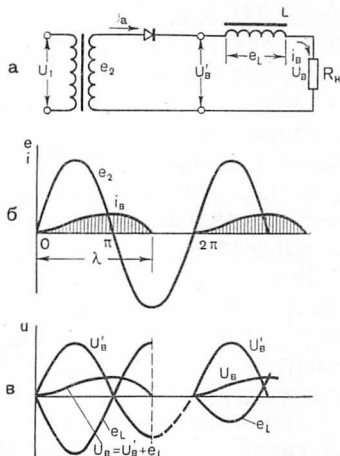


Рис. III-7. Схема (а) и графики (б, в), иллюстрирующие работу однополупериодного выпрямителя при индуктивной реакции нагрузки

При рассмотрении графика рис. III-5, *в* можно видеть еще одно важное свойство схемы. При работе на емкостный фильтр вентиль пропускает ток в виде кратковременных импульсов большой силы ($I_{a \text{ макс}}$), значительно превышающих среднее значение (обычно в 5÷10 раз). Такой режим работы неблагоприятен для вентиля, имеющего накаливаемый катод, например для кенотрона, так как кенотрон должен иметь ток эмиссии, намного превышающий его значение, допустимый для нормального теплового обмена.

По сравнению со схемой выпрямителя, работающего на одну активную нагрузку, подключение конденсатора приводит к удвоению обратного напряжения на вентиле в режиме холостого хода. Максимальное обратное напряжение на вентиле равно сумме напряжения на конденсаторе и амплитуды э. д. с. вторичной обмотки трансформатора в отрицательный полупериод:

$$U_{\text{макс}} = E_{2\text{макс}} + U_{\text{в}}$$

Это также неблагоприятный фактор, так как требует применения вентиля с высокой величиной допустимого обратного напряжения.

Все, что говорилось в отношении работы схемы однополупериодного выпрямителя, работающего на активно-емкостную нагрузку, справедливо и для схемы двухполупериодного выпрямления. Здесь один цикл процесса заряда и разряда конденсатора происходит не за период, а за половину периода переменного тока. Благодаря большей частоте чередования процессов заряда и разряда

величина пульсаций напряжения получается значительно меньшей, чем в схеме однополупериодного выпрямления.

На работу выпрямителя наибольшее влияние оказывает первый элемент фильтра, поэтому полезно рассмотреть еще такой случай, когда им является индуктивность (дрессель фильтра).

Рассмотрим работу однополупериодного выпрямителя при индуктивной реакции нагрузки (рис. III-7). Пусть схема подключена в сеть переменного тока в тот момент, когда э. д. с. вторичной обмотки равна нулю. По мере нарастания э. д. с. в положительный полупериод вентиль начинает пропускать ток, который сначала увеличивается, а затем уменьшается. При этом форма кривой тока будет несинусоидальна, так как помимо э. д. с. e_2 в цепи действует э. д. с. индуктивной катушки e_L , которая при увеличении тока отрицательна, т. е. замедляет процесс нарастания тока, а при уменьшении тока положительна и, действуя согласно с направлением тока, замедляет процесс его уменьшения.

В течение первой части этого процесса происходит накопление энергии в магнитном поле индуктивной катушки, а в течение второй части индуктивная катушка отдает накопленную энергию в цепь, благодаря чему в течение части отрицательного полупериода в цепи протекает ток. Направление этого тока совпадает с направлением тока через вентиль.

Таким образом, сущность сглаживающего действия индуктивной катушки заключается в том, что за счет запаса энергии, накопленной в магнитном поле за время увеличения тока через вентиль, становится возможным протекание тока и в течение части отрицательного полупериода.

Происходит «затягивание» времени протекания тока через нагрузку (вентиль пропускает ток в течение промежутка времени, большего половины периода).

При двухполупериодном выпрямлении потенциал катодов вентилях всегда положителен по отношению к средней точке, и выпрямленное напряжение на входе фильтра представляет собой ряд положительных полуволн — пульсирующее напряжение. Под его воздействием в цепи дросселя и сопротивления нагрузки появляется пульсирующий ток, который, однако, имеет значительно меньшую переменную составляющую, чем напряжение. Сглаживание

пульсаций происходит за счет индуктивности в цепи, причем оно тем больше, чем больше величина индуктивности.

На практике большую индуктивность в схеме сглаживающего фильтра получают, используя дроссель со стальным сердечником, имеющим воздушный зазор.

Мы рассмотрели работу двух простейших видов фильтров в схемах выпрямителей: а) конденсатора большой емкости, включенного параллельно

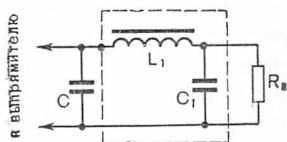


Рис. III-8. Схема одного звена Г-образного сглаживающего фильтра

нагрузке, и б) индуктивности (дросселя), включенной последовательно с нагрузкой.

В реальных схемах промышленной аппаратуры обычно используют фильтры, составленные из емкостей, индуктивностей и активных сопротивлений. Звено фильтра может быть собрано в виде буквы Г

или П, причем элементы фильтра, включенные последовательно с нагрузкой, должны обладать большим сопротивлением для переменной составляющей тока и малым — для постоянной. Элементы фильтра, включенные параллельно нагрузке, наоборот, должны иметь малое сопротивление для переменной составляющей тока и большое — для постоянной.

Принципиальная схема одного звена Г-образного сглаживающего фильтра показана на рис. III-8.

Конденсатор C — первый конденсатор выпрямителя. Звено собственно Г-образного фильтра состоит из индуктивной катушки (дросселя) L_1 , включенной последовательно с нагрузкой, и конденсатора C_1 , включенного параллельно. Дроссель L_1 обладает большим сопротивлением для переменной составляющей и на него падает большая часть переменной составляющей выпрямленного напряжения, вследствие чего пульсации напряжения на нагрузке уменьшаются.

Величиной, характеризующей работу фильтра, т. е. его сглаживающее действие, является коэффициент фильтрации, под которым понимают отношение коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсаций на его выходе.

Коэффициент фильтрации выражается следующей приближенной формулой:

$$\Phi_1 = \omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1 - 1,$$

где $\omega = 2\pi f$ (f — частота пульсаций: для однополупериодного выпрямителя равна 50 гц, для двухполупериодного — 100 гц); L_1 — индуктивность дросселя в генри (гн); C_1 — емкость конденсатора в фарадах (ф), ($\pi = 3,14$).

Например, пульсации напряжения на входе Г-образного индуктивно-емкостного фильтра равны 50 в. Индуктивность дросселя 30 гн, емкость конденсатора 8 мкф. Выпрямитель двухполупериодный. Определить пульсации напряжения в нагрузке.

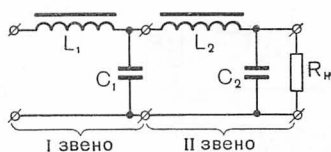


Рис. III-9. Схема двухзвенного фильтра $L-C$

Определяем коэффициент фильтрации по формуле:

$$\Phi_1 = \omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1 - 1.$$

$$\Phi_1 = (2 \cdot 3,14 \cdot 100)^2 \cdot 30 \cdot 8 \cdot 10^{-6} - 1 \approx 93,$$

т. е. пульсации напряжения на втором конденсаторе, или, что то же самое, на зажимах нагрузки, будут ослаблены в 93 раза и равны:

$$\frac{50}{93} = 0,53 \text{ в.}$$

Если на нагрузке нужно получить малые пульсации тока, т. е. большой коэффициент фильтрации, то выгодно применять многозвенные фильтры (рис III-9). Полезная нагрузка включена после второго звена. Так как пульсации, ослабленные первым звеном, ослабляются в несколько раз вторым звеном, то коэффициент фильтрации двухзвенного фильтра равен произведению коэффициентов фильтрации каждого из звеньев и определяется по формуле:

$$\Phi = \Phi_1 \cdot \Phi_2$$

$$\Phi = (\omega^2 \cdot L_1 \cdot C_1 - 1) \cdot (\omega^2 \cdot L_2 \cdot C_2 - 1).$$

Например, если к первому звену фильтра с коэффициентом фильтрации $\Phi_1 = 93$ подключить еще одно такое же звено, то общий коэффициент фильтрации будет:

$$\Phi = \Phi_1 \cdot \Phi_2 = 93 \cdot 93 = 8649,$$

а пульсации напряжения в нагрузке будут:

$$\frac{50}{8649} \approx 0,005 \text{ в.}$$

Фильтр-пробка. При использовании схемы двухполупериодного выпрямления основная частота пульсации равна 100 гц. Для ее подавления применяется фильтр с использованием явления резонанса токов (рис. III-10). Из электротехники известно, что при резонансе токов на частоте резонанса сопротивление контура, составленного из параллельно включенных конденсатора и дросселя, резко возрастает по сравнению с индуктивным сопротивлением.

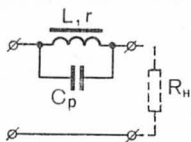


Рис. III-10. Схема фильтра с резонансным последовательным плечом — фильтром-пробкой

Обычно к дросселю фильтра выпрямителя подключают конденсатор такой емкости, чтобы для частоты 100 гц происходил резонанс токов. В этом случае удается уменьшить пульсации в четыре-пять раз.

Сопротивление контура при резонансе определяется не только величинами емкости и индуктивности, но зависит также от активного сопротивления контура. Поэтому стремятся применять детали с малыми активными потерями.

В фильтрах низковольтных выпрямителей индуктивность незначительна (десятые и сотые доли генри) и величина емкости C_p оказывается неприемлемо большой (а электролитические конденсаторы применять нельзя, так как они требуют поляризирующего напряжения). В таких случаях применяют автотрансформаторную схему включения емкости (рис. III-11), которая позволяет применить конденсатор меньшей емкости.

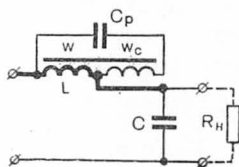


Рис. III-11. Фильтр-пробка с включением емкости по автотрансформаторной схеме

Фильтр-пробка требует индивидуальной настройки на заводе из-за разброса параметров деталей, что является большим недостатком.

Резисторно-емкостный фильтр. Дроссель, используемый в схеме сглаживающего фильтра, — относительно дорогостоящая и громоздкая деталь. Поэтому в тех цепях, где протекает малый постоянный ток (до нескольких десятков миллиампер), часто применяют Г-образные фильтры, в которых дроссель заменен активным сопротивлением. Такие фильтры называют резисторно-емкостными или фильтрами $R - C$.

Этот фильтр также сглаживает пульсации выпрямленного напряжения, однако в виду значительной величины сопротивления на нем происходит падение напряжения и часть выпрямленного напряжения как бы теряется. Величина постоянного напряжения после резисторно-емкостного фильтра значительно ниже напряжения, развиваемого выпрямителем.

Коэффициент фильтрации резисторно-емкостного фильтра $R_{\phi} - C_{\phi}$ может быть определен по формуле:

$$\Phi = \omega \cdot C_{\phi} \cdot R_{\phi}.$$

В усилителях низкой частоты широко применяются многозвенные резисторно-емкостные фильтры, состоящие из нескольких Г-образных звеньев или ячеек. Общий коэффициент фильтрации равен произведению коэффициентов фильтрации отдельных звеньев:

$$\Phi = \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \Phi_3 \dots$$

Таким образом, применение многозвенных фильтров различных типов позволяет осуществить сильное сглаживание пульсаций, происходящих при выпрямлении переменного тока, и получить в нагрузке ток, весьма близкий к постоянному.

§ 5. ВЫПРЯМИТЕЛИ В КОМПЛЕКТЕ ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ АППАРАТУРЫ КИНОУСТАНОВОК

Выпрямители — неотъемлемая часть звуковоспроизводящей аппаратуры, они необходимы для питания постоянным током анодных цепей усилительных ламп и фотоэлементов, а также читающих ламп кинопроекторов.

Наибольшее значение имеют кенотронные двухполупериодные выпрямители. Они применяются тогда, когда необходимо получить высокое напряжение при небольшой силе тока (например, для питания анодных цепей усилительных каскадов).

Кенотронный выпрямитель. Типовая схема двухполупериодного кенотронного выпрямителя показана на рис. III-12. Трансформатор выпрямителя имеет первичную обмотку *I* и две вторичные: *II* и *III*.

Первичная обмотка *I* рассчитана на определенное напряжение переменного тока: 110, 127 или 220 в. Вторичная обмотка *II* — высоковольтная, изготавливается повышающей, с тем чтобы получить от выпрямителя высокое постоянное напряжение (до 400—500 в). Обмотка *III* — низковольтная, служит для питания накала кенотрона. Напряжение, развиваемое этой обмоткой, устанавливается рав-

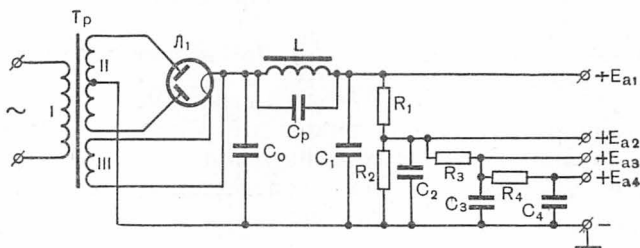


Рис. III-12. Типовая схема двухполупериодного кенотронного выпрямителя

ным номинальному напряжению накала кенотрона. Так, например, напряжение накала кенотрона 5Ц4С равно 5 в. На 5 в и рассчитана низковольтная вторичная обмотка трансформатора. Напряжение накала кенотрона 1Ц1С 0,7 в; для питания этого кенотрона и обмотка трансформатора должна быть рассчитана на 0,7 в.

Обычно помимо трех основных обмоток трансформатор имеет еще ряд вторичных: низковольтных для питания нитей накалов усилительных ламп потребителя, экранирующую обмотку, служащую для устранения вредных наводок, и др. Дополнительные обмотки на рисунке не показаны.

Высоковольтная обмотка имеет отвод от средней точки, которая служит минусом выпрямителя. Катод кенотрона является плюсом выпрямителя. В этом нетрудно убедиться, если проследить, как протекает ток. Катод кенотрона нагревается переменным током. После прогрева катод начнет испускать электроны с поверхности. Однако в то время, пока потенциал анода будет отрицательным, электроны не достигнут анода, и тока в цепи не будет. В течение времени, пока потенциал анода будет положительным, через лампу будет проходить ток.

Электроны внутри лампы движутся от катода к аноду, значит, ток проходит от анода к катоду, затем через дроссель, ряд сопротивлений и нагрузку к нулевому проводу и по нему к средней точке высоковольтной обмотки трансформатора, далее через одну из половин этой обмотки к рассматриваемому аноду. Путь тока на рис. III-13 указан стрелками: сплошными — за один полупериод переменного напряжения и пунктирными — за другой.

Фильтр кенотронного выпрямителя состоит из ряда звеньев: $L-C$ и $R-C$. В кенотронных выпрямителях, имеющих многозвенные фильтры, нагрузка часто включается в виде нескольких групп: та часть

нагрузки, которая допускает питание током с большими пульсациями, включается после первого звена, т. е. на зажимы конденсатора C_1 ; другая часть, требующая для питания ток с меньшими пульсациями, включается на зажимы следующего конденсатора и т. д. Такая система подключения нагрузки позволяет полноценно использовать фильтр.

Часть звеньев многозвенного фильтра служит помимо фильтрации напряжения в качестве развязывающих ячеек, ослабляющих (как мы увидим в дальнейшем) связь между отдельными каскадами усилителей через общий источник питания.

Чтобы кенотронный выпрямитель работал безаварийно и долговечно, нужно хорошо знать его эксплуатационные особенности и поддерживать нормальный режим работы.

Рассмотрим некоторые режимы работы, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации и привести к нарушению нормальной работы кенотронного выпрямителя.

1. Режим холостого хода — работа кенотронного выпрямителя без нагрузки. Такой режим может возникнуть тогда, когда по каким-либо причинам (обрыв проводов, нарушение контакта и т. п. в цепи нагрузки) нагрузка оказывается отключенной. Фактически выпрямитель работает на емкостную нагрузку: один или несколько конденсаторов, включенных параллельно.

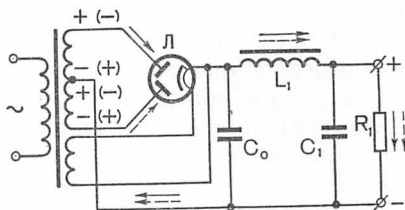


Рис. III-13. Путь тока в схеме двух-полупериодного выпрямителя

При этом конденсаторы, которые при нормальной работе должны разряжаться на сопротивление нагрузки, заряжаются до амплитудного значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, что может вызвать пробой диэлектрика конденсаторов.

Если в фильтре установлены конденсаторы, которые выдерживают значительное (на 25—40%) повышение напряжения, то режим холостого хода для такого выпрямительного устройства не опасен.

2. Режим короткого замыкания — работа кенотронного выпрямителя при сопротивлении нагрузки, равном нулю. Такой режим может возникнуть: если произойдет пробой диэлектрика одного из конденсаторов фильтра и внешняя цепь окажется короткозамкнутой; если произойдет пробой изоляции между повышающей и понижающей обмотками трансформатора; если произойдет короткое замыкание в цепи нагрузки.

Короткое замыкание в цепи нагрузки — это аварийное состояние и может привести к полному разрушению и выводу из строя всего выпрямительного устройства. Вместе с тем режим короткого замыкания кенотронного выпрямителя отличается от процессов, происходящих при коротком замыкании в обычных электрических цепях, так как в схеме выпрямителя включены лампы (кенотроны), имеющие ограниченную величину тока эмиссии с катода.

Рассмотрим процессы, происходящие в выпрямителе при коротком замыкании, более подробно.

При коротком замыкании внешняя цепь имеет сопротивление, близкое к нулю. Ток увеличивается незначительно (всего в два-три раза, так как он ограничен эмиссионной способностью катода). Напряжение на выходе выпрямителя уменьшается почти до нуля, и все напряжение, развиваемое повышающей обмоткой трансформатора, оказывается приложенным к лампе. В положительный полупериод это равносильно значительному повышению анодного напряжения. Возрастает протекающий через лампу ток, что приводит к резкому увеличению мощности, рассеиваемой на аноде лампы ($P_a = I_a \cdot U_a$), а следовательно, к быстрому и чрезмерному нагреванию анода. Аноды сильно раскаляются, при этом выделяются окклюдированные* газы, и вакуум лампы ухудшается.

* Окклюдированные газы — молекулы газа, которые содержатся в металлах при низких температурах и не удаляются при откачке газа из баллона лампы.

Наличие газа в баллоне лампы при сильном анодном напряжении приводит к ионизации газа, сопровождающейся сильным голубым свечением. Так как анодное напряжение велико, то ионы бомбардируют катод и разрушают его. Разрушение нити под действием ионной бомбардировки происходит за 10—20 сек.

После разрушения (разрыва) нити один из ее концов падает на анод лампы (см. конструкцию лампы) и повышающая обмотка трансформатора оказывается короткозамкнутой. У кенотронов с подогревным катодом вероятность короткого замыкания обмотки трансформатора значительно меньше.

Чтобы избежать столь серьезных последствий короткого замыкания, в цепь первичной обмотки трансформатора необходимо включать плавкие предохранители и проверять их техническое состояние.

Если при включении кенотронного выпрямителя в баллонах ламп появляется сильное свечение, которое не прекращается после прогрева катода лампы, аноды кенотрона раскаляются докрасна и происходит разрушение катода. Это указывает, что нагрузка выпрямителя замкнута накоротко, и во избежание порчи ламп необходимо немедленно выключить выпрямитель и устранить повреждение.

Устранять неисправности в выпрямителе, находящемся под напряжением, опасно для жизни, так как на конденсаторах и повышающей обмотке трансформатора действуют высокие напряжения.

3. Перегрузка кенотронного выпрямителя — режим, при котором сопротивление нагрузки выпрямителя меньше расчетного. При перегрузке кенотронного выпрямителя ток, проходящий через лампу, возрастает, а напряжение, развиваемое выпрямителем, уменьшается.

При уменьшении выпрямленного напряжения растет анодное напряжение в положительный полупериод и происходят те же процессы, но более медленно, что и при коротком замыкании: ионизация, разрушение катода. Ввиду этого перегрузка кенотронного выпрямителя недопустима.

4. Недокал катодов кенотронов может происходить из-за падения напряжения в питающей сети переменного тока. Он приводит к нарушению нормального режима работы кенотронного выпрямителя.

При понижении накала катода кенотрона (плохой контакт в цепи накала или медленный нагрев катода), если

при этом не понизилось переменное напряжение повышающей обмотки, происходит уменьшение эмиссии с катода, т. е. ток насыщения сильно уменьшается, что вызывает значительное уменьшение выпрямленного напряжения лампы. Далее следует ионизация, ионная бомбардировка катода и его разрушение.

Для предотвращения столь неприятных последствий промышленность выпускает кенотроны с большой электронной эмиссией. Кроме того, выпрямители рассчитывают

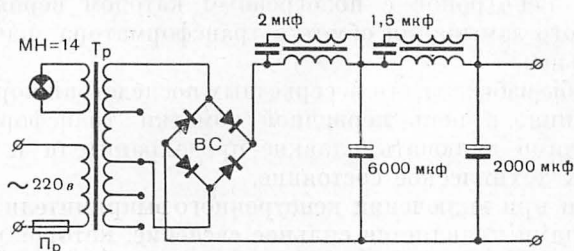


Рис. III-14. Схема выпрямителя 10B-19

так, чтобы максимальный импульс тока был значительно меньше тока насыщения кенотрона. Поэтому небольшое понижение накала (на 8—10%) для таких кенотронов не опасно и их можно эксплуатировать.

Полупроводниковые выпрямители. При использовании в качестве вентиля полупроводниковых выпрямительных элементов наиболее часто применяется мостовая схема двухполупериодного выпрямления, рассмотренная в § 3.

В комплекте звуковоспроизводящей киноустановки полупроводниковые выпрямители используются для питания нити накала читающей лампы хорошо сглаженным выпрямленным током (например, комплекты 10УДС-3 и 10УДС-4), или для питания накала ламп предварительного усилителя (комплект 31УЗУ-1), или для подачи независимого смещения на сетки ламп мощного каскада (комплект КЗВТ-3).

В новом унифицированном комплекте звуковоспроизводящей аппаратуры «Звук» селеновые выпрямители используются в блоке питания 10B-19 (рис. III-14). Этот выпрямитель применяется для питания читающей лампы кинопроекторов и питания катушек реле хорошо сглаженным выпрямленным током. Выпрямитель состоит из понижающего трансформатора, однофазного селенового моста и

двухзвенного фильтра с резонансными контурами, настроенными на частоту 100 гц. На первичную обмотку трансформатора подается напряжение 220 в. Выпрямленное напряжение на выходе фильтра — до 8 в при токе 5 а. В качестве вентиля используется селеновый выпрямительный мост ВС.

В этом же комплекте питающее устройство 20В-89 служит для питания анодных цепей лам предварительных усилителей (рис. III-15). Первичная обмотка рассчитана на подключение к сети переменного тока напряжением 220 в.

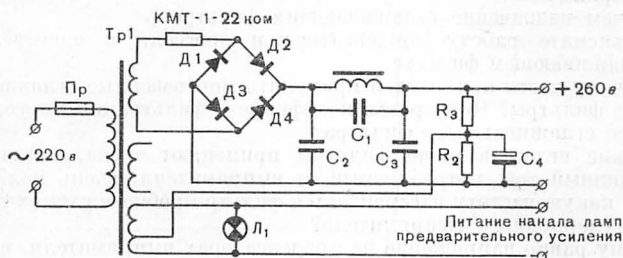


Рис. III-15. Принципиальная схема выпрямителя 20В-89

Имеются три первичные обмотки. К основной из них подключен мост из кремниевых диодов. В целях температурной стабилизации выпрямленного напряжения при изменении тока нагрузки последовательно с первичной обмоткой включено термосопротивление КМТ-1 (22 ком). В выпрямителе использован П-образный фильтр и резонансный фильтр, настроенный на частоту 100 гц.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные свойства имеет прибор, называемый вентиляем?
2. Как называется устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный?
3. Из каких частей состоит выпрямительное устройство, и укажите назначение этих частей.
4. В чем состоит физический смысл преобразования переменного тока в постоянный?
5. Дайте определение пульсирующего тока.
6. Укажите основные принципиальные недостатки однополупериодной схемы выпрямления переменного тока.
7. Как работает двухполупериодный выпрямитель с выводом нулевой точки трансформатора?
8. Перечислите основные преимущества двухполупериодного выпрямления по сравнению с однополупериодным выпрямлением переменного тока.

9. Как работает мостовая схема двухполупериодного выпрямителя?
10. Укажите назначение кенотронных выпрямителей в усилительных устройствах звукового кино.
11. Как работает двухполупериодный кенотронный выпрямитель?
12. Какое напряжение, приложенное к вентиллю, называется обратным и чему оно равно в схеме двухполупериодного кенотронного выпрямителя с выводом нулевой точки?
13. Как работает мостовая схема двухполупериодного выпрямителя?
14. Объясните назначение конденсатора, подключенного на выходе выпрямителя.
15. В чем назначение сглаживающих фильтров?
16. Объясните работу конденсатора и дросселя в однозвенном сглаживающем фильтре.
17. Почему часто приходится применять многозвенные сглаживающие фильтры? Чему равен коэффициент фильтрации многозвенного сглаживающего фильтра?
18. Какие сглаживающие фильтры применяют тогда, когда постоянный ток, потребляемый от выпрямителя, очень мал?
19. На какую частоту настраивается фильтр-пробка в схемах двухполупериодного выпрямителя?
20. Чему равно напряжение на конденсаторах выпрямителя, включенного без нагрузки?
21. К каким последствиям приводит короткое замыкание в нагрузке кенотронного выпрямителя?
22. Почему необходимы плавкие предохранители в цепи первичной обмотки трансформатора кенотронного выпрямителя?
23. О чем свидетельствует голубое свечение в баллоне кенотрона?

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

§ 1. ФИЗИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТРИОДЕ

Изучая работу диода, мы видели, что анодный ток в нем зависит от пространственного заряда: электроны, излучаемые катодом, прежде чем попасть в ускоряющее электрическое поле, образуемое положительным анодом, должны преодолеть определенный потенциальный барьер, создаваемый пространственным зарядом вблизи катода.

Величина анодного тока в диоде зависит от величины этого отрицательного пространственного заряда. Если в область пространственного заряда ввести электрод в виде *сетки* и подавать на него положительный или отрицательный потенциал относительно катода, то можно либо уменьшать (при положительном потенциале), либо усиливать (при отрицательном потенциале) вредное действие пространственного заряда. Следовательно, можно управлять величиной тока, протекающего на участке анод — катод, т. е. в анодной цепи.

Действие сетки заключается в том, что она управляет потоком электронов внутри лампы, т. е. анодным током, и поэтому ее называют управляющей сеткой.

Регулирование, описанное выше, легко осуществить, если собрать схему, показанную на рис. IV-1. В этой схеме имеются: 1) *цепь накала*, состоящая из нити накала, батареи накала B_H и соединительных проводов; 2) *анодная цепь*, состоящая из анода лампы, безвоздушного промежутка анод — катод лампы, катода, анодной батареи B_A и нагрузки в виде миллиамперметра; 3) *цепь сетки*, состоящая из сетки, безвоздушного промежутка сетка — катод лампы, катода, сеточной батареи B_C и соединительных проводов. В эту цепь может быть включен миллиамперметр.

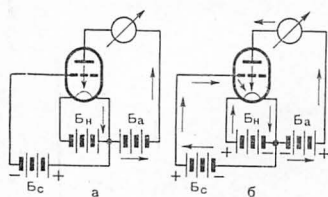


Рис. IV-1. Схемы триода: а — отрицательный полюс батареи B_C подключен к сетке; б — положительный полюс батареи B_C подключен к сетке

Если к сетке подключить отрицательный полюс батареи B_C , а к катоду — положительный (рис. IV-1, а), то электроны, вылетающие из катода и стремящиеся к аноду, будут отталкиваться сеткой обратно в сторону катода. При небольшом отрицательном напряжении на сетке часть электронов под действием анода все же пролетает сквозь сетку и попадает на анод, и в анодной цепи протекает небольшой анодный ток. Однако можно настолько увеличить отрицательное напряжение на сетке, что она станет отталкивать все электроны, и анодный ток прекратится. В этом случае говорят, что лампа заперта.

Отрицательное напряжение на управляющей сетке уменьшает анодный ток и может даже прекратить его.

Положительное напряжение на сетке (рис. IV-1, б) действует иначе. Оно помогает аноду притягивать электроны из пространственного заряда. Большинство электронов, несмотря на притяжение к сетке, вследствие большой скорости пролетает по инерции в просветы сетки и летит к аноду, так как напряжение на аноде всегда значительно больше, чем на сетке.

Часть электронов все же притягивается самой сеткой и, попадая на нее, образует *сеточный ток*. При достаточно большом положительном напряжении на сетке анодный ток возрастает до величины тока насыщения, но одновре-

менно возрастает и сеточный ток. Ток эмиссии катода при насыщении будет равен сумме анодного и сеточного токов.

Положительное напряжение на управляющей сетке увеличивает анодный ток и может довести его до насыщения, а также создает сеточный ток.

Изменяя напряжение на управляющей сетке в сравнительно небольших пределах (от некоторого отрицательного до некоторого положительного значения) можно получить изменение анодного тока от нуля до тока насыщения, т. е. в значительных пределах. Именно в этом и заключается управляющее действие сетки.

Рассматривая движение электрона от катода к аноду в триоде, мы видим, что в триоде на него *одновременно действует напряжение анода и сетки.*

Отсюда можно заключить, что анодным током в триоде можно управлять двумя способами: 1) меняя величину анодного напряжения (чтобы получить нужные изменения анодного тока, следует сильно изменять величину анодного напряжения); 2) изменяя напряжение на сетке (для необходимых изменений анодного тока напряжение сетки нужно изменять значительно меньше, чем анодное напряжение).

Более сильное влияние величины напряжения на сетке по сравнению с анодным напряжением на величину анодного тока объясняется тем, что сетка расположена значительно ближе к катоду, чем анод.

Введение в двухэлектродную лампу третьего электрода — сетки — придало этому новому электронному прибору — триоде — и новые свойства.

Помимо односторонней проводимости триод обладает свойством управлять величиной тока в анодной цепи путем изменения напряжения управляющего электрода, которым является сетка. В этом состоит основное принципиальное отличие триода от диода, так как это свойство открыло широкие возможности использования триодов для построения ряда электронных приборов.

Устройство трехэлектродной лампы показано на рис. IV-2. Внутри стеклянного (или металлического) баллона, из которого выкачан воздух до высокой степени вакуума

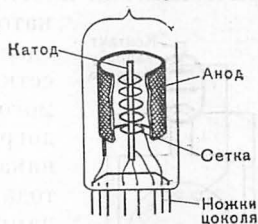


Рис. IV-2. Устройство трехэлектродной лампы

ним (восьмым) имеется относительно бóльший промежуток, чем между всеми остальными. Такое расположение штырьков обеспечивает установку лампы в панельку в единственно правильное положение.

Пальчиковые лампы применяют в радиоаппаратуре и измерительных приборах.

Для уменьшения габаритов аппаратуры конструкторы электронных ламп сумели в одном баллоне поместить две лампы, например два триода. В общем катоде внутри баллона размещены два анода и две сетки, а выводы от них присоединены к штырькам цоколя. Цоколевка двойного триода 6Н8С показана на рис. IV-4.

Забегая несколько вперед, скажем, что помимо трехэлектродных ламп разработано большое число других типов так называемых многосеточных ламп, имеющих аналогичное рассмотренным устройству цоколя.

Электронным лампам всех типов присваиваются в соответствии с Государственным общесоюзным стандартом (ГОСТом) специальные условные обозначения. В приемно-усилительных лампах обозначение состоит из четырех элементов. Первый элемент — число, указывающее напряжение накала в вольтах (округленно).

Второй элемент — буква — характеризует тип лампы: диоды обозначаются буквой Д, двойные диоды — буквой Х, триоды — С, пентоды — К или Ж, частотнопреобразовательные лампы с двумя управляющими сетками — А, выходные пентоды и лучевые тетроды — П и Р, триоды с одним или двумя диодами — Г, двойные триоды — Н, пентоды с одним или двумя диодами — Б и кенотроны — Ц.

Третий элемент — число, указывающее порядковый номер типа лампы. Четвертый элемент обозначения — буква, характеризующая конструктивное оформление лампы. Если лампа с металлическим баллоном, обозначение не ставится, если со стеклянным, — ставится буква С. Пальчиковая лампа обозначается буквой П; лампы сверхминиатюрные диаметром 10 мм — буквой Б. Стеклянная лампа в форме желудя — буквой Ж (диаметр 6 мм).

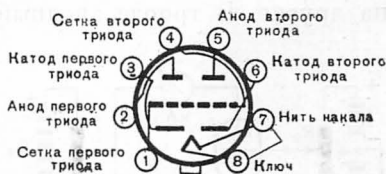


Рис. IV-4 Цоколевка двойного триода 6Н8С

§ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТРИОДОВ

Рассматривая физические процессы, происходящие в триоде, мы установили, что токи и напряжения в цепях триода взаимосвязаны. Изменение одной из величин ведет к изменению других. Для правильной оценки и расчета усилителей всегда важно знать характер связей и оценивать влияние изменения одной из величин на другие. В триоде анодный ток, например, зависит от

трех величин: напряжения накала, напряжения на аноде и напряжения на сетке.

Взаимосвязи наиболее точно определяются с помощью так называемых *статических характеристик* — графиков, показывающих зависимость одной из величин, например тока, от изменения тока или напряжения в другой цепи при постоянных во время опыта других показателях.

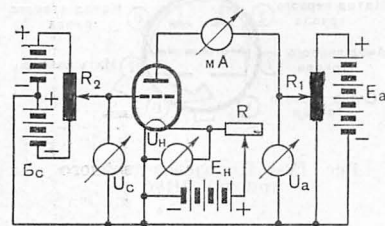


Рис. IV-5. Схема для снятия характеристик с трехэлектродных ламп

При работе триода, например, напряжение накала все время поддерживается постоянным, и, как мы видели выше, анодный ток триода зависит только от двух величин: напряжения на аноде и на сетке.

Для практики зависимость анодного тока в триоде от двух указанных величин удобно исследовать дважды, каждый раз придавая одной из них определенное постоянное значение.

В итоге получают две характеристики: сеточную (или анодно-сеточную) и анодную.

Рассмотрим получение *сеточной* характеристики триода, показывающей зависимость анодного тока от напряжения на сетке при постоянном напряжении анода.

Сеточную характеристику получают, или, как принято говорить, *снимают*, опытным путем, для чего собирают специальную схему для снятия характеристик с трехэлектродных ламп, показанную на рис. IV-5.

Напряжения накала U_n и на аноде лампы U_a поддерживаются постоянными с помощью реостата R и потенциометра R_1 . Контроль за напряжениями ведется по вольт-

метрам. Потенциометром R_2 изменяют напряжение на сетке U_c и фиксируют показания вольтметра и миллиамперметра, установленных в анодной цепи.

Напряжение на сетке изменяют, начиная с такой величины его отрицательного значения, при котором лампа заперта, т. е. ток в анодной цепи равен нулю.

Изменяя положение движка потенциометра, уменьшают напряжение, подводимое к управляющей сетке через равные интервалы 1—2 в, и записывают показания миллиамперметра, соответствующие отрицательному значению напряжения сетки. Очень важна величина анодного тока при нулевом значении напряжения на сетке. Затем так же увеличивают значения величины положительного напряжения на сетке и записывают значения анодного тока.

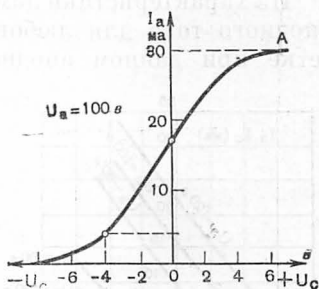


Рис. IV-6. Характеристика триода, снятая при постоянном анодном напряжении $U_a = 100$ в.

На рис. IV-6 приведена характеристика, снятая для некоторого триода при постоянном анодном напряжении, равном 100 в. Из характеристик видно, что для этого триода полное изменение анодного тока от нуля до тока насыщения, равного примерно 30 ма, получается при изменении напряжения на сетке от -8 до $+6$ в.

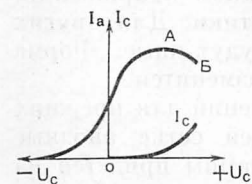


Рис. IV-7. Характеристики анодного и сеточного токов триода

Характеристика имеет три основные части: нижний криволинейный участок — нижний загиб, средний прямолинейный участок и верхний криволинейный участок — верхний загиб. Участок характеристики правее точки A соответствует режиму насыщения. Режим насыщения объясняется тем, что при увеличении

положительного напряжения сетки наступает такое состояние, когда подавляющее большинство электронов, излучаемых катодом, притягиваются анодом.

Однако если положительное напряжение на управляющей сетке увеличивать значительно, то анодный ток будет уменьшаться (рис. IV-7). Это происходит потому, что

сильно возрастает сеточный ток, так как сетка при большом положительном напряжении на ней притягивает бóльшую часть электронов. Такой режим, при котором анодный ток уменьшается (участок AB) за счет роста сеточного тока, называется перенапряженным режимом. Этот режим практически не используется в усилителях.

Из характеристики лампы всегда можно найти величину анодного тока для любого напряжения на управляющей сетке при данном анодном напряжении. Например, из

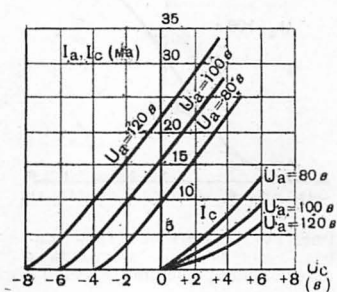


Рис. IV-8. Семейство статических сеточных характеристик триода

характеристики (см. рис. IV-6) для $U_c = -4$ в получаем $I_a = 4$ ма; для $U_c = +2$ в находим $I_a = 16$ ма и т. д.

Помимо характеристики анодного тока существует характеристика сеточного тока (см. рис. IV-7), который появляется при нуле на сетке и растет по мере увеличения положительного напряжения на сетке. У некоторых типов ламп сеточный ток появляется даже при небольших отрицательных

напряжениях на сетке. Это свидетельствует о том, что часть электронов оседает на сетке, попадая на нее, пролетая с катода к аноду.

Сеточная характеристика, рассмотренная нами, получена при некотором определенном анодном напряжении, постоянном для всех точек характеристики. Для других анодных напряжений характеристики будут иные. Форма их останется та же, но расположение изменится.

При более высоком анодном напряжении для прежних значений напряжения на управляющей сетке анодные токи будут больше и для записания лампы придется на сетку подать большее отрицательное напряжение. Поэтому характеристика для более высокого анодного напряжения пройдет левее.

При более низком анодном напряжении характеристика, наоборот, сдвинется вправо, так как лампа будет запирается при меньшем отрицательном напряжении на управляющей сетке, величины анодных токов уменьшатся.

На рис. IV-8 дана группа характеристик одной и той же лампы для различных анодных напряжений, называемая семейством сеточных характеристик.

Помимо характеристик анодного тока здесь же показано и семейство характеристик сеточного тока. Этот ток тем больше, чем меньше анодное напряжение; наоборот, при большем анодном напряжении ток сетки уменьшается, так как большее количество электронов под действием поля анода пролетает сквозь сетку, несмотря на ее притягивающее действие.

В зависимости от конструкции электродов лампы, характеристики анодного тока располагаются или в левой части — в области отрицательных напряжений сетки, или в правой — в области положительных напряжений сетки. В соответствии с этим характеристики ламп, а иногда и сами лампы называют «левыми» или «правыми».

На такое расположение характеристик больше всего влияет густота сетки. Чем гуще сетка, тем меньшее отрицательное напряжение запирает лампу, т. е. характеристики получаются более «правые». И наоборот, при редкой сетке лампа запирается при большом отрицательном напряжении на сетке и характеристики получаются «левые». Приемно-усилительные лампы чаще всего делают с «левыми» характеристиками, чтобы можно было работать без сеточных токов.

В начале этого параграфа мы говорили, что помимо сеточной характеристики исследуют зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении на сетке и получают анодную характеристику или семейство анодных характеристик (рис. IV-9).

Основная характеристика для $U_c = 0$ расположена точно так же, как и характеристика диода. Она начинается от точки, где напряжение анода равно нулю. От этой же точки начинаются характеристики для положительных значений напряжения сетки, но идут они выше основной характеристики, так как величины анодных токов при положительных напряжениях на сетке получаются большими.

Характеристики для отрицательных значений напряжения сетки расположены правее основной характеристики и начинаются от некоторых точек, соответствующих определенному положительному напряжению на аноде, на-

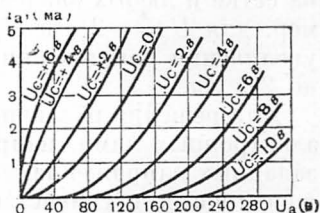


Рис. IV-9. Семейство анодных характеристик

пример характеристика $U_c = -4$ в начинается от точки, соответствующей $U_a = 80$ в. Это означает, что при анодных напряжениях меньше 80 в лампа заперта отрицательным напряжением на сетке, равным -4 в.

Подобно этому характеристика для $U_c = -8$ в начинается только от точки, соответствующей $U_a = 160$ в, так как напряжение на сетке -8 в еще сильнее запирает лампу. Из анодных характеристик можно определить также величину анодного тока для различных значений напряжения на сетке и любых значений анодного напряжения. Например, для $U_c = -2$ в и $U_a = 120$ в находим $I_a = 1$ ма, а при увеличении напряжения до 160 в анодный ток возрастает до 2,2 ма.

Для решения различных вопросов, связанных с работой электронных ламп, например для нахождения токов при заданных напряжениях, нет необходимости иметь семейство сеточных и семейство анодных характеристик, достаточно пользоваться одной из них.

Характеристики ламп различных типов приводятся в справочниках по электронным лампам.

Помимо характеристик свойства ламп оцениваются постоянными для определенного режима величинами, которые называются параметрами.

Основными параметрами триода являются: 1) коэффициент усиления μ («мю»); 2) крутизна характеристики S и 3) внутреннее сопротивление R_i .

Наиболее важный параметр триода — коэффициент усиления. Он показывает, во сколько раз изменение напряжения на управляющей сетке действует на анодный ток сильнее, чем такое же по величине изменение напряжения на аноде.

Коэффициент усиления — отвлеченное число. С его помощью можно сравнить влияние управляющей сетки и анода на анодный ток.

Рассмотрим это на примере. Для определения коэффициента усиления необходимо иметь семейство сеточных характеристик, снятых при различных значениях анодного напряжения. На рис. IV-10 показаны сеточные характеристики для триода 6Н15П, снятые при различных значениях анодного напряжения: $U_{a1} = 100$ в и $U_{a2} = 150$ в. Режим работы данного триода в точке А, отмеченной на характеристике I , как видно из рисунка, следующий:

$$U_{c1} = -1,5 \text{ в}; \quad U_{a1} = 100 \text{ в}; \quad I_{a1} = 4 \text{ ма.}$$

Увеличить анодный ток с 4 ма, допустим, до 10, т. е. добиться приращения анодного тока $\Delta I_a = 6$ ма, можно, как мы знаем, двумя путями: изменяя напряжение на аноде или на сетке. Чтобы анодный ток возрос от 4 до 10 ма при постоянном напряжении на сетке, нужно повысить анодное напряжение со 100 до 150 в (точка *B* на характеристике *II*) или при неизменном напряжении на аноде уменьшить величину отрицательного напряжения на сетке с $-1,5$ до $-0,5$ в (точка *C* на характеристике *I*).

В первом случае приращение анодного напряжения

$$\Delta U_a = U_{a2} - U_{a1} = 150 - 100 = 50 \text{ в.}$$

Во втором случае приращение напряжения на сетке составит

$$\begin{aligned} \Delta U_c &= U_{c1} - U_{c2} = -1,5 - \\ &(-0,5) = -1 \text{ в.} \end{aligned}$$

Следовательно, одинаковое изменение анодного тока может быть достигнуто изменением напряжения на сетке при постоянном анодном напряжении или изменением анодного напряжения U_a при постоянном напряжении на сетке.

Таким образом, если для изменения анодного тока на 6 ма нужно изменить анодное напряжение на 50 в при постоянном напряжении на сетке, а для такого же изменения анодного тока изменением напряжения на управляющей сетке достаточно на сетке изменить напряжение всего на 1 в, то можно сказать, что сетка действует в 50 раз сильнее, чем анод, и, значит, коэффициент усиления равен 50.

Вычисление сводится практически к следующему: на прямолинейных участках двух характеристик выбирают две точки, соответствующие одному значению анодного тока (например, точки *B* и *C* на рис. IV-10). Приращения анодного напряжения определяют как разность напряжений, при которых были сняты рассматриваемые характеристики.

Приращения напряжения сетки находят как разность напряжений сетки, соответствующих выбранным точкам ($-1,5$ и $-0,5$ в на рис. IV-10).

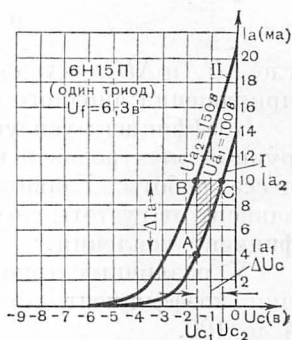


Рис. IV-10. Сеточные характеристики триода 6Н15П

Тогда коэффициент усиления определяется по формуле:

$$\mu = \frac{U_{a2} - U_{a1}}{U_{c2} - U_{c1}}, \text{ или } \mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \text{ (при } I_a \text{-пост.)}.$$

Для лампы, характеристика которой дана на рис. IV—10, коэффициент усиления равен:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \frac{50}{1} = 50,$$

где ΔU_a и ΔU_c — условные обозначения изменения, т. е. приращения анодного напряжения и напряжения сетки.

Коэффициент усиления триода зависит только от конструкции электродов и не изменяет своей величины в процессе работы. Главным образом коэффициент усиления зависит от густоты сетки: чем она гуще, тем больше коэффициент усиления.

У различных триодов в зависимости от их конструкции коэффициент усиления может быть в пределах от 4 до 100.

Но не следует делать вывод, что чем больше коэффициент усиления, тем лучше лампа. Как мы увидим в дальнейшем, для практики бывают нужны лампы как с большим, так и с малым коэффициентом усиления. Поэтому электронные лампы, в частности триоды, выпускают с различными коэффициентами усиления.

С коэффициентом усиления тесно связан другой параметр триода — *проницаемость D*.

Проницаемость — есть величина, обратная коэффициенту усиления лампы:

$$D = \frac{1}{\mu} \text{ или } D = \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a} \text{ (при } I_a \text{-пост.)}.$$

Поскольку величина μ всегда больше единицы, величина проницаемости всегда меньше единицы. Для триода, характеристика которого приведена на рис. IV-10, коэффициент усиления равен 50, а проницаемость $D=0,02$. Проницаемость иногда выражают в процентах. Для указанного случая проницаемость равна 2%.

Проницаемость показывает, что при более густой сетке влияние напряжения на сетке на величину анодного тока сказывается сильнее, чем при редкой сетке, и проникновение анодного поля сквозь густую сетку значительно слабее. Лампа с густой сеткой обладает меньшей проницаемостью, чем лампа с редкой сеткой. В этом и состоит физический смысл параметра «проницаемость».

Крутизна характеристики характеризует влияние напряжения на управляющей сетке на анодный ток.

Крутизной характеристики называют такое изменение анодного тока, которое приходится на 1 в изменения напряжения сетки при неизменных анодном напряжении и напряжении накала. Крутизна выражается в миллиамперах на вольт напряжения сетки (ма/в).

Если, например, при изменении напряжения на сетке на

$$\Delta U_c = U_{c2} - U_{c1} = 1,5 - 0,5 = 1 \text{ в}$$

анодный ток изменился на $\Delta I_a = 6 \text{ ма}$ при неизменном анодном напряжении, то крутизна

$$S = \frac{I_{a2} - I_{a1}}{U_{c2} - U_{c1}} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{6}{1} = 6 \text{ ма/в,}$$

т. е. изменение сеточного напряжения на 1 в в данной лампе вызывает изменение анодного тока на 6 ма.

Чем больше величина крутизны, тем круче идет сеточная характеристика. Таким образом, параметр S является по существу крутизной сеточной характеристики лампы.

Величина крутизны зависит от конструкции лампы. Для различных ламп крутизна может быть в пределах от 1 до 20 ма/в. Чем больше термоэлектронная эмиссия катода, чем ближе сетка к катоду и чем гуще сетка, тем больше величина S .

На различных участках характеристики данной лампы величина крутизны также неодинакова: на прямолинейном участке она наибольшая и постоянная, а на нижнем и верхнем изгибах уменьшается и уже не постоянна. В справочниках указывается крутизна, соответствующая прямолинейному участку характеристики.

Внутреннее сопротивление R_i показывает влияние анодного напряжения на анодный ток при условии постоянства напряжения на управляющей сетке. Оно определяется как отношение приращения напряжения на аноде ΔU_a к вызываемому им приращению анодного тока ΔI_a при постоянной величине напряжения на сетке:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \text{ (при } U_c \text{ - пост.)}$$

и представляет собой величину сопротивления, оказываемого триодом изменению анодного тока.

Когда триод работает в схеме усилителя или генератора, то анодный ток получается пульсирующим. Известно, что такой ток можно считать состоящим из двух токов: постоянного и переменного.

Внутреннее сопротивление R_i представляет собой сопротивление лампы между анодом и катодом для переменной составляющей анодного тока, которая возникает внутри лампы под действием переменного напряжения сетки на поток электронов. Величину внутреннего сопротивления можно определить по закону Ома. Так, для нашего примера изменение анодного напряжения $\Delta U_a = U_{a1} - U_{a2} = 150 - 100 = 50$ в, а изменение анодного тока в амперах равно $\Delta I_a = I_{a1} - I_{a2} = 10 - 4 = 6$ ма, или 0,006 а.

$$R_i = \frac{50}{0,006} = 8333 \text{ ом.}$$

Для получения сопротивления в омах необходимо выражать изменение анодного напряжения в вольтах, а изменение анодного тока — в амперах. Внутреннее сопротивление лампы переменному току в пределах прямолинейного участка характеристики постоянно и сильно увеличивается на ее загибах, так как на этих участках те же изменения анодного напряжения вызывают значительно меньшие изменения анодного тока.

Для различных триодов величина R_i имеет значение от 1000 до 100 000 ом и зависит от устройства электродов лампы. Чем меньше эмиссия катода, чем гуще сетка и чем ближе она к катоду, а также, чем дальше анод от катода, тем больше внутреннее сопротивление. Например, лампы для мощных усилителей низкой частоты должны быть с небольшим R_i .

Основные параметры триода — не строго постоянные величины. Приблизненно их можно считать постоянными только для прямолинейного участка сеточной характеристики. В общем случае все параметры триода изменяются с изменением напряжения на сетке.

Если вернуться к рис. IV-10, то мы увидим треугольник ABC (заштрихован), использующийся для определения основных параметров триода, который называют *параметрическим треугольником*. Катет AB параллелен оси ординат, и величина этого катета равна величине приращения анодного тока ΔI_a , вызываемого увеличением анодного напряжения от значения U_{a1} до значения U_{a2} . Второй катет (AC) параллелен горизонтальной оси и равен при-

ращению напряжения на сетке ΔU_c , которое вызывает такое же изменение анодного тока.

Между основными параметрами триода: S , R_i и μ — существует простая зависимость, позволяющая найти один из этих параметров, если известны два других. Формулу этой зависимости называют иногда внутренним уравнением лампы. Она имеет следующий вид:

$$R_i \cdot S = \mu.$$

Действительно, внутреннее сопротивление

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Крутизна характеристики, как мы видели выше, равна:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}.$$

Подставив эти значения в правую часть уравнения, получим:

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

Если R_i и S были вычислены на одном и том же участке характеристики, то ΔI_a как в формуле для R_i так и в формуле для S имеет одно и то же значение; поэтому, сократив на ΔI_a , получаем:

$$R_i \cdot S = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}.$$

Отношение приращения анодного напряжения к приращению напряжения сетки при одном и том же анодном токе — есть коэффициент усиления лампы, поэтому

$$R_i \cdot S = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \mu,$$

или

$$R_i \cdot S = \mu.$$

Так как проницаемость — есть величина, обратная коэффициенту усиления $\left(D = \frac{1}{\mu}\right)$, то эта формула может быть записана еще и в другом виде:

$$R_i \cdot S = \frac{1}{D},$$

или

$$DSR_i = 1.$$

Эти формулы важны, если нужно найти один параметр по двум другим, причем крутизна в этих формулах должна быть выражена в амперах на вольт (a/v).

Примеры:

1. Требуется определить коэффициент усиления лампы, имеющей $R_i=20\ 000$ ом и $S=4$ ма/в.

Находим $\mu=20\ 000 \cdot 0,004=80$.

2. Лампа имеет параметры $\mu=25$ и $S=2$ ма/в. Найти ее внутреннее сопротивление.

Из формулы $\mu=R_i \cdot S$ следует, что $R_i = \frac{\mu}{S}$, поэтому

$$R_i = \frac{25}{0,002} = 12\ 500 \text{ ом.}$$

Величина $\frac{\mu^2}{R_i}$ характеризует лампу в отношении мощности, максимальную величину которой лампа может развить во внешней цепи и называется *добротностью*. Добротность G является четвертым параметром лампы. Она позволяет сравнить каскады между собой: лучшим, очевидно, будет тот каскад усиления, который, отдавая в нагрузку определенное значение мощности, требует меньшего напряжения на входе. Численно добротность выражается в милливаттах при напряжении сетки 1 в.

Кроме основных параметров: S , R_i и μ , лампы каждого типа характеризуются величинами нормальных питающих напряжений, током эмиссии, сроком службы, максимальной допустимой мощностью потерь на аноде и другими данными.

Электроны под влиянием притяжения к аноду развивают большую скорость и со значительной силой ударяют об анод.

Например, если $U_a=100$ в, то скорость электронов достигает 6000 км/сек. Скорость электронов тем выше, чем больше анодное напряжение. В результате такой «электронной бомбардировки» анод нагревается. На его нагрев тратится некоторая энергия, или, как мы говорили, рассматривая работу диода, на аноде рассеивается мощность. Анод может сильно накалиться, иногда докрасна или добела, и даже расплавиться.

Величина мощности, рассеиваемой на аноде, обозначается P_a и подсчитывается умножением анодного напряжения U_a на анодный ток I_a . Это потерянная мощность, так как нагрев анода совершенно не нужен и даже вреден.

Для каждой лампы существует своя максимальная допустимая мощность потерь на аноде $P_{a \text{ макс}}$, зависящая от размеров, конструкции и материала анода.

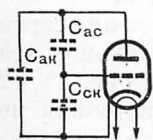


Рис. IV-11.
Междуэлектродные емкости в триоде

Чтобы у лампы при работе не перегрелся анод, фактически рассеиваемая на аноде мощность P_a всегда должна быть меньше максимальной допустимой мощности $P_{a \text{ макс}}$.

Для увеличения $P_{a \text{ макс}}$ увеличивают поверхность и размеры анода, делают его из более тугоплавкого металла со специальными ребрами для увеличения поверхности охлаждения. Кроме того, производят чернение анода, так как черная поверхность лучше излучает тепловые лучи, чем блестящая.

Применение трехэлектродных ламп в некоторых случаях ограничивается ввиду наличия в них *междуэлектродной емкости*. Электроды ламп изготовляют из металла, они отделены диэлектриком-вакуумом. Так как электроды лампы находятся под разными потенциалами относительно друг друга, то между ними образуется электрическое поле, свидетельствующее о наличии емкости. В трехэлектродной лампе три такие емкости (рис. IV-11): между анодом и сеткой $C_{ас}$, между анодом и катодом $C_{ак}$ и между сеткой и катодом $C_{ск}$. Величина каждой из емкостей зависит от размеров и формы электродов, расстояний между ними и от конструкции лампы. Междуэлектродные емкости также относятся к параметрам лампы.

В заключение следует отметить, что по эксплуатационным свойствам трехэлектродные лампы не отличаются от двухэлектродных. Так, срок службы ламп определяется способностью их катода излучать достаточное количество электронов при соблюдении нормальных режимов работы.

§ 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРИОДА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Трехэлектродная лампа имеет замечательное свойство, которое позволяет использовать ее в целях усиления слабых электрических колебаний. Оно заключается в том, что относительно небольшое изменение напряжения на сетке вызывает большое измене-

ние анодного тока. Анодный ток в триоде регулируется изменением напряжения сетки, причем такой способ регулировки обладает большой чувствительностью и практически безынерционен, т. е. изменение анодного тока происходит одновременно с изменением напряжения сетки.

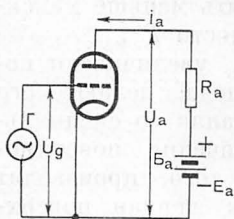


Рис. IV-12. Схема подключения к сетке лампы переменного напряжения и анодной нагрузки в цепь анода

Чтобы уяснить усилительное действие триода, рассмотрим рис. IV-12. В цепь сетки включен источник переменного напряжения G , а в анодную цепь помимо анодной батареи B_a — сопротивление нагрузки R_a . Так как в цепь сетки включен генератор переменного напряжения сигнала, то ток в анодной цепи будет изменяться по величине (но не по направлению), т. е. будет пульсирующим. Ток в анодной цепи будет протекать всегда в одном направлении, так как поток

электронов в триоде направлен всегда от катода к аноду.

Пульсирующий ток удобно представить состоящим из двух составляющих: постоянной и переменной. Особый интерес для нас представляет рассмотрение переменной составляющей пульсирующего анодного тока.

Величину пульсаций анодного тока можно найти, если воспользоваться анодно-сеточной характеристикой триода.

На рис. IV-13 показана анодно-сеточная характеристика триода и построены графики переменного напряжения сетки и колебаний анодного тока. Так как с таким графиком мы встречаемся впервые, рассмотрим несколько подробнее, как он строится.

Анодно-сеточная характеристика, с которой читатель уже знаком, строится в координатных осях, где по вертикальной оси откладывается величина анодного тока, а по горизонтальной — отрицательное (влево) и положительное (вправо) напряжение на сетке. Далее нам нужно показать изменение напряжения на сетке с течением времени.

Такой график обычно изображается так, как показано на рис. IV-13, б.

Совместим теперь оси сеточного напряжения анодно-сеточной характеристики и рис. IV-13, б. Для этого нужно повернуть график на 90° вправо так, чтобы ось времени t_1 была направлена вниз.

Наконец, график изменения пульсирующего анодного тока во времени в общем виде показан на рис. IV-13, *в*. Такой график мы и получаем в результате построения. Как же это делается?

Для построения выбираем на кривой переменного напряжения, подводимого к сетке лампы, девять произвольных точек (для более точного построения их берут

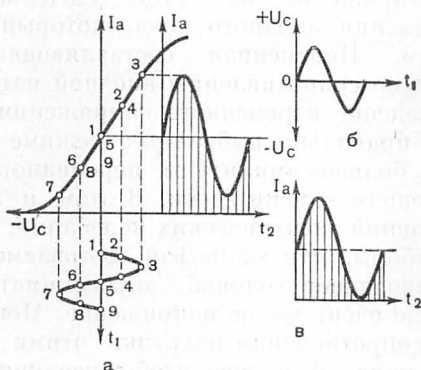


Рис. IV-13. Анодно-сеточная характеристика триода (а) и графики переменного напряжения сетки (б) и колебания анодного тока (в)

значительно больше): 1—9, причем точку 1 будем считать началом отсчета времени. Каждому значению величины напряжения на сетке соответствует определенная величина анодного тока, которую можно найти по сеточной характеристике лампы. Так, напряжению сетки, равному нулю вольт (точки 1, 5, 9), соответствует анодный ток, равный по величине I_{a0} — току покоя. Ток покоя — это величина тока в анодной цепи при отсутствии переменного сигнала, т. е. при напряжении на сетке, равном нулю.

Напряжению на сетке U_{c1} в положительный полупериод (точки 2, 4) соответствует ток, равный величине I_{a1} ; напряжению U_{c2} в отрицательный полупериод (точки 6, 8) — ток I_{a2} и т. д.

Таким образом, задаваясь определенной величиной напряжения на сетке, по сеточной характеристике находят величину анодного тока и по ним строят график изменения анодного тока. На рис. IV-13 точки, соответствующие одним и тем же моментам, обозначены одинаковыми цифрами.

Как видно из рис. IV-13 в, анодный ток изменяется по величине, но не по направлению. Таким образом, переменное напряжение, подведенное к сетке триода, вызывает появление пульсирующего анодного тока, состоящего из постоянной и переменной составляющих. Особый интерес представляет рассмотрение переменной составляющей анодного тока. Как видно из рисунка, слабые колебания напряжения на сетке (сигнала) вызывают большие изменения анодного тока, который становится пульсирующим. Переменная составляющая анодного тока, проходя по сопротивлению анодной нагрузки, создает на нем падение переменного напряжения, амплитуда которого при правильно выбранном режиме и нагрузке во много раз больше амплитуды переменного напряжения, действующего в цепи сетки. В этом и заключается сущность усиления электрических колебаний.

Такие приборы, как микрофон, фотоэлемент, магнитная воспроизводящая головка, звукозаписыватель, развивают на выходе очень малое напряжение. Мощность, развиваемая на сопротивлении нагрузки этими приборами, также очень мала. Для того чтобы увеличить мощность электрических колебаний, развиваемых этими источниками, их включают между сеткой и катодом триода, а в анодную цепь включают сопротивление нагрузки. На сопротивлении нагрузки благодаря процессам, описанным выше, будет выделяться значительно большая мощность, чем при непосредственном включении сопротивления нагрузки к источнику сигнала.

Но усиление мощности электрических колебаний возможно лишь за счет расхода энергии каким-либо другим источником. Таким источником служит анодная батарея или выпрямитель анодного питания. Лампа не является источником энергии, она сама потребляет электрическую энергию в процессе работы. Работа усилительной лампы состоит в том, что энергия постоянного тока, развиваемая источниками питания анодной цепи, преобразуется в энергию пульсирующего тока, из которого легко может быть выделена переменная составляющая.

Усиление электрических колебаний с помощью трехэлектродной лампы возможно еще и благодаря тому, что преобразование постоянного тока анодной батареи в переменный может происходить без изменения частоты и формы колебаний напряжения, подводимого к сетке лампы, при правильном выборе режима работы лампы.

При нарушении работы усилительной лампы форма переменной составляющей анодного тока может отличаться от формы кривой переменного напряжения, подводимого к сетке, т. е. форма усиленных колебаний может быть искажена.

Искажения, вносимые лампой при усилении, являются вредными, так как искажают сигнал и вносят новые, дополнительные звуки, которых не было в сигнале, подводимом к сетке лампы.

Так как усиление с искажениями теряет практический смысл, очень важно избежать искажений. Рассмотрим, когда они возникают и как их избежать.

§ 4. ИСКАЖЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ УСИЛЕНИИ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ ЛАМПОЙ

Рассматривая анодно-сеточную характеристику трехэлектродной лампы, мы отмечали, что она имеет три характерных участка: нижний загиб, прямолинейный участок и верхний загиб. Только прямолинейный участок характеристики создает прямую пропорциональность между величинами анодного тока и напряжения сетки.

Нижний и верхний загибы характеристики имеют нелинейную форму, поэтому они не могут обеспечить прямую пропорциональность между изменениями напряжения, подводимого к сетке, и изменениями анодного тока. В этих случаях лампа вносит искажения в усиливаемый сигнал, называемые *нелинейными*.

Рассмотрим неправильные, но возможные в эксплуатации режимы работы усилительной лампы, при которых возникают значительные нелинейные искажения. Под режимом работы лампы понимаются величины напряжений и токов в ее цепях.

Допустим, что по каким-то причинам значительно понизилось анодное напряжение триода. В этом случае характеристика сместится вправо и усиление будет производиться с использованием нижнего загиба характеристики. На рис. IV-14 пунктиром показана характеристика, которую имеет лампа при нормальном рабочем анодном напряжении. Как видно из рисунка, синусоидальное переменное напряжение, подводимое к сетке, имеет

такую величину, что работа при нормальном анодном напряжении лежит в пределах наиболее прямолинейного участка (участок *a*, *б*), и в этом случае лампа не вносит искажений. Сплошной линией показана характеристика при пониженном анодном напряжении.

Если переменное напряжение, подводимое к сетке лампы, имеет прежнюю величину, то работа будет про-

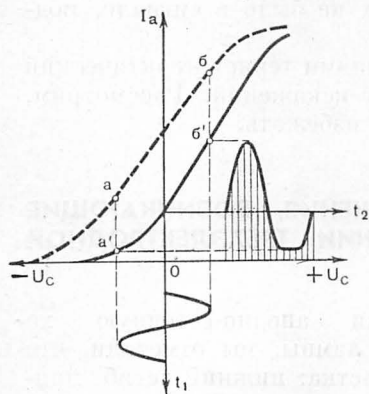


Рис. IV-14. График колебания анодного тока лампы, работающей с искажениями (работа происходит на нижнем загибе характеристики)

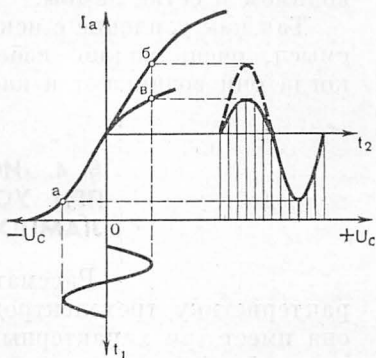


Рис. IV-15. График колебания анодного тока лампы, работающей с искажениями (работа происходит на верхнем загибе характеристики)

исходить на криволинейном участке, т. е. на нижнем загибе характеристики. Построив график анодного тока с использованием этой характеристики (таким же методом, как мы строили его на рис. IV-13, *в*), мы видим, что колебания анодного тока не соответствуют по своей форме колебаниям напряжения сетки. Форма оказалась искаженной — возникли нелинейные искажения, которые внесла лампа. Здесь причина возникновения нелинейных искажений кроется в понижении анодного напряжения.

Другой возможной причиной появления искажений является значительный недокал катода. Обратимся к рис. IV-15, где показан график колебаний анодного тока лампы, работающей с искажениями (работа на верхнем загибе). Здесь пунктиром показан график при нормальном режиме работы, т. е. при нормальной температуре катода. Но если по какой-либо причине (например, упало напряжение накала) температура катода

уменьшилась, то значительно уменьшаются ток эмиссии и ток насыщения. График в этом случае примет вид, показанный сплошной линией. Усиление теперь будет происходить с использованием верхнего загиба характеристики лампы, т. е. на криволинейном участке. В этом случае также возникают значительные искажения формы усиливаемого сигнала — лампа вносит нелинейные искажения.

Из рассмотрения этих двух примеров можно сделать важный вывод, что лампа, являясь прибором с нелинейной характеристикой, может служить источником нелинейных искажений. Мы увидим из дальнейшего, что нелинейные искажения вносятся лампой и во многих других случаях. Так, очень часто причиной появления нелинейных искажений является *перегрузка со стороны входа*, т. е. такие условия работы, когда величина переменного напряжения, подводимого к сетке, столь велика, что выходит за пределы прямолинейного участка характеристики лампы.

На рис. IV-16 показаны графики работы лампы без искажений и с искажениями от перегрузки со стороны входа. Из рисунка видно, что превышение напряжения U_{c1} , являющегося максимальным, которое может быть подведено к сетке лампы без возникновения искажений, неминуемо приводит к появлению искажений.

Если подвести к сетке значительно большее переменное напряжение U_{c2} , то работа будет происходить частично на криволинейных участках характеристики. При небольшом токе насыщения на участке $a'b'$, т. е. одновременно на верхнем и нижнем загибах характеристики, кривая колебаний анодного тока имеет срезанные вершины.

Если ток насыщения велик, то работа ведется на участке характеристики $a'b''$, и в этом случае колебания анодного тока имеют срезанные вершины только в отрицательные полупериоды.

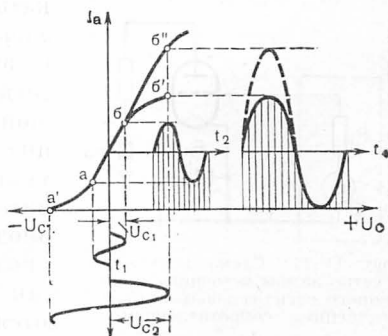


Рис. IV-16. График, иллюстрирующий неискаженную и искаженную работу усилительной лампы

Еще одной важной и распространенной причиной появления нелинейных искажений при усилении сигналов с помощью триода является наличие сеточного тока. Как это получается?

Если подать на сетку переменное напряжение сигнала, в положительный полупериод в цепи сетки будет протекать сеточный ток, так как часть электронов, летящих от катода к аноду, будет притягиваться сеткой, имеющей хотя и небольшой, но положительный потенциал относительно катода. Кроме того, сетка расположена значительно ближе к катоду, чем анод. В отрицательный полупериод сеточный ток отсутствует, так как электроны отталкиваются отрицательно заряженной сеткой.

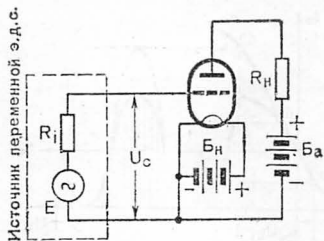


Рис. IV-17. Схема включения к сетке лампы источника переменного сигнала с большим внутренним сопротивлением

Рассмотрим рис. IV-17, на котором показана схема включения к сетке лампы источника переменного сигнала с большим внутренним сопротивлением. Обозначим внутреннее сопротивление источника R_i , а его электродвижущую силу E .

Из электротехники известно, что напряжение на зажимах генератора, работающего без нагрузки (холостой ход), равно его э. д. с. (ток не проходит через генератор, и падение напряжения на его внутреннем сопротивлении отсутствует).

Наш генератор работает без нагрузки, т. е. в режиме холостого хода в отрицательный полупериод, так как отсутствует ток в цепи сетки и напряжение, подводимое к сетке, равно э. д. с. источника $U_c = E$. В положительный полупериод появляется сеточный ток, который, проходя по внутреннему сопротивлению источника R_i , создает на нем падение напряжения. Так как внутреннее сопротивление маломощного источника велико, то даже небольшой сеточный ток будет большой нагрузкой для такого генератора и его напряжение будет значительно меньше э. д. с. (на величину внутреннего падения напряжения).

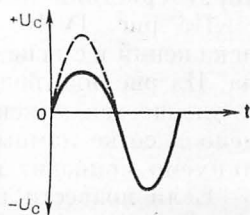


Рис. IV-18. График э. д. с. (пунктир) и напряжения на сетке

Следовательно, появление сеточного тока в течение положительных полупериодов приводит к уменьшению напряжения, подводимого к сетке в эти промежутки времени. Как видно на рис. IV-18, синусоидальное напряжение, подводимое к сетке лампы, будет искажено, ввиду наличия сеточного тока. Следовательно, будет искажена и форма кривой колебаний анодного тока, несмотря на то, что работа лампы происходит на прямолинейном участке характеристики лампы.

Очевидно, наличие сеточных токов совершенно недопустимо в процессе усиления и их как-то нужно избежать. Оказывается, появления сеточных токов можно избежать, если подать на сетку некоторое дополнительное отрицательное напряжение, называемое *напряжением смещения* или просто *смещением*. Практически в цепь сетки может быть включена батарея B_c (рис. IV-19).

Так как батарея B_c включена последовательно с источником переменного напряжения, то напряжение между сеткой и катодом усилительной лампы в течение одного полупериода равно сумме напряжений батареи смещения и источника переменного напряжения, в течение другого полупериода — разности этих напряжений. Постоянное напряжение смещения должно быть выбрано так, чтобы оно было больше амплитуды переменного напряжения, подводимого к сетке, или в крайнем случае равно ему. Тогда результирующее напряжение сетки будет изменяться лишь по величине, оставаясь по знаку отрицательным.

Следовательно, чтобы усиливать слабые электрические колебания с помощью трехэлектродной лампы без искажений их формы, нужно выбрать правильный режим работы лампы, когда используется только ее прямолинейный участок характеристики, лежащий в области отрицательных напряжений сетки (рис. IV-20).

Точка на характеристике, соответствующая постоянному отрицательному смещению на сетке U_0 , называется *рабочей точкой*.

Выбор правильного положения рабочей точки на характеристике лампы зависит от величины усиливаемого сигнала. Если напряжение сигнала небольшое, то и напряжение

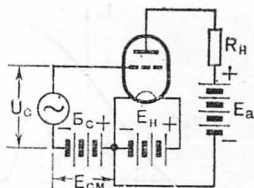


Рис. IV-19. Схема включения батареи отрицательного смещения в цепь сетки

смещения, как мы знаем, должно быть небольшим. Если напряжение смещения должно быть большим, то возникает опасность, что рабочая точка смещается в сторону нижнего криволинейного участка. Чтобы этого не произошло, нужно сдвинуть характеристику влево, увеличив анодное напряжение. В этом случае прямолинейный участок характеристики будет лежать в области отрицательных напряжений на сетке.

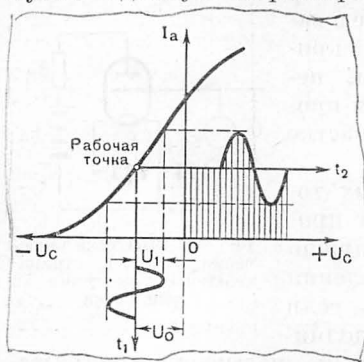


Рис. IV-20. Положение рабочей точки на характеристике лампы, работающей без искажения

Эта зависимость хорошо видна на рис. IV-21.

При небольшом анодном напряжении U_{a1} прямолинейный или рабочий участок характеристики лампы ab невелик. Если выбрать рабочую точку на середине прямолинейного участка и из нее опустить перпендикуляр на ось абсцисс, то мы определим

величину необходимого напряжения смещения U_{01} . В этом случае лампа сможет усиливать без искажений относительно небольшие по величине сигналы. При повышенном анодном напряжении U_{a2} характеристика сдвигается влево. Рабочий участок bc увеличивается, и если нужно усиливать сравнительно большой по величине сигнал, то необходимо подать большее напряжение смещения U_{02} .

Как видно из рассмотренного примера, величина выбираемого смещения (U_{01} , U_{a2} , U_{03}) не является постоянной для лампы, а зависит от величины анодного напряжения. При усилении значительных по величине колебаний на лампу подается большое анодное напряжение и значительное напряжение смещения. Если переменное напряжение сигнала превышает допустимую величину, то, как мы видели ранее, происходит перегрузка со сто-

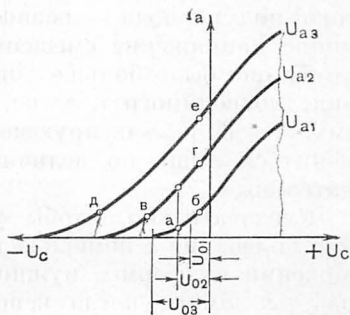


Рис. IV-21. Сравнительные режимы усилительной лампы

роны входа и возникают искажения. В мощных усилительных триодах на лампу подается большое анодное напряжение с учетом напряжения смещения на сетке. Если по каким-либо причинам напряжение смещения не будет подаваться на сетку лампы, то ток через лампу резко возрастет. В этом случае резко возрастет мощность, рассеиваемая на аноде, которая может превысить допустимую величину, возможен нагрев анода до красного каления и выход лампы из строя.

§ 5. СПОСОБЫ ПОДАЧИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ

Ранее указывалось, что избежать появления сеточных токов, вызывающих нелинейные искажения, можно, если подавать на сетку лампы кроме переменного напряжения сигнала постоянное отрицательное напряжение — напряжение смещения. Для этого в цепь сетки последовательно с источником переменного напряжения включается батарея смещения или в цепь катода включается специальное сопротивление, зашунтированное большой емкостью.

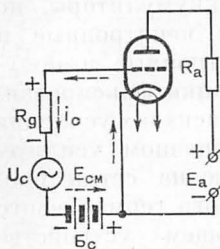


Рис. IV-22. Схема независимого смещения

Таким образом, по способу подачи смещения различают два способа или два вида схем: 1) с независимым или фиксированным смещением и 2) автоматического смещения.

Принципиальная схема подачи независимого смещения от специальной батареи смещения показана на рис. IV-22, где B_c — батарея смещения, а R_g — сопротивление в цепи сетки лампы (сопротивление утечки сетки). На этом сопротивлении источник усиливаемых колебаний (звукосниматель, магнитная воспроизводящая головка и обычно предыдущий каскад) развивает переменное напряжение входа.

Батарея смещения включается обязательно последовательно с источником переменного напряжения, так как при параллельном включении, ввиду малого сопротивления источника переменному току, он зашунтирует источник переменного сигнала и входного сигнала на сетке

лампы не будет. Поэтому напряжение смещения подается на сетку лампы через сопротивление R_g , которое должно быть достаточно велико для получения большого входного сигнала.

Когда лампа работает без сетевого тока, тогда источник независимого смещения работает в режиме холостого хода, тока в сеточной цепи нет и нет постоянного па-

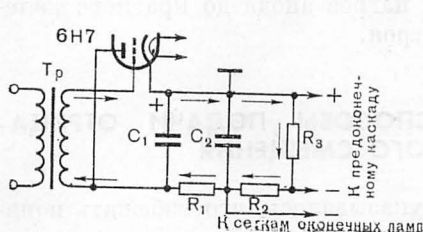


Рис. IV-23. Схема кенотронного выпрямителя независимого смещения

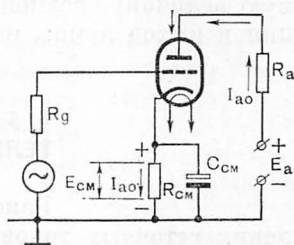


Рис. IV-24. Схема автоматического смещения

дения напряжения на сопротивлении R_g . Поэтому наличие R_g не отражается на режиме работы лампы.

В качестве источника фиксированного смещения используют гальванические элементы и аккумуляторы, но наибольшее распространение получили кенотронные и полупроводниковые выпрямители. Кенотронные и полупроводниковые выпрямители, как источники фиксированного смещения, применяются в мощных каскадах усиления низкой частоты. Так, например, в оконечном усилителе 51У-19 комплекта КЗВС-3 смещение на сетки оконечных ламп ГУ-50 подается от отдельного германиевого выпрямителя, находящегося в питающем устройстве 25В-24.

Полупроводниковые выпрямители имеют малые габариты, не требуют ухода, дешевы. Это выгодно отличает их от других источников фиксированного смещения.

В некоторых типах усилителей, например КУСУ-52, в качестве источника фиксированного смещения применяется однополупериодный кенотронный выпрямитель смещения с П-образным резисторно-емкостным фильтром, построенный на одном из триодов лампы 6Н7 (рис. IV-23). Роль анода кенотрона выполняет управляющая сетка триода, а анод использован как электростатический экран, предохраняющий усилительную лампу от наводок. Нагрузкой выпрямителя служит делитель напряжения,

с которого напряжение ($28 \div 34$ в) снимается к сеткам оконечных ламп и ламп предоконечного каскада ($2,2 \div 2,6$ в).

В аппаратуре КЗВТ-3 независимое смещение оконечных ламп подается от селенового выпрямителя, отделенного от усилителя. Величина смещения может регулироваться с помощью потенциометра.

В относительно маломощных лампах наиболее широко используется схема автоматического смещения (рис. IV-24).

Автоматическое смещение создается за счет источника питания анодных цепей усилителя. Для этого между катодом лампы и минусом источника анодного питания включаются параллельно соединенные конденсатор $C_{см}$ и сопротивление $R_{см}$.

Рассмотрим, как работает такая схема. При работе лампы в усилительном каскаде через нее протекает пульсирующий анодный ток. Постоянная составляющая анодного тока $I_{ао}$ протекает через сопротивление $R_{см}$ и создает на нем падение напряжения, величина которого равна произведению: $I_{ао} \cdot R_{см}$. Величина емкости конденсатора $C_{см}$ выбирается достаточно большой, чтобы переменная составляющая анодного тока не проходила по сопротивлению. При включении конденсатора большой емкости параллельно сопротивлению $R_{см}$ можно получить практически постоянное отрицательное смещение. Емкость электролитических низковольтных конденсаторов, которые обычно применяются в схемах автоматического смещения, достигает $5 \div 20$ мкф.

Очень важно разобраться в полярности получаемого напряжения смещения. Анодный ток, протекая по сопротивлению $R_{см}$, создает падение напряжения, плюс которого соединен с катодом лампы, а минус с общим проводом и через сопротивление R_g с сеткой. Таким образом, напряжение на сетке относительно катода получается отрицательным и равно:

$$E_g = - I_{ао} \cdot R_{см}.$$

Чтобы определить нужную в каждом конкретном случае величину сопротивления автоматического смещения, необходимо знать величину постоянной составляющей анодного тока. Эта величина определяется рабочей точкой на характеристике лампы.

Всегда нужно помнить о полярности напряжения смещения при подключении электролитических конден-

саторов в цепь смещения, так как они, как известно, также имеют полярность.

Несмотря на дешевизну и простоту, схема автоматического смещения не лишена недостатков при работе лампы в усилительном каскаде. Об этом мы скажем при рассмотрении работы усилительного каскада.

§ 6. МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

Четырехэлектродные лампы (тетроды).

Несмотря на достоинства триодов, простоту устройства и схемы включения их использование ограничивалось из-за малого коэффициента усиления и большой емкости между анодом и сеткой. Если же ввести в лампу четвертый электрод — добавочную сетку, расположенную между

управляющей сеткой и анодом триода (рис. IV-25), то коэффициент усиления лампы можно значительно увеличить. В результате введения четвертого электрода лампа превращается в четырехэлектродную, или тетрод.

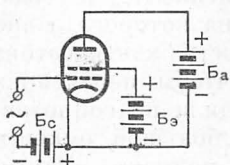


Рис. IV-25. Схема включения четырехэлектродной лампы

Дополнительная сетка представляет собой как бы экран между первой сеткой и анодом, тем самым она устраняет влияние анодной цепи

на сеточную (устраняется паразитная емкость). Дополнительную сетку называют экранирующей.

Экранирующая сетка сильно уменьшает действие анода на электроны, вылетающие с катода. Чтобы компенсировать ослабленное действие анода, к экранирующей сетке подают положительное напряжение в полтора-два раза меньше анодного. Электроны при этом будут притягиваться к аноду уже под действием анода и экранирующей сетки.

Большинство из них по инерции пролетит сквозь экранирующую сетку, так как расстояние между витками сетки несравнимо больше, чем размеры электронов. Но некоторая часть электронов притягивается и попадает на экранирующую сетку, образуя в цепи экранной сетки небольшой ток $I_{э} = 25-30\% I_{а}$. Поскольку из-за влияния экранирующей сетки увеличение или уменьшение анодного напряжения почти не вызывает изменения анодного

тока, то такая лампа имеет очень большое внутреннее сопротивление.

Внутреннее сопротивление тетродов исчисляется сотнями тысяч омов. Экранированная лампа имеет высокий коэффициент усиления ($\mu = S \cdot R_i$), который может достигать до нескольких сотен.

При всех отмеченных преимуществах обычный тетрод — недостаточно совершенная лампа, так как характеристика анодного тока тетрода имеет своеобразное очертание (рис. IV-26). Это объясняется влиянием динаatronного эффекта, проявляющегося тогда, когда напряжение на аноде меньше, чем на экранной сетке.

Вторичная электронная эмиссия заключается в том, что каждый из электронов, падающих на анод с большой скоростью, выбивает с поверхности анода несколько электронов, называемых вторичными. Если напряжение на аноде меньше, чем на экранирующей сетке, то большая часть вторичных электронов улавливается последней, в связи с чем наблюдается резкое уменьшение анодного тока.

Если проследить за изменением анодного тока по мере увеличения анодного напряжения, то легко видеть, что вначале анодный ток растет, затем, при достижении некоторой средней величины анодного напряжения, ток начинает уменьшаться и на характеристике появляется «седловина».

При дальнейшем увеличении анодного напряжения, когда его величина становится больше напряжения на экранирующей сетке, анод со все возрастающей силой притягивает вторичные электроны к своей поверхности. Анодный ток начинает снова возрастать, а ток экранирующей сетки уменьшаться.

Ток экранной сетки имеет обратную зависимость по сравнению с анодным током: сначала при увеличении анодного напряжения ток экранной сетки уменьшается, затем, когда анодное напряжение достигает значения, при котором наблюдается уменьшение анодного тока, он несколько возрастает, после чего вновь начинает уменьшаться.

Искажение формы анодной характеристики тетрода отрицательно сказывается на работе тетрода, ограничи-



Рис. IV-26. Типовая характеристика анодного тока и тока экранной сетки тетрода

вает область его применения и снижает величину полезной мощности, получаемой от лампы.

Провал анодной характеристики (см. рис. IV-26) вызывает значительные искажения формы кривой усиленного напряжения при относительно большой степени усиления. Из-за этого тетроды не используют для усиления колебаний звуковой частоты. Пентоды и лучевые

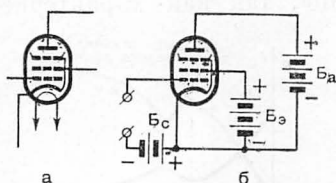


Рис. IV-27. Условное обозначение (а) и схема включения пентода (б)

тетроды, являющиеся дальнейшим усовершенствованием тетродов, не имеют этого недостатка.

Пятиэлектродные лампы (пентоды). Использовать достоинства тетродов (большой коэффициент усиления, малая проходная емкость) для усиления колебаний низкой частоты можно лишь при

подавлении в них динаatronного эффекта. Это можно сделать двумя способами:

1) введением еще одной дополнительной сетки, называемой противодинаatronной, или защитной, которая помещается между экранирующей сеткой и анодом. Такая лампа, имеющая пять электродов, называется *пентодом*;

2) особой конфигурацией и конструкцией электродов тетрода, при которой электроны летят от катода к аноду в виде расходящихся пучков лучей. Такие лампы получили название *лучевых тетродов*.

Схема пентода и его условное обозначение показаны на рис. IV-27.

Защитная сетка обычно имеет потенциал, равный потенциалу катода. У некоторых типов пентодов защитная сетка присоединяется к катоду внутри самой лампы и всегда находится под напряжением, близким к нулю, у других типов сетки с катодом соединяются снаружи. При этом она служит электрическим экраном между анодом и экранной сеткой и защищает вторичные электроны от действия высокого напряжения экранной сетки.

Вторичные электроны, оказавшиеся в пространстве между анодом и защитной сеткой, вновь притягиваются анодом, так как защитная сетка имеет отрицательный потенциал относительно анода и отталкивает вторичные электроны обратно на анод. Тем самым явление динаatronного эффекта будет устранено.

У некоторых типов пентодов защитная сетка имеет вывод к одному из штырьков цоколя лампы. Такие лампы используют в схемах различных электронных приборов и почти не применяют в усилителях низкой частоты.

В связи с лучшей экранировкой емкость анод — управляющая сетка у пентодов еще меньше, чем у тетродов.

Защитная сетка, как и экранирующая, ослабляет действие анода на поток электронов по сравнению с действием управляющей сетки, поэтому коэффициент усиления пентодов больше, чем тетродов. У современных высокочастотных пентодов μ доходит до нескольких тысяч.

Анодные характеристики пентода не имеют своеобразной седловины, свойственной анодным характеристикам тетрода. Приводим для сравнения характеристики тетрода и пентода (рис. IV-28).

Наличие защитной сетки, имеющей низкий потенциал, на пути основного электронного потока приводит к необходимости изменить режим других электродов для увеличения скорости электронов, летящих к аноду, и чтобы они смогли преодолеть препятствие в виде защитной сетки. Приходится увеличивать напряжение на экранной сетке, и часто у пентода это напряжение бывает равно анодному. Это вполне допустимо для пентода, так как противодинаatronная сетка не допускает возникновения динаatronного эффекта.

Поэтому пентод можно применять в оконечном каскаде усилителя для усиления напряжения низкой частоты, где при работе имеются большие колебания анодного напряжения.

Благодаря большому коэффициенту усиления и малой междуэлектродной емкости пентод является также отличной лампой для усиления высокой частоты.

В усилительной аппаратуре киноустановок широкое применение находит высокочастотный пентод 6Ж7. Лампы с металлическим баллоном очень прочны, имеют удобный октальный цоколь, хорошую защиту от внешних электрических и магнитных полей и им не нужен внешний экран, малые внутриламповые емкости.

Вместе с тем в лампах с металлическим баллоном трудно создать высокий вакуум, а при использовании в мощ-

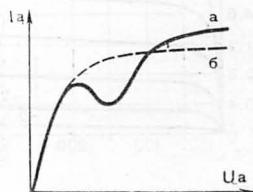


Рис. IV-28. Анодные характеристики тетрода (а) и пентода (б)

ном каскаде они сильно греются. Чаще всего лампа 6Ж7 применяется в каскадах усиления напряжения.

Анодная характеристика лампы 6Ж7 показана на рис. IV-29. Напряжение накала 6,3 в, ток накала 0,3 а.

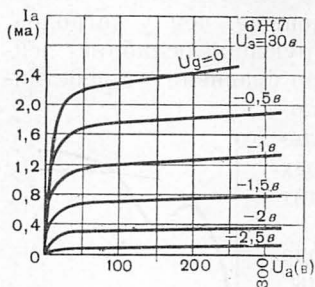


Рис. IV-29. Анодные характеристики пентода 6Ж7

Крутизна характеристики 1,2 ма/в. Коэффициент усиления 1200. Внутреннее сопротивление 1 мгом. Наибольшая мощность рассеяния на аноде 0,8 вт. Наибольшее напряжение на аноде 330 в. Наибольшее напряжение на экранной сетке 140 в.

Лучевые тетроды. Характеристики лучевых тетродов близки к характеристикам пентодов, так как в их конструкции приняты меры, устраняющие диватронный эффект.

Рис. IV-30 дает представление о форме и взаимном расположении электродов лучевого тетрода. Характерной особенностью ламп этого типа является дополнительный, так называемый лучеобразующий электрод и определенное взаимное расположение витков сеток.

Лучеобразующий электрод состоит из двух желобообразных пластин 1, расположенных между экранной сеткой 4 и анодом 5 и присоединенных внутри лампы к ее катоду 2. Управляющая 3 и экранная сетки намотаны в одну и ту же сторону с одинаковым шагом и смонтированы в лампе так, что проекция каждого полувитка второй сетки на поверхности катода совпадает с проекцией соответствующего полувитка первой сетки.

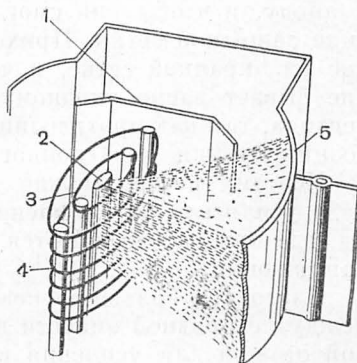


Рис. IV-30. Устройство лучевого тетрода

Такая конструкция создает возможность потоку электронов, летящему от катода, разделяться сетками на отдельные плоские «лучи». Плотность электронов в этих пучках получается гораздо бо́льшая, чем в электронном

потоке обычных ламп. Вследствие этого электронные пучки оказывают сильное отталкивающее действие на вторичные электроны и мешают им попадать на экранную сетку.

Формированию лучей способствуют также и желобообразные пластины-экраны, соединенные с катодом и ограничивающие электронный поток с боков.

Фокусирование электронного потока в таких тетрадах на отдельные лучи и дало лампам название лучевых тетродов. Лучевые тетроды 6ПЗС и 6РЗС широко применяются для усиления мощности электрических колебаний низкой частоты в большинстве усилителей. Лучевой тетрод 6П1П является оконечным в серии пальчиковых ламп.

Комбинированные лампы. Комбинированная лампа состоит из двух-трех однотипных или разнотипных ламп, смонтированных на одной ножке и помещенных в одном баллоне. Применение комбинированных ламп сокращает количество отдельных ламп в усилительных устройствах, благодаря чему упрощается конструкция, уменьшаются габариты, вес и стоимость этих устройств.

Простейшая комбинированная лампа — двойной диод или двойной кенотрон. Лампа, состоящая из двух одинаковых триодов, помещенных в одном баллоне, называется двойным триодом.

В двойном триоде 6Н9С имеются отдельные подогревные катоды, подогреватели соединены параллельно. Аноды и сетки имеют отдельные выводы. Все это позволяет использовать такую лампу в двух различных каскадах. В радиоприемной аппаратуре используется комбинированная лампа двойной диод-триод. Она состоит из триода и двух диодов. Двойной диод-триод заменяет три отдельные лампы.

Такая лампа, как двойной диод-пентод, состоит из двух диодов и пентода. Широко применяется в качестве визуального индикатора настройки на частоту принимаемого сигнала специальная лампа, называемая электронно-световым индикатором настройки, или «магическим глазом» (6Е5С). Эта лампа представляет собой комбинацию триода с люминесцирующим экраном, светящимся зеленым светом под действием потока электронов.

Экран лампы находится под полным напряжением источника анодного тока. На пути электронного потока к экрану с одной стороны катода находится плоский управляющий электрод — нож, напряжение на котором

одинаково с напряжением на аноде лампы. Свечение сектора экрана, находящегося за управляющим электродом, зависит от соотношения напряжений на экране и на этом электроде.

Если эти напряжения одинаковы, то сектор, находящийся за управляющим электродом, светится так же, как и весь остальной экран. Если напряжение на управляющем электроде уменьшается, то на части экрана, находящейся за ним, получается затененный сектор, потому что количество попадающих туда электронов уменьшается. Ширина затененного сектора зависит от величины напряжения на управляющем электроде. Так как направляющий электрод соединен с анодом, а напряжение на аноде зависит от силы принимаемых сигналов, то по ширине затененного сектора можно судить о точности настройки приемника.

Помимо комбинированных ламп в радиотехнике применяются многосеточные лампы. Одной из наиболее распространенных среди них является пятисеточная лампа (пентагрид). В такой лампе первые две сетки составляют триодную часть лампы (первая — управляющая, а вторая — анод генератора). На четвертую сетку подается напряжение сигнала. Третья и пятая сетки — экранирующие.

В настоящее время выпускается очень много различных электронных ламп. В зависимости от назначения лампы отличаются друг от друга как электрическими параметрами, так и конструктивным выполнением.

§ 7. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Схема устройства электронно-лучевой трубки показана на рис. IV-31. Рассмотрим устройство трубки простейшего типа. Внутри стеклянного баллона *б*, из которого выкачен воздух, помещены: катод *1*, фокусирующий цилиндр *2*, аноды *3* и две пары отклоняющих пластин *4* и *5*. Внутренняя поверхность торцевой части баллона *7* (экран) покрыта флюоресцирующим составом. На рис. IV-31 указаны и напряжения, подводимые к трубке: анодное напряжение E_a и напряжение питания фокусирующего цилиндра $E_{ц}$.

Катод (обычно подогревного типа) окружен цилиндром. На цилиндр подается отрицательный потенциал относи-

тельно катода, благодаря чему электроны, вылетающие с катода, не разлетаются в разные стороны, а образуют электронный луч. При изменении потенциала цилиндра меняется концентрация электронов в электронном луче. Работа фокусирующего цилиндра аналогична действию управляющей сетки в электронной лампе. От концентрации электронов в электронном луче зависит яркость светящегося пятна на экране трубки. Движок потенциометра

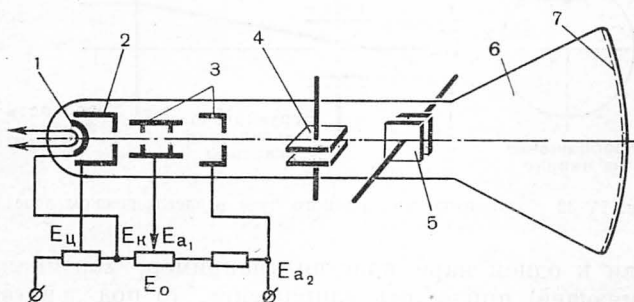


Рис. IV-31. Схема устройства электронно-лучевой трубки

связан с ручкой, называемой «Яркость», в таких приборах, как осциллограф или телевизор.

Анод также выполняется в виде цилиндра, а иногда и в виде двух цилиндров, в торцовых частях которых сделаны отверстия. Электроны, пролетев фокусирующий цилиндр и выйдя из него, попадают на анод расходящимся пучком, но часть из них проскакивает через отверстия и попадает на экран трубки. Результирующее электрическое поле обоих анодов и катода оказывает фокусирующее действие на электронный луч. Поскольку в таких трубках фокусировка электронного луча производится путем изменения электрического поля, то такой способ фокусировки называется электростатическим.

В телевизорах чаще используются трубки с магнитной фокусировкой. В этом случае в промежутке между катодом и анодом поверх трубки помещают катушку и пропускают по ней постоянный ток. Вокруг катушки создается продольное магнитное поле, которое и собирает летящие электроны в тонкий луч. При хорошей фокусировке в центре флюоресцирующего экрана наблюдается резко очерченная светящаяся точка.

На пути от анода до экрана электронный луч проходит через отклоняющую систему, которая может быть выполнена в виде взаимно перпендикулярных пар пластин или магнитных катушек. В первом случае для отклонения луча используется электрическое поле, а во втором — магнитное.

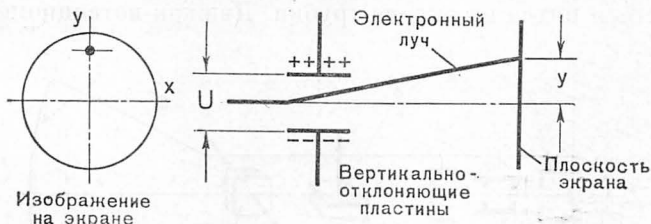


Рис. IV-32. Отклонение электронного луча в электрическом поле

Если к одной паре пластин (например, вертикально отклоняющей) приложить напряжение, то под действием электрического поля электроны будут смещаться в сторону положительного потенциала.

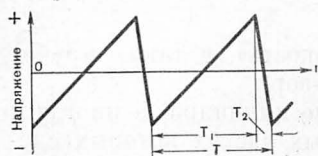


Рис. IV-33. График пилообразного напряжения развертки

Отклонение электронного луча на экране будет наблюдаться как смещение светящейся точки в вертикальном направлении. Смещение будет тем больше, чем сильнее электрическое поле между пластинами (рис. IV-32).

При создании электрического поля между горизонтально-отклоняющими пластинами электронный луч будет перемещаться в горизонтальном направлении.

Если к вертикально-отклоняющим пластинам подвести переменное синусоидальное напряжение, то на экране мы увидим прямую линию, величина которой будет пропорциональна амплитуде переменного сигнала.

Чтобы увидеть на экране синусоиду, на горизонтально-отклоняющие пластины дополнительно подводят пилообразное напряжение (рис. IV-33) от специального генератора. Такое напряжение называют напряжением развертки, а генератор — генератором развертки.

Напряжение развертки обеспечивает горизонтальное перемещение светящегося пятна с постоянной скоростью

и после достижения крайней точки экрана мгновенное возвращение в исходное положение. Благодаря такому устройству на экране электронно-лучевой трубки можно получить кривую, воспроизводящую какое-либо неизвестное напряжение (сигнал), и исследовать его.

Приборы, в которых используется электронно-лучевая трубка для исследования переменных сигналов, называются электронными осциллографами. Разновидностью такой электронно-лучевой трубки является кинескоп, широко используемый в телевизорах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Опишите устройство трехэлектродной лампы и двойного триода.
2. Как расшифровывается обозначение, присваиваемое лампе?
3. Какие электрические цепи существуют в схемах с трехэлектродными лампами и из каких элементов они состоят?
4. Чем объясняется появление сеточного тока при небольших отрицательных напряжениях, подводимых к сетке?
5. Какими двумя способами можно управлять анодным током в триоде?
6. Чем отличаются различные типы триодов?
7. От каких трех величин зависит анодный ток в триоде?
8. Назовите характеристики трехэлектродной лампы.
9. Какие характерные участки имеет сеточная характеристика триода?
10. Что называется режимом насыщения? При каких условиях сеточный ток лампы сильно возрастает, а анодный ток уменьшается?
11. Что называется семейством сеточных характеристик?
12. Какую зависимость показывает анодная характеристика триода? Что называют семейством анодных характеристик?
13. Что называют параметрами ламп?
14. Перечислите наиболее важные параметры триода.
15. В чем заключается физический смысл параметра коэффициент усиления триода?
16. Как находится численное значение коэффициента усиления по семейству сеточных или анодных характеристик триода?
17. От чего зависит коэффициент усиления лампы?
18. Что показывает крутизна характеристики триода?
19. Что называют внутренним сопротивлением лампы?
20. Как связаны между собой основные параметры триода?
21. Как определяется величина мощности, рассеиваемой на аноде лампы, и каково ее практическое значение?
22. Между какими электродами в триоде существуют междуэлектродные емкости?
23. Из-за чего возникают нелинейные искажения при усилении?
24. Объясните назначение отрицательного смещения.
25. Как осуществляется автоматическое смещение усилительных ламп?

26. Из каких соображений выбирается величина конденсатора, шунтирующего сопротивление смещения?
27. В чем состоит явление вторичной эмиссии и динатронный эффект?
28. Как устранить динатронный эффект?
29. Каковы преимущества пентода по сравнению с триодом?
30. Как устроен лучевой тетрод?
31. Почему тетроды не используются в усилителях низкой частоты?
32. В чем преимущества комбинированных ламп?
33. Какие многосеточные лампы вы знаете?
34. Как работает электронно-лучевая трубка?

ТРАНЗИСТОРЫ (ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРИОДЫ)

§ 1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА

В § 5 главы II мы познакомились с полупроводниковыми вентилями и их основным свойством односторонней проводимости на границе раздела полупроводников с различными типами проводимости. Транзистором называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор с электрическими переходами, имеющий три вывода.

Транзистор (полупроводниковый триод) представляет собой трехслойный полупроводник с чередующимися типами проводимости. Например, два слоя полупроводника с дырочной проводимостью, разделенные слоем полупроводника с электронной проводимостью, образуют транзистор типа $p-n-p$.

На рис. V-1 показано схематическое устройство плоскостного транзистора типа $p-n-p$ (а) и графически представлено распределение потенциала вдоль транзистора (б). Точно так же может быть изготовлен транзистор типа $n-p-n$, в котором два слоя полупроводника с электрон-

ной проводимостью разделены слоем с дырочной проводимостью.

Если от каждого из трех слоев сделать отвод, то получается система с тремя электродами. С помощью металлических выводов, припаянных к слоям, транзистор вклю-

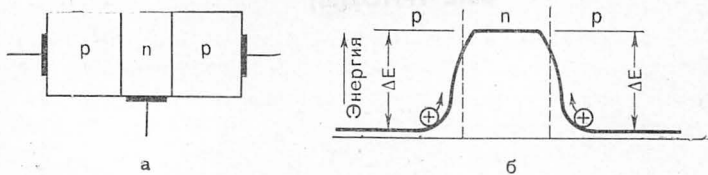


Рис. V-1. Схематическое устройство плоскостного транзистора типа $p-n-p$ (а) и графическое представление распределения потенциала вдоль транзистора (б)

чается в схему. В рабочих условиях к транзистору подключают смещающие батареи; при этом один из слоев в цепях батарей служит общим электродом.

Средний слой транзистора называют *базой*, или *основанием*. На рис. V-2, а показана схема подключения

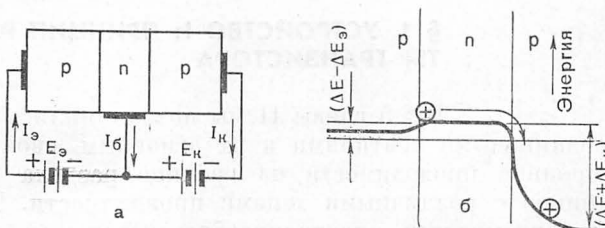


Рис. V-2. Схема подключения смещающих батарей к транзистору типа $p-n-p$ (а) и распределение потенциала вдоль транзистора (б)

смещающих батарей к транзистору, когда общим электродом служит база. Полярность включения батарей должна быть такой, чтобы один из энергетических барьеров понизился, а другой повысился. Электронно-дырочный переход, к которому батарея подключена в пропускном (прямом) направлении, называется *эмиттером* — он служит поставщиком зарядов и аналогичен с этой точки зрения катоду электронной лампы. Этот $p-n$ -переход называется эмиттерным. Электронно-дырочный переход, к которому батарея подключена в обратном направлении,

называется *коллектором* — этот электрод аналогичен аноду электронной лампы.

Если в транзистор типа $p-n-p$ включена батарея так, что плюс ее соединен с эмиттером, а минус — с базой, то потенциальный барьер на переходе эмиттер — база понизится и распределение потенциала вдоль транзистора будет иметь вид, показанный на рис. V-2, б.

При таком включении батареи дырки из эмиттера начнут перемещаться через переход в область базы, а электроны — из области базы в область эмиттера. Так как в эмиттере сосредоточено значительно больше дырок, чем электронов в базе, результирующий ток определяется в основном движением дырок от эмиттера в базу.

Если замкнуть цепь коллектор — база, включив в нее батарею минусом к коллектору, то высота второго потенциального барьера увеличится. Это значит, что дыркам из области коллектора будет еще труднее проникнуть в область базы. Но если в области базы окажутся дырки (практически введенные туда из области эмиттера), то они будут легко «скатываться» из базы в коллектор.

Проникшие из эмиттера в область базы дырки движутся в направлении коллектора, частично рекомбинируя на пути с электронами. Соединение дырки с электроном (рекомбинация) приводит к исчезновению как дырки, так и свободного электрона. Последний замещает дырку в соответствующей валентной связи, и нейтрализованные заряды уже не участвуют более в проводимости.

Скорость движения дырки зависит от разности потенциалов между эмиттером и базой (или между эмиттером и коллектором). Чем больше эта разность, тем быстрее движется дырка.

Транзисторы изготавливают так, что расстояние между эмиттерным и коллекторным переходами меньше среднего пути движения дырки, что обеспечивает такую работу, при которой большая часть их не успевает рекомбинировать и «скатиться» с потенциального барьера в область коллектора.

В области эмиттера с дырочной проводимостью действует поле внешней эмиттерной батареи, способствующее дрейфу дырок через эмиттерный переход в область базы. Здесь часть дырок рекомбинирует с электронами, а подавляющее большинство дрейфует далее и беспрепятственно проникает через коллекторный переход в область коллектора. Дырки движутся под действием поля внешней

коллекторной батарее E_k , включенной между базой и коллектором.

Беспрепятственное движение дырок через коллекторный переход означает, что последний обладает малым сопротивлением. С увеличением отрицательного напряжения коллекторной батареи E_k сопротивление коллекторного перехода начинает при некотором E_k резко возрастать до весьма большого значения (порядка мегом). Это вызвано тем, что при неизменном напряжении эмиттерной батареи $E_э$ число дырок, поставляемых из эмиттера в единицу времени, постоянно и ограничено, а коллектор, если E_k достаточно велико, их быстро удаляет. В подобном случае ток не успевает расти столь же быстро, как возрастает напряжение E_k , что эквивалентно большому сопротивлению цепи (рис. V-3).

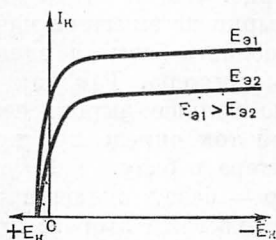


Рис. V-3. Зависимость изменения тока коллектора от напряжения коллекторной батареи при различных значениях напряжения на эмиттере

эквавалентно большому сопротивлению цепи (рис. V-3).

Дальнейший рост E_k почти не приводит к росту тока коллектора. Последний может возрасти лишь с увеличением тока эмиттера, т. е. с увеличением числа дырок, поставляемых эмиттером, как видно из графиков на том же рисунке.

Рассматривая процессы, происходящие внутри транзистора, мы акцентировали внимание на дырочной проводимости. Во внешней цепи ток переносится электронами. Электронные токи протекают в базовой области в направлениях, обозначенных на рис. V-2 соответствующими стрелками. Ток, протекающий в цепи эмиттера, называют *током эмиттера* $I_э$, а в цепи коллектора — *током коллектора* I_k . В рассматриваемой схеме рис. V-2 ток коллектора является выходным током, а ток эмиттера — входным.

Отношение изменения тока коллектора к вызвавшему его изменению тока эмиттера при постоянном напряжении коллектора называют *статическим коэффициентом усиления по току* α :

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_э} \text{ при } U_k = \text{пост.}$$

Для плоскостных триодов α всегда меньше единицы. В современных транзисторах $\alpha=0,9-0,99$.

Если посмотреть на рис. V-2, а, то видно, что ток в базовом проводе I_b равен разности между токами эмиттера и коллектора:

$$I_b = I_a - I_k = (1 - \alpha) \cdot I_a.$$

Таким образом, в транзисторе мы имеем дело с тремя токами и в триоде так же с тремя токами в трех цепях.

Конструктивное устройство сплавленного германиевого транзистора типа $p-n-p$ показано на рис. V-4. Эмиттерный и коллекторный $p-n-p$ -переходы в таких транзисторах получают вплавлением в германий типа n металла индия в среде водорода при температуре 550°C .

Транзистор смонтирован на круглом металлическом основании с двумя отверстиями, в которых установлены изоляторы. Через изоляторы пропущены выводы коллектора и эмиттера. Вывод базы припаян непосредственно к основанию прибора.

Кристалл германия в виде тонкой пластинки установлен на особой шайбе, прикрепленной к основанию. К пластинке германия типа n с двух сторон вплавлен индий, примеси которого создают в германии слой типа p . К индию припаяны выводы эмиттера и коллектора. Все устройство заключено в стальной цилиндрический корпус, спаянный с основанием.

Конструкция кремниевых транзисторов типа $n-p-n$ аналогична приведенной выше. Для получения $n-p-n$ -переходов в пластинку кремния типа p вплавляют с двух сторон сплав олова с небольшим содержанием фосфора. Кремниевые транзисторы (например, П101, П102, П103) имеют несколько большие размеры, чем германиевые,

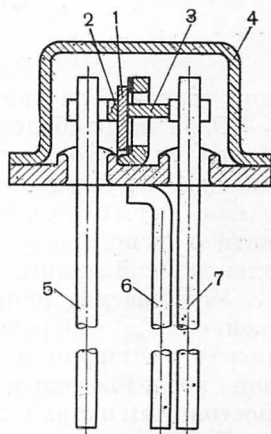


Рис. V-4. Устройство сплавленного германиевого транзистора типа $p-n-p$: 1 — электрод коллектора; 2 — кристалл германия; 3 — электрод эмиттера; 4 — колба; 5 — вывод коллектора; 6 — вывод базы; 7 — вывод эмиттера

при равных допустимых мощностях, рассеиваемых на коллекторах (150 мвт). Более мощные транзисторы снабжаются радиатором, сделанным из меди — металла, обладающего высокой теплопроводностью.

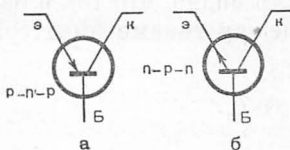


Рис. V-5. Обозначение транзисторов на принципиальных схемах: а — типа $p-n-p$; б — типа $n-p-n$

На принципиальных схемах транзисторы типа $p-n-p$ обозначаются так, как показано на рис. V-5, а, а транзисторы типа $n-p-n$ — как на рис. V-5, б.

§ 2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Рассмотрим некоторые схемы включения транзистора при работе его в усилительном каскаде.

Одна из наиболее простых схем усилительного каскада на транзисторе показана на рис. V-6, а, где транзистор включен по схеме с общей базой. На рис. V-6, б приведена схема аналогичного каскада с использованием электронной лампы.

Усиливаемое напряжение $U_{вх}$ включено между эмиттером и базой последовательно с постоянным напряжением $E_э$. Если напряжение $U_{вх} = 0$, т. е. отсутствует, то в цепи эмиттера протекает ток постоянной величины $I_э$, а в цепи коллектора — ток $I_к \approx I_э$. Ток коллектора, проходя по сопротивлению нагрузки, создает на нем падение напряжения постоянной величины:

$$U_n = I_k \cdot R.$$

Если в цепь эмиттера включено переменное напряжение $U_{вх}$, то ток в цепи эмиттера $I_э$ становится пульсирующим, изменяя величину в соответствии с изменениями $U_{вх}$. Количество дырок, перешедших в базу, а следовательно, и ток коллектора также изменяются по закону

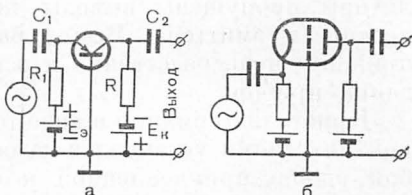


Рис. V-6. Включение транзистора по схеме с общей базой (а) и электронной лампы по схеме с общей сеткой (б)

изменения $U_{вх}$. В этом случае на сопротивлении нагрузки R происходит падение напряжения, переменная составляющая которого через конденсатор C_2 подается на выход усилительной схемы в виде величины $U_{вых}$.

В этой схеме, как видно из рисунка, входной сигнал создает ток в цепи эмиттер — база, а выходной сигнал (выходное напряжение) снимается с нагрузочного резистора R , установленного в цепи коллектор — база. Как нетрудно видеть, контакт базы — *общий* для входного и выходного сигналов. Поэтому рассматриваемая схема усилительного транзисторного каскада называется схемой с *общей базой*, или сокращенно ОБ.

В схеме с общей базой используются два источника питания с электродвижущей силой: $E_э$ и $E_к$. Батарея $E_э$ служит для создания в цепи эмиттера некоторого постоянного тока, определяющего режим работы транзистора, его рабочую точку, — это ток смещения. Величина тока смещения определяется э. д. с. батареи, сопротивлением участка транзистора эмиттер — база и величиной резистора R_1 .

Практически сопротивление перехода эмиттер — база много меньше R_1 .

Поскольку сопротивление эмиттер — база невелико, небольшое изменение входного напряжения создает значительное изменение тока эмиттера. При этом ток в цепи коллектора, определяемый э. д. с. батареи $E_к$, сопротивлением участка транзистора коллектор — база и нагрузочным резистором R , также начинает изменяться.

При подаче переменного напряжения во входную цепь транзистора изменение тока в его выходной цепи несколько меньше, чем изменение тока во входной цепи, т. е. усиления по току в данной схеме не получается.

Но так как сопротивление участка коллектор — база велико, то можно выбирать большое нагрузочное сопротивление R , на котором коллекторный ток создает падение напряжения, во много раз превосходящее входное переменное напряжение.

Коллекторный ток почти равен эмиттерному и поэтому, если выбрать R значительно бóльшим, чем сопротивление входной цепи, то падение переменного напряжения на нагрузке $U_{вых}$ будет значительно больше входного напряжения $U_{вх}$.

Значит, схема может использоваться как усилитель напряжения.

Усилительные свойства транзистора характеризуются коэффициентом усиления по напряжению:

$$k_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{I_K \cdot R}{I_3 \cdot r_3}$$

где r_3 — сопротивление входной цепи транзистора (сопротивление участка эмиттер — база).

Так как $I_K \approx I_3$, то $k_u \approx \frac{R}{r_3}$.

Благодаря тому что в этой схеме может быть большим сопротивление нагрузки R , эта схема с успехом может

применяться для усиления мощности, так как выходная мощность при неизменном токе прямо пропорциональна R .

Коэффициент усиления по мощности:

$$k_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{I_K^2 \cdot R}{I_3^2 \cdot r_3} \approx \frac{R}{r_3}$$

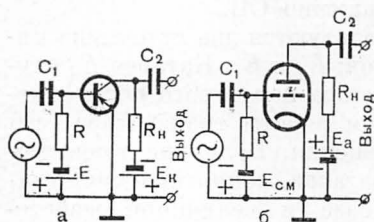


Рис. V-7. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером (а) и электронной лампы по схеме с общим катодом (б)

Выше было сказано, что коллекторный ток приблизительно равен и даже несколько меньше эмиттерного, поэтому усиления по току в этой схеме не происходит. Коэффициент усиления по току равен:

$$k_i = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_3} < 1.$$

Для различных типов плоскостных транзисторов $\alpha = 0,90-0,99$.

Рассмотренная схема с общей базой основными свойствами напоминает схему усилительного каскада на электронной лампе с общей («заземленной») сеткой (см. рис. V-6, б). Эмиттер транзистора может быть уподоблен катоду электронной лампы — источнику электронов, база — сетке электронной лампы, а коллектор — ее аноду.

Схема с общей базой, как и с общей сеткой, не изменяет фазы усиливаемого колебания, имеет малое входное и большое выходное сопротивления.

Помимо рассмотренной имеются две схемы включения транзисторов: с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

Схема с общим эмиттером применяется чаще других (рис. V-7, а). Входное напряжение сигнала подается между базой и эмиттером. Постоянная составляющая (ток смещения) создается батареей E . Источником тока коллектора служит батарея E_k ; R — нагрузочное сопротивление.

В схеме с общим эмиттером можно получить большое усиление по току, что является преимуществом этой схемы. Коэффициент усиления по току k_i представляет собой отношение переменной составляющей выходного тока к переменной составляющей входного тока. В данном случае выходной ток является током коллектора ΔI_k , а входной — током базы ΔI_b :

$$k_i = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_3 - \Delta I_k} = \frac{\alpha}{1 - \alpha},$$

где

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_3}.$$

В схеме с ОЭ отношение переменного тока коллектора к переменному току базы обозначают буквой β . Тогда

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b}, \text{ или } \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Коэффициент усиления по мощности равен:

$$k_p = k_i \cdot k_u = \beta \cdot k_u,$$

так как

$$k_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Схема с общим эмиттером сходна с самой распространенной схемой усилительного каскада на электронной лампе с общим катодом (рис. V-7, б). Фаза усиливаемых колебаний оборачивается на 180° . Входное сопротивление схемы несколько больше, чем у схемы с общей базой. Это свойство в сочетании с большим усилением по току позволяет эффективно использовать схему в многокаскадных усилителях.

Схемы с общим эмиттером дают усиление по току в десятки раз и усиление по напряжению в сотни раз, так что усиление по мощности достигает нескольких тысяч. Большим достоинством этой схемы является также воз-

возможность применения одного источника питания коллектора и смещения во входной цепи.

Схема с общим коллектором приведена на рис. V-8, а. Входной сигнал действует в цепи база — коллектор, а нагрузочное сопротивление R включается в цепь база — эмиттер. Схема с общим коллектором напоминает свои

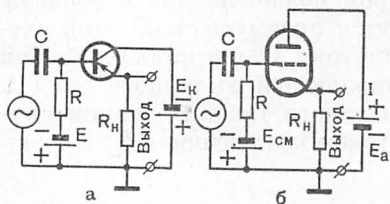


Рис. V-8. Включение транзистора по схеме с общим коллектором (эмиттерный повторитель, а) и электронной лампы по схеме с общим анодом (катодный повторитель, б)

своими свойствами схему катодного повторителя (рис. V-8, б), которая подробно рассматривается в главе VII. Она иногда называется эмиттерным повторителем. Схема обладает высоким входным и низким выходным сопротивлениями, не меняет фазы сигнала и применяется главным

образом в тех случаях, когда нужно согласовать сопротивления, например, при работе усилителя на выносную линию или от высокоомного звукоснимателя.

Коэффициент усиления по току может быть найден по формуле:

$$k_i = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_э - \Delta I_к} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э}} = \frac{1}{1 - \alpha}.$$

Например, при $\alpha = 0,95$

$$k_i = \frac{1}{1 - 0,95} = 20.$$

Эта схема дает наибольший по сравнению с другими схемами коэффициент усиления по току. Однако так как в схеме действует 100%-ная отрицательная обратная связь, то коэффициент усиления по напряжению меньше единицы, а усиление по мощности меньше, чем по току.

Уместно сравнить свойства транзисторов со свойствами электронных ламп.

В лампах управление анодным током (потоком электронов на участке катод — анод) производится путем изменения напряжения, приложенного между сеткой и катодом. В транзисторах носителями зарядов являются электроны и дырки, передвижение которых от эмиттера к коллектору происходит обычно в результате разности

концентраций носителей в областях, смежных с этими электродами.

В транзисторах управление током коллектора осуществляется в области эмиттера за счет изменения величины эмиттерного тока в соответствии с изменением напряжения между эмиттером и базой.

Входное сопротивление триода имеет большую величину, а у транзисторов, оно, как правило, мало. Поэтому при работе в режиме усиления в цепи сетки электронной лампы отсутствует сеточный ток, а у транзистора в цепи базы всегда проходит ток.

У триода входной сигнал практически не зависит от выходного напряжения, а у транзисторов всегда существует внутренняя обратная связь.

Общим свойством транзистора и электронной лампы является то, что, расходуя малую мощность во входной цепи, можно управлять значительно большей мощностью в выходной цепи.

Преимущества транзисторов перед электронными лампами состоят в простоте схемы и электрического питания, малых размерах и весе, мгновенной готовности к работе и высоком к. п. д., высокой прочности и долговечности.

Наряду с перечисленными преимуществами транзисторы имеют и целый ряд недостатков, к числу которых относятся: малое входное сопротивление; высокий уровень шумов; зависимость стабильности работы транзистора от окружающей температуры и влажности; внутренняя обратная связь, требующая применения специальных методов ее нейтрализации; сильная чувствительность к электрическим перегрузкам, даже кратковременным, которые ведут к порче транзисторов. Все эти недостатки объясняются в основном тем, что еще не выработана совершенная технология их изготовления.

§ 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРА

Так же как и для электронных ламп, зависимости, существующие между токами и напряжениями транзистора, подключенного к источникам питания, удобно представлять графически в виде характеристик.

Чтобы облегчить понимание возможных характеристик, представим себе транзистор в виде четырехполюсни-

ка (рис. V-9). Из схемы видно, что между собой взаимосвязаны четыре величины: I_1 , U_1 , U_2 , I_2 .

Для такого четырехполюсника могут быть построены четыре вида характеристик:

1. Входные характеристики, которые выражают зависимость входного напряжения от входного тока при постоянной величине выходного напряжения.

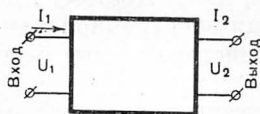


Рис. V-9. Четырехполюсник

2. Выходные характеристики, которые показывают зависимость выходного тока от выходного напряжения и постоянной величины входного тока.

3. Характеристики передачи по току, которые показывают зависимость выходного тока от входного при постоянном значении выходного напряжения. Эта характеристика отражает процесс передачи энергии от входных зажимов к выходным.

4. Характеристики обратной связи по напряжению — зависимость входного напряжения от выходного при постоянном значении входного тока. Они отражают процесс передачи энергии от выходных зажимов к входным, т. е. характеризуют степень обратного воздействия выходной цепи на входную.

Форма каждой из четырех характеристик непостоянна. Она зависит от того, какой электрод транзистора является общим для входной и выходной цепей. Поэтому характеристики транзистора различны для разных схем его включения в цепь.

Наиболее часто приводятся и используются входные и выходные характеристики для той или иной схемы включения. Так, для схемы с общей базой входные характеристики транзистора показаны на рис. V-10. Коллекторные (выходные) характеристики для той же схемы показаны на рис. V-11.

По двум видам характеристик транзистора можно определить его параметры, т. е. так же, как по характеристикам ламп определяют их параметры. Различают две группы параметров транзисторов.

Первичные параметры характеризуют электрические свойства самого транзистора и не зависят от схемы его включения в электрическую цепь. Вторичные параметры определяются схемой включения.

Первичными параметрами называют: сопротивление эмиттерного перехода $r_э$ (оно равно десяткам ом);

сопротивление базы $r_б$ (его величина составляет сотни ом);

сопротивление коллекторного перехода $r_к$ (его величина составляет сотни тысяч ом).

В эту же группу параметров входят: коэффициент усиления по току (см. стр. 144), который обозначается

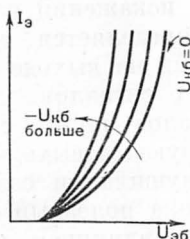


Рис. V-10. Входные характеристики транзистора при включении по схеме с общей базой



Рис. V-11. Коллекторные характеристики транзисторов типа $p-n-p$ при включении по схеме с общей базой

буквой α — в схеме включения транзистора с общей базой и буквой β — в схеме включения с общим эмиттером.

Вторая группа параметров, так называемых характеристических, устанавливает связь между малыми приращениями токов и напряжений, действующих в транзисторе. Они необходимы при анализе и расчете нелинейных систем, к которым относятся и схемы с транзисторами.

Существует несколько систем характеристических параметров. Наибольшее распространение в практике полупроводниковых усилителей получила система неоднородных или смешанных параметров, представляющая собой серию формул, которые легко позволяют рассчитать ту или иную схему усилительного каскада на транзисторе.

Кроме того, транзисторы и их свойства характеризуются целым рядом других показателей и величин. Параметры транзисторов сильно зависят от режима питания и температуры. Это часто служит причиной несовпадения расчетных данных с результатами экспериментов, а в выходных каскадах — причиной появления нелинейных искажений.

С повышением частоты усиливаемых колебаний свойства транзисторов также меняются: параметры, которые считаются постоянными величинами, даже при малых сигналах становятся иными на высоких частотах. Объясняется это тем, что сопротивление коллекторного перехода велико и емкость в несколько десятков пикофард начинает проявляться на частотах в несколько десятков килогерц. Поэтому емкость коллекторного перехода является важной величиной, определяющей частотную характеристику усилительного каскада.

Помимо нелинейных и частотных искажений качество работы усилительного устройства определяется шумами (помехами) — посторонними сигналами на выходе усилителя даже при отсутствии полезных сигналов.

При наличии усиливаемых сигналов шумы складываются с ними, из-за чего результирующее выходное напряжение искажается и при прослушивании создается неприятный характерный эффект. Пока полезный сигнал много больше, чем напряжение шумов, влиянием последних можно пренебречь. Когда же они станут соизмеримыми с полезными сигналами, воспроизведение оказывается неприемлемым. Поэтому помехи ограничивают возможность усиления слабых сигналов и ставят предел увеличения коэффициента усиления.

В транзисторных усилителях шум возникает по ряду причин, главная из которых — принципиально неустраняемые электрические флуктуации.

Электрическими флуктуациями называются малые колебания величин флуктуаций потенциалов или токов из-за неравномерного (хаотического) характера электрических процессов в веществе. В транзисторах главное значение имеет тепловой шум базы. С ним соизмеримы флуктуации тока эмиссии дырок в $p-n$ -переходе и шумы, обусловленные беспорядочной рекомбинацией дырок с электронами, т. е. вызванные самой природой полупроводника.

Практически удобно оценивать транзистор коэффициентом шума, равным отношению мощности шумов в выходном нагрузочном сопротивлении к мощности шумов, которая получалась бы в этом сопротивлении, если бы усилитель их не создавал. Эта мощность равна мощности шумов, развиваемых сопротивлением генератора входного сигнала, умноженной на коэффициент усиления по мощности усилителя. Коэффициент шума транзистора F прак-

тически зависит не от схемы включения и сопротивления нагрузки, а от сопротивления генератора входного сигнала и становится минимальным при $R_r = 500 \text{ ом}$. Коэффициент шума зависит также от частоты. Для типовых транзисторов $F = 10 - 25 \text{ дб}$ на частоте 1000 гц .

Наличие шумов ограничивает возможность усиления слабых сигналов, так как вместе с полезным сигналом усилитель усиливает и шумы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные преимущества и недостатки транзисторов?
2. Как устроен транзистор типа $p-n-p$?
3. Перечислите три возможные схемы включения транзисторов.
4. Какая из трех схем включения транзисторов дает наибольшее усиление по току, по мощности и напряжению?
5. Какая схема включения транзисторов имеет наибольшее входное сопротивление?
6. Какая схема включения транзисторов имеет наибольшее выходное сопротивление и какая — наименьшее?
7. Дайте определение коэффициента усиления по току для схемы с общей базой.
8. Как связан коэффициент усиления по мощности с коэффициентом усиления по току и по напряжению?
9. Перечислите основные характеристики транзистора.

ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

§ 1. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

В соответствии с современными представлениями о строении вещества (см. гл. II, § 1) в металлах при отсутствии внешнего электрического поля внутри кристаллической решетки хаотически перемещаются свободные электроны, имея различные направления и различные скорости.

Однако эти электроны в обычных условиях не могут выйти за пределы вещества, так как не имеют достаточной энергии. Чтобы электрон смог выйти из металла в вакуум, он должен обладать значительной энергией, чтобы преодолеть электрические силы, действующие на него на границе раздела металл — вакуум.

Такой необходимой энергией электрон может обладать только в том случае, если дополнительная энергия будет сообщена ему извне. При выходе электрона за границу тела он совершает работу по преодолению сил электрического поля. Эта работа называется *работой выхода*

и измеряется в электрон-вольтах (эв); она постоянна для каждого металла.

Так, например, нижеперечисленные металлы имеют следующие значения работы выхода электрона: цезий 1,81, барий 2,52 и вольфрам 4,52 эв .

Для сравнения можно указать значение работы выхода электрона и для некоторых других металлов, которые находят применение при изготовлении электровакуумных приборов: кальций 2,71, торий 3,4, молибден 4,16, алюминий 4,23 эв .

Как следует из приведенных данных, цезий и барий требуют наименьшей затраты дополнительной энергии для испускания электронов.

Дополнительная энергия, необходимая электрону для совершения им работы выхода, может быть практически сообщена различными путями в виде тепловой, световой, механической энергии или энергии электрического поля.

Так как работа фотоэлементов основана на использовании фотоэлектронной эмиссии, рассмотрим этот вопрос более подробно.

Под действием светового потока с поверхности металла излучаются свободные электроны. Это явление получило название внешнего фотоэффекта.

Установлено, что фотоэлектронная эмиссия происходит с поверхности данного металла тем сильнее, чем короче длина волны падающего на него света, т. е. чем больше частота света. Фотоэлектронная эмиссия происходит лишь тогда, когда частота падающего света ν больше некоторой величины ν_0 , присущей данному металлу, или, что то же самое, когда длина волны падающего света λ будет меньше некоторой определенной для данного металла величины λ_0 .

Эта частота ν_0 называется граничной частотой. Точно так же длина волны λ_0 является граничной длиной волны, или, как ее часто называют, красной границей фотоэффекта. Граничная длина волны для различных металлов тем больше, чем меньше работа выхода для данного металла. Так, для цезия, обладающего наименьшим значением работы выхода, граничная длина волны лежит в пределах $1760 \div 908 \text{ нм}$ *, а для бария — в пределах $777 \div 538 \text{ нм}$.

* нм (нанометр) = $10^{-9} \text{ м} = 10^{-6} \text{ мм}$; раньше назывался миллимикрон.

§ 2. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

Фотоэлементом называют прибор, преобразующий колебания света в соответствующие колебания электрического тока.

По принципу действия различают две основные группы фотоэлементов: 1) электровакуумные фотоэлементы и 2) полупроводниковые фотоэлектрические приборы.

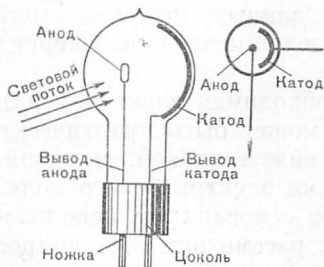


Рис. VI-1. Устройство электровакуумного фотоэлемента и условное обозначение на схеме

Электровакуумные фотоэлементы широко используются в звуковом кино. Они являются неотъемлемой частью звуковоспроизводящих устройств, работающих с фотографической фонограммой. В зависимости от степени разреженности газа в электровакуумном фотоэлементе, различают два их вида: 1) фотоэлемент электронного разряда (электронный фотоэлемент), 2) фотоэлемент темного разряда (ионный фотоэлемент).

Устройство фотоэлемента относительно несложно. Электровакуумный фотоэлемент представляет собой прибор с фотоэлектронным катодом. Конструктивно он состоит из стеклянной колбы, из которой выкачан воздух.

Внутренняя стенка баллона посеребрена и покрыта тонким слоем калия или цезия. Это покрытие занимает примерно 50% площади внутренней поверхности колбы и представляет собой катод. Остающаяся без покрытия часть баллона образует световое окно фотоэлемента. В центре баллона в форме колечка помещен анод фотоэлемента (рис. VI-1). Выводы от катода и анода присоединяются к ножкам цоколя фотоэлемента.

Для работы фотоэлемента к его электродам необходимо подвести напряжение от внешнего источника питания (рис. VI-2); в цепь включается резистор — сопротивление нагрузки.

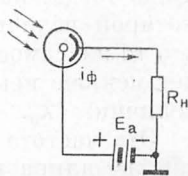


Рис. VI-2. Схема включения фотоэлемента

Под действием светового потока, падающего на катод, с него вылетают электроны. Так как к аноду приложен значительный положительный потенциал относительно катода, электроны стремятся попасть на анод. Благодаря такому перемещению электронов во внешней цепи фотоэлемента возникает электрический ток (фототок), имеющий относительно небольшую величину. Источником этого тока служит батарея с напряжением E_a , включенная последовательно с фотоэлементом и сопротивлением нагрузки.

Роль светового потока сводится к управлению током в цепи источника питания; ток в цепи фотоэлемента протекает лишь тогда, когда катод освещен. При выключении света ток прекращается. Величина тока в вакуумном фотоэлементе пропорциональна величине светового потока, падающего на катод (рис. VI-3).

Величина тока в электронном, а также в ионном фотоэлементах зависит от напряжения между анодом и катодом фотоэлемента и от светового потока, падающего на его катод. Следовательно, для выяснения закономерностей изменения можно установить две зависимости — две характеристики. Одна из них называется световой характеристикой (рис. VI-3) и показывает зависимость тока от величины светового потока при постоянном анодном напряжении. Другая называется вольтамперной характеристикой и показывает зависимость тока от величины анодного напряжения

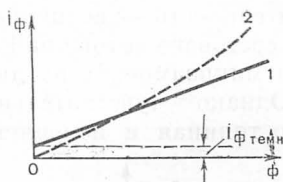


Рис. VI-3. Световые характеристики фотоэлементов: 1 — электронного; 2 — ионного

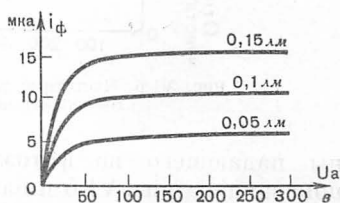


Рис. VI-4. Вольтамперные характеристики электронного фотоэлемента

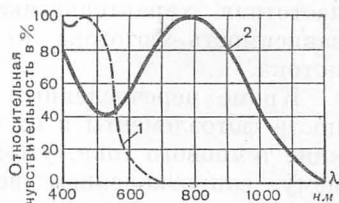


Рис. VI-5. Спектральные характеристики фотоэлементов: 1 — с сурьмяно-цезиевым катодом; 2 — с кислородно-цезиевым катодом

и показывает зависимость тока от величины светового потока при постоянном анодном напряжении. Другая называется вольтамперной характеристикой и показывает зависимость тока от величины анодного напряжения

при постоянном значении падающего на катод светового потока (рис. VI-4).

Основным параметром фотоэлемента является его чувствительность — величина изменения тока при изменении светового потока на 1 лм. Чувствительность измеряется в микроамперах на люмен (мкА/лм).

Однако чувствительность фотоэлемента — величина непостоянная и изменяется в зависимости от длины вол-

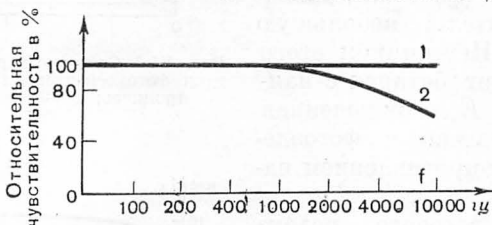


Рис. VI-6. Частотные характеристики фотоэлементов: 1 — электронного; 2 — ионного

ны падающего на фотоэлемент света. Зависимость эта показана на рис. VI-5 и называется спектральной характеристикой фотоэлемента. Она показывает, что максимальный фототок получается при какой-то определенной длине волны света. Последняя зависит от материала фотокатода.

Наконец, важная характеристика фотоэлемента — его частотная характеристика (рис. VI-6), показывающая зависимость фототока от частоты колебаний светового потока.

Кроме перечисленных характеристик и чувствительности фотоэлементы и их свойства оцениваются по величине темнового тока, утомляемости и старению, внутреннему сопротивлению, величине напряжения питания и др.

Под утомляемостью фотоэлемента понимают резкое, но обратимое снижение его чувствительности при увеличении освещенности катода. Если фотоэлементу дать «отдохнуть» в темноте, его чувствительность восстановится.

Старением называют необратимое уменьшение чувствительности с течением времени, происходящее в результате физико-химических изменений в сложном катоде.

Темновым называется ток, протекающий через включенный в цепь питания фотоэлемент, когда он находится в темноте. Темновые токи обусловлены термоэлектронной

эмиссией и током утечки (например, по стеклу баллона). При постоянной температуре темновые токи возрастают при увеличении анодного напряжения фотоэлемента.

Свойства и параметры фотоэлементов в значительной мере зависят от материала и типа примененного катода.

В электровакуумных фотоэлементах обычно применяют так называемые кислородно-цезиевые и сурьмяно-цезиевые катоды.

Ознакомившись с характеристиками и параметрами электровакуумных фотоэлементов, можно суммировать их технические данные.

Чувствительность электронных фотоэлементов с кислородо-цезиевым катодом (типа ЦВ) составляет 20—25 *мкА/лм*, а с сурьмяно-цезиевым катодом (типа СЦВ) — 80—85 *мкА/лм*.

Частотная характеристика прямолинейна, т. е. фотоэлемент практически безынерционен. Световая характеристика прямолинейна, т. е. фотоэлемент не вносит нелинейных искажений. Несмотря на указанные достоинства электронного фотоэлемента, он имеет один серьезный недостаток — относительно малую чувствительность (30 ÷ 50 *мкА/лм*).

Ионные фотоэлементы выгодно отличаются по величине чувствительности от вакуумных. В них внутрь баллона вводится инертный газ при давлении 0,1—0,01 *мм рт. ст.* При этом изменяются физические процессы, происходящие в фотоэлементе, и его характеристики.

Ионные фотоэлементы включаются в цепь таким же образом, как и электронные. При падении светового потока на катод ионного фотоэлемента из катода вылетает некоторое количество электронов, образующих первичный фотоэлектронный ток. Эти электроны при движении к аноду, обладая значительной скоростью, встречают на своем пути молекулы газа, соударяются с ними и ионизируют их, что приводит к развитию лавинообразного процесса ионизации газа и значительному возрастанию тока в цепи фотоэлемента.

Ионный фотоэлемент имеет нелинейную вольтамперную характеристику (рис. VI-7), что требует выбора

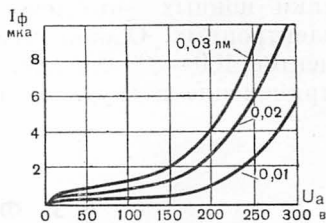


Рис. VI-7. Вольтамперные характеристики ионного фотоэлемента

Такого рабочего участка, где вносимые искажения минимальны.

Частотная характеристика имеет спад на высоких частотах (см. рис. VI-6). Световая характеристика также нелинейна (см. рис. VI-3). Таким образом, все характеристики ионных фотоэлементов уступают характеристикам электронных. Однако чувствительность ионных фотоэлементов 100—300 *мкА/лм*, и это определило их широкое применение в звуковом кино.

§ 3. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ

Фотоэлектронными умножителями называются фотоэлементы, которые используют не только фотоэлектронную эмиссию, но и вторичную электронную эмиссию. Эти приборы имеют значительно большую чувствительность по сравнению с электровакуумными фотоэлементами (500—600 *мкА/лм*) при сохранении всех положительных характеристик электронных фотоэлементов.

✓ Электроды фотоэлектронного умножителя заключены в стеклянном баллоне, из которого выкачан воздух до высокой степени вакуума. Под действием света, падающего на катод, с его поверхности излучается некоторое количество электронов, которые направляются к вторичному катоду (эммитеру) с достаточно большой скоростью и, ударившись о его поверхность, выбивают из него некоторое количество вторичных электронов, которые направляются к аноду.

✓ В результате использования явления вторичной эмиссии происходит усиление электронного потока, который в конечном итоге попадает на анод. Помимо одноступенного можно построить и многокаскадные фотоэлектронные умножители. 2

В звуковом кино применяются исключительно однокаскадные приборы ФЭУ-1 и ФЭУ-2 с сурьмяно-цезиевым катодом (что позволяет использовать их для воспроизведения черно-белых и цветных фонограмм).

Катод и эммитер изготовлены по одинаковой технологии и имеют одинаковые свойства, но назначение их различно. Первичный катод служит источником фотоэлектронов, испускаемых за счет действия светового потока, а

Эмиттер является источником вторичных электронов, вылетающих за счет динаatronного эффекта.

Схема включения однокаскадного фотоэлектронного умножителя показана на рис. VI-8. В цепи анода проте-

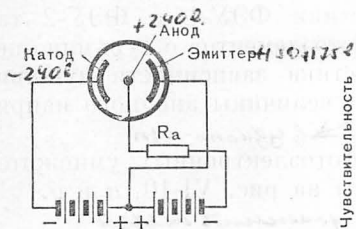


Рис. VI-8. Схема включения однокаскадного фотоэлектронного умножителя

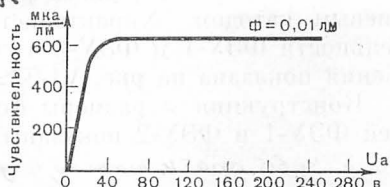


Рис. VI-9. Характеристика зависимости чувствительности ФЭУ-1 и ФЭУ-2 от величины анодного напряжения

кает суммарный ток (из первичных электронов, частично попадающих на анод, и вторичных электронов от эмиттера), который заметно превосходит ток, создаваемый

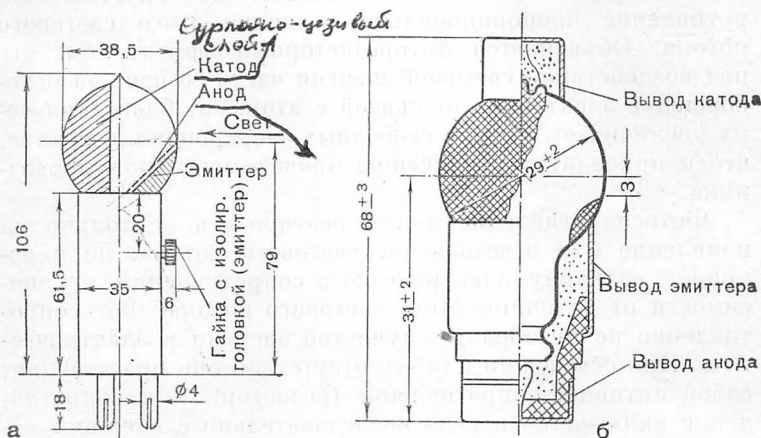


Рис. VI-10. Конструкции и размеры фотоэлектронных умножителей ФЭУ-1 (а) и ФЭУ-2 (б)

электронами, испускаемыми катодом. В этом случае происходит усиление фотоэлектронного тока внутри самого фотоэлемента.

Катоды фотоэлектронных умножителей нанесены на внутренней стенке стеклянного баллона примерно один

против другого. Анод изготовлен в виде металлической сетки и расположен вблизи эмиттера. Общее рабочее напряжение фотоэлектронного умножителя равно 220 в. Напряжение на эмиттере 160—180 в.

Спектральные характеристики ФЭУ-1 и ФЭУ-2 такие же, как и электронных фотоэлементов с сурьмяно-цезиевым катодом. Характеристика зависимости чувствительности ФЭУ-1 и ФЭУ-2 от величины анодного напряжения показана на рис. VI-9. *→ в узких кат. ктн.*

Конструкция и размеры фотоэлектронных умножителей ФЭУ-1 и ФЭУ-2 показаны на рис. VI-10, а и б. *Увл. чувств. пратк. можно, а уменьшить кат. ктн.*

§ 4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Фотосопротивления. Фоторезисторный эффект заключается в том, что у ряда полупроводников (селен, сернистый галлий и др.) под действием световой энергии изменяется по величине электрическое сопротивление пропорционально величине этого светового потока. Объясняется фоторезисторный эффект тем, что под воздействием световой энергии часть ее идет на освобождение электронов от связей с атомами, благодаря чему увеличивается число свободных электронов в веществе, что и приводит к увеличению проводимости полупроводника.

Фотосопротивление может реагировать не только на появление или исчезновение светового потока, но и изменяет величину электрического сопротивления в зависимости от величины этого светового потока. Фотосопротивление не преобразует лучистой энергии в электрическую. При освещении или его отсутствии оно представляет собой активное сопротивление (резистор). Фотосопротивление включается в цепь последовательно с внешним источником питания и без него работать не может. При постоянной величине приложенного к фотосопротивлению напряжения величина протекающего тока будет зависеть от интенсивности облучения.

Приемная площадь фотосопротивления изготавливается в виде квадрата, прямоугольника или круга и может иметь размеры от 3 до 400 мм².

Фотоэлементы с запирающим слоем (фотогальванические элементы) непосредственно преобразуют падающую на

них световую энергию в электрическую, т. е. являются генераторами электрической энергии, и не требуют для работы источника внешнего напряжения.

Фотогальванические элементы работают благодаря внутреннему фотоэффекту, заключающемуся в том, что на поверхности раздела двух слоев под воздействием света возникает э. д. с.

Широкое распространение получили селеновые и серно-таллиевые фотоэлементы.

В селеновом фотоэлементе относительно толстый электрод изготавливается из алюминия или стали. На эту

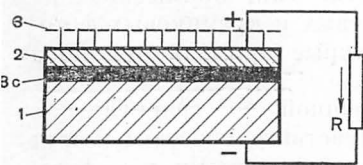


Рис. VI-11. Селеновый фотоэлемент с запирающим слоем с фронтальным фотоэффектом: 1 — электрод; 2 — селен; 3 — слой металла; 3с — запирающий слой

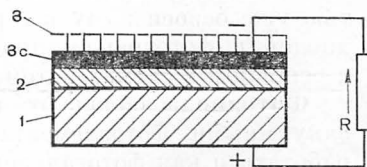


Рис. VI-12. Серно-таллиевый фотоэлемент с запирающим слоем с тыловым фотоэффектом: 1 — электрод; 2 — селен; 3 — слой металла; 3с — запирающий слой

основу наносится тонкий слой селена. Сверху методом катодного распыления наносится тончайший полупрозрачный слой металла. Запирающий слой всегда образуется между полупрозрачным слоем металла и селена.

Под действием светового потока электроны, освобождающиеся в слое селена, направляются через запирающий слой к полупрозрачному слою, заряжая его отрицательно. Направление тока в цепи показано на рис. VI-11; в данном случае происходит так называемый фронтальный фотоэффект.

В серно-таллиевом фотоэлементе при аналогичном расположении слоев, но при различной термической обработке может образоваться фотоэлемент либо с фронтальным фотоэффектом, либо с тыловым. В последнем случае электроны, высвобождающиеся под действием света в слое полупроводника, направляются к основанию (рис. VI-12).

Селеновый фотоэлемент имеет спектральную характеристику, близкую по своему виду к кривой спектральной чувствительности глаза, и поэтому он находит широкое применение в фотометрических приборах, в частности в

экспонетрах — приборах для измерения яркости и освещенности.

Чувствительность селенового фотоэлемента 500—600 *мкА/лм*. Максимальное значение э. д. с. не превышает 0,35 *в* при световых потоках, близких 1 *лм*. Максимум спектральной чувствительности лежит в области 590 *нм*. Селеновые фотоэлементы имеют очень нелинейную световую характеристику и ограниченную полосу пропускания частот.

В последние годы проводятся большие работы по использованию полупроводников, свойства которых тают в себе неограниченные возможности. Так, промышленностью уже освоен выпуск германиевых и кремниевых фотодиодов и фототранзисторов, которые применяются пока в основном в схемах автоматики.

Фотодиоды обладают повышенной по сравнению с вакуумными фотоэлементами чувствительностью, могут работать и как фотогальванические элементы и как фоторезисторы. **Фототранзисторы** одновременно с преобразованием лучистой энергии в электрическую позволяют также усиливать фотоэлектронный ток.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие три вида эмиссии вы знаете?
2. В чем состоит назначение фотоэлемента при воспроизведении фонограммы?
3. Как устроен электровакуумный фотоэлемент?
4. В чем заключается принципиальное различие между электронным и ионным фотоэлементами?
5. Перечислите основные параметры и характеристики электровакуумного фотоэлемента.
6. Дайте определение чувствительности фотоэлемента.
7. Какие зависимости показывают вольтамперная и световая характеристики?
8. Что понимается под утомляемостью фотоэлемента?
9. Какое явление используется в работе фотоэлектронного умножителя?
10. Перечислите достоинства и укажите недостатки фотоэлектронных умножителей.
11. В чем заключается фоторезисторный эффект и в каких приборах он используется?
12. Какое применение в кинотехнике находят фотодиоды?

УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

§ 1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Усилителем называется устройство, с помощью которого осуществляется усиление, т. е. увеличение напряжения, тока или мощности электрических колебаний.

Различают усилители низкой частоты, высокой частоты, широкополосные усилители (видеоусилители) и усилители постоянного тока.

Усилители низкой частоты предназначены для усиления колебаний звуковой частоты от 16 до 20 000 *гц*. Эти усилители широко используют в аппаратуре для записи и воспроизведения звука в звуковом кино, в радиовещании, в телевидении и т. п.

На необходимость применения усилителей электрических сигналов при воспроизведении звука в звуковом кино указывалось раньше. Мощность, подводимая к громкоговорителям для создания достаточной громкости звука в зрительном зале кинотеатра, должна составить единицы, десятки и даже сотни ватт, в то время как

фотоэлемент с чувствительностью 200 мка/лм развивает мощность всего $6 \cdot 10^{-7}$ вт.

В звукотехнике применяются только ламповые и полупроводниковые усилители. Они и составляют предмет нашего изучения.

Принцип усиления основан на применении управляемого активного или реактивного сопротивления (электронной лампы, транзистора и др.), которое включается в цепь источника тока последовательно с полезной нагрузкой. Основное свойство управляемого сопротивления состоит в том, что при действии в цепи управления слабого электрического сигнала соответственно изменяется величина его сопротивления и ток в более мощной цепи содержащей нагрузку. Колебания малой мощности, подлежащие усилению, подводятся к управляющей цепи, а в цепи нагрузки получаются значительно более мощные колебания.

Отсюда следует, что управляемое сопротивление является усилительным элементом.

Сочетание усилительного элемента с необходимыми для его работы элементами схемы представляет собой одну ступень усиления, называемую каскадом.

Так, в усилительном каскаде, собранном на электронной лампе, в анодную цепь включается сопротивление нагрузки и источник анодного питания, а усиливаемые колебания подводятся к управляющей сетке. В усилительном каскаде, собранном на транзисторе по схеме с общей базой, нагрузочное сопротивление и источник питания (батарея коллектора) включены в цепь коллектора, а усиливаемые колебания подводятся к цепи эмиттер-база.

Увеличение мощности колебаний происходит за счет потребления каскадом энергии источников питания.

Таким образом, усилитель является преобразователем энергии постоянного тока в энергию колебаний звуковой частоты, если на его вход подводятся слабые колебания звуковой частоты. Однако обеспечить нужное усиление одним усилительным каскадом, как правило, не удастся, поэтому в практических схемах сигнал последовательно усиливается несколькими каскадами.

При конструировании усилителя, исходя из необходимого усиления, определяют число ступеней усиления или число каскадов. Усилители, содержащие несколько каскадов усиления, называются многокаскадными.

Отдельные каскады могут связываться между собой различными способами. В усилителях низкой частоты используются три вида связей между каскадами: 1) непосредственная, или гальваническая (усилители постоянного тока), 2) реостатно-емкостная (или просто реостатная) и 3) трансформаторная.

Наиболее распространены реостатно-емкостная и трансформаторная связи.

Скелетная схема многокаскадного усилителя приведена на рис. VII-1. Элементы, служащие для связи дан-

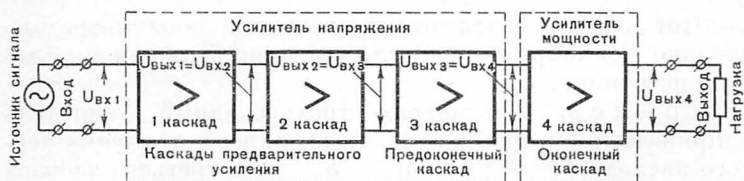


Рис. VII-1. Скелетная схема многокаскадного усилителя

ного каскада с последующим или с внешней нагрузкой, входят в схему данного каскада. На этой скелетной схеме каждый каскад представлен в виде четырехполюсника, имеющего два входных и два выходных зажима.

Очень слабые колебания напряжения, которые должны быть усилены, подводятся к входным зажимам первого каскада, выходные зажимы которого соединены последовательно с входными зажимами следующего и т. д.

Отвлеченное число, которое показывает, во сколько раз при помощи одного усилительного каскада повышается напряжение, подводимое от источника, называется *коэффициентом усиления этого каскада*. Числовое значение коэффициента усиления каскада определяется как отношение переменного напряжения на выходных зажимах каскада к переменному напряжению на его входных зажимах.

Применительно к усилительному каскаду, собранному на электронной лампе (рис. VII-2), коэффициент усиления

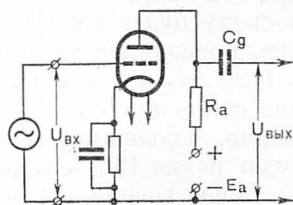


Рис. VII-2. Усилительный каскад низкой частоты

каскада K — есть отношение переменного напряжения, действующего на сопротивлении анодной нагрузки $U_{\text{ВЫХ}}$ к переменному напряжению, подводимому к сетке лампы $U_{\text{ВХ}}$:

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Если усилитель состоит из нескольких каскадов, то общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

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

Этот общий коэффициент усиления показывает, во сколько раз напряжение после усиления больше напряжения источника.

Пример. Рассмотрим трехкаскадный усилитель напряжения (см. рис. VII-1). Коэффициент усиления первого каскада $K_1=15$; второго — $K_2=12$ и третьего каскада $K_3=10$. Общий коэффициент усиления всего усилителя напряжения может быть подсчитан:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 15 \cdot 12 \cdot 10 = 1800.$$

Если к входу такого усилителя подвести переменное напряжение от микрофона $U_{\text{ВХ}_1}=10$ мв, то первым каскадом это напряжение будет усилено в 15 раз и ко второму каскаду будет подведено $U_{\text{ВХ}_2}=10 \cdot 15=150$ мв. Напряжение, подводимое на вход третьего каскада $U_{\text{ВХ}_3}=150 \cdot 12=1800$ мв $=1,8$ в, и на выходе третьего каскада напряжение составит $U_{\text{ВХ}_3}=1,8 \cdot 10=18$ в. Таким образом, напряжение, подводимое к мощному или оконечному каскаду, будет равно 18 в (см. рис. VII-1).

Ранее говорилось о логарифмической шкале (см. стр. 20). Так как мы воспринимаем изменение громкости звука пропорционально логарифму изменения звукового давления, то и коэффициент усиления иногда удобно измерять в логарифмических единицах — децибелах. Отношение напряжений (усиление) в децибелах L равно:

$$L = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 20 \lg K.$$

Коэффициент усиления усилителя напряжения, рассмотренного нами в примере ($K=1800$) в логарифмических единицах, равен:

$$L = 20 \lg K = 20 \lg 1800 \approx 20 \cdot 3,25 = 65 \text{ дб.}$$

Если коэффициент усиления отдельных каскадов L_1 , L_2 , L_3 выражается в децибелах, то для определения общего коэффициента усиления всего усилителя коэффициенты усиления отдельных каскадов суммируются:

$$\begin{aligned} L_{[общ]} &= 20 \lg K = 20 \lg (K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \dots) = \\ &= 20 \lg K_1 + 20 \lg K_2 + 20 \lg K_3 + \dots = \\ &= L_1 + L_2 + L_3 + \dots \end{aligned}$$

Вернемся к рассмотрению рис. VII-4. Помимо усилителя напряжений в скелетной схеме усилителя имеется еще один оконечный или выходной каскад. Последний каскад усилительного устройства является всегда каскадом, развивающим мощность в нагрузку.

Если назначение усилителя напряжения состоит только в том, чтобы усилить в необходимое число раз переменное напряжение сигнала, то назначение оконечного усилителя заключается в том, чтобы развить необходимую мощность в нагрузку, например такую мощность электрических колебаний в громкоговорителе, чтобы заставить перемещаться его подвижную систему и диффузор.

Мощный каскад характеризуется коэффициентом усиления по мощности:

$$K_p = 10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \text{ дб.}$$

При логарифме отношения мощностей ставится множитель 10, а при логарифме отношения напряжений — 20, так как мощность пропорциональна квадрату напряжений.

Другой характеристикой мощного каскада является величина чувствительности (или добротности) мощного каскада:

$$D_p = \frac{\sqrt{P_{\text{ВЫХ}}}}{U_{\text{ВХ}}},$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ — величина выходной мощности; $U_{\text{ВХ}}$ — напряжение, которое необходимо подать на вход каскада для получения данной мощности.

Искажения при усилении. В главе I мы познакомились с искажениями при звукопередаче и их видами. Это частотные, нелинейные и фазовые искажения.

Усилитель, являясь важнейшим элементом тракта звуковоспроизведения, естественно, вносит искажения. Рас-

смотрим более подробно требования, предъявляемые к усилителю в отношении вносимых им искажений.

Частотные искажения ощущаются нами как изменение тембра звучания голосов и музыкальных инструментов, исчезает ясность передачи, снижается разборчивость речи.

Различные музыкальные звуки и речь состоят из суммы синусоидальных колебаний различной частоты, и если усилитель по каким-либо причинам неравномерно усиливает переменное напряжение разных частот, отдельные составляющие звука усиливаются неодинаково, а следовательно, и прослушиваются они также неодинаково: одни слабее, другие сильнее.

Наши органы слуха ощущают эту неравномерность усиления различных частот как изменение окраски звука, т. е. как тембральные изменения. Возникают частотные искажения.

Чтобы избежать частотных искажений, необходимо добиваться более равномерного усиления в широком пределе (диапазоне) звуковых частот.

Диапазоном частот, или *полосой пропускания усилителя*, называется та область частот, в пределах которой коэффициент усиления изменяется в заданных пределах, обусловленных требованиями к усилителю. Как мы увидим в дальнейшем, требования эти могут быть разными для усилителей различного назначения.

Современные высококачественные усилители звукового кино имеют полосу пропускания 40—12 000 *гц*.

Диапазон частот имеет, как видно из приведенных данных, две границы: низшую и высшую. Низшей границей является самая низкая частота f_n , а высшей — самая высокая частота f_v , усиливаемая данным усилителем в пределах допустимых отклонений.

Диапазон частот усилителей низкой частоты можно условно разделить на три области: а) область низших частот (30 ÷ 500 *гц*); б) область средних частот (500 ÷ 1500 *гц*); в) область высших частот (1500 ÷ 12 000 *гц*). Условно принято считать в качестве так называемой средней частоты частоту, равную 1000 *гц*.

Кривая, показывающая изменение коэффициента усиления с частотой, называется частотной характеристикой, или амплитудно-частотной характеристикой усилителя. На рис. VII-3 показаны две частотные характеристики. Первая (кривая I) относится к усилителю, кото-

рый практически не вносит частотных искажений во всем диапазоне частот и только за заданными границами происходит уменьшение усиления (спад частотной характеристики). Вторая (кривая II) — к усилителю, который вносит значительные частотные искажения, так как неравномерно усиливает колебания различных частот.

Коэффициент усиления на средней частоте обозначен на рисунке через K_0 , коэффициент усиления на самой низкой частоте — через K_H и на самой высокой частоте — K_B . Это позволяет количественно оценить величину частотных искажений, вносимых усилителем, с помощью коэффициента частотных искажений, который определяется как отношение коэффициента усиления на средних частотах к коэффициенту усиления на данной частоте:

$$M_f = \frac{K_0}{K_f}.$$

Соответственно, коэффициент частотных искажений на низких частотах: $M_H = \frac{K_0}{K_H}$, а на высоких — $M_B = \frac{K_0}{K_B}$.

Коэффициенты частотных искажений позволяют, таким образом, судить о *равномерности частотной характеристики*, и часто в технических данных усилителей можно встретить фразу: «Неравномерность частотной характеристики не превышает ± 2 дБ в заданном диапазоне частот». Здесь коэффициент частотных искажений выражен в децибелах, так же как и коэффициент усиления.

Причиной частотных искажений является неправильный выбор элементов усилительного каскада: величин сопротивлений, емкостей и индуктивностей деталей.

Из-за деталей, обладающих емкостью и индуктивностью, в усилителях возникают наряду с частотными искажениями еще и фазовые. Природа их заключается в том, что в процессе усиления различные частоты претерпевают разные фазовые сдвиги. Из-за этого форма сложного колебания на выходе отличается от формы колебания, подведенного на вход усилителя.

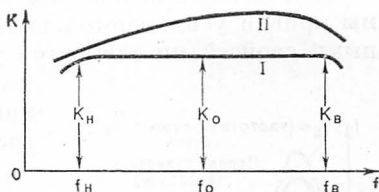


Рис. VII-3. Частотные характеристики усилителей

Оценка величины фазовых искажений производится при помощи фазовой характеристики усилителя.

Фазовые искажения не воспринимаются нашим слухом, поэтому не имеют существенного значения для характеристики работы усилителя в тракте звуковоспроизведения.

Нелинейные искажения обусловлены изменением формы кривой усиливаемых колебаний, вызванных нелинейными свойствами элементов усилителя. Такими элементами в усилителях являются, например, электронные лампы, трансформаторы и т. п.



Рис. VII-4. График разложения сложной кривой на составляющие ее гармоники

Однако, как мы указывали выше, форма кривой может быть искажена вследствие только фазовых искажений. Поэтому более правильно считать основным условием неискаженной передачи правильную передачу амплитуд и частот синусоидальных составляющих сигнала, а не формы кривой.

Огибающая звуковых колебаний представляет собой сложную кривую. Известно, что всякую несинусоидальную периодическую кривую с частотой ω можно разложить на ряд синусоидальных кривых, из которых одна имеет такую же частоту ω и называется основной, или первой гармоникой (гармонической составляющей), а остальные имеют частоты в целое число раз больше, чем основная (2ω , 3ω , 4ω и т. д.), и называются высшими гармониками (в соответствии с частотой — вторая гармоника, третья и т. д.).

На рис. VII-4 показан пример разложения сложной кривой на составляющие ее гармоники: первой с частотой ω и второй гармоникой с частотой 2ω .

Таким образом, наличие нелинейных искажений в усилителе вызывает появление на его выходе кроме полезного сигнала (основной частоты, подаваемой на вход усилителя) еще целого ряда дополнительных новых частот — гармоник, которых не было на входе усилителя.

Появление этих новых частот приводит к искажению звука. Нелинейные искажения прослушиваются как «дрезбизжание», снижение разборчивости речи.

О величине нелинейных искажений, вносимых уси-
лительным устройством, судят по величине коэффициента
нелинейных искажений γ .

Коэффициентом нелинейных искажений (часто его на-
зывают коэффициентом гармоник) называется отношение
действующего значения исследуемого напряжения (или
тока), содержащего все гармоники без основной, к дейст-
вующему значению выходного напряжения (или тока)
основной частоты:

$$\gamma = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2}}{U_1} \cdot 100\%;$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2}}{I_1} \cdot 100\%.$$

Обычно коэффициент нелинейных искажений выража-
ют в процентах.

В отношении коэффициента нелинейных искажений к
современным усилителям звукового кино предъявляются
высокие требования, и он не должен превышать 1—2%.

Коэффициент нелинейных искажений может быть из-
мерен с помощью специального прибора — измерителя
нелинейных искажений ИНИ-11*, который позволяет из-
мерить коэффициент нелинейных искажений в пределах
от 0,3 до 30% в диапазоне частот от 50 гц до 15 кгц.

В многокаскадных усилителях в основном нелинейные
искажения вносятся работой оконечного мощного каска-
да. Это объясняется тем, что в целях получения наиболь-
шей мощности на выходе оконечного каскада на его вход
подается напряжение со значительной амплитудой. По-
этому сеточная характеристика ламп, работающих в мощ-
ном каскаде, используется наиболее полно, включая иног-
да и криволинейные участки.

Допустимо иметь несколько больший коэффициент не-
линейных искажений на низких и высоких частотах по
сравнению с его величиной в области средних частот. Объ-
ясняется это тем, что наше ухо менее чувствительно
к нелинейным искажениям, возникающим на крайних
частотах.

Помехи наряду с частотными и нелинейными искаже-
ниями также сильно снижают качество звуковоспроизве-

* С. И. Подкуйко, А. С. Третьякова, Измере-
ния в усилителях киноустановок, М., «Искусство», 1960.

дения. В идеальном случае усилитель не должен создавать на выходе колебаний тока, если его вход замкнут накоротко, т. е. если к его входу не подводится переменное напряжение звуковой частоты.

Однако практические схемы усилителей создают помехи — шумы, возникающие из-за фона переменного тока от источников питания, шума ламп, резисторов, транзисторов, внешних электрических помех и т. д.

Наибольшее влияние на уровень собственных помех в усилителе оказывает шум ламп, работающих в первых каскадах многокаскадного усилителя. Поэтому к этим лампам предъявляются повышенные требования в отношении минимальных уровней собственных шумов.

Во время работы лампы с ее катода в одинаковые промежутки времени излучается неодинаковое количество электронов. Это непостоянство электронной эмиссии во времени является причиной непериодических колебаний анодного тока, которые при дальнейшем усилении последующими каскадами становятся сильно ощутимыми на слух.

Шумы в полупроводниковых приборах, в частности в транзисторах, также объясняются тем, что в них происходят электрические флюктуации. За равные промежутки времени через поперечное сечение полупроводника проходит неодинаковое число зарядов. В транзисторах главное значение имеет тепловой шум сопротивления базы. На низких частотах шумы транзисторов возрастают.

Шум резисторов объясняется тем, что на зажимах любого резистора всегда имеется незначительное напряжение, являющееся результатом тепловых движений частиц внутри активного покрытия резистора или внутри металла, если это проволочное сопротивление.

Шумы усилителя определяют нижнюю границу динамического диапазона усилителя. Динамическим диапазоном мощности усилителя называется диапазон мощностей от самой малой мощности, воспроизводимой усилителем, до максимальной (номинальной) мощности.

Установлено, что хорошая передача звука будет в том случае, если динамический диапазон мощности усилителя равен 60 дБ, т. е. если максимальная мощность на его выходе в миллион раз больше минимальной воспроизводимой мощности.

Чтобы обеспечить достаточную разборчивость самого слабого звука, воспроизводимого усилителем, необходи-

мо, чтобы минимальное полезное напряжение было по крайней мере в три раза больше напряжения собственных шумов и помех.

О величине помех судят по отношению напряжений помех, развиваемых усилителем при отсутствии напряжения звуковой частоты на входе усилителя $U_{\text{н}}$, к номинальному напряжению выхода усилителя $U_{\text{н}}$. Обычно уровень собственных шумов или помех выражается в децибелах:

$$N_{\text{дб}} = 20 \lg \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{н}}} \text{ или } N_{\text{дб}} = 10 \lg \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}}.$$

Так как помехи всегда меньше номинального сигнала, то уровень помех в децибелах имеет отрицательный знак. В современных усилительных устройствах уровень помех не превышает 0,1—0,2%.

ВЫХОДНАЯ МОЩНОСТЬ И К. П. Д. УСИЛИТЕЛЯ

Важнейшей характеристикой усилителя низкой частоты является *выходная мощность*, т. е. та полезная мощность, которую развивает усилитель на сопротивлении нагрузки, которой в звуковом кино является громкоговоритель.

Выходная мощность $P_{\text{вых}}$ может быть определена по формуле:

$$P_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{R_{\text{н}}},$$

где $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки; $U_{\text{вых}}$ — напряжение на выходе усилителя.

В зависимости от изменения амплитуды сигнала на входе, все время в процессе воспроизведения звука изменяется и выходная мощность. В паузе (при отсутствии полезного сигнала на входе) выходная мощность усилителя, если пренебречь помехами, равна нулю, а на пиках громкости мощность наибольшая.

Следует сказать, что с увеличением напряжения на входе растут нелинейные искажения. Следовательно, можно установить зависимость между коэффициентом нелинейных искажений и выходной мощностью усилителя (рис. VII-5). При малых значениях мощности на выходе

усилителя коэффициент нелинейных искажений невелик и медленно растет с увеличением выходной мощности. Однако с дальнейшим ростом выходной мощности нелинейные искажения начинают быстро увеличиваться.

Номинальной выходной мощностью усилителя принято считать ту наибольшую мощность, которую развивает усилитель на нагрузке при допустимой величине нелинейных искажений.

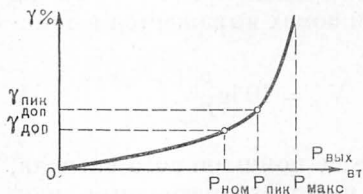


Рис. VII-5. Зависимость коэффициента нелинейных искажений от мощности на выходе усилителя

Наибольшая выходная мощность, какую может развить усилитель (если не обращать внимания на большие нелинейные искажения), называется *максимальной выходной мощностью*. Естественно, что номинальная мощность

всегда меньше максимальной. Номинальная мощность указывается в технических данных усилителя и в его паспорте. Так, например, в паспорте усилителя 90У-2 указана его номинальная мощность 10 *вт* при коэффициенте нелинейных искажений не более 3%. Пиковая мощность — 15 *вт*.

Пиковой называют мощность, появляющуюся на выходе усилителя при кратковременных пиковых значениях напряжения на входе и при несколько повышенных, но все еще допустимых нелинейных искажениях. Пиковая мощность превышает номинальную примерно на 25÷50%.

Выше было сказано, что выходная мощность зависит от величины напряжения на входе усилителя. Поэтому вводится понятие о номинальном входном напряжении или чувствительности усилителя.

Чувствительностью называют такое амплитудное значение входного напряжения, при котором на выходе усилителя развивается номинальная мощность.

Источниками переменного напряжения на входе усилителя служат фотоэлектронный умножитель, микрофон, звукосниматель и др. Они развивают, в зависимости от типа, различные по величине значения напряжения: фотоэлектронные умножители — 40—200 *мв*; электродинамические микрофоны — 0,3—2 *мв*; магнитные звукоспроизводящие головки — 0,05—1,5 *мв*; звукосниматели электромагнитного типа — 80—150 *мв*.

Так как усилитель низкой частоты обычно предназначен для работы от нескольких источников, то его вход рассчитывается на наименьшее напряжение, которое дает один из источников, а другие источники сигналов включаются через делители напряжения. Схемы включения источников сигналов на вход усилителей рассматриваются в главе XI.

Важной характеристикой усилителя является его *коэффициент полезного действия*. Применительно к усилителям низкой частоты различают два вида к. п. д.: электрический и промышленный.

Первый из них определяется как отношение полезной мощности, развиваемой на сопротивлении нагрузки данного каскада, к мощности, потребляемой каскадом от источника питания анодной цепи:

$$\eta_a = \frac{P_{\text{ном}}}{P_a} \cdot 100\%.$$

Промышленный, или полный, к. п. д. каскада усиления определяется как отношение полезной мощности, развиваемой на сопротивлении нагрузки, к полной мощности, потребляемой от всех источников питания (анодная цепь, цепь накала, цепь экранирующей сетки и др.):

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{потр}}} \cdot 100\%.$$

Полный к. п. д. усилителя обычно составляет 5—30%.

§ 2. РЕЗИСТОРНЫЙ КАСКАД

Схема резисторного каскада на триоде.

В начале этой главы указывалось, что усилители напряжения входят обычно во всякое усилительное устройство и служат для усиления переменного напряжения звуковой частоты (сигнала), подаваемого на оконечный усилитель.

В зависимости от характера анодной нагрузки, различают три основные схемы усилителей напряжения, собранных на электронных лампах или полупроводниковых приборах:

- 1) резисторный каскад — усилитель с активным сопротивлением анодной нагрузки;
- 2) дроссельный каскад — усилитель с индуктивным сопротивлением анодной нагрузки;

3) трансформаторный каскад — усилитель с трансформатором в анодной цепи.

Эти элементы могут быть использованы в качестве нагрузки и в схемах транзисторных усилителей. Остальные схемы, по существу, — только варианты перечисленных схем.

Наиболее распространенным является резисторный каскад усиления напряжения; с него мы и начнем рассмотрение устройства и работы.

На рис. VII-6 показана принципиальная схема одного резисторного каскада, собранного на трехэлектродной

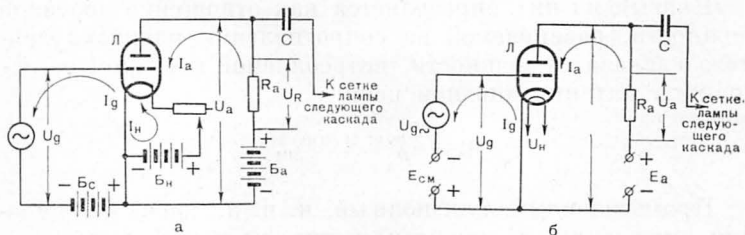


Рис. VII-6. Принципиальная схема резисторного каскада: а — с батареями в качестве источников питания; б — с указанием зажимов источников питания

лампе L . Для большей наглядности на рис. VII-6, а в качестве источников питания показаны батареи.

На схеме отчетливо видны три цепи: 1) цепь накала, состоящая из батареи накала B_n , регулирующего реостата, нити накала лампы и соединительного провода от нити накала до отрицательного полюса батареи накала; 2) анодная цепь, состоящая из батареи анодного питания B_a , резистора R_a в анодной цепи, участка анод — катод лампы и соединительного провода — общего провода усилителя; 3) цепь сетки, состоящая из батареи смещения B_c , соединительного провода, участка катод — сетка, источника переменного напряжения (сигнала). В каждой цепи протекают соответствующие токи: I_n — ток накала, I_a — анодный ток, I_g — ток сетки.

Напряжение сигнала $u_{g\sim}$, которое должно быть усилено, т. е. увеличено по амплитуде, подводится к сетке лампы. В эту же сеточную цепь включена батарея смещения, а следовательно, к сетке помимо переменного подведено и отрицательное постоянное напряжение смещения.

В анодной цепи протекает анодный ток, который создает на большом сопротивлении анодной нагрузки — резисторе R_a , — падение напряжения $u_R = i_a \cdot R_a$.

Пока к сетке лампы не подведен переменный сигнал (в режиме покоя или в паузе), на сетке лампы действует постоянное отрицательное напряжение смещения которому на сеточной характеристике лампы (рис. VII-7) соответствует рабочая точка P , а в анодной цепи протекает постоянный анодный ток I_{a0} (ток покоя) и на резисторе R_a создается постоянное падение напряжения U_{a0}

$$U_{a0} = E_a - I_{a0} \cdot R_a.$$

Как видно из приведенной формулы, анодное напряжение лампы (т. е. разность потенциалов между катодом и анодом лампы) меньше величины э. д. с. анодной батареи E_a на величину падения напряжения на сопротивлении анодной нагрузки.

Пример. Двойной триод 6Н7С имеет внутреннее сопротивление $R_i = 12 \text{ ком}$. В типовом режиме его ток покоя $I_{a0} = 4 \text{ ма}$ при напряжении анодного питания $E_a = 300 \text{ в}$ и напряжении смещения $E_g = -6 \text{ в}$. Определить, чему равно анодное напряжение лампы, если сопротивление анодной нагрузки $R_a = (2 \div 4) \cdot R_i = 4 \cdot 12 \approx 50 \text{ ком}$.

$$U_{a0} = E_a - I_{a0} \cdot R_a,$$

$$U_{a0} = 300 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^4 = 300 - 200 = 100 \text{ в}.$$

Как только к сетке лампы подается переменное напряжение $u_g \sim$ (будем считать его синусоидальным для простоты построения графиков и удобства рассмотрения), общее напряжение на сетке U_g становится пульсирующим (рис. VII-8, а). Оно все время остается отрицательным, чтобы избежать и не допустить появления сеточного тока, являющегося, как мы знаем, причиной возникновения нелинейных искажений.

С подачей переменного напряжения на вход каскада он работает в *колебательном режиме*, или *режиме усиления*.

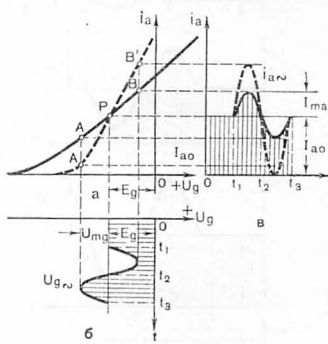


Рис. VII-7. График, иллюстрирующий появление переменной составляющей анодного тока при подаче переменного напряжения на сетку лампы

В соответствии с изменениями напряжения на сетке будет изменяться по величине и анодный ток (рис. VII-8, б), а следовательно, по сопротивлению анодной нагрузки — резистору — будет протекать пульсирующий анодный

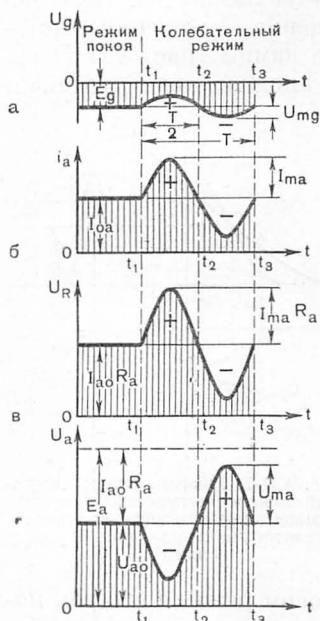


Рис. VII-8. Графическое представление процесса усиления

ток, создавая на нем пульсирующее падение напряжения (рис. VII-8, в). Анодное напряжение лампы также изменяется по величине, ибо увеличение анодного тока приводит к увеличению падения напряжения U_R на сопротивлении анодной нагрузки, что, в свою очередь, вызывает такое же по величине уменьшение анодного напряжения U_a , так как из постоянно напряжения источника питания E_a вычитается большее падение напряжения на R_a .

Пример. К сетке лампы подведено переменное напряжение с амплитудой 2 в. При этом анодный ток изменяется от 3,5 до 4,5 ма. Определить минимальное и максимальное падение напряжения на R_a и соответствующие величины анодного напряжения.

В колебательном режиме минимальное падение напряжения на сопротивлении R_a равно:

$$U_{\text{мин}} = I_{\text{а мин}} \cdot R_a = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^4 = 175 \text{ в},$$

а максимальное падение напряжения равно:

$$U_{\text{макс}} = I_{\text{а макс}} \cdot R_a = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^4 = 225 \text{ в}.$$

Соответственно, в момент минимального падения напряжения анодное напряжение будет максимальным:

$$U_{\text{а макс}} = 300 - 175 = 125 \text{ в},$$

а в момент максимального падения напряжения анодное напряжение будет минимальным

$$U_{\text{а мин}} = 300 - 225 = 75 \text{ в}.$$

Из рассмотрения графиков, характеризующих работу резисторного каскада (см. рис. VII-8), и примера можно сделать следующие выводы:

1. Амплитуда переменного напряжения на выходе каскада получается значительно больше амплитуды переменного напряжения на входе, в чем и заключается сущность усиления посредством электронной лампы.

2. Амплитуда анодного напряжения, являющегося усиленным сигналом, определяется как

$$U_{ам} = I_{ам} \cdot R_a.$$

3. В процессе усиления лампа поворачивает фазу усиливаемого сигнала на 180° , так как

$u_{g\sim}$ (входное напряжение) и $u_{a\sim}$ (выходное напряжение) по фазе противоположны (см. графики на рис. VII-8, а и з).

Здесь мы рассмотрели роль лампы и анодной нагрузки в схеме резисторного каскада. Рассмотрим теперь назначение остальных элементов схемы этого каскада — переходного конденсатора C_g и сопротивления утечки сетки R_g .

Усиленное первым каскадом переменное напряжение необходимо подвести к сетке лампы второго каскада. Если прямо соединить сетку второй лампы с анодом первой лампы, то на нее попадет постоянное высокое напряжение от источника анодного питания. Чтобы этого не произошло, устанавливается переходной конденсатор C_g . Он позволяет отделить переменную составляющую из пульсирующего напряжения, выделяющегося на сопротивлении анодной нагрузки, так как конденсатор не пропускает постоянный ток.

На рис. VII-9 показана принципиальная схема резисторного каскада. При рассмотрении схемы видно, что, для того чтобы подвести к следующей лампе переменное напряжение, необходимо еще сопротивление R_g .

Сопротивление R_g называется сопротивлением утечки сетки. Оно выполняет следующие функции: 1) через него подводится отрицательное напряжение смещения к сетке лампы L_2 . Включение источника напряжения смещения параллельно входу лампы недопустимо из-за малой вели-

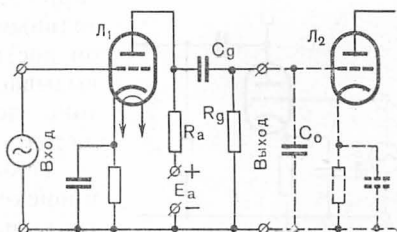


Рис. VII-9. Принципиальная схема резисторного каскада

чины внутреннего сопротивления источника; 2) через него «стекают» обратно на катод лампы те электроны, которые накапливаются на сетке лампы во время ее работы. Как известно, электроны, летящие на анод, частично попадают

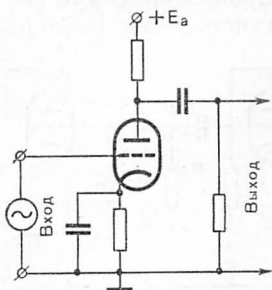


Рис. VII-10. Принципиальная схема резисторного каскада

на сетку (чем и обусловлен ток сетки); накапливаясь, они постепенно заряжают ее все большим отрицательным потенциалом и, наконец, он достигает такой величины, что вызывает прекращение анодного тока через лампу — лампа окажется «запертой».

Такое явление иногда может происходить при нарушении контакта или обрыве в резисторе R_g . При этом усилитель некоторое время еще работает с большими искажениями, а затем работа прекращается — лампа запирается.

Велика роль сопротивления утечки сетки и в тех случаях, когда при случайных пиках напряжения, которые превосходят величину отрицательного смещения, конденсатор, заряжающийся при этом сеточным током лампы, мог бы после прекращения действия пикового напряжения достаточно быстро разрядиться. Иначе заряд конденсатора сместит рабочую точку влево и может на определенное время запереть лампу.

Познакомимся еще с одним способом начертания принципиальных схем усилительных каскадов (рис. VII-10). Здесь все элементы цепей расположены сверху вниз так, что каждая более высокая точка схемы имеет более высокий потенциал по отношению к общему проводу, который часто заземляется. Этот способ наиболее часто применяется в радиотехнических схемах и в заводских описаниях.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА РЕЗИСТОРНОГО КАСКАДА

Эквивалентными друг другу схемами называются такие схемы, результаты работы которых одинаковы.

Для принципиальной схемы резисторного каскада может быть создана такая электрическая схема, в которой

электронная лампа заменяется генератором переменной э. д. с., электродвижущая сила на зажимах этого генератора выбирается в μ раз большей переменного напряжения на сетке лампы, а внутреннее сопротивление — равным внутреннему сопротивлению лампы R_i в рабочей точке.

Эквивалентная схема позволяет:

1) рассчитать резисторный каскад, т. е. найти все величины переменных составляющих напряжений и токов, действующих в нем (так как из нее исключены источники

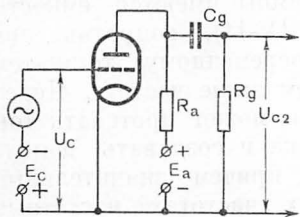


Рис. VII-11. Принципиальная схема резисторного каскада

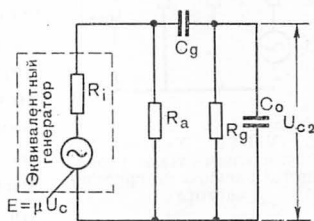


Рис. VII-12. Эквивалентная схема резисторного каскада

постоянного тока), пользуясь основными законами электротехники Кирхгофа и Ома для переменного тока, чего нельзя сделать, пользуясь принципиальной схемой с элементом в виде лампы;

2) произвести анализ действия и роли отдельных элементов усилительного каскада в различных диапазонах звуковых частот. Основной целью анализа работы каскада усиления является определение коэффициента усиления и зависимости его от частоты приложенного напряжения сигнала. На рис. VII-11 показана принципиальная схема резисторного каскада, а на рис. VII-12 дана его эквивалентная схема. На ней помимо перечисленных ранее элементов резисторного каскада: сопротивления анодной нагрузки R_a , переходного конденсатора C_g , сопротивления утечки сетки R_g — имеется еще один элемент — емкость C_o . Она складывается из емкости монтажа и из так называемой входной емкости лампы, которая может быть определена по формуле:

$$C_{\text{вх}} = C_{\text{ск}} + C_{\text{ас}} \cdot (1 + K),$$

где $C_{\text{ск}}$ — емкость между сеткой и катодом; $C_{\text{ас}}$ — емкость между анодом и сеткой; K — коэффициент усиления каскада.

Как мы увидим из последующего рассмотрения, входная емкость играет существенную роль на высоких частотах.

Действительно, источник переменного напряжения подключается к участку сетка — катод лампы. При правильно выбранном режиме работы в цепи сетки не протекает ток, следовательно, промежуток сетка — катод лампы не нагружает источник. Но между электродами лампы имеются емкости (см. рис. IV-11), сопротивление которых переменному току тем меньше, чем выше частота. Через эти емкости может протекать ток от источника и создавать дополнительные, причем значительные на высоких частотах частотные искажения при работе каскада.

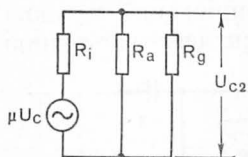


Рис. VII-13. Упрощенная эквивалентная схема резисторного каскада на средних частотах

Рассматривая элементы, входящие в состав эквивалентной схемы резисторного каскада, нетрудно заметить наличие двух емкостей: C_g и C_o , причем, если одна из них (C_g) включена последовательно с сопротивлением R_g , то другая (C_o) — включена параллельно сопротивлению R_g . Обе эти емкости по-разному влияют на величину выходного напряжения каскада, а стало быть и на коэффициент усиления в зависимости от областей частот усиливаемых сигналов.

Коэффициентом усиления каскада называется число, показывающее, во сколько раз повышается переменное напряжение звуковой частоты при помощи одного каскада

$$K = \frac{U_{\text{ВМХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

Определяя коэффициент усиления резисторного каскада в области средних частот (от $500 \div 1500$ гц), можно упростить эквивалентную схему и исключить из рассмотрения обе емкости, так как они не влияют на величину усиления каскада. Тогда эквивалентная схема принимает вид, показанный на рис. VII-13, где видно, что общее сопротивление каскада равно:

$$R = \frac{R_a \cdot R_g}{R_a + R_g}$$

Теперь определим коэффициент усиления каскада — задача, которая сводится, по существу, к определению $U_{\text{ВЫХ}}$ при заданном $U_{\text{ВХ}}$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = I_{a\sim} \cdot R.$$

Переменная составляющая анодного тока равна э. д. с., деленной на полное сопротивление цепи:

$$I_{a\sim} = \frac{\mu U_c}{R_i + R}.$$

Подставляя полученное значение тока в формулу для $U_{\text{ВЫХ}}$, получаем:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{\mu U_c}{R_i + R} \cdot R.$$

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\mu U_c \cdot R}{(R_i + R) \cdot U_{c1}} = \frac{\mu \cdot R}{R_i + R},$$

т. е.

$$K = \mu \cdot \frac{R}{R_i + R}.$$

Как видно из полученной формулы, коэффициент усиления резисторного каскада зависит от коэффициента усиления лампы μ и от отношения $\frac{R}{R_i + R}$.

Влияние величины сопротивления R (т. е. сопротивлений R_a и R_g) на величину коэффициента усиления каскада видно из графика на рис. VII-14, на котором по вертикальной оси отложен коэффициент усиления каскада K , а по горизонтальной оси — отношение $\frac{R}{R_i}$.

График показывает, что при достаточно большом значении сопротивления R коэффициент усиления каскада лишь несколько отличается от коэффициента усиления лампы.

Следовательно, для получения большого коэффициента усиления каскада, т. е. чтобы увеличить переменное напряжение в большее число раз, в анодную цепь лампы необходимо включить сопротивление, в несколько раз большее, чем внутреннее сопротивление лампы.

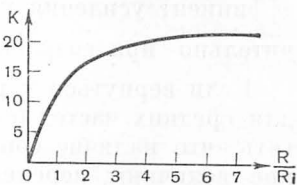


Рис. VII-14. График зависимости коэффициента усиления резисторного каскада от отношения $\frac{R}{R_i}$.

Из рассмотрения графика видно, что коэффициент усиления каскада по мере увеличения сопротивления нагрузки вначале растет быстро, а затем, после определенного значения, все медленнее, асимптотически приближаясь к статическому коэффициенту усиления лампы μ .

При выборе очень большой величины сопротивления анодной нагрузки уменьшается анодное напряжение лампы (см. формулу на стр. 181), ниже смещается рабочая

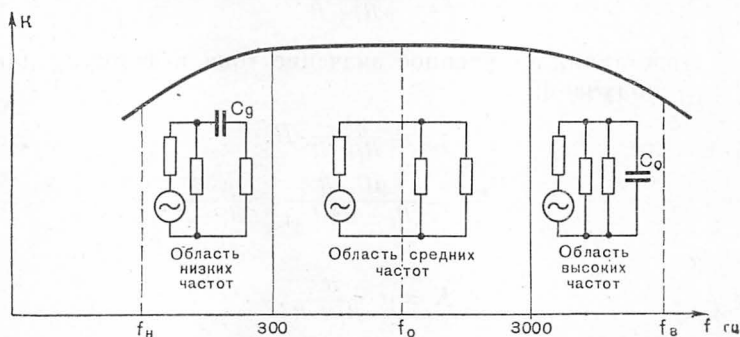


Рис. VII-15. Типовая частотная характеристика резисторного каскада

точка лампы, а на участках характеристики лампы ближе к нижнему загибу, внутреннее сопротивление лампы возрастает. Увеличение внутреннего сопротивления лампы вследствие уменьшения анодного напряжения при увеличении анодного сопротивления приводит к тому, что коэффициент усиления каскада увеличивается очень незначительно при возрастании отношения $\frac{R}{R_i}$ свыше 3—4.

Если вернуться к рассмотрению эквивалентной схемы для средних частот (см. рис. VII-13), то нельзя не заметить, что наличие сопротивления R_g вызывает уменьшение величины переменного напряжения U_{c2} , развиваемого усилительным каскадом, так как для переменной составляющей анодного тока лампы это сопротивление шунтирует анодное сопротивление, ибо конденсатор C_g пропускает переменную составляющую тока и общее сопротивление анодной цепи R уменьшается.

Чтобы сопротивление R_g не сильно снижало усиление каскада, его величину выбирают обычно в три-четыре раза больше сопротивления анодной нагрузки R_a :

$$R_g = (3 \div 4) \cdot R_a.$$

Типовая частотная характеристика резисторного каскада приведена на рис. VII-15. В большей части частотного диапазона она является горизонтальной прямой, а на низких и высоких звуковых частотах имеет спадающий характер.

Рассмотрим причины, вызывающие спад частотной характеристики в области низких и высоких частот, т. е. уменьшение величины коэффициента усиления на край-

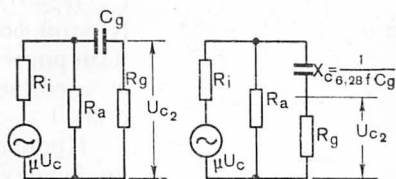


Рис. VII-16. Эквивалентная схема резисторного каскада на низких частотах

Рис. VII-17. Усиленное лампой напряжение низких частот распределяется между x_c и R_g

них частотах. Для этого рассмотрим эквивалентную схему каскада в области низких частот, когда по мере уменьшения частоты существенную роль начинает играть переходной конденсатор C_g (рис. VII-16).

Сопротивление конденсатора для переменного тока

$$x_c = \frac{1}{6,28 \cdot f \cdot C}$$

По мере уменьшения частоты усиливаемого сигнала f величина знаменателя уменьшается, а сопротивление конденсатора переменному току возрастает и становится соизмеримым с сопротивлением R_g .

Образуется как бы делитель напряжения, развиваемого лампой, состоящий из двух плеч: x_c и R_g (рис. VII-17), причем по мере уменьшения частоты роль плеча x_c все время возрастает, что приводит к уменьшению переменного напряжения U_{c2} , подводимого к сетке лампы следующего каскада, т. е. к уменьшению коэффициента усиления на низких звуковых частотах.

На низких частотах влиянием малой емкости C_o можно пренебречь, так как по мере уменьшения частоты сопротивление конденсатора переменному току возрастает и не шунтирует сопротивление R_g .

Для создания равномерного усиления как в области средних, так и низких частот, т. е. чтобы уменьшить спад частотной характеристики на низких частотах, нужно увеличивать величину конденсатора C_g и сопротивления R_g .

Уже указывалось, что сопротивление R_g выбирают из условия $R_g = (3 \div 4) \cdot R_a$. Переходной конденсатор C_g выбирают из условия, что-

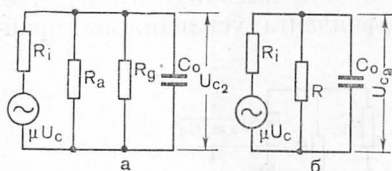


Рис. VII-18. Эквивалентные схемы резисторного каскада в области высоких частот

бы произведение $C_g \cdot R_g = 0,005 \div 0,02$ сек. (В этой формуле емкость измеряется в фарадах, а сопротивление — в омах.)

Произведение $C_g \cdot R_g$ не следует выбирать очень большим, так как в этом случае усилитель

может работать менее устойчиво и будет склонен к самовозбуждению (см. стр. 256).

В области высоких частот существенную роль начинает играть входная емкость следующего каскада C_o , которая, как видно из эквивалентной схемы в области высоких частот на рис. VII-18, а, оказывается включенной параллельно сопротивлению анодной нагрузки и сопротивлению R_g . Емкость C_o шунтирует результирующее сопротивление R , состоящее из сопротивлений R_a и R_g . Эквивалентная схема в области высоких частот может быть еще упрощена (рис. VII-18, б).

По мере увеличения частоты усиливаемого сигнала сопротивление емкости C_o уменьшается, а следовательно, уменьшается общее сопротивление, включенное в анодную цепь, уменьшается и коэффициент усиления на выходе каскада.

Конденсатором C_g при рассмотрении работы каскада в области высоких частот можно пренебречь, так как сопротивление его незначительно и уменьшается по мере роста частоты.

На практике стремятся уменьшить величину входной емкости, однако сделать это очень сложно, так как она в большой мере зависит от коэффициента усиления следующего каскада и от величины емкости между сеткой и анодом, т. е. от конструкции лампы.

Чтобы уменьшить спад частотной характеристики на высоких частотах, нужно уменьшить сопротивление R .

Практически приходится уменьшать сопротивления R_a и R_g . Чем меньше величина R , тем меньше сказывается влияние входной емкости на величину общего сопротивления, а следовательно, и уменьшение коэффициента усиления на высоких частотах будет меньше, т. е. частотные искажения могут быть сведены к малой величине. Однако коэффициент усиления резисторного каскада уменьшается при уменьшении сопротивления R , и потому в данном случае уменьшение сопротивления нежелательно.

РЕЗИСТОРНЫЙ КАСКАД НА ПЕНТОДЕ

Можно уменьшить величину входной емкости, используя пентод, который имеет значительно меньшую емкость C_{ac} по сравнению с триодом. Использование пентода дает возможность получить частотную характеристику усилителя с расширением частотного диапазона пропускания в сторону высших частот при тех же значениях коэффициента усиления на средних частотах (или даже большем, чем у триода).

Кроме того, каскад на пентоде позволяет получить значительно больший коэффициент усиления по напряжению, чем в случае применения триода.

Еще одной характерной особенностью резисторного каскада на пентоде является небольшая величина сопротивления анодной нагрузки, составляющая величину порядка $R_a = (0,1 \div 0,25)R_i$.

Из электротехники известно, что если источник переменного тока обладает большим внутренним сопротивлением, то уменьшение сопротивления нагрузки вызовет большее уменьшение напряжения генератора, чем в том случае, когда генератор имеет меньшее сопротивление.

Внутреннее сопротивление пентодов весьма велико (достигает 10^6 ом и более). Если выбрать, например, сопротивление анодной нагрузки в три раза больше, чем R_i , то оно составит $3 \cdot 10^6$ ом. На таком большом сопротивлении будет происходить значительное падение напряжения и потребуется значительно увеличить напряжение источника анодного питания, что крайне нежелательно.

Помимо этого, несмотря на относительно малую величину емкости C_o , постоянная времени анодной цепи (произведение $R_a \cdot C_o$) значительно увеличится, что приведет

к большому увеличению частотных искажений в области высших частот.

При использовании пентода, как мы видели, выбирают сопротивление R_a меньше, чем R_i .

Коэффициент усиления резисторного каскада в области средних частот определяется формулой:

$$K_o = \mu \cdot \frac{R}{R + R_i},$$

где

$$R = \frac{R_a \cdot R_g}{R_a + R_g}.$$

Так как для каскада на пентоде $R_i \gg R_a > R$, то формулу коэффициента усиления можно упростить, если пренебречь величиной R в знаменателе

$$K_o = \mu \cdot \frac{R}{R_i},$$

а так как

$$\frac{\mu}{R_i} = S,$$

то

$$K_o = S \cdot R.$$

Если R_g выбрать в несколько раз больше, чем R_a , то усиление можно определить еще проще, считая, что $R \approx \approx R_a$; тогда $K_o = S \cdot R_a$, где S — крутизна характеристики пентода в рабочей точке, выраженная в миллиамперах на вольт, а R_a — сопротивление анодной нагрузки в киломах.

Применение пентодов в предварительных каскадах усиления напряжения позволяет получить значительно больший коэффициент усиления каскада, чем в случае применения триода. При достаточно высоком напряжении источника анодного питания ($300 \div 500$ в) можно получить коэффициент усиления каскада $150 \div 200$.

Принципиальная схема резисторного каскада на пентоде показана на рис. VII-19. Она отличается от схемы на триоде наличием цепи экранной сетки, которая присоединяется к анодному источнику питания через большое сопротивление R_s . Назначение этого сопротивления заключается в понижении напряжения, поступающего на

экранную сетку, которое должно быть ниже анодного напряжения. Кроме того, имеется конденсатор C_3 , отсутствие которого привело бы к созданию пульсирующего падения напряжения на R_3 . Включение R_3 и C_3 составляет фильтр, сглаживающий пульсации напряжения питания экранной сетки, вследствие чего уменьшается фон переменного тока. Величина конденсатора выбирается равной $0,1 \div 0,25$ мкф.

Резисторные каскады на пентодах получили широкое распространение в усилителях для звукозаписи. Особенно широко для этих целей используются лампы 6Ж7, 6Ж8 и 6Ж4.

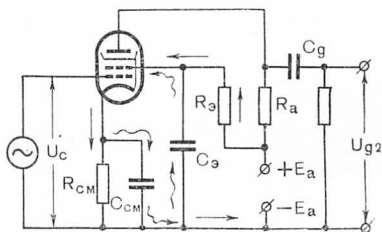


Рис. VII-19. Принципиальная схема резисторного каскада на пентоде

ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАМПЫ

При включении нагрузки в анодную цепь лампы, а это необходимое условие для работы любого каскада усиления, напряжение на аноде изменяется с изменением сеточного напряжения.

Таким образом, при работе каскада происходит сложная зависимость величины анодного тока одновременно от напряжения и на аноде и на сетке.

Все это позволяет ввести понятие *динамического режима работы лампы* — режима работы лампы с нагрузкой в анодной цепи, при котором в процессе усиления изменение напряжения на управляющей сетке вызывает кроме изменения величины анодного тока еще и изменение величины напряжения на аноде в отличие от статического режима, когда U_a остается постоянным.

Характеристики и параметры лампы в динамическом режиме называются динамическими характеристиками и параметрами и позволяют учесть степень влияния сопротивления анодной нагрузки на режим работы лампы.

Динамические характеристики триода изображаются графически и могут быть построены в системе сеточных или анодных координат.

На рис. VII-20, а приведена динамическая характеристика триода, построенная в системе сеточных координат. Основой для ее построения являются сеточные статические характеристики триода. Средняя из приведенного семейства сеточных характеристик снята при

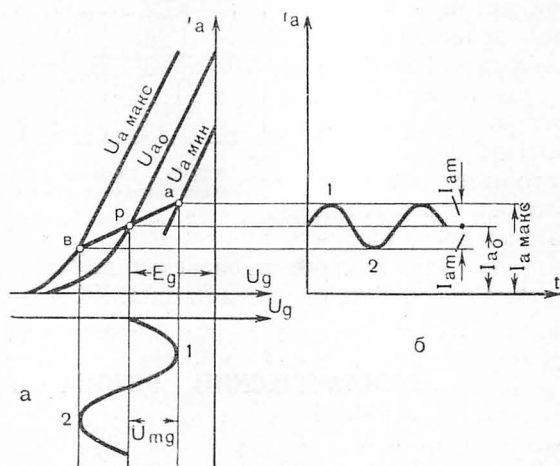


Рис. VII-20. Динамическая характеристика триода

постоянном напряжении на аноде, равном U_{a0} . При напряжении смещения E_g постоянная составляющая анодного тока равна I_{a0} . Точка P на статической характеристике называется рабочей точкой.

Если в анодной цепи включен резистор R_a и к сетке лампы подведено переменное напряжение сигнала с амплитудой U_{gm} , то анодный ток будет изменяться так, как показано на рис. VII-20, б. При увеличении напряжения на сетке лампы (точка I) анодный ток растет. Это приводит к росту падения напряжения на сопротивлении анодной нагрузки, равного $i_a \cdot R_a$. Напряжение источника анодного питания всегда равно сумме напряжений на аноде и напряжения на сопротивлении анодной нагрузки:

$$E_a = u_a - i_a \cdot R_a,$$

откуда

$$u_a = E_a - i_a \cdot R_a.$$

Из последней формулы видно, что с ростом анодного тока величина напряжения на аноде u_a уменьшается.

При уменьшении напряжения на сетке триода (точка 2) величина анодного тока уменьшается, падение напряжения на анодной нагрузке также уменьшается, а величина напряжения на аноде возрастает. Таким образом, напряжение на аноде триода изменяется в соответствии с изменением анодного тока, вызванного изменением напряжения на сетке лампы.

В колебательном режиме, когда на сетку лампы подается переменное напряжение $u_g = U_{gm} \cdot \sin \omega t$, рабочая точка P совершает колебания по участку динамической характеристики ab , называемому рабочим участком; он заключен между статическими характеристиками, соответствующими минимальному и максимальному напряжению на сетке, где

$$u_{g \text{ мин}} = E_g - u_{g \text{ м}}, \text{ а } u_{g \text{ макс}} = E_g + u_{g \text{ м}}.$$

Соответственно и анодный ток при изменении напряжения на сетке лампы изменяется по динамической характеристике ab , проходящей более полого, чем любая статическая сеточная характеристика этой лампы.

Крутизна динамической характеристики $S_{\text{дин}}$ может быть определена как отношение амплитуды переменной составляющей анодного тока к амплитуде переменного напряжения, подаваемого на сетку:

$$S_{\text{дин}} = \frac{I_{a \text{ м}}}{I_{g \text{ м}}}.$$

Построить динамическую характеристику в анодной системе координат можно, решив уравнение $u_a = E_a - i_a \cdot R_a$ относительно анодного тока

$$i_a = \frac{E_a - u_a}{R_a}.$$

Это выражение называют уравнением динамической характеристики в анодной системе координат. Оно позволяет легко построить динамическую характеристику, называемую иначе *линией нагрузки*.

На рис. VII-21 даны две статические характеристики в анодной системе координат. Для того чтобы построить линию нагрузки, найдем точки, в которых она пересекает ось абсцисс ($i_a = 0$) и ось ординат ($U_a = 0$). Из уравнения динамической характеристики видно, что пересе-

чение оси абсцисс (точка A) происходит при $u_a = E_a$, а оси ординат (точка B) — при $i_a = \frac{E_a}{R_a}$. Прямая, проведенная через точки A и B , и является динамической характеристикой лампы (линией нагрузки).

Динамическая характеристика, построенная на семействе анодных статических характеристик, позволяет для любого значения напряжения на сетке определить

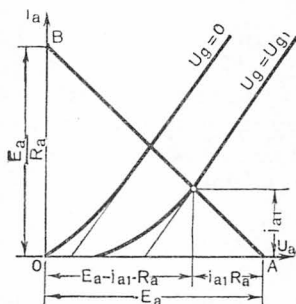


Рис. VII-21. Статические характеристики и линия нагрузки

величину анодного тока и анодного напряжения по точкам пересечения динамической характеристики со статической, соответствующей данному сеточному напряжению.

Изменение величины сопротивления нагрузки R_a , включенного в анодную цепь, вызывает изменение угла наклона линии нагрузки.

Все это дает возможность выбрать нужный режим работы лампы в резисторном усилительном каскаде, т. е.

такой режим, при котором усиление будет происходить без искажений. Главным в выборе режима является определение положения рабочей точки на динамической характеристике лампы. При правильно выбранном режиме для усилителя напряжения рабочая точка в колебательном режиме не должна заходить в область криволинейной части статических характеристик лампы и в область появления сеточных токов.

Чтобы выполнить поставленные условия, амплитуда сеточного переменного напряжения не должна быть больше величины смещения. При слишком большом смещении появляются нелинейные искажения из-за захода в нижний криволинейный участок характеристики, с дальнейшим увеличением смещения лампа может оказаться запертой (рис. VII-22, a и b). При слишком малом смещении нелинейные искажения возникают из-за появления сеточных токов (рис. VII-22, $в$).

Таким образом, для получения неискаженного усиления напряжения выбирают такой режим работы каскада, чтобы: 1) напряжение на сетке в любой момент времени оставалось отрицательным, для чего на сетку лампы по-

дается несколько большее по величине постоянное отрицательное смещение, чем амплитуда усиливаемого сигнала:

$$U_{gm} \leq |E_{cm}| - (0,5 \div 0,8) e,$$

где $|E_{cm}|$ — абсолютная величина смещения;

2) рабочий участок динамической характеристики лампы должен быть по возможности прямолинейным.

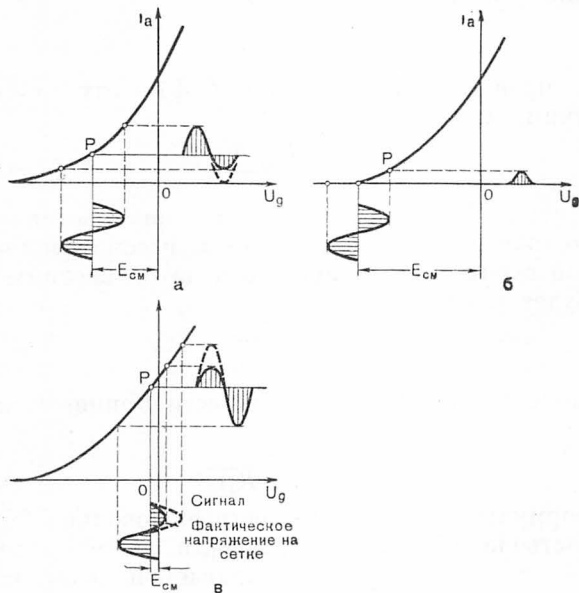


Рис. VII-22. Появление нелинейных искажений из-за сеточных токов

При рассмотрении динамического режима работы каскада на пентоде следует иметь в виду, что положение рабочей точки зависит не только от напряжения на аноде и напряжения смещения, но и от напряжения на экранирующей сетке.

МОЩНОСТЬ В АНОДНОЙ ЦЕПИ

Рассматривая динамический режим работы усилительного каскада, необходимо определить мощность, выделяющуюся на резисторе анодной нагрузки при прохождении переменной составляющей анодного

тока. Эта мощность называется колебательной мощностью и может быть определена по формуле:

$$P_{\sim} = I_a^2 \cdot R_a,$$

где I_a — действующее значение переменной составляющей тока.

Из электротехники известно, что действующее значение переменного тока равно его амплитудному значению, поделенному на $\sqrt{2}$, т. е.:

$$I_a = \frac{I_{am}}{\sqrt{2}}.$$

Если произвести подстановку в формулу мощности, то получим, что

$$P_{\sim} = \frac{I_{am}^2 \cdot R_a}{2}.$$

Амплитудное значение переменной составляющей анодного тока может быть найдено из рассмотрения эквивалентной схемы резисторного каскада на средних частотах и будет равно:

$$I_{am} = \frac{\mu \cdot U_{mc}}{R_i + R_a}.$$

После подстановки формула мощности примет вид:

$$P_{\sim} = \frac{\mu^2 \cdot U_{mc}^2 \cdot R_a}{2(R_i + R_a)}.$$

Из формулы видно, что существует довольно сложная зависимость колебательной мощности, т. е. мощности, отдаваемой каскадом во внешнюю цепь от амплитуды напряжения, подводимого к сетке лампы, и соотношения между сопротивлением анодной нагрузки и внутренним сопротивлением лампы.

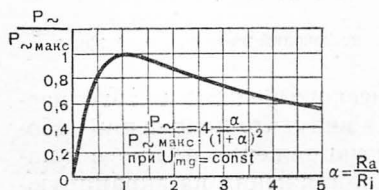


Рис. VII-23. График зависимости колебательной мощности от нагрузочного коэффициента

Эту зависимость удобно представить графически (рис. VII-23), где по вертикальной оси отложено отношение колебательной мощности к ее максимальному значению, а по горизонтальной — нагрузочный коэффициент $\alpha = \frac{R_a}{R_i}$ при постоянной амплитуде напряжения, подводимого к сетке.

Из графика видно, что для триодов максимальная мощность получается при $\alpha=1$, т. е. когда $R_a=R_l$.

Однако практически при работе мощного каскада на триодах выбирается нагрузочный коэффициент $\alpha=2\div 4$, о чем подробнее будет сказано при рассмотрении усиления мощности.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Рассмотрим схемы каскадов усиления напряжения и резисторно-емкостную междукаскадную связь, но до этого необходимо познакомиться с некоторыми способами подачи тока смещения и способами стабилизации работы каскадов с общим источником питания.

Необходимый ток смещения во входной цепи можно получить двумя способами.

1. *Независимое смещение* получают, включая большое сопротивление R_o между источником питания и основанием транзистора (рис. VII-24, а). Здесь питание усилительного каскада по схеме ОЭ осуществляется от одного источника. Ток смещения протекает от плюса источника через промежуток эмиттер — база транзистора, по сопротивлению R_o к минусу источника (пунктирные стрелки на рисунке). Если $R_o \gg R_{вх}$, то ток смещения определяется как

$$I_o = \frac{E}{R_o},$$

т. е. практически не зависит от параметров транзистора.

2. *Автоматическое смещение* можно получить, включая R_o между коллектором и основанием транзистора. На рис. VII-24, б показана схема такого включения. Здесь сопротивление R_o подключено не к батарее, а к коллектору. Источником смещающего тока служит не напряжение батареи, а напряжение коллектора, и при его изменении меняется и ток смещения основания.

Величина сопротивления автоматического смещения определяется как отношение номинального значения кол-

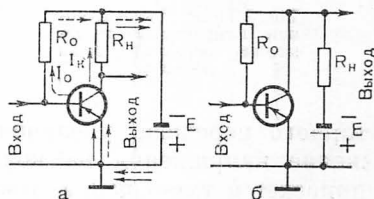


Рис. VII-24. Схемы независимого смещения в транзисторном каскаде

латорного напряжения к номинальному значению тока смещения базы:

$$R_o = \frac{U_{к0}}{I_o}.$$

Обе эти схемы подачи смещения при питании каскада от одного источника не стабильны. Транзисторы очень чувствительны к изменениям температуры. Повышение температуры вызывает понижение сопротивления коллек-

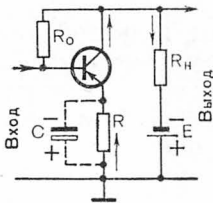


Рис. VII-25. Температурная компенсация с помощью обратной связи по току

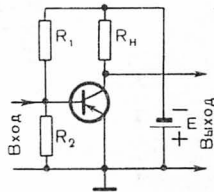


Рис. VII-26. Схема стабилизации

торного перехода, увеличение тока коллектора и понижение напряжения на коллекторе U_k . Уменьшение U_k приведет к уменьшению тока смещения, а это переместит рабочую точку вниз по нагрузочной прямой и приведет к уменьшению коэффициента усиления по току.

Однако в случае перемещения рабочей точки под влиянием внешних причин вниз по нагрузочной прямой напряжение U_k возрастет, ток смещения увеличится и рабочая точка переместится вверх. Таким образом, в схеме автоматического смещения происходит стабилизация режима работы с помощью отрицательной обратной связи.

Схема ОЭ наиболее чувствительна к изменению температуры. Повышение температуры приводит к уменьшению сопротивления коллекторного перехода и увеличению тока коллектора, а также к уменьшению входного сопротивления и коэффициента усиления по току.

Чтобы уменьшить степень нарушения режима работы из-за изменения температуры, вводятся дополнительные элементы, дающие *температурную компенсацию*.

Температурная компенсация достигается с помощью отрицательной обратной связи по постоянному току. Для этого между эмиттером и общим проводом включается сопротивление R (рис. VII-25). Здесь также ток коллек-

тора возрастает по мере повышения температуры и, проходя по сопротивлению R , будет происходить увеличение падения напряжения на нем. Это падение напряжения является отрицательным смещением на эмиттере относительно базы, напряжение между эмиттером и базой уменьшается, что приводит к уменьшению тока коллектора. Сопротивление R может быть шунтировано емкостью C , чтобы уменьшить отрицательную обратную связь по переменному току.

На рис. VII-26 дана другая схема стабилизации режима работы каскада, в которой подача смещения осуществляется при помощи делителя напряжения R_1-R_2 . Ток от общей батареи протекает по резисторам делителя, создавая падение напряжения стабилизирующее положение рабочей точки.

Резисторно-емкостная междукаскадная связь широко используется в схемах усилителей на транзисторах. На рис. VII-27 показана простая схема двухкаскадного усилителя с резисторно-емкостной связью, которая применяется главным образом при включении транзисторов по схеме ОЭ. Рассмотрим назначение и роль отдельных элементов в этой схеме.

Разделительный конденсатор C_g служит для разделения цепей первого каскада от цепей второго каскада по постоянному току.

Через сопротивление R_k коллектор питается постоянным током. Делитель напряжения R_1-R_2 задает потенциал базы и тем самым определяет ток смещения. Сопротивление R_3 служит для стабилизации рабочей точки. Оно создает отрицательную обратную связь; если последняя (по переменному току) нежелательна, то оно шунтируется конденсатором C_3 достаточно большой емкости.

Сопротивление нагрузки первого каскада для переменного тока $R_{экв}$ меньше, чем R_k — сопротивление нагрузки для постоянного тока. $R_{экв}$ определяется как сопротивление параллельного соединения R_k , R_1 , R_2 и $r_{вх2}$. Нагрузкой для данного каскада служит входное сопро-

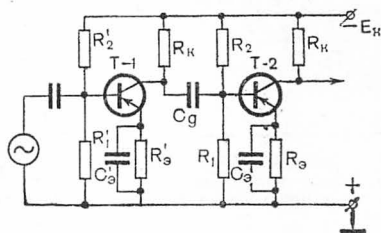


Рис. VII-27. Схема двухкаскадного усилителя с резисторно-емкостной связью

тивление (или сопротивление меньше, чем входное) последующего каскада.

Для междукаскадной связи может быть создана эквивалентная схема. На рис. VII-28 изображена упрощенная эквивалентная схема для переменного тока междукаскадной связи. Упрощение произведено за счет исключения влияния R_3 и C_3 , так

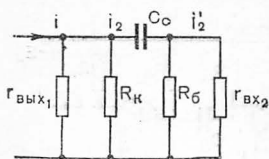


Рис. VII-28. Упрощенная эквивалентная схема резисторного каскада

как в рабочем диапазоне частот $x_{C_3} = \frac{1}{6,28 \cdot f \cdot C_3}$ значительно меньше R_3 и потому переменная составляющая тока создает на разветвлении $R_3 - C_3$ ничтожно малое падение напряжения.

Первый каскад заменен генератором тока i , зашунтированным внутренним выходным сопротивлением триода $r_{\text{вх}1}$. Выходной ток транзистора обозначен i_2 . В схемах ОЭ или ОБ это ток коллектора i_k . Он разветвляется в сопротивлениях R_k , R_6 и $r_{\text{вх}2}$. Заметим, что выходной ток первого каскада i_2 вовсе не равен i'_2 — входному току второго каскада.

Нагрузочным сопротивлением первого каскада $R_{\text{эКВ}}$, т. е. сопротивлением, по которому протекает переменный ток i_2 , служит сопротивление параллельного соединения R_k , R_6 и $r_{\text{вх}2}$:

$$\frac{1}{R_{\text{эКВ}}} = \frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{r_{\text{вх}2}},$$

где $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ (для схемы, показанной на рис. VII-27).

Выходное сопротивление первого каскада — это сопротивление, которое шунтирует вход второго каскада. Можно предположить, что этим сопротивлением служит $r_{\text{вх}1}$. Это верно, если выходным током является i_2 . Но в рассматриваемой практической схеме выходной, полезный, ток i'_2 и всю предшествующую схему следует рассматривать как генератор тока i'_2 с выходным сопротивлением $R_{\text{вых}}$, равным:

$$\frac{1}{R_{\text{вых}}} = \frac{1}{r_{\text{вх}1}} + \frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_6}.$$

Понятие сопротивление генератора входного сигнала второго каскада R_2 применительно к практическим схе-

мам также требует уточнения. Мы пользуемся понятием внутреннее сопротивление генератора входного каскада, полагая, что нам известно э. д. с. этого генератора $u_{вх}$. В действительности известен ток i_2 , например переменная составляющая тока коллектора в схемах ОЭ и ОБ. Убирая из общей схемы (см. рис. VII-28) ненужные для данного рассуждения детали, можно изобразить интересующую нас схему, как показано на рис. VII-29, а и б.

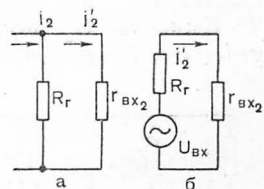


Рис. VII-29. Эквивалентные схемы для определения потерь в межкаскадной цепи

В этой схеме генератор тока i_2 обладает внутренним сопротивлением R_2 , равным сопротивлению параллельного разветвления R_k и R_6 , и шунтирующим нагрузку $r_{вх2}$, по которой протекает ток i'_2 :

$$U_{вх} = i_2 \cdot R_r,$$

$$R_r = \frac{R_k \cdot R_6}{R_k + R_6}.$$

Коэффициент усиления по току с учетом потерь в межкаскадной цепи равен:

$$K'_i = K_i \cdot \frac{R_r}{R_r + r_{вх2}}.$$

Схемные элементы состоят не только из активных сопротивлений, но содержат также частотно-зависимые, реактивные элементы: разделительный конденсатор C_c , конденсатор C_3 и др.

На средних частотах влияние емкости C_c можно не учитывать, так же как и влияние емкости C_3 (для схемы ОЭ).

На низких частотах по мере уменьшения частоты сигнала сопротивление разделительного конденсатора для переменного тока $x_c = \frac{1}{6,28 \cdot f \cdot C_c}$ возрастает. При этом, во-первых, меньшая часть тока эквивалентного генератора ответвляется в последовательную ветвь, где находится конденсатор C_c , и большая часть тока ответвляется в сопротивления $r_{вх1}$ и R_k (см. рис. VII-27); поэтому уменьшается выходной ток, а значит, и падение напряжения, создаваемое этим током на выходе. Во-вторых, поскольку сопротивление x_{C_3} с уменьшением частоты увеличивается, а

сопротивление параллельного соединения R_6 и $r_{вх2}$ остается постоянным, то увеличивается падение напряжения переменной составляющей на конденсаторе и уменьшается на указанных сопротивлениях.

Емкость C_3 шунтирует сопротивление R_3 , которое уменьшает усиление каскада. По мере уменьшения частоты сопротивление конденсатора увеличивается и усиление уменьшается.

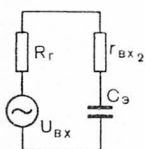


Рис. VII-30. Эквивалентная схема с учетом C_3

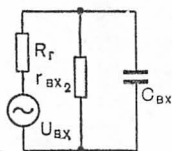


Рис. VII-31. Эквивалентная схема входной части усилителя с учетом входной емкости на высоких частотах

Чтобы получить необходимое усиление на нижней граничной частоте, значительно увеличивают емкость конденсатора. Обычно применяют низковольтные электрические конденсаторы большой емкости.

Эквивалентная схема с учетом C_3 имеет вид, показанный на рис. VII-30.

На рис. VII-31 показана эквивалентная схема входной части усилителя с учетом входной емкости на высоких частотах. Входная емкость $C_{вх}$ шунтирует сопротивление выхода каскада и приводит к спаду частотной характеристики на высоких частотах. Схема ОЭ наиболее чувствительна к вредному влиянию входной емкости и может не обеспечить воспроизведение высокочастотных сигналов.

Трансформаторная междукаскадная связь также широко применяется в схемах усилителей на транзисторах. Для максимальной отдачи транзистора сопротивление нагрузки должно быть примерно таким же, как его внутреннее сопротивление. В схеме ОБ выходное сопротивление велико, а входное сопротивление следующего каскада очень мало. Для согласования сопротивлений в подобном случае целесообразно применить понижающий переходной трансформатор.

Трансформаторная связь между каскадами дает возможность получить максимальный коэффициент усиления и для схем с общим эмиттером, входное сопротивление которых не очень мало, но все же значительно меньше выходного. Эти две схемы показаны на рис. VII-32.

Для каскада с трансформаторной связью, так же как и для каскада с резисторно-емкостной связью, может быть построена эквивалентная схема (рис. VII-33, а). При на-

личии трансформатора параметры вторичной обмотки могут быть приведены в цепь первичной обмотки, и тогда схему можно упростить (рис. VII-33, б). Нагрузка вторичной обмотки R_{II} эквивалентна нагрузке $R'_{II} = n^2 \cdot R_{II}$, подключенной непосредственно к генератору. При этом по цепи

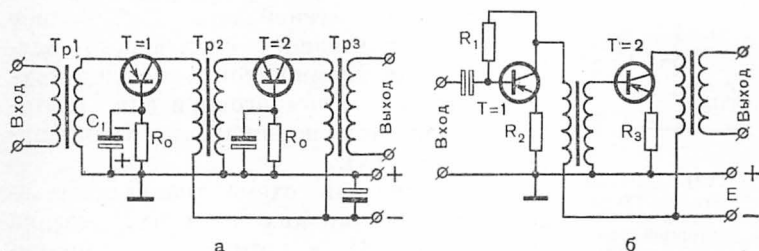


Рис. VII-32. Схемы каскадов с трансформаторной связью

в схеме на рис. VII-33, б протекает ток $i'_2 = \frac{i_2}{n}$ и создает на сопротивлении нагрузки падение напряжения $u'_2 = u_2 \cdot n$. В этих выражениях n — коэффициент трансформации, равный отношению числа витков первичной обмотки w_1 к числу витков вторичной обмотки w_2 .

Коэффициент передачи напряжения трансформатором, т. е. отношение напряжения на нагрузке к э. д. с. генератора, равно:

$$K_{\text{тр}} = \frac{n \cdot R_{II}}{R_{\Gamma} + n^2 \cdot R_{II}}.$$

Последнее выражение максимально, когда $n_0 = \sqrt{R_{\Gamma} \cdot R_{II}}$ или $R'_{II} = R_{\Gamma}$. При этом максимальное значение коэффициента передачи равно:

$$K_{\text{тр. макс}} = 0,5 \sqrt{\frac{R_{II}}{R_{\Gamma}}}.$$

Таким образом, максимальная передача напряжения трансформатором получается при согласовании сопротивлений. Такой же вывод можно сделать и в отношении передачи тока и мощности.

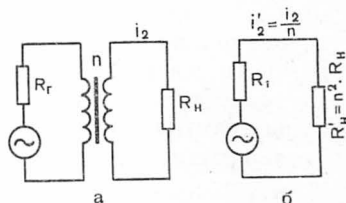


Рис. VII-33. Эквивалентные схемы каскада с трансформаторной связью

Если нагрузка высокоомная ($R_{II} > R_I$), то трансформатор должен быть повышающим ($n < 1$ или $w_2 > w_1$); если нагрузка низкоомная, трансформатор должен быть понижающим ($n > 1$ или $w_1 > w_2$). В практике транзисторных усилителей сопротивление во вторичной обмотке обычно значительно меньше, чем сопротивление «генератор», — это либо входное сопротивление следующего каскада, либо низкоомное сопротивление звуковой катушки громкоговорителя; поэтому применяются понижающие трансформаторы ($w_2 > w_1$).

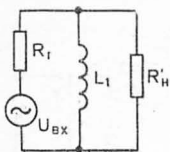


Рис. VII-34. Эквивалентная схема каскада с трансформаторной связью на низких частотах

Эквивалентная схема трансформаторной связи на низких частотах показана на рис. VII-34, в которой L_1 — индуктивность намагничивания первичной обмотки. На высоких частотах сопротивление $x_L = 2\pi f \cdot L_1$ велико и ток сюда не ответвляется. По мере уменьшения частоты ток в индуктивности возрастает, а в сопротивлении R'_{II} уменьшается и, следовательно, падает усиление на низких частотах.

Если учесть, что искажения вносятся еще конденсатором C_3 и конденсаторами в других каскадах, то станет ясно, насколько сложна задача высококачественного воспроизведения низких частот в трансформаторных каскадах. Поэтому на практике редко используются схемы, содержащие кроме выходного другие трансформаторы.

Упрощенная эквивалентная схема трансформаторного каскада в области высоких частот показана на рис. VII-35.

На высоких частотах влияние оказывает индуктивность рассеяния L_s и суммарная шунтирующая емкость C_0 , складывающаяся из отдельных распределенных емкостей обмоток и монтажа, приведенных к первичной обмотке.

С ростом частоты уменьшается сопротивление x_c и при неизменной величине сопротивления генератора уменьшается напряжение на выходе. Кроме того, на некоторой частоте возникает резонанс напряжений между L_s и C_0 , включенных последовательно. На частотной характеристике будет наблюдаться характерный выброс.

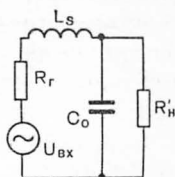


Рис. VII-35. Упрощенная эквивалентная схема трансформаторного каскада в области высоких частот

Типичная частотная характеристика трансформаторного каскада показана на рис. VII-36.

На практике не всегда удается добиться нужного согласования сопротивлений и получения малых частотных искажений с помощью трансформатора. Так, при большом коэффициенте трансформации велика разница между количеством витков первичной и вторичной обмоток, нельзя получить большую связь между ними, а следовательно, будет большая индуктивность рассеяния. Большие значения L_s приводят к спаду частотной характеристики на высоких частотах; из эквивалентной схемы видно, что чем больше $x_{L_1} = 6,28 \cdot f \cdot L_s$, тем больше на нем падение напряжения и, значит, на выходных зажимах напряжение будет тем меньше, чем больше L_s и выше частота.

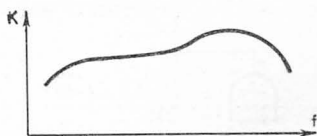


Рис. VII-36. Типичная частотная характеристика трансформаторного каскада

Для уменьшения низкочастотных искажений, создаваемых трансформатором, требуется увеличивать индуктивность L_1 , что приводит к возрастанию собственной емкости обмотки; последняя является составной частью C_0 . Значит, в таких случаях коррекция низкочастотных искажений приводит к увеличению высокочастотных искажений.

§ 3. ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ И ДРОС- СЕЛЬНЫЙ КАСКАДЫ УСИЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В предыдущем параграфе указывалось, что между каскадами усиления напряжения кроме резисторно-емкостной возможна и трансформаторная связь (см. рис. VII-32). Пример двухкаскадной схемы, в которой трансформатор *Tr-1* используется для связи между каскадами, собранными на триодах, приведен на рис. VII-37. Как видно из схемы, первичная обмотка трансформатора *Tr-1* включена в анодную цепь лампы L_1 между положительным полюсом источника анодного питания и анодом лампы. Так как сопротивление первичной обмотки постоянному току невелико (сотни или тысячи ом), то падением напряжения на первичной обмотке можно пренеб-

речь и считать, что напряжение на аноде лампы L_1 равно э. д. с. источника анодного питания.

При подведении переменного напряжения U_{c1} к сетке лампы L_1 в анодной цепи ее создается пульсирующий ток, который проходит через первичную обмотку трансформатора и создает в ней переменное падение напряжения. (Постоянной составляющей падения напряжения в первичной обмотке можно, как было только что показано, пренебречь.)

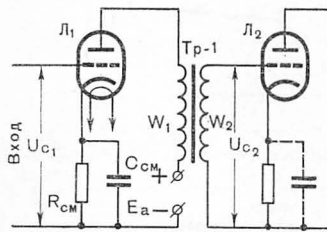


Рис. VII-37. Двухкаскадный усилитель с трансформаторной связью между каскадами

При этом во вторичной обмотке индуцируется переменное напряжение, и если индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора значительно больше внутреннего сопротивления лампы, то величина переменной составляющей напряжения на зажимах первичной

обмотки в μ раз больше напряжения, подводимого к сетке.

Если число витков вторичной обмотки трансформатора сделать больше числа витков первичной, то можно получить некоторое увеличение переменного напряжения, подводимого к сетке лампы L_2 , по сравнению с переменным напряжением первичной обмотки.

Повысить напряжение при помощи усилительного трансформатора практически можно лишь в два-три раза.

Коэффициент трансформации $n = \frac{w_2}{w_1}$ и, следовательно, максимальный коэффициент усиления трансформаторного каскада может быть определен по следующей формуле:

$$K = \mu \cdot n,$$

если трансформатор работает без нагрузки. Практически параллельно вторичной обмотке включается шунт.

Как следует из приведенной формулы, коэффициент усиления каскада с трансформаторной связью может быть больше коэффициента усиления лампы, что не может иметь места в резисторном каскаде.

Отличительной чертой трансформаторного каскада является отсутствие переходного конденсатора, необходимость в котором отпадает, так как нет гальванической связи между анодом лампы L_1 и сеткой лампы L_2 и, сле-

довательно, высокое анодное напряжение не может упасть на сетку лампы L_2 ; конденсатор C_g не нужен.

В числе элементов трансформаторного каскада отсутствует также сопротивление утечки сетки, так как гальваническая связь между сеткой и катодом осуществляется через вторичную обмотку трансформатора. Через нее же подается постоянное напряжение смещения к сетке лампы.

Трансформаторный каскад имеет малое выходное сопротивление и поэтому может применяться при работе следующего каскада с сеточными токами.

Таким образом, по сравнению с резисторным каскадом трансформаторный каскад усиления имеет следующие преимущества:

1. При одном и том же типе лампы трансформаторный каскад усиления имеет значительно больший коэффициент усиления, который получается вследствие повышения напряжения за счет трансформатора.

2. В трансформаторном каскаде усиления можно применить источник анодного питания с меньшей э. д. с. E_a , так как падение постоянного напряжения на первичной обмотке ничтожно мало и можно считать, что $U_{a0} \approx E_a$.

3. Отпадает необходимость в разделительном конденсаторе и сопротивлении утечки сетки лампы следующего каскада.

4. Трансформатор позволяет получить на выходе каскада два равных по величине и противоположных по фазе напряжения, если вывести среднюю точку вторичной обмотки, и поэтому может применяться на входе так называемых двухтактных усилителей мощности, о чем будет рассказано в дальнейшем.

К числу недостатков трансформаторного каскада следует отнести относительную дороговизну трансформатора по сравнению с резистором и конденсатором и трудность получения равномерной частотной характеристики.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРНОГО КАСКАДА

Вопрос о частотных искажениях, вносимых трансформаторным каскадом, удобно рассмотреть при анализе работы эквивалентной схемы на различных частотах. Для построения эквивалентной схемы трансформаторного каскада, так же как и при построении схе-

мы резисторно-емкостного каскада, лампа заменяется эквивалентным генератором переменного тока с э. д. с., равной μU_{c1} , и обладающим внутренним сопротивлением R_i . Трансформатор, в свою очередь, — его эквивалентной электрической схемой.

Из электротехники известно, что всякую нагрузку во вторичной цепи трансформатора можно заменить некоторой эквивалентной нагрузкой, присоединенной к клеммам первичной обмотки. Величина этого эквивалентного сопротивления, или, как его часто называют, приведенного к первичной обмотке сопротивления, может быть легко определена, если известен коэффициент трансформации, путем деления величины сопротивления нагрузки во вторичной цепи на квадрат коэффициента трансформации.

Так, например, шунт, который обычно устанавливается во вторичной цепи междулампового трансформатора $R_{ш}$, может быть приведен к первичной обмотке по формуле:

$$R'_{ш} = \frac{R_{ш}}{n^2}.$$

Аналогичным образом в первичную цепь могут быть пересчитаны активное сопротивление r_2 вторичной обмотки и ее индуктивность рассеяния L_{s2} .

В первичную цепь может быть пересчитана и величина входной емкости следующего каскада C_0 . Но учитывая, что емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости $x_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$, при пересчете емкости ее величину следует не делить, а умножать на квадрат коэффициента трансформации, т. е.:

$$C'_0 = C_0 \cdot n^2.$$

Из курса электротехники (см.: Федосеев П. Г., Электротехника, «Искусство», 1962) также известно, что если к первичной обмотке трансформатора (рис. VII-38,а) подводится переменное напряжение, то через нее проходит переменный ток, который создает в стальном сердечнике переменный магнитный поток.

Силовые линии потока, замыкающиеся в стальном сердечнике, показаны пунктиром. Магнитный поток пронизывает витки вторичной обмотки, индуктируя на ее концах э. д. с., и если к зажимам вторичной обмотки подклю-

чена нагрузка, то во вторичной цепи потечет переменный ток. Он, в свою очередь, также создает магнитный поток в стальном сердечнике. Таким образом, первичная и вторичная цепи трансформатора взаимодействуют между собой, так как один и тот же магнитный поток, образованный токами первичной и вторичной цепей, пронизывает как первичную, так и вторичную обмотки трансформатора.

Но оказывается, что часть силовых линий магнитного потока, образованного током в первичной обмотке, замы-

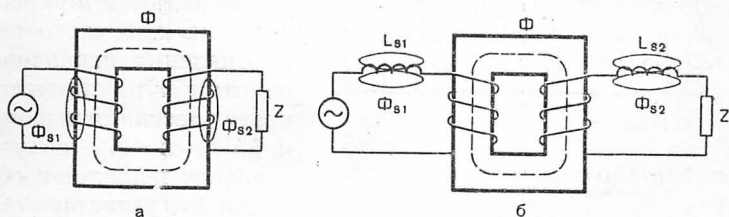


Рис. VII-38. Схематическое изображение трансформатора: а — с рассеянием; б — без рассеяния, но с включенными в его обмотки отдельными индуктивностями

кается по воздуху, а не по стальному сердечнику. Этот поток называется магнитным потоком рассеяния первичной обмотки Φ_{s1} . То же происходит и вокруг вторичной обмотки, образуя магнитный поток рассеяния Φ_{s2} .

Магнитный поток рассеяния первичной обмотки пронизывает только первичную обмотку и индуцирует в ней э. д. с. самоиндукции. То же происходит и во вторичной обмотке. Магнитные потоки рассеяния не участвуют в передаче электрической энергии из первичной цепи трансформатора во вторичную.

Добавочные э. д. с., индуцируемые в обмотках трансформатора потоками рассеяния, вызывают уменьшение напряжения на приемнике на несколько процентов. По величине потоки рассеяния тем больше, чем больше ток в обмотках трансформатора. Действие потоков рассеяния равносильно включению последовательно с первичной и вторичной обмотками трансформатора, не имеющего рассеяния, небольших катушек самоиндукции L_{s1} и L_{s2} (рис. VII-38, б).

На низких и средних частотах индуктивность рассеяния в трансформаторах практически не сказывается на величине коэффициента усиления. Это объясняется тем, что индуктивность рассеяния обычно невелика, поэтому

и их индуктивные сопротивления на низких и средних частотах малы, вследствие чего мало и падение напряжения на них.

В области высоких частот индуктивное сопротивление становится значительным и его нужно учитывать при рассмотрении работы трансформаторного каскада.

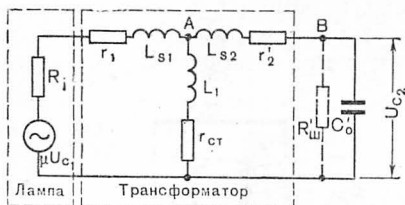


Рис. VII-39. Полная эквивалентная схема трансформаторного каскада

Эквивалентная схема трансформатора состоит из активного сопротивления первичной обмотки r_1 , индуктивности рассеяния первичной обмотки L_{s1} , индуктивности первичной обмотки L_1 , резистора $r_{ст}$, эквивалентного потер-

ям на перемагничивание и вихревые токи в стальном сердечнике, а также из пересчитанных в первичную цепь с помощью коэффициента трансформации $n = \frac{w_2}{w_1}$ резисто-

ров, индуктивностей и емкостей: $L'_{s2} = \frac{L_{s2}}{n^2}$ — приведен-

ная к первичной цепи индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора; $r'_2 = \frac{r_2}{n^2}$ — приведенное актив-

ное сопротивление вторичной обмотки; $R'_{ш} = \frac{R_{ш}}{n^2}$ — приведенное сопротивление шунта; $C'_0 = C_0 \cdot n^2$ — приве-

денная входная емкость следующего каскада, включающая межвитковую емкость трансформатора $C_T = 50 \div 100$ нф. Полная эквивалентная схема трансформаторного каскада дана на рис. VII-39.

Чтобы рассмотреть, какой вид имеет частотная характеристика трансформаторного каскада, можно упростить эквивалентную схему, пренебрегая потерями в сердечнике, а также учитывая малость величин r'_2 и L'_{s2} . Последнее позволяет перенести точку присоединения индуктивности L_1 из A в B , после чего можно объединить индуктивности рассеяния L_{s1} и L'_{s2} в общую индуктивность рассеяния трансформатора L_s , а резисторы r_1 и r'_2 присоединить к R_i источника. Тогда упрощенная эквивалентная схема примет вид, показанный на рис. VII-40.

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО КАСКАДА

Рассмотрим, какие частотные искажения вносятся схемой на низких, средних и высоких частотах, что позволит нам представить себе вид частотной характеристики трансформаторного каскада. Возьмем схему без шунта.

Эквивалентная схема на низких частотах приведена на рис. VII-41, а. По сравнению со схемой рис. VII-40 здесь отсутствуют шунтирующая емкость C'_0 , поскольку ее

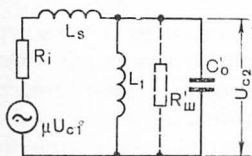


Рис. VII-40. Упрощенная эквивалентная схема трансформаторного каскада

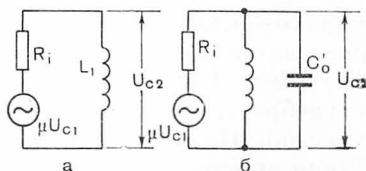


Рис. VII-41. Упрощенная эквивалентная схема на низких частотах

сопротивление в области нижних частот мало, и L_s , так как в этой области индуктивное сопротивление рассеяния также мало.

Усиление на нижних частотах зависит от индуктивного сопротивления ωL_1 , которое уменьшается с понижением частоты. Это приводит к увеличению тока в анодной цепи и падению напряжения на внутреннем сопротивлении лампы; следовательно, выходное напряжение и усиление каскада с понижением частоты уменьшаются. Частотная характеристика имеет спад на низких частотах. Для уменьшения спада нужно, чтобы для самой низкой частоты индуктивное сопротивление ωL_1 было бы больше R_i ; следовательно, индуктивность трансформатора должна быть большой.

Большой величины индуктивности добиваются, применяя большое число витков первичной обмотки трансформатора (3000—5000 витков).

Кроме того, поскольку получение большой индуктивности связано со значительными трудностями при изготовлении трансформатора, для уменьшения частотных искажений следует выбирать лампу с малым внутренним сопротивлением.

С увеличением частоты индуктивные сопротивления ωL_s и ωL_1 увеличиваются, но сопротивление ωL_s даже на средних частотах остается настолько малым, что им можно пренебречь. В то же время емкостное сопротивление $\frac{1}{\omega C'_0}$ уменьшается и становится соизмеримым с ωL_1 . Как видно из эквивалентной схемы (см. рис. VII-41, б) на некоторой определенной частоте между емкостью L_1 и емкостью C'_0 наступает резонанс токов:

$$\omega \cdot L_1 = \frac{1}{\omega \cdot C'_0},$$

при котором общее сопротивление резонансного контура становится очень большим, а ток в цепи становится минимальным. Таким параллельным сопротивлением можно пренебречь, и эквивалентная схема становится элементарно простой. Падение напряжения на внутреннем сопротивлении при этом практически отсутствует, и напряжение на первичной обмотке трансформатора U'_{c2} равно э. д. с. источника, т. е. $U'_{c2} = \mu U_{c1}$.

Напряжение на выходе каскада (на вторичной обмотке трансформатора) в $n = \frac{w_2}{w_1}$ раз больше, чем на первичной обмотке, и, следовательно, равно:

$$U_{c2} = n \cdot U'_{c2} = \mu \cdot n U_{c1}.$$

Отсюда коэффициент усиления на средних частотах K_o равен:

$$K_o = \frac{U_{c2}}{U_{c1}} = \mu \cdot n.$$

Частота первого резонанса может быть приближенно определена по формуле:

$$f_{o. \text{рез}} = \frac{1}{6,28 \sqrt{L_1 \cdot C'_0}}.$$

С дальнейшим повышением частоты индуктивное сопротивление $6,28 \cdot f \cdot L_1$ становится значительно больше, чем емкостное сопротивление $\frac{1}{6,28 \cdot f \cdot C'_0}$, которое продолжает уменьшаться; поэтому в области верхних ча-

стот шунтирующим влиянием индуктивности L_1 можно пренебречь. В то же время падением напряжения на возросшем индуктивном сопротивлении рассеяния $6,28 \cdot f \cdot L_s$ на верхних частотах пренебречь нельзя. Эквивалентная схема с учетом этих соображений может быть упрощена (рис. VII-42). Здесь имеется последовательное соединение индуктивности рассеяния и приведенной входной емкости, между которыми может возникнуть резонанс напряжений. Из условия резонанса может быть определена частота второго резонанса:

$$f_{в. рез} = \frac{1}{6,28 \sqrt{L_s \cdot C'_c}}$$

На частоте резонанса общее реактивное сопротивление становится равным нулю, поэтому ток в цепи резко возрастает и напряжение на каждом из элементов резонансного контура значительно увеличивается, ввиду чего частотная характеристика в области верхних частот приобретает пик (рис. VII-43), а затем резко падает из-за уменьшения сопротивления емкости C'_o .

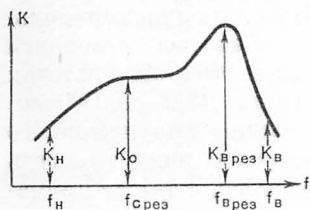


Рис. VII-43. Частотная характеристика трансформаторного каскада

Усилитель с такой частотной характеристикой: 1) создает значительные частотные искажения, так как неравномерно усиливает различные звуковые частоты; 2) склонен к генерации, так как большие частотные искажения могут привести и к появлению больших фазовых искажений; 3) не позволяет получить большой диапазон воспроизводимых частот, так как стремление повысить усиление на средних частотах за счет увеличения коэффициента трансформации приводит к снижению частоты резонанса. Обычно коэффициент трансформации междулампового трансформатора не более $2 \div 4$.

Чтобы уменьшить частотные искажения и получить более устойчивую работу усилителя, вторичную обмотку трансформатора часто шунтируют, подключая рези-

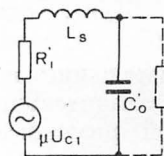


Рис. VII-42. Упрощенная эквивалентная схема на высоких частотах

стор $R_{ш}$ (на рисунке VII-42 он указан пунктиром). Эквивалентное сопротивление $R'_{ш}$, которое обусловлено сопротивлением шунта вторичной обмотки, оказывается включенным параллельно C'_0 .

Шунт, хотя и снижает усиление во всем диапазоне частот, но зато выравнивает частотную характеристику. Включение шунта параллельно емкости C'_0 приводит к значительному уменьшению напряжения на емкости при резонансе и частотная характеристика усилителя имеет меньший подъем на частотах, близких к резонансной. Таким образом, частотная характеристика усилителя становится более прямолинейной, т. е. частотные искажения уменьшаются.

Подбирая величину шунта, добиваются прямолинейной частотной характеристики. При слишком малой величине сопротивления шунта появляется спад частотной характеристики в области высоких частот.

Более или менее прямолинейная характеристика получается при таких сопротивлениях шунта, при которых уменьшение коэффициента усиления на средних частотах составляет $10 \div 20\%$.

Так как сразу за пиком усиления наступает резкий спад частотной характеристики, то для получения большего частотного диапазона нужно добиваться резонанса напряжения трансформатора на самых высоких частотах звукового диапазона, т. е. на частотах 7000—10 000 *гц*. Этого можно добиться при изготовлении междудлампового трансформатора, в частности, уменьшая индуктивность рассеяния до сотых долей генри и меньше, а также применяя секционированные обмотки, что позволяет снизить собственные емкости и потоки рассеяния.

Выбор частоты резонанса напряжения имеет чрезвычайно важное значение при расчете и конструировании усилителя. Так, например, в усилителях, предназначенных для воспроизведения звука с фотографических фонограмм 16-мм фильмов, необходимо иметь подъем частотной характеристики на частоте 4500 *гц*, а затем резкий ее спад.

Это требование вытекает из того факта, что скорость продвижения 16-мм фильма при записи и при проекции составляет 0,183 *м/сек* (а для обычного фильма — 0,456 *м/сек*), и при такой низкой скорости при записи высокие звуковые частоты записываются с меньшими амплитудами. Частотная характеристика фонограммы 16-мм

фильма имеет плавный спад в области высоких частот. Чтобы компенсировать его, нужен усилитель воспроизведения с частотной характеристикой, имеющей значительный подъем в области высоких частот. Кроме того, на частотах более высоких, чем наивысшая частота, записываемая на фонограмму 16-мм фильма (5000 гц,) желательно иметь крутой спад частотной характеристики, так как в этом случае уменьшаются вредные шумы, которые особенно велики при воспроизведении звука с изношенного фильма.

Такую частотную характеристику с подъемом высоких частот имеет универсальный усилитель 90У-2 для работы с 16-мм звуковым фильмом.

Частота резонанса напряжения у трансформатора зависит от эквивалентной емкости $C'_0 = C_0 \cdot n^2$ и полной индуктивности рассеяния L_s :

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{6,28 \cdot \sqrt{L_s \cdot C'_0}} = \frac{1}{6,28 \cdot \sqrt{L_s \cdot C_0 \cdot n^2}} = \\ = \frac{1}{6,28 \cdot n \cdot \sqrt{L_s \cdot C_0}}.$$

Фактически индуктивность рассеяния и собственная емкость трансформатора, зависящие от числа витков и коэффициента трансформации, имеют почти всегда такие значения, что для получения резонанса напряжений на частоте выше 6000 ÷ 8000 гц необходимо выбирать трансформатор с коэффициентом трансформации $n < 2 \div 4$. Поэтому общий коэффициент усиления трансформаторного каскада практически удается получить ненамного больше коэффициента усиления реостатного каскада, тем более, что в трансформаторном каскаде приходится применять лампы с меньшим внутренним сопротивлением и, следовательно, с малым коэффициентом усиления.

На рис. VII-44 показана конструкция междуламповых трансформаторов низкой частоты.

Сердечник трансформатора броневое или стержневого типа собирается из пластин, изготовленных из высококачественного ферромагнитного материала, а иногда из пермаллоя. Это дает возможность получить большую индуктивность первичной обмотки. Катушки (обмотки) надеваются на каркас. Для уменьшения индуктивности рассеяния (до сотых долей генри и меньше) и собственной

емкости применяется секционированная симметричная обмотка; при этом секции разных обмоток чередуются, вследствие чего улучшается магнитная связь и уменьшаются потоки рассеяния. Лучше иметь окно узкое и длинное, тогда катушка имеет меньшую высоту обмотки и большую длину, что снижает рассеяние. Иногда приме-

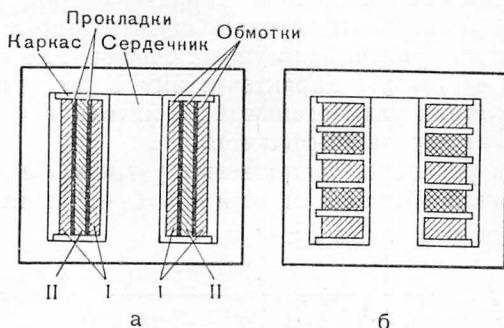


Рис. VII-44. Конструкция междуламповых трансформаторов низкой частоты

няются дисковые обмотки, позволяющие получить малую межвитковую емкость и большую электрическую прочность (рис. VII-44, б).

Включение трансформатора в анодную цепь по-прежнему ставит вопрос о нелинейных искажениях, так как трансформатор, как нелинейный элемент, является источником нелинейных искажений в усилителе.

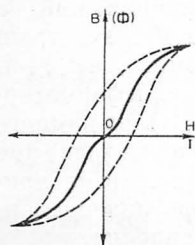


Рис. VII-45. Кривая намагничивания

Известно, что между магнитной индукцией и намагничивающим током имеет место нелинейная зависимость (рис. VII-45). Поэтому подведение синусоидального переменного напряжения к первичной обмотке трансформатора от генератора с большим внутренним сопротивлением, каким является лампа, приводит к тому, что в первичной обмотке протекает несинусоидальный ток.

На рис. VII-46 показана схема включения трансформатора к источнику переменного напряжения с большим внутренним сопротивлением — эквивалентная схема лампы, нагруженной на трансформатор. Напряжение на первичной обмотке трансформатора равно э. д. с. генера-

тора минус падение напряжения на его внутреннем сопротивлении. Так как падение напряжения на генераторе несинусоидально, то разность синусоидального и несинусоидального напряжений также будет несинусоидальна. Ввиду этого во вторичной обмотке также индуцируется несинусоидальная э. д. с. Она отличается от формы кривой генератора, т. е. лампы, и, следовательно, трансформатор вносит нелинейные искажения, величина которых зависит как от величины переменного потока, пронизывающего сердечник, а также от соотношения индуктивного сопротивления первичной обмотки трансформатора и внутреннего сопротивления лампы.

Для уменьшения нелинейных искажений желательно иметь возможно большую индуктивность первичной обмотки трансформатора и применить лампу с малым внутренним сопротивлением. Возможен еще один вариант схем, в которых междупламповый трансформатор включается после катодного повторителя, имеющего малое выходное сопротивление. Включение шунта во вторичную обмотку трансформатора уменьшает нелинейные искажения, так как в этом случае нелинейное сопротивление трансформатора зашунтировано линейным сопротивлением шунта.

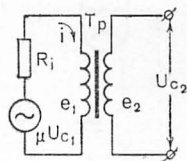


Рис. VIII-46. Схема включения трансформатора к источнику переменного напряжения с большим внутренним сопротивлением

РЕЗИСТОРНО-ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ И ДРОССЕЛЬНЫЙ КАСКАДЫ

На рис. VII-47 показана принципиальная схема резисторно-трансформаторного каскада с параллельным питанием. Как видно из схемы, постоянная составляющая анодного тока не создает подмагничивания сердечника и проходит не через первичную обмотку трансформатора, а через резистор R_a . Иногда вместо резистора R_a берут дроссель, и усилитель становится индуктивно-дроссельным. Для разделения переменной и постоянной составляющих между анодом и первичной обмоткой трансформатора включается разделительный конденсатор.

Резисторно-трансформаторная схема имеет следующие преимущества по сравнению с обычной трансформаторной схемой каскада усиления напряжения:

1) дает возможность получить при том же числе витков большую индуктивность L_1 , так как при отсутствии подмагничивания магнитная проницаемость больше;

2) дает возможность получить меньшие нелинейные и частотные искажения, вносимые трансформатором;

3) дает возможность получить больший коэффициент усиления на низких частотах, чем на средних, для коррекции частотной характеристики усилителя. Этот подъем может быть получен за счет резонанса напряжений между индуктивностью

первичной обмотки и разделительным конденсатором C_g ;

4) дает возможность использовать трансформатор меньшего веса и размера.

К недостаткам резисторно-трансформаторного каскада следует отнести то, что напряжение источника питания должно быть больше, чем при трансформаторном каскаде, из-за падения напряжения на резисторе. Кроме того, R_a шунтирует трансформатор и усиление на средних частотах несколько снижается.

Схема дроссельного каскада дана на рис. VII-48. В ней вместо резистора анодной нагрузки включается дроссель низкой частоты. На малом активном сопротивлении дросселя почти не происходят потери напряжения, поэтому напряжение на аноде практически равно напряжению источника питания.

Как и в резисторно-трансформаторном каскаде, дроссельный каскад может быть использован для подъема частотной характеристики на низких частотах за счет резонанса напряжений между индуктивностью дросселя и емкостью разделительного конденсатора.

Ввиду того что дроссель является тяжелой деталью и сравнительно дорогой, схемы дроссельных каскадов в аппаратуре воспроизведения звука почти не применяются.

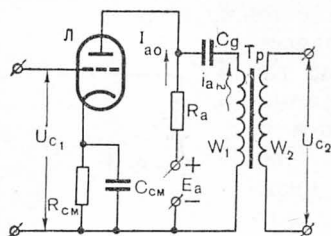


Рис. VII-47. Схема каскада с параллельным питанием

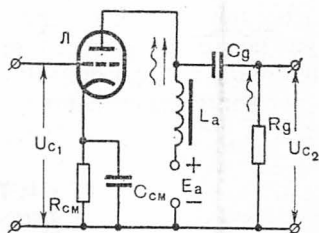


Рис. VII-48. Схема дроссельного каскада

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните назначение и место усилителя в схеме звуковоспроизведения.
2. Почему применяются многокаскадные усилители?
3. Что называется усилительным каскадом?
4. В чем заключается назначение предварительного и оконечного усилителей?
5. Перечислите основные параметры усилителей.
6. Что понимают под коэффициентом усиления усилителя?
7. Чему равен коэффициент усиления многокаскадного усилителя напряжения?
8. Что понимается под чувствительностью усилителя?
9. Что такое добротность оконечного усилителя?
10. Какие типы искажений вносит усилитель?
11. Что называют диапазоном частот или полосой пропускания усилителя?
12. Как строится частотная характеристика усилителя и в каком отношении она его характеризует?
13. Как воспринимаются на слух нелинейные искажения при воспроизведении музыки и речи?
14. Какие элементы усилительного каскада могут служить причиной появления нелинейных искажений?
15. Что понимают под номинальной выходной мощностью и пиковой мощностью усилителей?
16. Что называют помехами при работе усилителя? Чем вызваны шумы, шорох и фон переменного тока на выходе усилителя?
17. Объясните графически процессы, происходящие в усилительном каскаде.
18. Пользуясь схемой, объясните, почему лампа поворачивает усиливаемое напряжение по фазе на 180° .
19. Что называется динамическим режимом работы лампы?
20. Какими величинами определяется положение рабочей точки на характеристике лампы?
21. Как зависят нелинейные искажения от выбора режима работы лампы?
22. Что такое автоматическое смещение?
23. Объясните особенности автоматического и независимого смещения.
24. С какой целью сопротивление автоматического смещения шунтируют конденсаторами большой емкости?
25. Перечислите типы каскадов усиления напряжения?
26. Объясните назначение элементов схемы резисторного каскада.
27. Покажите на схеме резисторного каскада пути и направления постоянной составляющей анодного тока.
28. Покажите на схеме того же каскада пути и направления переменной составляющей анодного тока.
29. Объясните по эквивалентной схеме резисторного каскада, какими элементами схемы и почему можно пренебречь на нижних, средних и верхних частотах.
30. Нарисуйте и объясните частотную характеристику резисторного каскада.
31. Объясните назначение сопротивления и конденсатора в цепи экранной сетки пентода.

32. Объясните принципиальную схему трансформаторного каскада и назначение его деталей.
33. Что происходит в трансформаторном каскаде при подаче на выход усиленного переменного напряжения?
34. Покажите на схеме трансформаторного каскада путь и направление постоянной и переменной составляющей тока лампы.
35. Перечислите и объясните недостатки и достоинства трансформаторного каскада.
36. Пользуясь упрощенной эквивалентной схемой, объясните причину подъема частотной характеристики в области высоких частот.
37. Как устроен междуламповый трансформатор?
38. Как уменьшить индуктивность рассеяния трансформатора?

ОКОНЕЧНЫЕ И ПРЕДОКОНЕЧНЫЕ КАСКАДЫ

§ 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ

Мощным, или выходным (оконечным), называют каскад, непосредственно работающий на полезную нагрузку, например на громкоговоритель в усилительном устройстве для воспроизведения звука. Основное назначение выходного каскада заключается в создании полезного сигнала определенной мощности при небольших нелинейных искажениях. Последние часто определяют выбор схемы каскада и режим его работы.

Наибольшая мощность электрических колебаний, развиваемая на нагрузке, зависит только от свойств выходного каскада. Предварительные каскады усиления напряжения предназначены лишь для того, чтобы увеличить амплитуду переменного напряжения, подводимого на вход мощного каскада.

В выходных каскадах обычно стремятся получить наибольший коэффициент полезного действия (к. п. д.) и стараются поэтому наиболее полно использовать возможности электронной лампы или транзистора. Однако

последнее приводит к неминуемому росту нелинейных искажений, которые часто ограничивают получение необходимой мощности.

К. п. д. является важным показателем работы мощного каскада, так как он характеризует экономичность устройства.

На рис. VIII-1 дана схема простейшего выходного каскада с непосредственным включением полезной нагрузки в анодную цепь.

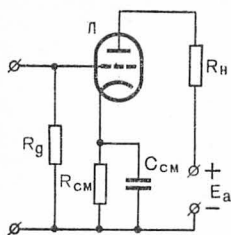


Рис. VIII-1. Схема выходного каскада с непосредственным включением нагрузки в анодную цепь

Этой схеме присущи серьезные недостатки, которые почти не позволяют использовать ее в усилителях звукового кино.

1. Через нагрузочное сопротивление (звуковую катушку громкоговорителя) проходит не только переменная, но и постоянная составляющая анодного тока оконечной лампы. Постоянная составляющая анодного тока вызывает значительный дополнительный нагрев звуковой катушки и увеличение нелинейных искажений из-за смещения звуковой катушки в воздушном зазоре относительно среднего положения.

2. Сопротивление нагрузки не может быть согласовано с внутренним сопротивлением лампы. Вместе с тем усилительная лампа или транзистор отдают во внешнюю цепь максимальную мощность только при вполне определенном отношении сопротивления внешней нагрузки к внутреннему сопротивлению лампы.

3. Происходит значительная потеря напряжения на сопротивлении нагрузки, из-за чего для получения нужного анодного напряжения требуется источник анодного питания с повышенным напряжением.

Можно было бы добиться согласования между внутренним сопротивлением лампы и сопротивлением громкоговорителя, но для этого потребовались бы высокоомные (1000—1500 ом) громкоговорители, которые имеют меньший к. п. д. и потому не изготавливаются.

Наиболее приемлемой оказалась схема однотактного выходного каскада с трансформаторной связью (рис. VIII-2). Анодная нагрузка лампы состоит из трансформатора, называемого выходным, нагруженного на сопротивление R_n (например, звуковая катушка головки громкоговорителя). Выходной трансформатор служит здесь для

согласования низкоомной звуковой катушки головки громкоговорителя с внутренним сопротивлением лампы. Лампа оказывается нагруженной на сопротивление, приведенное к первичной обмотке выходного трансформатора

$R'_H = \frac{R_H}{n^2}$, где коэффициент трансформации $n = \frac{w_2}{w_1}$.

Выбирая $R'_H = (2 \div 4)R_i$, можно найти коэффициент трансформации по формуле:

$$n = \sqrt{\frac{R_H}{R'_H}}$$

Так как падение напряжения на первичной обмотке трансформатора незначительно, то в рассматриваемой схеме анодное напряжение примерно равно э. д. с. источника питания $U_a \approx E_a$.

Мощность, развиваемую лампой в однотактном трансформаторном каскаде, можно определить для случая $R'_H = R_i$ по формуле:

$$P_{\text{макс}} = \frac{\mu^2 \cdot U_c^2}{(R_i + R'_H)^2},$$

где $P_{\text{макс}}$ — максимальная мощность, отдаваемая лампой, U_c — действующее значение подводимого к сетке напряжения.

Когда $R'_H = R_i$ и напряжение, подводимое к сетке, равно 1 в, формула принимает вид:

$$P_{\text{макс}} \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{\mu^2}{R_i}$$

Из этой формулы видно, что максимальная мощность зависит от параметров лампы: μ и R_i .

Если известна величина U_c действующего значения переменного напряжения сетки, то максимальную мощность, развиваемую лампой, можно определить по формуле:

$$P_{\text{макс}} = \frac{\mu^2 \cdot U_c^2}{4R_i}$$

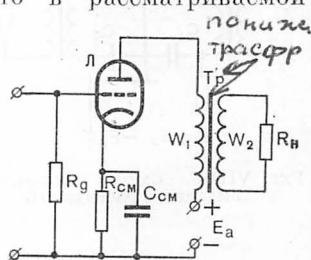


Рис. VIII-2. Схема выходного однотактного каскада с трансформаторной связью

Если же подставить амплитудное значение напряжения сигнала $U_c = \frac{U_{cm}}{\sqrt{2}}$, формула примет вид:

$$P_{\text{макс}} = \frac{\mu^2 \cdot U_{cm}^2}{8R_i}$$

Таким образом, мощность, развиваемая лампой в схеме однотактного каскада, зависит от добротности лампы, от величины переменного напряжения, подводимого к сетке,

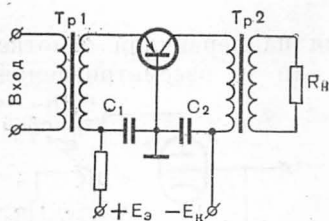


Рис. VIII-3. Схема однотактного выходного каскада ОБ

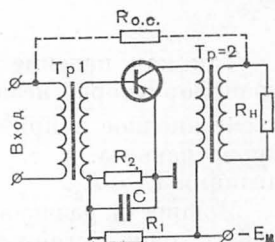


Рис. VIII-4. Схема однотактного выходного каскада ОЭ

от выбора величины сопротивления нагрузки и, как было показано выше, максимальную мощность лампа отдает при условии, что $R'_H = R_i$.

Однотактные выходные каскады могут быть собраны и на транзисторах. В мощных каскадах возможно использование всех трех схем включения транзисторов: ОБ, ОЭ и ОК.

На рис. VIII-3 показана схема однотактного выходного каскада ОБ. Здесь нагрузка также подключается к транзистору через трансформатор $Tp-2$. Схема ОБ имеет то достоинство, что дает наименьшие нелинейные искажения, зависящие главным образом от искажений во входной цепи, но имеет небольшой коэффициент усиления по мощности. Поэтому желательно, чтобы значительную мощность развивал предоконечный каскад, и, как следствие этого, возникает необходимость применения входного трансформатора. Он нужен для согласования малого входного сопротивления оконечного каскада с выходным сопротивлением предоконечного каскада.

Схема ОБ менее других чувствительна к изменениям окружающей температуры и к смене транзистора. Она

имеет большое выходное сопротивление, что можно считать недостатком при использовании для усиления мощности.

Другая схема мощного однотактного каскада — с общим эмиттером ОЭ — показана на рис. VIII-4. Она также имеет два трансформатора и дает наибольшее усиление по мощности и, следовательно, требует наименьшей мощности сигнала на входе. Однако эта схема дает большие нелинейные искажения и, кроме того, весьма чувствительна к изменению параметров транзисторов. Чтобы уменьшить коэффициент нелинейных искажений в этой схеме, приходится менее полно использовать транзистор по питанию.

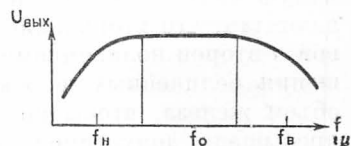


Рис. VIII-5. Частотная характеристика оконечного трансформаторного каскада

Полезная мощность, развиваемая каскадом на транзисторе, зависит от максимально допустимых напряжения и мощности рассеяния на коллекторе и практически не зависит от схемы включения транзистора.

Эквивалентная схема и частотная характеристика однотактного выходного каскада с трансформаторной связью идентичны полной эквивалентной схеме трансформаторного каскада усиления напряжения (см. стр. 212). Основное отличие эквивалентной схемы оконечного каскада усиления напряжения состоит в том, что она не имеет емкости (см. рис. VII-39). Отсутствие емкости в эквивалентной схеме оконечного каскада объясняется тем, что существующая во вторичной цепи емкость соединительной линии к громкоговорителю не учитывается, так как ее эквивалентная величина при понижающем трансформаторе получается ничтожно малой и ею можно пренебречь; она почти не влияет на форму частотной характеристики.

Частотная характеристика оконечного трансформаторного каскада имеет спад на высоких частотах (рис. VIII-5). На графике по оси ординат отложены значения величины напряжения на выходе (на нагрузке), а не коэффициент усиления. Отношение напряжения выхода усилителя к напряжению, подводимому к сетке лампы, не называют коэффициентом усиления, так как в оконечном каскаде это отношение не характеризует свойства усилителя. Так, например, если громкоговори-

тель низкоомный, то для получения большей мощности в целях согласования используется понижающий выходной трансформатор, а следовательно, напряжение на выходе усилителя будет небольшим.

При конструировании выходного трансформатора к нему предъявляется ряд требований: он должен иметь малую индуктивность рассеяния L_s , поэтому намотку делают так, что вторичная обмотка помещается между первой и второй половинками первичной обмотки: для уменьшения нелинейных искажений при расчете увеличивают объем железа, чтобы постоянное намагничивание его не превышало допустимой величины, иначе сильно возрастают искажения.

§ 2. РЕЖИМ РАБОТЫ ЛАМП МОЩНОГО КАСКАДА

К мощному каскаду предъявляется основное требование, заключающееся в получении наибольшей возможной мощности при допустимых нелинейных искажениях. Мы видели, что электрическая мощность, которую может развить оконечный каскад на нагрузке, зависит от параметров лампы μ и R_i и от напряжения на сетке, которое все время изменяется. Величина нелинейных искажений в основном зависит от режима работы в каскаде усиления мощности.

Как известно из рассмотрения работы лампы как усилителя, под режимом работы лампы понимают постоянное напряжение на аноде, постоянное напряжение отрицательного смещения, максимально допустимое напряжение, подводимое к сетке. Режим определяется также величиной анодной нагрузки.

При работе лампы в режиме усиления можно получить два принципиально различных вида колебаний анодного тока. Один из них называют режимом класса А (рис. VIII-6). В этом режиме рабочая точка выбирается на середине прямолинейного участка характеристики лампы, так как в этом случае нелинейные искажения при усилении сводятся к минимуму. Анодный ток проходит через лампу в течение всего периода колебаний напряжения на сетке. Как видно на рассматриваемом рисунке, амплитуда переменной составляющей анодного тока I_{ma} может быть меньше или равна току покоя I_{a0} , а постоянная составляющая анодного тока при подаче переменного напряжения на сетку лампы примерно равна току покоя.

При работе лампы в качестве усилителя в режиме класса А для него характерны малые нелинейные искажения и низкий к. п. д. ($\eta=0,1 \div 0,3$). Для обычных однокатных схем допустим только такой режим. Как мы увидим из дальнейшего, он может быть использован и в других, так называемых двухтактных схемах усиления мощности.

Но в двухтактных каскадах усиления мощности может быть использован еще так называемый режим класса В (рис. VIII-7). Здесь рабочая точка выбирается в точке пересечения характеристики с осью абсцисс. Анодный ток проходит через лампу только в течение одной половины периода переменного напряжения на сетке, а в течение второй (отрицательной по знаку) половины периода анодный ток равен нулю. Ток по-

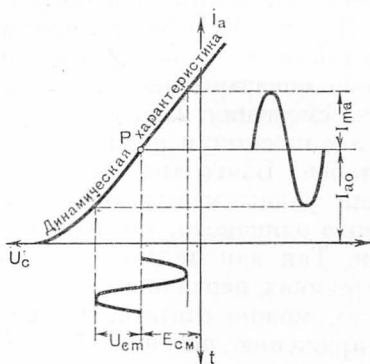


Рис. VIII-6. Работа лампы в режиме класса А

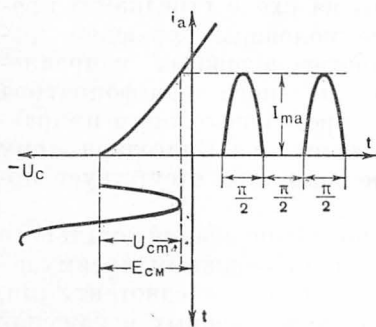


Рис. VIII-7. Работа лампы в режиме класса В

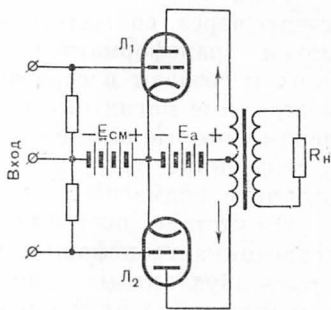


Рис. VIII-8. Принципиальная схема двухтактного каскада на триодах

коя I_{a0} в режиме класса В равен нулю. Такой режим работы используется в том случае, если применяется двухтактная схема оконечного каскада.

Двухтактными называют такие схемы, в которых не одна, а две лампы (или два транзистора) работают пооче-

редно. При наличии двух ламп каждая из них со своими цепями составляет плечо каскада. Плечи в двухтактной схеме должны быть симметричны, т. е. лампы должны иметь одинаковые параметры и режимы.

На рис. VIII-8 дана принципиальная схема двухтактного оконечного каскада на триодах. Для наглядности на схеме показаны анодная батарея и батарея отрицательного смещения. Как видно из схемы, отрицательное смещение на сетки первой и второй ламп подводится от общей батареи. Благодаря этому напряжения на сетках обеих ламп равны между собой. Анодное напряжение лампы также одинаково, так как подается от одной общей батареи. Так как падение постоянного напряжения в обеих половинах первичной обмотки выходного трансформатора мало, можно считать, что напряжения на анодах равны напряжению питания: $U'_{ao} = U''_{ao} = E_a$.

Рассмотрим сначала случай, когда переменное напряжение не подводится на вход каскада, т. е. в режиме покоя. Так как анодные напряжения и напряжения смещения у ламп одни и те же, а лампы одинаковы, то анодные токи ламп будут также строго одинаковы: $I'_{ao} = I''_{ao} = I_{ao}$. Так как включены две лампы, то общий потребляемый от анодной батареи ток $I_o = 2 \cdot I_{ao}$.

Токи покоя ламп (указаны на схеме стрелками) проходят через соответствующие половины первичной обмотки трансформатора в противоположных направлениях и создают в сердечнике выходного трансформатора постоянные магнитные потоки противоположного направления, которые взаимно компенсируются. Благодаря этому в сердечнике выходного трансформатора отсутствует постоянное подмагничивание.

Отсутствие постоянного подмагничивания стального сердечника трансформатора является важным преимуществом двухтактных схем по сравнению с однотактными, так как приводит к уменьшению нелинейных искажений в выходном трансформаторе и позволяет сделать его менее громоздким.

Легко себе представить, что произойдет, если вместо анодной батареи будет использоваться источник анодного питания в виде кенотронного выпрямителя с фильтром, где возможны пульсации питающих напряжений: токи обеих ламп будут изменяться одновременно, оставаясь равными друг другу в любой момент, а так как они создают взаимно компенсирующие друг друга пульсирую-

щие магнитные потоки в сердечнике, то суммарный магнитный поток будет равен нулю.

Малая чувствительность к пульсациям питающих напряжений — второе преимущество двухтактных схем. В частности, это позволяет снизить требования, предъявляемые к фильтрации анодного напряжения.

Рассмотрим, как работает схема, когда к сеткам ламп в противофазе подводятся переменные напряжения сигнала. Это требование, предъявляемое двухтактной схемой, может быть выполнено либо путем использования переходного трансформатора с выводом от средней точки вторичной обмотки, либо применением так называемых инверсных каскадов усиления напряжения.

При подаче на сетки ламп переменных напряжений результирующие сеточные напряжения изменяются в противофазе (рис. VIII-9, а). Поэтому анодные токи ламп также изменяются в противофазе (рис. VIII-9, б), следовательно, их переменные составляющие сдвинуты по фазе на 180° .

Рассмотрим первую четверть периода, и если анодный ток первой лампы возрастает, а анодный ток второй лампы уменьшается, сумма мгновенных значений токов ламп в любой момент остается постоянной. Это означает, что и в колебательном режиме ток, потребляемый от источника питания, равен удвоенному току покоя одной лампы и не содержит переменной составляющей (рис. VIII-9, в).

Вернемся к рассмотрению первой четверти периода колебательного режима: в то время, когда анодный ток первой лампы возрастает, а второй — уменьшается, в стальном сердечнике выходного трансформатора возникает магнитный поток, численно равный разности потоков, создаваемых током первой и второй ламп. По направлению он будет совпадать с потоком, создаваемым током первой лампы. Величина магнитного потока в сердечнике транс-

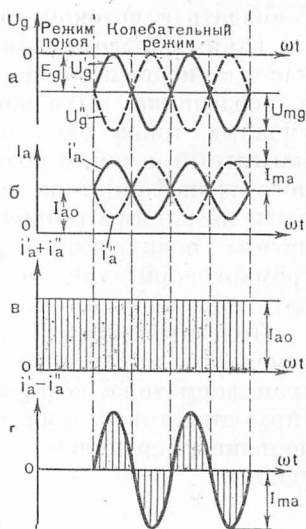


Рис. VIII-9. Графики работы двухтактного каскада

форматора в рассматриваемый промежуток времени будет тем больше, чем больше увеличение тока первой лампы и чем значительнее уменьшится ток второй лампы.

В следующий полупериод анодный ток первой лампы будет уменьшаться, а анодный ток второй лампы — увеличиваться. В этом случае магнитный поток выходного трансформатора равен разности потоков, создаваемых токами второй и первой ламп, а по направлению он будет совпадать с потоком, создаваемым током второй лампы.

Таким образом, если к входу двухтактного оконечного каскада подводится переменное напряжение сигнала, то в сердечнике выходного трансформатора колебаниями анодных токов оконечных ламп создается переменный магнитный поток, и поэтому во вторичной обмотке выходного трансформатора создается переменное напряжение. Если на клеммы вторичной обмотки выходного трансформатора подключить сопротивление нагрузки (головку громкоговорителя), то через эту нагрузку будет протекать переменный ток.

Полезный эффект в нагрузке зависит от величины переменного магнитного потока в сердечнике выходного трансформатора, который пропорционален разности пульсирующих токов ламп (рис. VIII-9, *з*), проходящих через половины первичной обмотки в противоположных направлениях:

$$i'_a - i''_a = 2 \cdot I_{m a} \cdot \sin \omega t;$$
$$\Phi = a \cdot 2 \cdot I_{m a} \cdot \sin \omega t,$$

где a — коэффициент пропорциональности.

Отсюда следует, что полезный магнитный поток пропорционален удвоенной переменной составляющей анодного тока и, следовательно, мощность в нагрузке равна сумме мощностей, развиваемых каждой лампой.

Выше указывалось, что несмотря на то, что анодные токи ламп изменяются по величине, суммарный ток, проходящий через источник питания анодных цепей, остается постоянным. Это — важное преимущество схемы. Обычно пульсации анодного напряжения и напряжения смещения из-за недостаточной фильтрации приводят к появлению фона переменного тока вследствие пульсаций анодного тока лампы с частотой 50 или 100 *гц*.

Уменьшение пульсаций на общем источнике питания положительно сказывается на стабильности работы

многокаскадного усилителя, так как приводит к ослаблению паразитной связи между каскадами через общий источник питания анодных цепей различных каскадов.

В начале этой главы указывалось, что назначение выходного каскада заключается в создании полезного сигнала определенной мощности при минимальных нелинейных искажениях. Оказывается, что двухтактная схема имеет еще одно преимущество перед однотактной схемой, так как позволяет значительно уменьшить нелинейные искажения благодаря компенсации четных гармоник в выходном трансформаторе.

Как это происходит? До сих пор мы рассматривали работу двухтактной схемы, полагая, что плечи строго симметричны, а лампы — одинаковы. Практически, однако, лампы имеют разброс параметров и изменения токов в лампах не одинаковы ввиду того, что в любом участке характеристики их отклоняются от прямой.

Допустим, что на вход оконечного каскада подводится синусоидальный сигнал. Если работа происходит на криволинейном участке характеристики, например при использовании нижнего криволинейного участка (рис. VIII-10), то колебания анодных токов ламп будут несинусоидальными. Всякий несинусоидальный переменный ток кроме колебаний основной частоты содержит колебания с частотами, кратными основной. Поскольку кривая получается несимметричной, то в ней преобладают четные гармоники тока. Но переменные напряжения на сетках ламп сдвинуты по фазе на 180° ; поэтому для тока первой лампы кривая сильно искажена во второй полупериод, а для тока второй лампы, наоборот, — в первый полупериод.

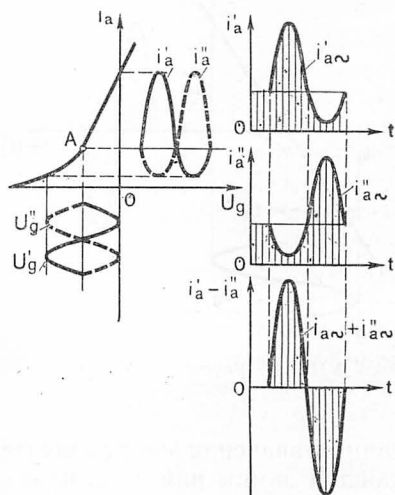


Рис. VIII-10. Работа на криволинейном участке характеристики

При вычитании пульсирующих токов ламп их переменные составляющие суммируются, причем менее искаженный полупериод тока первой лампы складывается с более искаженным полупериодом тока второй лампы, и наоборот, — более притупленный полупериод тока первой лампы складывается с полупериодом более острой формы для тока второй лампы.

Как видно из графика, результирующая кривая разностного тока получается симметричной, т. е. не содержит четных гармоник, и нелинейные искажения значительно уменьшаются.

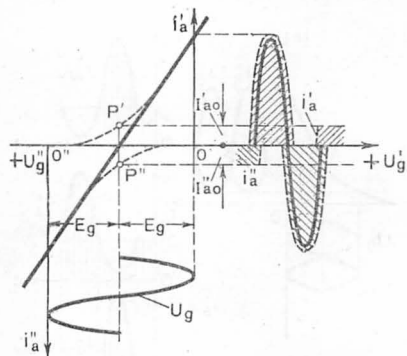


Рис. VIII-11. Работа лампы в режиме класса АБ

Это объясняется тем, что токи четных гармоник, как и постоянные составляющие, протекают по половинкам первичной обмотки выходного трансформатора в противоположных направлениях и создаваемые ими магнитные потоки взаимно компенсируются. Поэтому при заданном значении коэффициента нелинейных искажений от каждой лампы или от каждого транзистора (если схема на транзисторах) можно получить большую мощность, чем от той же лампы или от того же транзистора в одноконтурной схеме.

Малые нелинейные искажения и работа ламп в противофазе в двухтактном мощном каскаде позволяют использовать режим класса Б или промежуточный режим класса АБ, на котором следует остановиться особо.

Режим класса АБ наиболее распространен на практике. Рабочая точка выбирается на начальном участке динамической характеристики лампы, ближе к нижнему загибу, чем для режима А. Ток покоя мал, но не равен нулю. В этом режиме каждый полупериод работают обе лампы, но если взглянуть на график анодного тока каждой лампы (рис. VIII-11), легко заметить, что нижние полупериоды колебаний тока частично срезаны, т. е. ток каждой лампы искажен. Однако результирующие искажения в выходном токе (в нагрузке) отсутствуют, так же как и в классе Б.

Полезная мощность и к. п. д. в режиме класса АБ больше, чем в классе А, но меньше, чем в режиме класса Б.

Различают две разновидности режима АБ. Один называют режимом АБ₁, когда работа происходит только в отрицательной области характеристик, т. е. без сеточных токов. Другой режим, когда работа происходит с заходом в положительную область характеристик, называют режимом АБ₂. Режим АБ₂ с появлением сеточных токов не применяется в аппаратуре воспроизведения звука киноустановок.

Режим АБ₁ широко используется, так как в этом режиме от усилителя можно получить большую мощность, чем в режиме А. Тогда, когда режим АБ близок к режиму А, можно использовать отрицательное автоматическое смещение. Если же используется глубокий режим АБ₁, при котором ток покоя очень мал, а среднее значение анодного тока сильно зависит от амплитуды сигнала, приходится применять так называемое независимое смещение, так как невозможно иметь автоматическое смещение.

Таким образом, по сравнению с одноктактной двухтактная схема мощного каскада имеет следующие преимущества:

- 1) сердечник выходного трансформатора не имеет постоянного подмагничивания, что приводит к снижению вносимых им нелинейных искажений каскада. Трансформатор может быть менее громоздким;

- 2) меньше прослушивается фон переменного тока, возникающий при пульсациях питающих напряжений;

- 3) паразитные связи через общий источник питания каскадов значительно ослаблены;

- 4) нелинейные искажения благодаря компенсации в выходном трансформаторе четных гармоник значительно ослаблены;

- 5) позволяет использовать экономичные режимы работы ламп классов Б и АБ.

Наряду с перечисленными преимуществами двухтактная схема имеет и ряд недостатков: применение двух ламп или транзисторов, вывод средней точки первичной обмотки выходного трансформатора, необходимость подводить к сеткам ламп противофазные напряжения сигнала, подбора ламп с одинаковыми параметрами, полной симметрии входных напряжений и симметрии половин первичной обмотки выходного трансформатора.

§ 3. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ДВУХТАКТНОГО ВЫХОДНОГО КАСКАДА

При рассмотрении поведения каскадов при усилении различных частот мы пользовались эквивалентными схемами. Рассмотрим эквивалентную схему двухтактного выходного каскада (рис. VIII-12). Эта схема получена путем замены ламп эквивалентными генераторами μU_c с внутренними сопротивлениями R_i . Сопротивление источника питания переменному току невелико и не учитывается.

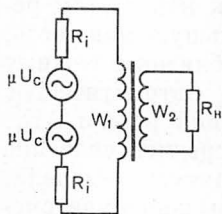


Рис. VIII-12. Эквивалентная схема двухтактного выходного каскада

Можно считать, что в приведенной эквивалентной схеме для переменной составляющей тока генераторы включены последовательно. Поэтому схему можно упростить, используя вместо двух генераторов один с удвоенной э. д. с. и удвоенным внутренним сопротивлением (рис. VIII-13, а). Такая так называемая последовательная эквивалентная схема (рис. VIII-13, б) справедлива лишь для режима класса А при полной симметрии плеч и абсолютной линейности характеристик ламп.

Для режимов классов Б и АБ удобнее преобразовать схему путем разделения контуров токов обоих генераторов и включения их параллельно на общую обмотку трансформатора с числом витков $\frac{w_1}{2}$

(рис. VIII-14, а). Дальнейшее преобразование заключается в замене двух параллельно соединенных генераторов одним с такой же э. д. с., μU_c и внутренним сопротивлением $R_{is} = \frac{R_i}{2}$ (рис. VIII-14, б и в).

Разделение контуров токов обоих генераторов возможно благодаря тому, что э. д. с., индуцируемые в половинах первичной обмотки, одинаковы, так как обмотку пронизывает общий магнитный поток.

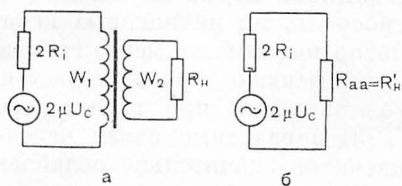


Рис. VIII-13. Эквивалентная схема двухтактного выходного каскада в режиме класса А

В последней схеме R_{as} — сопротивление нагрузки суммарному току. Сопротивление нагрузки суммарному току является сопротивлением полезной нагрузки, приведенным к половине первичной обмотки трансформатора:

$$R_{as} = \frac{R_H}{4 \cdot n^2} = \frac{R'_H}{4}.$$

Частотные характеристики двухтактных каскадов ничем не отличаются от однотактных и имеют вид, показанный на рис. VII-43. Точно так же для уменьшения частотных искажений индуктивное сопротивление первич-

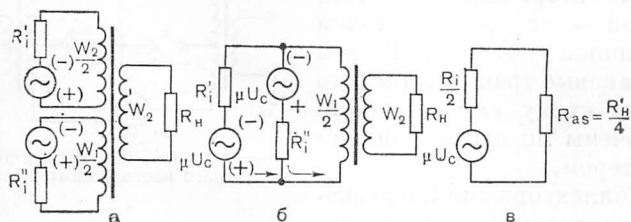


Рис. VIII-14. Эквивалентные схемы двухтактного выходного каскада для режимов классов Б и АБ

ной обмотки трансформатора должно быть даже на самых низких частотах больше эквивалентного сопротивления ламп, т. е. больше $2R_i$ для схемы рис. VIII-13, б (при режиме класса А).

Влияние индуктивности трансформатора на частотную характеристику сказывается на ее западании на высоких частотах, поэтому индуктивность рассеяния должна быть по-возможности малой. В выходном трансформаторе двухтактной схемы из-за отсутствия постоянного подмагничивания сердечника трансформатора можно получить заданную индуктивность первичной обмотки при меньшем числе витков, чем в трансформаторе однотактного каскада, поэтому и индуктивность рассеяния может быть получена практически меньшей.

§ 4. ДВУХТАКТНЫЕ ВЫХОДНЫЕ КАСКАДЫ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Двухтактные выходные каскады могут быть построены не только на электронных лампах, но и на транзисторах, причем достоинство двухтактных схем заключается в применении как режима класса А, так и

режима класса Б, когда транзисторы работают попеременно (в первый полупериод — один транзистор, во второй — другой).

Включение транзисторов в выходных каскадах, в том числе и двухтактных, возможно по всем трем основным схемам: ОБ, ОЭ и ОК.

Если рассмотреть схему двухтактного выходного каскада на транзисторах (рис. VIII-15), то в ней используются два трансформатора: $Tr1$ — входной и $Tr2$ — выходной. Первый трансформатор имеет вывод от средней точки вторичной обмотки, второй — от средней точки первичной обмотки. В ней одинаковые транзисторы (что делает схему симметричной) включены по схеме с общим эмиттером.

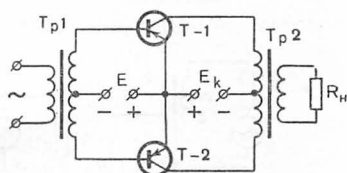


Рис. VIII-15. Схема двухтактного выходного каскада на транзисторах

Коллекторными нагрузками транзисторов служит нагрузочное сопротивление, пересчитанное в соответствующие половины первичной обмотки трансформатора $Tr2$. Коллекторные напряжения подаются одним проводом на оба транзистора через половины первичной обмотки того же трансформатора. Так как постоянные составляющие коллекторных токов одинаковы и протекают по обмотке в разных направлениях от средней точки, магнитные потоки, создаваемые этими токами, взаимно компенсируют друг друга и в результате сердечник трансформатора $Tr2$ работает без постоянного подмагничивания.

Схема работает точно так же, как двухтактный каскад на триодах.

Усиливаемый сигнал, подведенный к первичной обмотке трансформатора $Tr1$, индуцирует в противоположных концах вторичной обмотки напряжения, противофазные относительно средней точки. Когда потенциал базы транзистора $T-1$ возрастает, потенциал базы транзистора $T-2$ уменьшается. Соответственно изменяются и коллекторные токи транзисторов: один — уменьшается, в то время как второй — увеличивается. Значит, изменения токов в обмотках трансформатора $Tr2$ будут согласованными, оба тока в одинаковом направлении изменяют магнитные потоки, пронизывающие вторичную обмотку выходного трансформатора. Результирующий выходной сигнал про-

порционален двойному изменению тока каждого из транзисторов.

Каскад (рис. VIII-16) также представляет собой обычную двухтактную схему, но собранную на транзисторах, включенных с общей базой. По сравнению с предыдущей эта схема дает наименьшие нелинейные искажения, зависящие главным образом от искажений во входной цепи, но имеет небольшой коэффициент усиления по мощности. Поэтому при ее использовании предоконечный каскад должен быть достаточно мощным.

Схема с общим эмиттером дает наибольшее усиление по мощности, но она весьма чувствительна к изменениям параметров транзисторов, чего нельзя сказать о включении с общим основанием.

Важной характеристикой является величина выходного сопротивления. Схема с общей базой имеет наибольшее выходное сопротивление, и это следует отнести к ее недостаткам, так как для согласования с нагрузкой требуется большой коэффициент трансформации трансформатора.

Наименьшее выходное сопротивление у схемы с общим коллектором, что позволяет иногда исключить из нее выходной трансформатор и непосредственно включить нагрузку в цепь транзисторов.

Безтрансформаторные схемы представляют большой практический интерес, так как трансформаторы увеличивают вес, габариты и стоимость устройств, в частности усилителей на транзисторах.

Входной трансформатор можно не применять, если использовать в предоконечном каскаде так называемую фазоинверсную схему.

Схемы двухтактных каскадов без выходного трансформатора можно построить несколькими способами. На рис. VIII-17 дана схема с последовательным включением

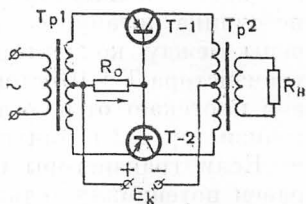


Рис. VIII-16. Схема двухтактного выходного каскада, собранная на транзисторах, включенных по схеме с ОБ

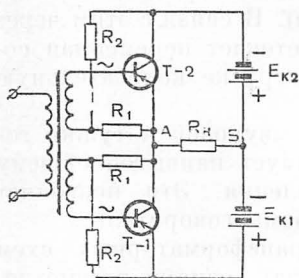


Рис. VIII-17. Безтрансформаторная схема двухтактного каскада с последовательным включением двух транзисторов

двух выходных транзисторов. Входной трансформатор имеет две отдельные вторичные обмотки. Он развивает противофазные возбуждающие сигналы. Сопротивления R_1 и R_2 нужны для создания небольшого исходного смещения на базах транзисторов. Эмиттер транзистора Т-2 соединен с коллектором транзистора Т-1. Два одинаковых источника питания соединены последовательно и подключены между коллектором транзистора Т-2 и эмиттером транзистора Т-1. Постоянная составляющая тока источников протекает от плюса батареи $E_{к1}$ через транзистор Т-1, транзистор Т-2 к минусу источника $E_{к2}$.

Если транзисторы идентичны, то потенциал точки А равен потенциалу точки В, так как падение напряжения постоянной составляющей на каждом из транзисторов одинаково и равно $E_{к1} = E_{к2}$.

Нагрузка включена между точками А и В. Отрицательная полуволна входного сигнала делает более проводящим один из транзисторов и менее проводящим — другой. Таким же образом изменяются и сопротивления коллекторных цепей постоянному току. Потенциал точки А становится более отрицательным, когда отрицательная полуволна напряжения на базе транзистора Т-2, и менее отрицательным, когда отрицательная полуволна на базе транзистора Т-1 (для типа $n-p-n$). В связи с этим через нагрузочное сопротивление R_n протекает переменная составляющая тока, создающая в нагрузке колебательную мощность.

Часто величина сопротивления звуковой катушки головки громкоговорителя соответствует наивыгоднейшему значению нагрузочного сопротивления. Это позволяет включать в качестве нагрузки громкоговоритель.

Существует ряд других бестрансформаторных схем оконечных каскадов на транзисторах, однако рассмотренные их не входят в нашу задачу.

§ 5. ПРЕДОКОНЕЧНЫЕ КАСКАДЫ

Назначение предоконечного каскада состоит в том, чтобы подать на вход оконечного каскада напряжение сигнала определенной величины, достаточной для его раскачки.

В зависимости от схемы оконечного каскада — однотактной или двухтактной — используют любую схему

усиления напряжения или специальную, обеспечивающую подачу к сеткам ламп выходного каскада переменного напряжения со сдвигом по фазе на 180° . Иными словами, при работе предоконечного каскада на выходной, собранный по двухтактной схеме, он должен развивать на выходе два напряжения звуковой частоты, равные по величине и сдвинутые по фазе на 180° относительно общего провода.

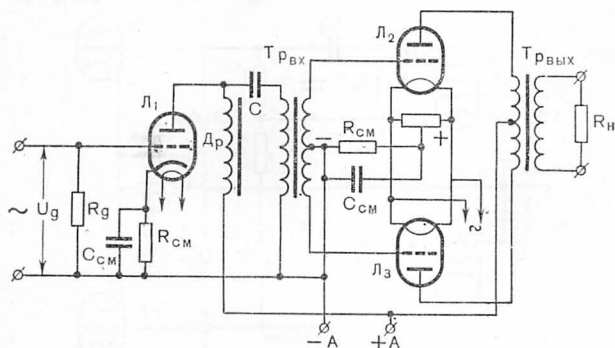


Рис. VIII-18. Принципиальная схема двухкаскадного усилителя: предоконечного и оконечного

Такие напряжения можно получить от трансформаторного каскада, если во вторичной обмотке трансформатора сделать вывод от средней точки.

На рис. VIII-18 показана принципиальная схема двухкаскадного усилителя, оконечный каскад которого собран по двухтактной схеме, а предоконечный — по дроссельно-трансформаторной. Такая схема в настоящее время применяется крайне редко, так как лучшие результаты дают бестрансформаторные схемы. Они проще в изготовлении, экономичнее, вносят меньшие нелинейные и частотные искажения.

Бестрансформаторные схемы, которые дают возможность получить два равных по величине и противоположных по фазе переменных напряжения, называют фазоинверсными схемами.

ПРОСТАЯ ФАЗОИНВЕРСНАЯ СХЕМА

На рис. VIII-19 дана принципиальная схема простого фазоинверсного каскада, использующего две лампы: L_1 и L_2 . Первая служит для усиления напряжения, а вторая — для поворота фазы напряжения сиг-

нала на 180° . Из приведенной схемы видно, что первая половина инверсного каскада — лампа L_1 , резисторы R'_{cm} , R'_a , R_1 , R_2 и конденсатор C'_g — представляет собой обычный резисторный каскад с автоматическим смещением. На вход этого каскада подается переменное напряжение сигнала U'_{g1} , которое усиливается по амплитуде в K_1 раз и подводится к сетке лампы оконечного каскада L_3 .

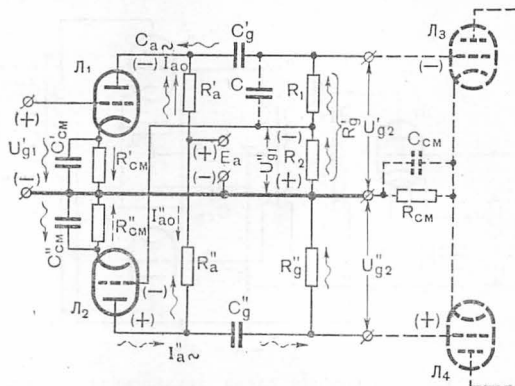


Рис. VIII-19. Принципиальная схема простого фазоинверсного каскада

Это напряжение обозначено на схеме как U'_{g2} , и оно образуется на сопротивлении утечки сетки третьей лампы. Последнее выполнено в виде делителя напряжения R_1-R_2 , с нижнего плеча которого (R_2) подается напряжение U'_{g1} на сетку лампы L_2 , поворачивающей фазу и называемой фазоинвертором. Эта лампа L_2 (резисторы R''_{cm} , R''_a , R''_g и конденсатор C''_g) является второй половиной инверсного каскада и также представляет собой простой резисторный каскад с автоматическим смещением. С выхода этого каскада, имеющего коэффициент усиления K_2 , напряжение U''_{g2} подается на сетку лампы L_4 оконечного каскада.

Рассмотрим, как работает такая схема. Известно, что в резисторном каскаде напряжение, развиваемое им, или, что то же самое, переменная составляющая напряжения между анодом и катодом противоположна по фазе переменному напряжению, подводимому к сетке лампы.

Обратимся к схеме. Пусть в данный момент на сетку лампы L_1 подается «+» переменного напряжения, тогда

аноде этой лампы и на сетке лампы L_3 будет «—» переменного напряжения, часть которого со знаком «—» приложена к сетке лампы L_2 .

Так как лампа L_2 также переворачивает фазу напряжения, то при подаче к ее сетке напряжения со знаком «—», к ее аноде будет «+» напряжения. Теперь мы видим, что сеткам ламп оконечного каскада одновременно подводится напряжения сигнала в противофазе.

Необходимым условием работы фазоинверсного каскада является равенство этих напряжений, так как они отстают на соответствующие плечи двухтактного каскада усиления мощности. В простой фазоинверсной схеме это равенство достигается выбором величин сопротивлений R_1 и R_2 делителя напряжения. Сопротивление R_2 должно быть в число раз, равное коэффициенту усиления инвертирующего плеча, меньше всего сопротивления R_g .

Разобранная нами схема страдает рядом недостатков, к числу которых можно отнести необходимость иметь две лампы. Правда, этот недостаток практически легко преодолевается путем использования двойных триодов 6Н8, 6Н9. Разброс параметров ламп и элементов устройства приводит к другому недостатку — трудности достижения симметрии схемы и ее стабильной работы.

Она неприемлема в тех случаях, когда выходной двухтактный каскад работает с независимым смещением, так как большое отрицательное напряжение смещения оконечных ламп попадает через сопротивление делителя R_2 на сетку лампы L_2 и вызывает запирацию этой лампы. Кроме того, эта схема вносит неравные частотные искажения на верхних и нижних частотах даже при полной симметрии плеч на средних частотах.

Часто в промышленной аппаратуре можно встретить схему фазоинверсного каскада, показанную на рис. VIII-20. Она не имеет принципиальных отличий от рассмотренной ранее, но в ней установлено отдельное сопротивление утечки сетки оконечной лампы L_3 . Это изменение позволяет применить схему и в том случае, когда в выходном каскаде используется независимое смещение, так как при таком включении отрицательное напряжение смещения не может попасть на сетку лампы L_2 инвертирующего плеча.

Несмотря на то, что эта схема более совершенна по сравнению с простой инверсной, она тоже страдает рядом недостатков. Дело в том, что сопротивления R_7 и R_8

в цепях сеток в случае использования независимого смещения оконечного каскада должны быть небольшими (порядка 50 000 ом). Но это приводит к снижению усиления предоконечного каскада и возрастанию нелинейных искажений.

Еще одной отличительной чертой является включение последовательно с сопротивлением R_5 конденсатора C_5 ,

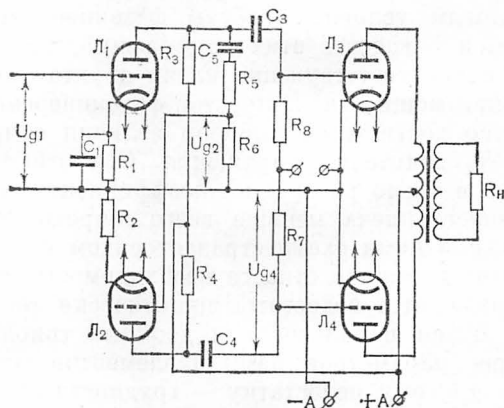


Рис. VIII-20. Схема фазоинверсного каскада с делителем в цепи анода

который отсутствовал в простой инверсной схеме. Этот конденсатор необходим для того, чтобы высокое анодное напряжение лампы L_1 не попадало на сетку лампы L_2 .

Эта схема с незначительными дополнениями, предназначенными для улучшения ее свойств, например уменьшения возможной асимметрии, уменьшения нелинейных искажений, как мы уже указывали, встречается в аппаратуре КУСУ-52 и КЗВТ-3.

Ее называют фазоинверсным делителем в цепи анода.

АВТОБАЛАНСНЫЕ ФАЗОИНВЕРСНЫЕ СХЕМЫ

При рассмотрении фазоинверсных схем указывалось, что одним из серьезных их недостатков является асимметрия плеч, возникающая не столько из-за разброса параметров ламп и элементов схемы, сколько из-за нарушения режима в процессе работы. Асиммет-

инверсного каскада не нарушена, токи плеч равны и, следовательно, разностный ток равен нулю, и $\Delta U = 0$.

Если же по какой-либо причине (например, увеличилось внутреннее сопротивление лампы L_2 из-за частичной потери эмиссии катода) возникла асимметрия, уменьшилась величина тока I_2 , это уменьшение тока вызовет появление разности токов $I_1 - I_2$, на сопротивлении R_6 появится падение напряжения ΔU , а следовательно, увеличится напряжение, подводимое к сетке лампы L_2 и ток I_2 достигнет своей первоначальной величины.

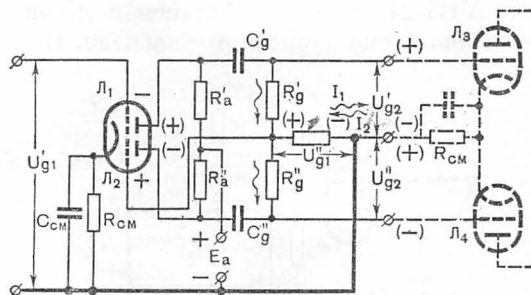


Рис. VIII-22. Автобалансирующая фазоинверсная схема без делителя

Аналогично этому восстановится симметрия, если по какой-либо причине ток I_2 возрастет. Тогда изменится знак приращения напряжения ΔU , так что в результате напряжение, подводимое к сетке лампы L_2 , уменьшится и симметрия вновь будет восстановлена.

Таким образом, всякое изменение тока I_2 , вызванное изменением параметров лампы или параметров схемы, вызывает такое изменение сеточного напряжения, которое стремится противодействовать первоначальному изменению тока I_2 .

От выбора величины сопротивления R_6 зависит чувствительность схемы к разбалансировке. Чем больше сопротивление R_6 , тем острее будет реагировать схема, так как падение напряжения ΔU будет больше даже при небольшой разности токов I_1 и I_2 . На практике выбирают R_6 примерно такой же величины, как и сопротивление утечки сетки.

Автобалансирующая схема без делителя напряжения. На рис. VIII-22 дана так называемая дифференциальная

гобалансная схема фазоинверсного каскада, которая также находит применение в аппаратуре звуковоспроизведения.

Отличительной особенностью этой схемы является то, что напряжение на сетку фазоинвертирующей лампы L_2 снимается только с балансирующего сопротивления R_6 , в котором падение напряжения образуется разностным током $I_1 - I_2$. При этом схема может работать только в том случае, пока разность токов не будет равна нулю. Для этого в схему включаются сопротивления утечки, не одинаковые по величине, а отличающиеся одно от другого на 20—30%. Большим выбирается сопротивление нижнего плеча. Учитывая, что при условии, когда $I_{g2}'' = U_{g2}''$, ток первой лампы всегда больше тока второй лампы и полярность напряжения U_{g1}'' , снимаемого с R_6 , зависит от направления тока I_1 в данный момент. Это создает поворот фазы напряжения U_{g2}'' лампой L_2 на 180° по отношению к U_{g2}' .

Если в какой-то момент потенциал сетки лампы L_1 понижается, то анодный ток этой лампы уменьшается, а потенциал анода возрастает. В это время переменная составляющая анодного тока протекает от анода к катоду и переменное напряжение с R_6 поступает на сетку лампы L_2 со знаком «+». Значит, в этот же момент потенциал сетки лампы L_2 возрастает, а потенциал анода понижается. Как видно из схемы (потенциалы обозначены знаками «+» и «-»), к сеткам ламп оконечного каскада напряжения сигнала приложены в противофазе. Симметрия схемы поддерживается автоматически благодаря тому, что напряжение на входе инвертирующей лампы обусловлено разностным током $I_1 - I_2$, причем всегда $I_1 > I_2$.

Как и в предыдущей автобалансной схеме, всякое изменение тока I_2 (разбалансировка плеч) вызывает такое изменение сеточного напряжения на фазоинверторе, которое стремится противодействовать первоначальному изменению тока I_2 , т. е. приводит к восстановлению симметрии.

Автобалансные схемы имеют наряду с преимуществами, о которых указывалось ранее, и целый ряд недостатков. Так, они могут служить причиной нестабильной работы усилителя, если он охвачен глубокой отрицательной обратной связью. В автобалансных схемах плечи имеют неодинаковые выходные сопротивления из-за того,

что в фазоинверторе, по существу, применена обратная связь, а в основном плече ее нет.

Эти недостатки приводят к тому, что в промышленной аппаратуре мощных усилителей применение автобалансных схем ограничено, и используются простые фазоинверсные схемы.

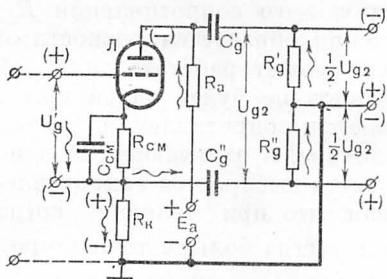


Рис. VIII-23. Схема фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой

Сопротивление анодной нагрузки этой лампы L разделено на две части: одна R_a включена у анода, а другая R_k — у катода. Выбираются они равными по величине. Направление переменная составляющая анодного тока лампы L указана на схеме волнистой стрелкой. Усиленное лампой напряжение сигнала образуется на R_a и R_k и через разделительные конденсаторы C_g' и C_g'' и сопротивления утечки сетки подводится к сеткам ламп окончательного каскада в противофазе.

Схема должна быть строго симметричной.

Этот фазоинверсный каскад с разделенной нагрузкой часто используется и в транзисторных схемах.

На рис. VIII-24 показан фазоинверсный каскад с разделенной нагрузкой, собранный на транзисторе Т-1.

Переменная составляющая коллекторного тока протекает по сопротивлению R_3 , через транзистор и сопротивление в направлении, указанном волнистой стрелкой.

Поскольку минус источника по переменному току заземлен, точки A и Γ схемы равнопотенциальны. Если потенциал точки B относительно общего провода (земли) уменьшается, то потенциал точки B относительно земли

Фазоинверсная схема с разделенной нагрузкой. На рис. VIII-2 дана схема фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой, которая обладает той отличительной чертой, что используется только одна лампа. Сопротивле-

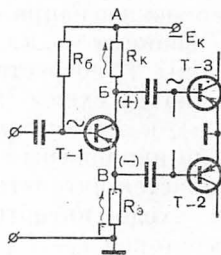


Рис. VIII-24. Фазоинверсный каскад с разделенной нагрузкой на транзисторе

увеличивается. Противофазные выходные напряжения передаются к транзисторам Т-2 и Т-3 двухтактной схемы.

По сопротивлению R_3 , кроме тока коллектора протекает еще переменная составляющая тока, создаваемая источником входного сигнала, поэтому равенство сопротивлений R_k и R_3 еще не означает равенства выходных напряжений. По ряду причин приходится выбирать небольшой величину R_3 и соответственно для симметрии выходных напряжений уменьшать и R_k .

Разработаны и другие фазоинверсные схемы на транзисторах, в частности схема на двух транзисторах. В кинематографии они пока не применяются.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните назначение оконечного каскада.
2. От чего зависит мощность, развиваемая оконечным каскадом?
3. Объясните работу лампы в режиме класса А.
4. Как работает лампа в режимах классов В и АВ?
5. Как осуществляется согласование сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением лампы?
6. Объясните принцип действия схемы двухтактного каскада.
7. Что происходит в двухтактном каскаде при включении источников питания?
8. Почему плечи двухтактного каскада должны быть симметричны?
9. Почему пульсации напряжения питания двухтактного каскада могут быть больше, чем для одноконтурного каскада?
10. Объясните назначение и укажите особенности предоконечных каскадов.
11. Какие схемы каскадов называют фазоинверсными?
12. Что происходит в каскаде, собранном по простой инверсной схеме, если на вход поступает усиливаемое напряжение?
13. Какая схема называется автобалансной?

ГЛАВА IX

ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ

§ 1. СХЕМЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Усиление сигнала, нужное для работы киноустановки, удается получить благодаря применению многокаскадных усилителей, в которых развиваемый источник сигнала последовательно усиливается несколькими каскадами. Схему или систему связи между отдельными каскадами усилителя, в которой выходной сигнал первого каскада подается на вход второго, выходной сигнал второго каскада — на вход третьего и т. д., можно условно назвать *прямой* связью.

Помимо прямой (обязательной) связи между каскадами в усилителях может существовать так называемая *обратная связь*, когда часть выходного сигнала всего усилителя или его отдельного каскада поступает обратно на вход этого же усилителя или каскада. Иными словами, появление во входной цепи тока, обусловленного током выходной цепи, называют обратной связью.

Обратная связь в многокаскадных усилителях может быть создана в определенных целях искусственным путем, но может возникать и самостоятельно.

На рис. IX-1 приведена скелетная схема усилителя с обратной связью, когда сигнал, поступающий из цепи обратной связи, действует последовательно с источником входного сигнала. Такую связь называют *последовательной*.

Параллельное подключение к входным зажимам усилителя источника усиливаемого сигнала и сигнала, поступающего с выходного каскада, называется *параллельной* обратной связью (рис. IX-2). На рис. IX-1 и IX-2 приняты следующие обозначения: $U_{\text{вых}}$ — напряжение выхода усилителя; U_g — напряжение входа без обратной связи; $U_{\text{вх}}$ — напряжение входа усилителя с обратной связью; U_{β} — напряжение обратной связи.

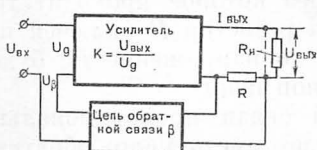


Рис. IX-1. Скелетная схема усилителя с обратной связью (схема последовательной связи) по току

Рис. IX-2. Скелетная схема усилителя с обратной связью (схема параллельной связи) по напряжению

ступающего с выходного каскада, называется *параллельной* обратной связью (рис. IX-2). На рис. IX-1 и IX-2 приняты следующие обозначения: $U_{\text{вых}}$ — напряжение выхода усилителя; U_g — напряжение входа без обратной связи; $U_{\text{вх}}$ — напряжение входа усилителя с обратной связью; U_{β} — напряжение обратной связи.

На схемах в виде четырехполюсника представлена цепь обратной связи, в простейшем случае — делитель напряжения из двух резисторов. Для такого четырехполюсника входным напряжением является выходное напряжение усилителя $U_{\text{вых}}$ (рис. IX-3), а выходным — напряжение обратной связи U_{β} . Цепь обратной связи оценивается *коэффициентом передачи* напряжения β :

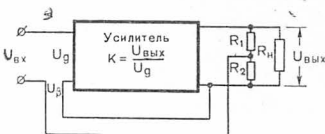


Рис. IX-3. Схема усилителя с обратной связью по напряжению с активным делителем обратной связи

$$\beta = \frac{U_{\beta}}{U_{\text{вых}}}$$

Это отношение показывает, какая часть выходного напряжения подается обратно на вход усилителя, и поэтому часто именуется *коэффициентом обратной связи*, измеряемым в отвлеченных числах или в процентах.

Различают три вида схем обратной связи:

1) схемы обратной связи по току (см. рис. IX-1);

2) схемы обратной связи по напряжению (см. рис. IX-3);

3) схемы со смешанной обратной связью (см. пунктир на рис. IX-1).

Если напряжение обратной связи пропорционально выходному току, то ее называют обратной связью по току, так как U_{β} в этом случае представляет собой падение напряжения на резисторе R , через которое проходит ток выхода усилителя $I_{\text{вых}}$. Так как резистор R включен последовательно с нагрузкой $R_{\text{н}}$, то напряжение U_{β} будет пропорционально току в выходной цепи.

Если напряжение обратной связи пропорционально выходному напряжению, то будет иметь место обратная связь по напряжению (см. рис. IX-3). Цепь обратной связи представляет собой делитель напряжения, и для этой схемы коэффициент обратной связи может быть численно определен из отношения сопротивлений

$$\beta = \frac{U_{\beta}}{U_{\text{вых}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Из этого отношения легко доказать, что напряжение обратной связи U_{β} пропорционально напряжению $U_{\text{вых}}$:

$$U_{\beta} = U_{\text{вых}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

§ 2. ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ И ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Рассматривая блок-схемы многокаскадных усилителей, охваченных обратной связью, можно себе представить, что напряжение обратной связи, поступающее на вход усилителя, может либо совпадать по фазе с напряжением входного сигнала, либо находиться в противофазе с ним.

В первом случае обратная связь называется *положительной*, во втором — *отрицательной* (негативной).

Из рассмотрения схемы на рис. IX-1 видно, что $U_g = U_{\text{вх}} + U_{\beta}$, если фазы напряжений обратной связи и напряжения входного сигнала совпадают; а если они не совпадают, то $U_g = U_{\text{вх}} - U_{\beta}$, т. е. при отрицательной обратной связи напряжение, подводимое к сетке лампы первого усилительного каскада, оказывается равным разности

жду напряжением входного сигнала и напряжением обратной связи.

Теперь определим, какое влияние оказывает обратная связь на коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью, для чего опять вернемся к рис. IX-1.

Известно, что коэффициент усиления усилителя

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_g}.$$

Если ввести обратную связь, то коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью (обозначим K_β), можно записать в виде:

$$K_\beta = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Найдем, чему равно $U_{\text{ВХ}}$, из уравнения $U_g = U_{\text{ВХ}} + U_\beta$:

$$U_{\text{ВХ}} = U_g - U_\beta.$$

Подставляя полученное значение $U_{\text{ВХ}}$ в формулу K_β , получим:

$$K_\beta = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_g - U_\beta}.$$

Так как напряжение обратной связи $U_\beta = \beta \cdot U_{\text{ВЫХ}}$, то

$$K_\beta = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_g - \beta \cdot U_{\text{ВЫХ}}}.$$

Поделим числитель и знаменатель дроби на U_g :

$$K_\beta = \frac{\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_g}}{\frac{U_g}{U_g} - \beta \cdot \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_g}},$$

а так как $\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_g} = K$, то формула примет вид:

$$K_\beta = \frac{K}{1 - \beta \cdot K}.$$

Это соотношение показывает, что при положительной обратной связи коэффициент усиления усилителя возрастает. При отрицательной обратной связи β имеет отрицательный знак и усиление будет равно:

$$K_\beta = \frac{K}{1 - (-\beta \cdot K)} = \frac{K}{1 + \beta \cdot K}.$$

Эта формула показывает, что при отрицательной обратной связи усиление уменьшается в $1 + \beta K$ раз.

Величина, показывающая, во сколько раз снижает усиление усилителя при введении отрицательной обратной связи, называется *глубиной обратной связи*.

Иными словами, глубину обратной связи характеризует отношение:

$$\frac{K}{K_{\beta}} = 1 + \beta K.$$

Так, например, если это отношение равно двум, то это значит, что введение обратной связи уменьшает усиление каскада вдвое.

Но при введении отрицательной обратной связи:

1) нелинейные искажения усилительного устройства также уменьшаются в $(1 + \beta K)$ раз;

2) частотные искажения также уменьшаются во столько же раз, во сколько снижается усиление;

3) изменяется входное сопротивление схемы; при последовательной обратной связи входное сопротивление возрастает в $(1 + \beta K)$ раз, при параллельной обратной связи входное сопротивление уменьшается — оно образует, как параллельное соединение входного сопротивления усилителя без обратной связи и входного сопротивления цепи связи, уменьшенного в $(1 + \beta K)$ раз;

4) изменяется выходное сопротивление; при использовании связи по напряжению выходное сопротивление уменьшается; если используется связь по току, то выходное сопротивление возрастает. Уменьшение выходного сопротивления приводит к тому, что выходное напряжение мало зависит от изменения нагрузочного сопротивления и тем самым стабилизируется усиление по напряжению. Последовательная обратная связь стабилизирует усиление по току.

Применение отрицательной обратной связи в усилителях низкой частоты значительно улучшает качественные показатели работы усилителя. Не говоря о важности снижения нелинейных и частотных искажений, остановимся на вопросе использования обратной связи по напряжению для некоторых практических целей.

Так, для хорошей работы громкоговорителей очень важно поддерживать постоянным напряжение на зажимах звуковой катушки, т. е. усилительный каскад должен работать в режиме постоянства напряжения. Как известно,

сопротивление звуковой катушки громкоговорителя зависит от частоты, а изменение сопротивления звуковой катушки на различных звуковых частотах не должно приводить к изменению выходного напряжения усилительного каскада, так как напряжение на звуковой катушке громкоговорителя не должно изменяться.

Это достигается применением отрицательной обратной связи по напряжению. Действительно, в этом случае значительно уменьшается внутреннее сопротивление лампы, что и приводит к постоянству выходного напряжения, так как чем меньше сопротивление источника тока по сравнению с сопротивлением нагрузки, тем меньше колебания выходного напряжения будут при изменениях величины нагрузки. Если сопротивление источника очень мало, т. е. стремится к нулю, то выходное напряжение будет строго постоянным, несмотря на изменение нагрузки.

Для этого случая работы окончного каскада на нагрузку, сопротивление которой зависит от частоты (громкоговоритель), не применяют схему обратной связи по току, так как при этом внутреннее сопротивление лампы значительно увеличивается и возникают частотные искажения.

Отрицательная обратная связь широко используется в усилителях в целях коррекции частотной характеристики, о чем подробно см. в главе XII.

Обратной связью охватывают целиком многокаскадный усилитель или часть каскадов.

Широкое распространение получила схема обратной связи по напряжению в окончных и предоконечных каскадах (рис. IX-4). Напряжение выхода усилителя $U_{\text{вых}}$ делится делителем, состоящим из сопротивлений R_1 и R_2 . Напряжение, подаваемое на вход усилителя, в противофазе $U_{\text{о.с}}$ представляет собой часть выходного напряжения, которая падает на сопротивлении R_2 . Для того чтобы в предоконечном каскаде не создавалась обратная связь по току, сопротивление R_2 выбирают значительно меньшей величины, чем сопротивление смещения $R_{\text{см}}$. Глубина связи регулируется величиной сопротивления R_1 .

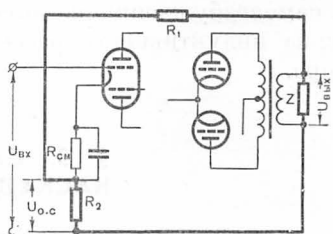


Рис. IX-4. Цепь обратной связи по напряжению в окончном и предоконечном каскадах

В промышленной аппаратуре используется глубокая обратная связь (от 2 до 9 дб). Однако с увеличением глубины связи усилитель становится в большей степени склонным к самовозбуждению. Причиной понижения стабильности является неудовлетворительная фазовая характеристика каскадов усилителя, охваченных глубокой обратной связью.

Каскады, содержащие трансформаторы и конденсаторы (оконечный и предоконечный), наиболее склонны к самовозбуждению на высоких частотах главным образом из-за индуктивности рассеяния в выходном трансформаторе.

§ 3. САМОВОЗБУЖДЕНИЕ МНОГОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Самовозбуждением, или *генерацией*, усилителя называется такой колебательный процесс, при котором усилитель развивает на выходе переменное напряжение при отсутствии подачи на вход переменного напряжения, подлежащего усилению.

Такой колебательный режим становится возможным при возникновении положительной обратной связи в многокаскадном усилителе. Коэффициент усиления каскада, охваченного обратной связью, в общем случае равен:

$$K_{\beta} = \frac{K}{1 - \beta \cdot K}.$$

При положительной обратной связи при значении $\beta K = 1$ знаменатель дроби обращается в нуль, или K_{β} стремится к бесконечности.

Усилитель в этом случае становится генератором незатухающих колебаний, частота которых определяется параметрами схемы, а нормальная работа усилителя прекращается. Усилитель начинает работать как преобразователь постоянного тока, источником которого служит выпрямитель или батарея, в переменный; он сам генерирует переменный ток.

Для усилителей возникновение генерации — явление крайне вредное и совершенно недопустимое, однако его используют для создания специальных устройств — высокочастотных ламповых генераторов, которые широко применяются в радиотехнике.

К чему приводит возникновение генерации в усилителе низкой частоты?

Генерация усилителя обнаруживается по характерному свисту или «бульканью», напоминающему работу двигателя внутреннего сгорания, прослушиваемому на выходе при отсутствии подачи переменного напряжения на вход (клеммы входа замкнуты накоротко). Генерация возникает не только на высоких, но и на очень низких частотах (2—3 гц) или на очень высоких частотах — около нескольких десятков килогерц, т. е. выходящих за пределы звукового диапазона.

Возникновение генерации на очень высоких частотах — от 40 кгц (килогерц) до 1 мгц (мегагерц) — наиболее частый случай при работе усилителей, охваченных обратной связью. Механизм возникновения такой генерации заключается в переходе отрицательной обратной связи в положительную из-за неудовлетворительной фазовой характеристики усилительных каскадов, охваченных обратной связью.

Возникновение же фазовых сдвигов на высоких частотах объясняется наличием реактивных элементов (индуктивностей и емкостей) в усилителях, охваченных обратной связью. При достаточно больших фазовых сдвигах отрицательная обратная связь может перейти в положительную.

Генерирование усилителя нежелательно еще и потому, что мощность переменного тока, развиваемая генерирующим усилителем, бывает значительно больше его номинальной неискаженной мощности и может привести к порче громкоговорителя (срыв звуковой катушки, разрыв диффузора), порче самого усилителя из-за возникающих перенапряжений и др.

Ламповый генератор. Выше указывалось, что положительную обратную связь используют для создания специальных устройств — ламповых высокочастотных генераторов, преобразующих энергию источника постоянного тока в колебания переменного тока высокой частоты. Рассмотрение работы лампового генератора дает возможность понять в дальнейшем возникновение паразитной генерации.

Принципиальная схема лампового генератора с индуктивной связью показана на рис. IX-5. В его анодную цепь включен колебательный контур. Вспомним, что если конденсатору сообщен некоторый запас энергии, то при замы-

кании ключа (рис. IX-6) конденсатор начнет разряжаться через индуктивную катушку, через которую будет протекать электрический ток — ток разряда конденсатора. Из курса электротехники известно, что при разряде конденсатора через индуктивную катушку его энергия переходит в энергию магнитного поля, которое создается током разряда.

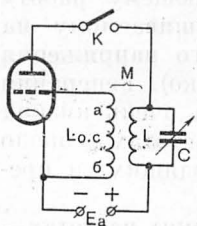


Рис. IX 5. Принципиальная схема лампового генератора с индуктивной связью

Но индуктивность препятствует как увеличению, так и уменьшению тока в электрической цепи, поэтому, когда заряд конденсатора уменьшается, индуктивность будет стремиться поддерживать разрядный ток в том же направлении, и в результате конденсатор перезарядится. Энергия магнитного поля катушки преобразуется в энергию электрического заряда конденсатора. После перезаряда конденсатор вновь будет разряжаться через индуктивную катушку и снова

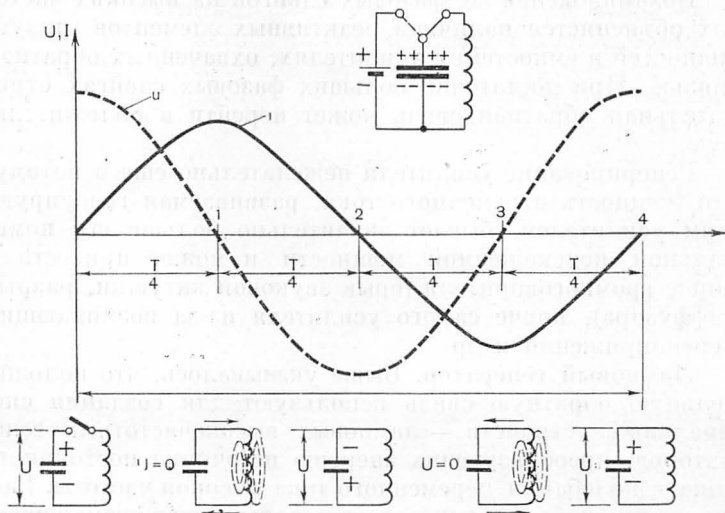


Рис. IX-6. Колебательный контур

перезаряжаться, т. е. будет иметь такой по знаку заряд, как и в первом случае, и т. д.

Таким образом, в контуре будет протекать переменный ток, но каждое следующее колебание тока меньше преды-

дущего по амплитуде; так как часть энергии теряется на нагрев элементов и проводов схемы. Следовательно, в колебательном контуре происходят *затухающие колебания* тока.

Частота колебаний определяется формулой:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}},$$

где L — индуктивность в генри, а C — емкость в фарадах.

Возвратимся к рис. IX-5. В цепь сетки лампы включена катушка $L_{o.c.}$, которая охватывается магнитным потоком катушки L . При включении источника питания анодной цепи (замыкание ключа K) возникает импульс анодного тока, и в контуре возникнут затухающие колебания, которые вызывают колебания магнитного поля. Силовые магнитные линии пересекают витки катушки $L_{o.c.}$ и индуктируют в ней переменную э. д. с. с частотой колебаний в контуре. Индуктированная в катушке $L_{o.c.}$ переменная э. д. с. действует между сеткой и катодом лампы и вызывает колебания анодного тока лампы.

Переменная составляющая анодного тока, проходя через контур LC , создает на нем переменное напряжение. Фактически это есть усиленное лампой переменное напряжение управляющей сетки, так как контур для лампы представляет собой нагрузку. Переменная составляющая анодного тока имеет такую же частоту, как и частота резонанса контура, и будет подзаряжать конденсатор колебательного контура и тем самым поддерживать в нем начинающие затухать колебания. В свою очередь, поддержанные в контуре колебания изменяют напряжение на сетке, а последняя — анодный ток.

В результате в контуре установятся *незатухающие колебания* переменного тока. Однако они могут возникать только при условии, если переменная составляющая анодного тока будет поддерживать колебания в контуре (при условии положительной обратной связи). Описанная подача обратно в контур собственных колебаний контура после усиления их лампой и есть обратная связь.

Будет ли обратная связь уменьшать или увеличивать затухание колебаний в контуре, зависит от того, совпадут или не совпадут по фазе колебания на сетке с колебаниями в контуре, т. е. от правильности включения концов a и b катушки обратной связи. Правильность включения их обычно определяется чисто практически. Если колебания

в генераторе не возникают, то следует сеточный конец включить на катод, а конец б с катода пересоединить и сетку. Возникновение незатухающих колебаний зависит также от достаточной величины коэффициента взаимной индукции M между катушками. При слишком малой связи энергия, добавляемая в контур через обратную связь

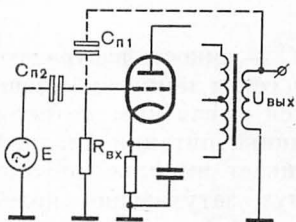


Рис. IX-7. Емкостная обратная связь в усилителе

будет недостаточной, и само возбуждения незатухающих колебаний в контуре не будет.

Возникновение в контуре колебаний может произойти не только в момент включения или выключения анодного напряжения. Любое, даже небольшое изменение анодного тока приведет к возникновению в контуре ничтожно малых затухающих колебаний. Так как лампа усиливает

малые переменные напряжения, то и самые малые колебания, всегда имеющиеся в цепях лампы и контура, при наличии обратной связи могут превратиться в колебания с большой амплитудой.

Здесь была рассмотрена схема с индуктивной обратной связью между анодной цепью и цепью сетки. Возможна также обратная связь через емкость (рис. IX-7). Емкость является хорошим проводником переменного тока и, следовательно, энергии из цепи анода в цепь сетки. Емкостная связь, к сожалению, бывает устранима с большим трудом, так как существует между проводами монтажа, между анодом и сеткой и т. д. Она может быть причиной возникновения паразитной генерации.

§ 4. ПАРАЗИТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ И СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ

Возникающие паразитные обратные связи особенно опасны в многокаскадных устройствах с большим коэффициентом усиления, когда даже ничтожно малого влияния выхода на вход достаточно для возникновения генерации. Поэтому в многокаскадных усилителях приходится принимать специальные меры, предупреждающие возникновение самовозбуждения усилителя. Прежде

ем их рассматривать, нужно классифицировать причины, из-за которых может возникнуть генерация.

Различают четыре вида паразитных обратных связей: емкостную, индуктивную, гальваническую и акустическую.

Емкостная связь образуется через емкость между сетью и анодом лампы или между проводами выхода и входа усилителя.

Для предотвращения генерации из-за емкостной связи применяется экранирование входных цепей усилителя. Экран представляет собой металлическую коробку, изолированную от всех элементов схемы и источников питания, но электрически соединенную с общей точкой усилителя (рис. IX-8). В этом случае паразитная емкость будет значительно уменьшена. Экран может быть сделан из тонкой фольги.

Индуктивная паразитная связь возникает из-за наводок сильных переменных магнитных полей (например, выходных трансформаторов) на провода и элементы входных цепей.

В целях борьбы с генерацией из-за индуктивной связи также применяют экранирование входных цепей, но при этом экран делают латунным или медным с толстыми (1—3 мм) стенками. Экранируют обычно входные цепи и входные трансформаторы. Такие экраны служат и для борьбы с помехами — наводками от силовых трансформаторов.

Принимаются и другие меры для уменьшения индуктивной связи между трансформаторами. Их разносят при монтаже на максимальное удаление друг от друга, устанавливают так, чтобы катушки оказались в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, изолируют трансформаторы от шасси усилителя и др.

Аналогичным образом предотвращают возникновение генерации и в усилителях на транзисторах.

Гальваническая паразитная связь возникает главным образом через общие источники питания или когда какой-либо резистор служит связующим звеном между выходными и входными цепями.

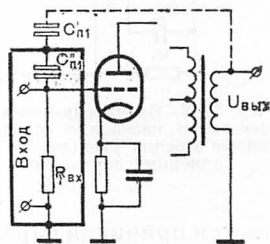


Рис. IX-8. Схема экранирования входной цепи усилителя

Так, например, на рис. IX-9 дана схема выходного однотактного трансформаторного каскада, в котором для уменьшения нелинейных искажений применена противосвязь. Связь осуществлена через резистор R_3 , соединяющий вторичную обмотку выходного трансформатора с первичной обмоткой входного. Резистор R_3 нужно включать обязательно между противофазными концами обмоток — в противном случае возникают положительная обратная связь и генерация в усилителе.

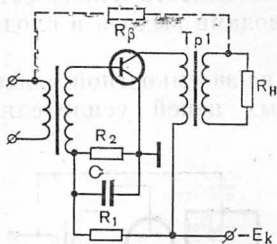


Рис. IX-9. Схема однотактного выходного каскада с обратной связью в целях уменьшения нелинейных искажений

На схеме рис. IX-10 показан трехкаскадный усилитель с общим источником питания анодных цепей. Общая анодная батарея, или выпрямитель, обладает некоторым внутренним сопротивлением R_i , которое и является причиной паразитной связи между каскадами. Через это сопротивление проходят анодные токи всех ламп, причем анодный ток последней из них создает на R_i наибольшее переменное падение напряжения. Это приводит к тому, что во время работы усилителя напряжение общего источника пи-

тания не остается постоянным, а изменяется в соответствии с колебаниями тока последней лампы. При общем источнике питания эти колебания напряжения попадают на анод первой лампы и через переходной конденсатор на сетку второй лампы.

Особенно склонен к генерации усилитель с большим коэффициентом усиления и при большом значении внут-

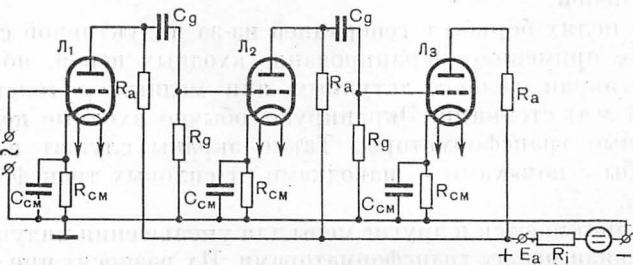


Рис. IX-10. Трехкаскадный усилитель с общим источником питания анодных цепей

тания не остается постоянным, а изменяется в соответствии с колебаниями тока последней лампы. При общем источнике питания эти колебания напряжения попадают на анод первой лампы и через переходной конденсатор на сетку второй лампы.

Особенно склонен к генерации усилитель с большим коэффициентом усиления и при большом значении внут-

ренного сопротивления источника. Генерация усилителя, вызванная паразитной связью через общий источник питания, всегда возникает на очень низких частотах (звук, создаваемый в этом случае громкоговорителем, напоминает работу двигателя внутреннего сгорания).

Для предотвращения генерации усилителя, возникающей из-за паразитной связи через источник питания, применяют развязывающие фильтры.

Акустическая паразитная связь может возникнуть из-за воздействия звуковой волны от громкоговорителя на микрофон (при усилении речи) или на электронные лампы, поэтому лампы в усилителе, особенно первую, укрепляют на ламповой панели с амортизаторами.

Микрофон в случае усиления речи должен быть значительно удален от громкоговорителя.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях обратная связь называется положительной и в каких отрицательной?
2. К чему приводит наличие положительной обратной связи в усилительном каскаде?
3. Как ощущается генерация усилителя?
4. Какие явления происходят в колебательном контуре, если конденсатору контура сообщен первоначальный электрический заряд?
5. Объясните принцип действия лампового генератора.
6. Как разделяются схемы обратной связи по принципу действия?
7. Как зависят свойства усилителя от схемы обратной связи?
8. Что называется глубиной обратной связи?
9. Чему равен коэффициент усиления усилителя с обратной связью?
10. Что называется стабилизацией усилителя?
11. Как возникает генерация при связи через общие источники питания?
12. Объясните действие развязывающих фильтров.
13. Объясните существование внутренней обратной связи в транзисторах.
14. Какими способами добиваются повышения стабильности усилителей с глубокой обратной связью?
15. Для чего применяется отрицательная обратная связь в усилителях?
16. Для чего применяются защитные экраны?
17. Как экранируются входные трансформаторы?
18. Что называется акустической обратной связью?

КАТОДНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ

§ 1. СХЕМА КАТОДНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

Катодным повторителем называется резисторный усилительный каскад с катодной нагрузкой. Как известно, анодная цепь триода состоит из источника анодного питания, сопротивления нагрузки участка анод — катод лампы и провода катод — отрицательный полюс источника питания. Именно по такой цепи протекает анодный ток и, казалось бы, не имеет принципиального значения место включения нагрузочного сопротивления в последовательную цепь. Однако, как будет показано далее, место включения сопротивления нагрузки резко изменяет свойства усилительного лампового каскада.

Схемы катодного повторителя, собранные на триоде и на пентоде, показаны на рис. X-1.

При различных схемах включения сопротивления нагрузки изменяются параметры каскада: коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление.

Рассмотрим основные отличительные особенности такого каскада, каким является катодный повторитель.

Входной сигнал подается между сеткой и общим проводом усилителя. При этом анодный ток пульсирует, и на резисторе нагрузки R_H создается пульсирующее падение напряжения, переменная составляющая которого является выходным сигналом.

Выберем для рассмотрения такой момент, когда потенциал сетки повышается и к сетке подводится положительный полупериод напряжения переменного сигнала (знак «+» на рис. X-1, а).

В этот момент анодный ток увеличивается (так как на сетке действует положительный возрастающий потенциал),

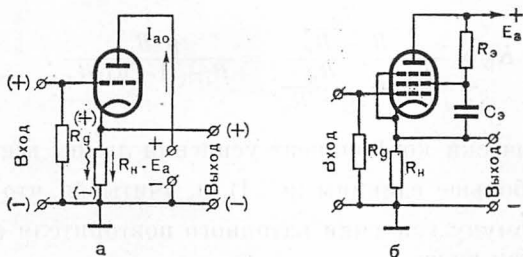


Рис. X-1. Схемы катодного повторителя на триоде (а) и на пентоде (б)

падение напряжения на резисторе нагрузки катодного повторителя возрастает и потенциал катода повышается относительно общего провода. Так как выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ снимается с резистора R_H , то нетрудно видеть, что катодный повторитель не переворачивает фазу сигнала.

Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ совпадает по фазе с входным напряжением $U_{\text{ВХ}}$. Это одно из основных свойств катодного повторителя.

Из рис. X-1, а видно, что резистор нагрузки R_H входит также в цепь сетки лампы, а следовательно, все выходное напряжение подается обратно на вход в противофазе с входным сигналом. Таким образом, в катодном повторителе всегда действует стопроцентная обратная связь по напряжению.

Катодный повторитель можно рассматривать как усилительный каскад, охваченный глубокой отрицательной обратной связью.

Коэффициент обратной связи $\beta = \frac{U_{\text{о.с.}}}{U_{\text{ВЫХ}}}$; так как в катодном повторителе $U_{\text{о.с.}}$ равно $U_{\text{ВЫХ}}$, то $\beta = 1$.

Коэффициент усиления с обратной связью можно определить по формуле:

$$K_{\beta} = \frac{U_{\text{В.ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{1 + \beta K},$$

где K — коэффициент усиления без обратной связи, равный

$$K = \mu \frac{R_{\text{н}}}{R_i + R_{\text{н}}}.$$

Произведем подстановку в формулу K_{β} :

$$K_{\beta} = \frac{\mu \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_i + R_{\text{н}}}}{1 + \mu \cdot \frac{R_{\text{н}}}{R_i + R_{\text{н}}}} = \frac{\mu \cdot R_{\text{н}}}{R_i + (1 + \mu) \cdot R_{\text{н}}}.$$

Практически коэффициент усиления лампы всегда значительно больше единицы ($\mu \gg 1$), и, учитывая, что $\frac{\mu}{R_i} = S$, можно формулу усиления катодного повторителя представить в таком виде:

$$K_{\beta} = \frac{S \cdot R_{\text{н}}}{1 + S \cdot R_{\text{н}}}.$$

Из формулы следует, что коэффициент усиления катодного повторителя всегда остается меньше единицы, приближаясь к ней по мере увеличения произведения $S \cdot R_{\text{н}}$. Поэтому логично назвать его не коэффициентом усиления, а коэффициентом передачи катодного повторителя.

Коэффициент передачи катодного повторителя близок, но всегда меньше единицы. Это второе отличительное свойство катодного повторителя от обычного резисторного каскада.

Если вспомнить, что катодный повторитель не изменяет входного сигнала по фазе и почти не изменяет его по величине, то понятным становится название «повторитель».

Третьей отличительной особенностью катодного повторителя является то, что, не давая усиления по напряжению, он дает возможность получить *значительное усиление по току и по мощности.*

В схемах катодного повторителя сопротивление катодной нагрузки хотя и выбирают большим, но оно всегда значительно меньше сопротивления утечки сетки. Поэтому,

если считать, что входное и выходное напряжения примерно равны, то токи в цепях анода и сетки обратно пропорциональны величинам сопротивлений R_n и R_g .

Коэффициент усиления по току определяется по формуле:

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_n} \cdot \frac{R_g}{U_{\text{вх}}} = K_\beta \cdot \frac{R_g}{R_n}.$$

Так как $R_g \gg R_n$, а $K_\beta \approx 1$, то усиление по току получается большим.

Усиление мощности можно оценивать коэффициентом усиления по мощности K_p , равным отношению мощности, развиваемой схемой катодного повторителя в нагрузочном сопротивлении, к мощности, затрачиваемой генератором входного сигнала:

$$K_p = \frac{I_r \cdot U_{\text{вых}}}{I_1 \cdot U_{\text{вх}}} = K_i \cdot K_\beta.$$

Последнее равенство позволяет вычислить коэффициент усиления по мощности, как произведение коэффициентов усиления по току и по напряжению. Если вспомнить, что $K_\beta \approx 1$, то коэффициент усиления по мощности получается такого же порядка, как и по току.

Четвертая отличительная особенность катодного повторителя состоит в том, что его *выходное сопротивление может быть очень небольшим*.

В каскаде со стопроцентной отрицательной обратной связью его эквивалентное внутреннее сопротивление в $(1 + \mu)$, раз меньше внутреннего сопротивления лампы:

$$R'_i = \frac{R_i}{1 + \mu}.$$

Так как $\mu \gg 1$ и $\frac{R_i}{\mu} = S$, то $R'_i \approx \frac{1}{S}$.

Выбирая лампу с большой крутизной характеристики, можно получить очень небольшое эквивалентное сопротивление каскада, а так как выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ равно сопротивлению параллельно включенных R'_i и R , то

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_n \cdot R'_i}{R_n + R'_i}.$$

Так как $R_i' \approx \frac{1}{S}$, то, подставляя, получим:

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_n}{1 + S \cdot R_n}.$$

Из формулы видно, что если крутизна лампы большая, то выходное сопротивление катодного повторителя может быть очень небольшим. Это свойство катодного повторителя широко используется для согласования сопротивлений, когда сопротивление потребителя колебаний мало.

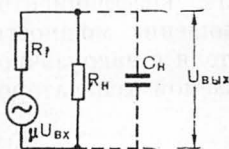


Рис. X-2. Эквивалентная схема катодного повторителя

В этих случаях катодный повторитель как бы заменяет выходной трансформатор.

Пятой особенностью катодного повторителя является *линейность и равномерность частотной и фазовой характеристик в широкой полосе частот*. При включении нагрузки в анодную цепь в обычном резисторном каскаде получается заметный спад

усиления в области высоких частот из-за влияния паразитной емкости, шунтирующей сопротивление нагрузки и внутреннее сопротивление лампы.

Как видно из эквивалентной схемы катодного повторителя (рис. X-2), емкость C_n шунтирует сопротивление нагрузки. Она складывается из емкости монтажа и входной емкости следующего каскада и при длинной линии может быть довольно большой.

Однако она не вносит существенных изменений в частотную характеристику каскада, что видно из анализа формулы коэффициента передачи катодного повторителя для этого случая:

$$K_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{S \cdot R_n}\right)^2 + \left(\frac{\omega C_n}{S}\right)^2}}.$$

В области низких и средних частот второе слагаемое под корнем обычно во много раз меньше первого и им можно пренебречь. На низких и средних частотах частотные (и фазовые) искажения будут ничтожны. На высоких частотах происходит спад усиления. Заметный спад получается в обычных условиях только на очень высоких частотах, выходящих за пределы звукового диапазона порядка сотен килогерц.

Это свойство катодного повторителя дает возможность использовать его для включения выносного регулятора громкости в качестве каскада, стоящего перед длинной линией.

Шестая особенность катодного повторителя — большая величина его входного сопротивления, следовательно, малая входная емкость, которая определяется по формуле:

$$C_{вх} = C_{ас} + C_{ск} (1 - K).$$

Поскольку $K \approx 1$, то $C_{вх}$ может быть получена очень небольшой.

Схема катодного повторителя имеет еще ряд отличительных особенностей: к его входу можно подвести значительно большее напряжение, чем в других схемах, при которых лампа не перегружается со стороны входа и каскад не вносит нелинейных искажений. Кроме того, наличие стопроцентной обратной связи, как указывалось ранее, стабилизирует выходное напряжение каскада при изменении параметров ламп и нагрузки и при колебаниях питающего напряжения.

Свойствами, близкими катодному повторителю, обладает схема включения транзистора с общим коллектором (см. рис. V-8, а), которая называется часто эмиттерным повторителем.

Эквивалентная схема транзисторного усилительного каскада с общим коллектором показана на рис. X-3. Особенность схемы заключается в том, что эквивалентный генератор с э. д. с. $r_{г} \cdot i_{э}$ включен в общий для входного и выходного контуров провод. В схеме с общим коллектором фаза выходного напряжения совпадает с фазой входного.

Входное сопротивление схемы всегда положительно и достаточно велико даже при малых значениях R .

Выходное сопротивление схемы мало даже при больших значениях внутреннего сопротивления генератора $R_{г}$. Например, при $R_{г} = 200 \text{ ом}$ $r_{ввых} = 45 \text{ ом}$ (с учетом $r_{э}$), при $R_{г} = 10 \text{ ком}$ $r_{ввых} \approx 1000 \text{ ом}$. На этих примерах видно действие схемы как трансформатора сопротивлений.

Усиление по току схемы с общим коллектором велико (см. гл. V, § 2).

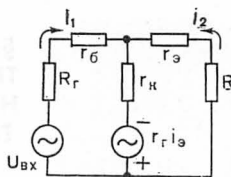


Рис. X-3. Эквивалентная схема транзисторного усилительного каскада с общим коллектором

Коэффициент усиления по напряжению в схеме с общим коллектором всегда меньше единицы.

Рассмотренные особенности схемы (возможность согласования сопротивлений, большое усиление по току) делают ее в ряде случаев незаменимой.

§ 2. СПОСОБЫ ПОДАЧИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ НА СЕТКУ ЛАМПЫ КАТОДНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ

Для того чтобы на аноде лампы катодного повторителя не выделялась излишне большая мощность, нужно соответствующим образом подобрать режим работы каскада по постоянному току.

Рассматривая схему катодного повторителя (см. рис. X-1, а), видно, что постоянная составляющая анодного тока I_{a0} создает на нагрузочном резисторе R_H постоянное падение напряжения, приложенное между сеткой и катодом.

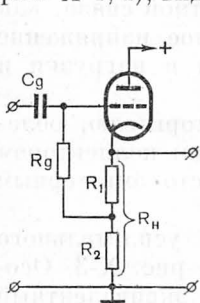


Рис. X-4. Схема подачи напряжения смещения на сетку лампы катодного повторителя

Для того чтобы это падение напряжения или его часть можно было использовать как напряжение отрицательного автоматического смещения, обычно вводят в схему дополнительные элементы, показанные на рис. X-4.

Ввиду того что падение напряжения на резисторе нагрузки превышает необходимую величину напряжения смещения, резистор нагрузки выполняет в виде делителя, состоящего из двух резисторов: R_1 и R_2 . Первый из них выбирается так, чтобы постоянное напряжение, создаваемое проходящим по нему током I_{a0} , было равно нужному напряжению смещения $U_{см}$:

$$R_1 = \frac{U_{см}}{I_{a0}}, \quad R_1 + R_2 = R_H.$$

Схема с делителем напряжения может быть несколько усложнена введением развязывающего фильтра R_3C_1 (рис. X-5).

Кроме указанных может быть предложено еще большее число схем подачи отрицательного напряжения на сетку лампы катодного повторителя.

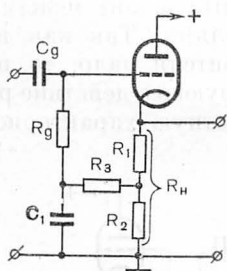


Рис. X-5. Схема подачи напряжения смещения на сетку лампы катодного повторителя, усложненная введением развязывающего фильтра

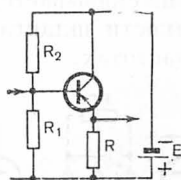


Рис. X-6. Стабилизация рабочей точки при включении транзистора по схеме с общим коллектором

При использовании эмиттерного повторителя, т. е. транзисторного усилителя, включенного по схеме с общим коллектором, для стабилизации режима и положения рабочей точки включается добавочный резистор R_1 (рис. X-6).

§ 3. ПРИМЕНЕНИЕ КАТОДНОГО И ЭМИТТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЕЙ

Применение катодного и эмиттерного повторителей в электроакустической аппаратуре обусловлено использованием тех или иных из их отличительных свойств, на которые указывалось ранее.

Так, например, в комплектах звуковоспроизводящих устройств 10УДС-1 и КЗВТ-3 используется прямолинейность частотной характеристики катодного повторителя в широком диапазоне частот при работе на длинную линию. Регуляторы усиления (громкости) могут быть размещены как в самом корпусе усилителя, так и вне его в виде отдельного узла, связанного с усилителем длинным соединительным шлангом (10—12 м). При такой большой длине шланга его распределенная емкость приобретает большие значения. На рис. X-7 показано, что катодный повто-

тель использован в качестве каскада перед выносным регулятором громкости *РГ*.

В КЗВТ-3 (рис. X-8) катодный повторитель включен на выходе предварительного усилителя, т. е. работает на длинную линию — соединительный шланг между предварительным и основным усилителями. Так как выходное сопротивление катодного повторителя мало, то почти совершенно не сказывается шунтирующее действие распределенной емкости шланга на частотную характеристику на высоких частотах.

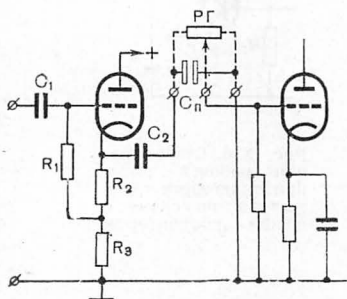


Рис. X-7. Схема использования катодного повторителя перед выносным регулятором усиления в 10УДС-1 и КЗВТ-3

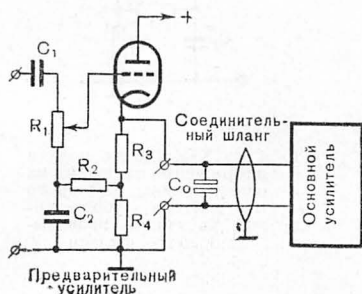


Рис. X-8. Схема использования катодного повторителя перед шлангом, соединяющим предварительный и основной усилители в УДС-1 и КЗВТ-3

Как указывалось ранее (см. стр. 267), уменьшаются помехи, наводимые на входную цепь, — на линию входа основного усилителя; так как выходное сопротивление катодного повторителя мало, то мало и наводимое напряжение помех, прямо пропорциональное величине этого сопротивления.

Катодный повторитель имеет сравнительно малое выходное и большое входное сопротивления. Поэтому катодный повторитель используется в качестве промежуточного, буферного каскада в тех случаях, когда нужно согласовать малое входное сопротивление последующей цепи со сравнительно большим выходным сопротивлением предыдущего каскада усиления напряжения.

Так, например, в оконечном усилителе 51У-19 из комплекта КЗВС-3 оконечные лампы работают в режиме AB_2 , (с токами сетки), и поэтому входное сопротивление оконечного каскада мало, в то же время известно, что выходные сопротивления обоих плеч фазоинвертора относительно

велики. Поэтому установлены два катодных повторителя в качестве буферных предоконечных каскадов, обладающих малым внутренним сопротивлением, благодаря чему получаются очень незначительные искажения.

Два катодных повторителя (рис. X-9) установлены потому, что выходной каскад является двухтактным и, следовательно, предоконечный каскад тоже должен быть собран на двух лампах.

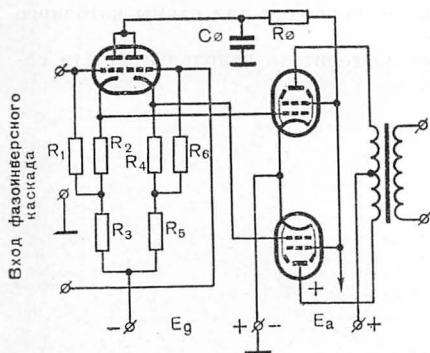


Рис. X-9. Схема использования катодного повторителя в качестве предоконечного каскада с активной нагрузкой, собранного на двойном триоде

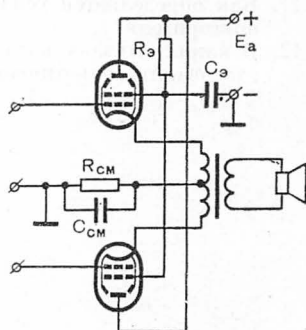


Рис. X-10. Схема использования катодного повторителя в качестве оконечного каскада

Так как катодный повторитель является усилителем мощности, он может быть использован в качестве оконечного каскада (рис. X-10). Его малое выходное сопротивление позволяет снизить размеры выходного трансформатора. Кроме того, малое выходное сопротивление усилителя, нагруженного на громкоговоритель, также обладающего малым сопротивлением, весьма благоприятно сказывается на работе громкоговорителя.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой усилительный каскад называется катодным повторителем и почему?
2. Какими основными свойствами обладает катодный повторитель?
3. Чему равен коэффициент обратной связи катодного повторителя?
4. От чего зависит коэффициент усиления катодного повторителя?
5. Почему для работы в схеме катодного повторителя выбирают лампы с большой крутизной характеристики?

6. Почему катодный повторитель практически обладает линейной и равномерной частотной характеристикой в широкой полосе частот?
7. Какая схема включения транзистора называется эмиттерным повторителем?
8. Почему на сетку лампы катодного повторителя нужно подавать отрицательное напряжение смещения?
9. Как подается напряжение смещения на сетку лампы катодного повторителя?
10. Объясните действие схемы катодного повторителя при работе на длинную линию.
11. Как определяется усиление по мощности для схемы катодного повторителя?
12. В каких случаях катодный повторитель используется для согласования сопротивлений?



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ВХОДНЫЕ ЦЕПИ УСИЛИТЕЛЕЙ



§ 1. СХЕМЫ ВХОДА ПРИ РАБОТЕ ОТ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Наиболее распространенными источниками сигналов звуковой частоты являются фотоэлементы и фотоэлектронные умножители, магнитные звуковоспроизводящие головки, звукосниматели и микрофоны. Все они применяются в технике звукового кинематографа.

Соединение (включение) источника сигналов с усилителем играет важную роль в обеспечении высокого качества при усилении звука. Та часть усилителя, к которой непосредственно подключается источник сигналов, называется *входом усилителя*. *Входной цепью усилителя* называется схема связи источника усиливаемых сигналов с первой лампой или первым транзистором усилителя.

Рассмотрение построения входных цепей усилителя выделено в отдельную главу потому, что построение входной цепи усилителя определяется как электрическими параметрами источника, так и входным сопротивлением усилителя. Особые требования, предъявляемые к входным цепям, объясняются тем, что полезный сигнал на входе

усилителя мал и, если отношение его величины к величине помех невелико, качество воспроизводимого звука будет плохим.

Простейшая схема подключения фотоэлемента к входу усилителя, собранного на электронной лампе, показана на рис. XI-1. В цепь питания фотоэлемента постоянным током от источника E_a входит в качестве нагрузки сопротивление утечки сетки R_1 первой лампы усилителя. При изменении светового потока, падающего на фотоэлемент от читающей лампы сквозь фонограмму, ток фотоэлемента пульсирует и создает на сопротивлении R_1 пульсирующее падение напряжения, переменная составляющая которого является полезным входным сигналом.

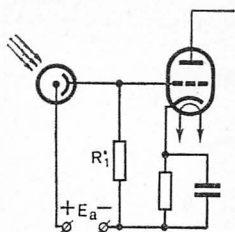


Рис. XI-1. Схема включения фотоэлемента на вход усилителя (схема последовательного питания)

Чтобы уяснить, от каких причин зависит величина напряжения, развиваемая на сопротивлении нагрузки фотоэлемента, построим эквивалентную схему фотоэлемента с нагрузкой (рис XI-2), в которой фотоэлемент заменен генератором, развивающим э. д. с. и обладающим внутренним сопротивлением R_i .

Внутреннее сопротивление фотоэлементов очень велико и составляет десятки мегом; сопротивление же нагрузки обычно 0,1—1,0 мгом. Поэтому практически величина фототока не зависит от нагрузки, а определяется величиной чувствительности фотоэлемента и световым потоком, падающим на катод.

Напряжение, развиваемое фотоэлементом на нагрузке, или, что то же самое, на входе усилителя, будет определяться по закону Ома:

$$U_{\text{вх}} = I_{\text{ф. э.}} \cdot R_1.$$

Как видно из формулы, для получения большого напряжения $U_{\text{вх}}$ целесообразно выбирать большую величину R_1 , однако этого делать не следует, так как сопротивление зашунтировано входной емкостью C_0 , которая имеет значительную величину.

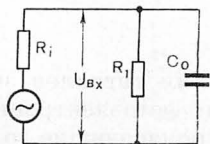


Рис. XI-2. Эквивалентная схема фотоэлемента с нагрузкой

Входная емкость C_0 складывается из величины емкости кабеля от фотоэлемента, установленного на кинопроекторе, до усилителя, причем длина такого кабеля достигает 1—1,5 м, и междуэлектродной емкости лампы. Так как входная емкость включена параллельно сопротивлению R_1 , то она оказывает шунтирующее действие при прохождении сигналов переменного тока высокой частоты. Частотная характеристика входной цепи усилителя при неизменной модуляции светового потока показана на рис. XI-3.

Частотные искажения фотоэлемента вместе с входной цепью усилителя в области высоких частот определяются по формуле:

$$M_B = \sqrt{1 + (\omega_B \cdot R_1 \cdot C_0)^2},$$

где $\omega_B = 2\pi f_B$; f_B — наибольшая частота звукового диапазона.

Можно уменьшить частотные искажения, т. е. добиться уменьшения спада на высоких частотах, если значительно уменьшить входную емкость C_0 и сопротивление нагрузки фотоэлемента R_1 . Тогда второй член подкоренного выражения уменьшится. Однако практически это не удастся, так как уменьшение одновременно приводит к снижению входного сигнала.

Поэтому, с одной стороны, добиваются уменьшения емкости, применяя специальный малоемкостной кабель для подключения фотоэлемента к усилителю, а с другой, — увеличивают усиление на высоких частотах в усилителе в два-три раза для компенсации спада частотной характеристики, сохраняя в то же время большую величину сопротивления R_1 (1—1,5 мгом).

Чтобы уменьшить емкость C_0 , в некоторой аппаратуре конструктивно объединяют фотоэлемент или фотоумножитель с первым каскадом усилителя. Такой узел называется *фотокаскадом* и устанавливается на кинопроекторе.

Рассмотренная схема последовательного питания имеет еще ряд недостатков и не применяется в современной аппаратуре. Наибольшее распространение получила схема включения фотоэлемента параллельного питания. Эта схема может быть выполнена в двух вариантах: с включе-

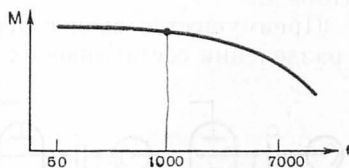


Рис. XI-3. Частотная характеристика входной цепи усилителя при неизменной модуляции светового потока

нием нагрузки со стороны анода (рис. XI-4, а) и со стороны катода (рис. XI-4, б).

При изменении светового потока, падающего на фотоэлемент от читающей лампы сквозь фонограмму, ток фотоэлемента пульсирует, причем постоянная составляющая этого тока протекает по сопротивлению R_1 , а переменная, являющаяся полезным сигналом, — по сопротивлению R_2 . Разделение постоянной и переменной составляющей фототока стало возможным за счет разделительного конденсатора C .

Преимущество схем с переменным питанием и состоит в разделении составляющих фототока, ибо в схеме последовательного питания

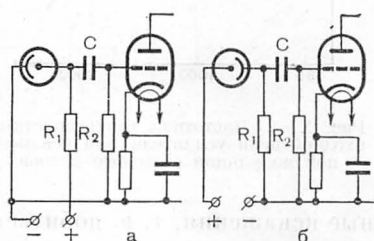


Рис. XI-4. Схемы включения фотоэлементов с параллельным питанием: а — с включением нагрузки со стороны анода; б — с включением нагрузки со стороны катода

цепь сетки лампы не отделена от цепи постоянного тока, что меняет режим лампы.

Несмотря на то, что обычные фотоэлементы могут включаться по любой из этих схем, преимуществами обладает схема включения нагрузки со стороны катода. Наоборот, при использовании фотоэлектронных умножителей может быть применена только схема с включением нагрузки со стороны анода.

Рассмотрим более подробно работу обеих схем при включении обычного фотоэлемента.

В схеме с нагрузкой со стороны анода к разделительному конденсатору приложено высокое напряжение (220 ÷ 240 в) и поэтому нужно применять конденсатор с большим сопротивлением изоляции, иначе на сетку лампы через утечку конденсатора попадет положительный потенциал. Кроме того, эта схема требует установки развязывающих фильтров питания фотоэлемента с большим коэффициентом фильтрации, иначе усилитель будет склонен к генерации из-за обратной связи через общий источник питания.

В схеме с нагрузкой со стороны катода не предъявляются столь высокие требования к разделительному конденсатору, так как к нему приложено небольшое напряжение, равное падению напряжения на сопротивлении R_1 .

Напряжение паразитной обратной связи через общий источник питания, а также напряжение пульсаций попадает на сопротивление R_2 через большое внутреннее сопротивление фотоэлемента. Поэтому паразитная связь и помехи ослабляются в несколько раз и требования к развязывающим и сглаживающим фильтрам снижаются.

Фотоэлектронные умножители включаются на вход усилителя по схеме с нагрузкой со стороны анода. В этом случае через нагрузку протекает суммарный фототок, т. е. ток, обусловленный как электронами, излучаемыми катодом, так и вторичными электронами, излучаемыми эмиттером.

Схема включения фотоэлектронного умножителя показана на рис. XI-5. На эмиттер подается напряжение 170 в через отдельные развязывающие фильтры. Под воздействием светового потока возникает фототок, усиленный за счет вторичной эмиссии. Этот фототок, проходя по сопротивлению R_1 , создает на нем пульсирующее падение напряже-

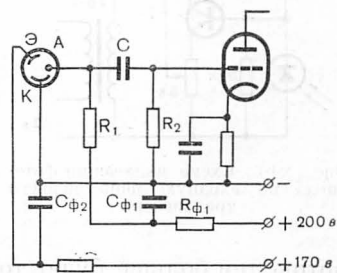


Рис. XI-5. Схема включения фотоэлектронного умножителя

ния, переменная составляющая которого представляет собой полезный сигнал, поступающий на сетку лампы. Необходимо особое внимание обращать при эксплуатации на изоляцию разделительного конденсатора.

Если усилитель работает от фотоэлемента, то первый каскад его собирают на электронной лампе, а не на транзисторе. Объясняется это тем, что фотоэлементы обладают очень большими внутренними сопротивлениями при малых токах сигнала. Поэтому подключение фотоэлементов к транзисторным усилителям при любой схеме включения транзисторов дает весьма невыгодные отношения сигнала к шуму.

Практически более важная характеристика шумовых свойств схемы — отношение напряжения полезного сигнала к напряжению шумов. Оно зависит от напряжения генератора входного сигнала, от внутреннего сопротивления генератора и от полосы частот.

В качественных усилителях отношение сигнала к шуму должно быть не менее 30—50 дб. Проводятся эксперименты

с использованием малошумящих транзисторов, собранных по схеме с общим коллектором.

Воспроизведение оптических фонограмм в транзисторных усилителях осуществляется с помощью фотодиодов. Включение фотодиода во входную цепь первого транзистора показано на рис. XI-6.

К фотодиоду приложено напряжение в запирающем направлении, чем обеспечивается большое внутреннее сопротивление прибора, высокая чувствительность и ли-

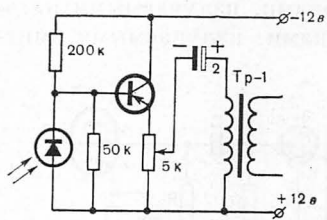


Рис. XI-6. Схема включения фотодиода во входную цепь первого транзистора

нейность световой характеристики. Под действием энергии светового потока в германии типа *n* образуются дополнительные носители заряда — электроны и дырки. Поле внешней батареи способствует перемещению дырок в область *p*, так как к этой области подведен провод от отрицательного полюса батареи. Чем больше световой

поток, тем больше будет ток, протекающий через диод, и тем больше изменение потенциала между базой и эмиттером транзистора.

Первый каскад собран по схеме с общим коллектором, имеющей большое входное сопротивление. Последнее необходимо для согласования входа с высоким внутренним сопротивлением фотодиода. Стабилизация положения рабочей точки транзистора создается как сопротивлением 200 *ком*, так и параллельным соединением фотодиода с сопротивлением 50 *ком*. Для этой же цели устанавливается исходный потенциал базы транзистора.

К эмиттеру транзистора присоединено нагрузочное сопротивление 5 *ком* в виде потенциометра. Положение движка потенциометра определяет величину сигнала, снимаемого на второй каскад, а значит, и выходное напряжение схемы.

§ 2. СХЕМЫ ВХОДА ПРИ РАБОТЕ ОТ ЗВУКОСНИМАТЕЛЯ И МИКРОФОНА

Схемы включения звукоснимателей. Одним из источников звукового сигнала является звукосниматель, позволяющий проигрывать грамзаписи. Наиболее

широкое распространение получили пьезоэлектрические и электромагнитные звукосниматели. Схемы включения звукоснимателя на вход усилителя достаточно просты, поэтому всегда предусматриваются в массовой усилительной аппаратуре, даже в передвижной.

Различают открытые схемы и закрытые. В схемах открытого входа звукосниматель включается непосредственно между сеткой и катодом первой лампы. По такой схеме (рис. XI-7) можно включить только электромагнитный звукосниматель. Пьезоэлектрический звукосниматель

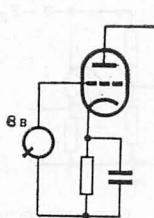


Рис. XI-7. Схема непосредственного включения звукоснимателя между сеткой и катодом первой лампы

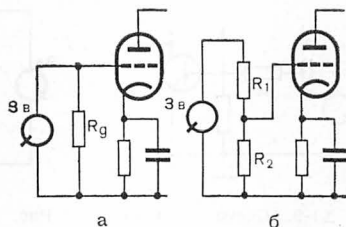


Рис. XI-8. Закрытая (а) и потенциометрическая (б) схемы включения звукоснимателей

включать по этой схеме нельзя, так как он не имеет гальванической связи, а следовательно, на сетку лампы не будет подводиться автоматическое смещение, и если нет сопротивления утечки сетки, с сетки на катод не смогут стекать случайные заряды. Эта схема почти не применяется.

Наиболее широко используются закрытые, а чаще потенциометрические схемы включения звукоснимателей (рис. XI-8, а и б). В схеме закрытого входа между сеткой и катодом лампы включено сопротивление утечки сетки R_g , а звукосниматель любого типа подключается параллельно этому сопротивлению.

Другая схема, показанная на том же рисунке, является разновидностью закрытой схемы. В ней сопротивление утечки включено как делитель напряжения или как регулятор громкости.

Необходимость применения потенциометрических схем вызвана тем, что напряжение, развиваемое звукоснимателем, обычно выше номинального входного напряжения усилителя (например, номинальное входное напряжение

усилителей 90У-2 составляет 75 ± 25 мв, а напряжение, развиваемое пьезоэлектрическим звукоснимателем, равно 1 в) и для того, чтобы не создавать перегрузки усилителя со стороны входа, звукосниматель включают через делитель.

При использовании электромагнитного звукоснимателя следует учитывать, что его катушки обладают индуктивным внутренним сопротивлением, равным на средних частотах 2—6 ком. Поэтому сопротивление делителя, состоящего из сопротивлений R_1 и R_2 (рис. XI-8, б), нельзя

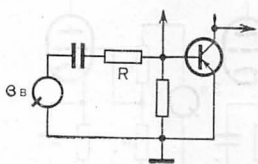


Рис. XI-9. Схема включения электромагнитного звукоснимателя на вход транзисторного усилителя

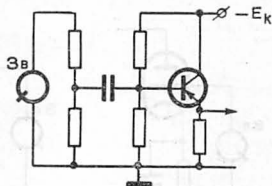


Рис. XI-10. Схема включения пьезоэлектрического звукоснимателя на вход транзисторного усилителя

брать ниже 20—25 ком, в противном случае будет значительный спад частотной характеристики на высоких частотах.

Эти же соображения учитываются и при включении электромагнитного звукоснимателя к усилителю на транзисторе.

Поскольку сопротивление звукоснимателя растет с частотой, для равномерности частотной характеристики нужно, чтобы сопротивление, на которое нагружен звукосниматель, было больше этой величины. Входное сопротивление каскада с общим эмиттером невелико. Если э. д. с., развиваемая звукоснимателем, достаточна (э. д. с. составляет 0,15—0,25 в), то последовательно с базой может быть включено сопротивление R (рис. XI-9).

При включении пьезоэлектрического звукоснимателя следует учитывать, что его внутреннее сопротивление очень велико и имеет емкостный характер, поэтому отдача увеличивается с частотой. Для выравнивания частотной характеристики целесообразно нагружать звукосниматель на большое сопротивление (0,5—2 мгом) и часть напряжения снимать на вход первого каскада, собранного по схеме с общим коллектором (рис. XI-10).

Пьезоэлектрические звукопередатчики развивают напряжение до 1 в, поэтому потери в делителе напряжения не имеют существенного значения.

Провода, соединяющие звукопередатчик с усилителем, должны быть обязательно экранированы (для защиты от помех) и экран заземлен. Так как внутреннее сопротивление звукопередатчика сравнительно невелико, то емкость соединительного шланга не влияет на частотную характеристику усилителя и эта линия может быть довольно длинной.

Схема включения микрофонов. Микрофон применяется очень широко: на киностудиях при записи звука, на теле- и радиостудиях при прямых передачах, в массовых магнитофонах для любительской записи, в диспетчерской связи и т. д. Киномеханику же чаще всего приходится применять микрофон в тех случаях, когда звуковоспроизводящая аппаратура киноустановки используется для усиления речи: объявлений в фойе и зале, переводе фильма на другой язык и др.

Наиболее простым по устройству, наиболее механически прочным, а следовательно, и надежным является электродинамический микрофон. Хотя он и уступает по электроакустическим характеристикам микрофонам других систем, для усиления речи он вполне приемлем, и поэтому электродинамические микрофоны получили наибольшее распространение.

Микрофон — очень нежный прибор и требует исключительно бережного отношения; кроме того, это очень тонкий, чувствительный элемент — приемник весьма слабых звуковых волн. Работая как генератор э. д. с., он развивает очень слабые электрические сигналы, что требует внимательного включения на вход усилителя.

Особенностями электродинамического микрофона как источника сигналов, включенного на вход усилителя, являются: малое входное сопротивление и незначительная величина напряжения 2—3 мв, развиваемого на нормальной нагрузке.

Сопротивление катушки электродинамического микрофона составляет единицы ом (катушка имеет всего несколько витков тонкой проволоки). Если включить микрофон непосредственно на вход лампового усилителя параллельно сопротивлению утечки первой лампы, то напряжение, развиваемое микрофоном на входе усилителя при таком включении (рис. XI-11), будет сопоставимо

с напряжением помех. Другими словами, при таком включении получается относительно большой уровень помех. Поэтому схема непосредственного включения микрофона на вход лампового усилителя не применяется.

На практике наиболее широко используется схема включения микрофона через трансформатор (рис. XI-12).

Применение повышающего трансформатора дает следующие преимущества:

1. Можно несколько повысить величину входного напряжения, выбрав трансформатор с большим коэффициентом

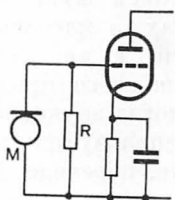


Рис. XI-11. Схема непосредственного включения микрофона на вход лампового усилителя

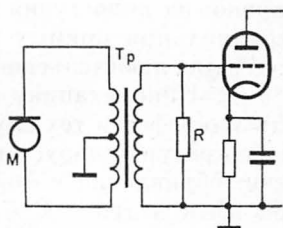


Рис. XI-12. Схема включения микрофона на вход лампового усилителя через трансформатор

трансформации, и тем самым снизить относительный уровень помех.

2. Можно симметрировать вход путем заземления средней точки первичной обмотки трансформатора, что дает возможность снизить электростатические помехи, являющиеся самыми распространенными и возникающими из-за наведения на провода микрофонной линии при плохой их экранировке. Если же средняя точка первичной или вторичной обмоток трансформатора заземлена, то наводки в обоих проводах создают в сердечнике трансформатора два противоположных по направлению магнитных потока, которые взаимно компенсируются; в итоге помехи уменьшаются.

Для защиты от наводок со стороны внешних магнитных полей трансформатор помещают в магнитный экран; чаще всего согласующий трансформатор помещают внутри корпуса электродинамического микрофона.

Коэффициент трансформации согласующего трансформатора обычно не превышает $20 \div 40$. Увеличение коэффициента трансформации приводит к нежелательной

равномерности частотной характеристики в области высоких частот, так как имеется резонанс между индуктивностью рассеивания трансформатора, входной емкостью лампы и емкостью монтажа. По этим же причинам горючую обмотку шунтируют, включая резистор $R=100 \div 200$ ком.

Схема включения микрофона на вход транзисторного усилителя по существу не отличается от рассмотренной трансформаторной схемы. Учитывая, что трансформатор расположен в корпусе микрофона, микрофонный кабель может быть подключен к базе транзистора первого каскада, собранного по схеме с общим эмиттером, через разделительный конденсатор так, как показано на рис. XI-13.

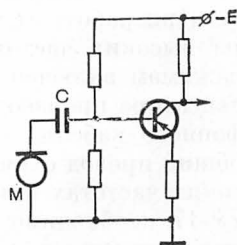


Рис. XI-13. Подключение микрофона на вход транзисторного усилителя

В усилителе 7У-17, собранном на транзисторах, который используется в комплекте киноаппаратуры «Украина-4», для воспроизведения магнитных фонограмм 16-мм фильмов, предусмотрена возможность включения микро-

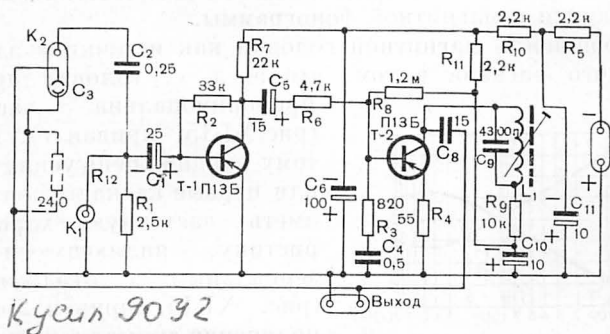


Рис. XI-14. Схема транзисторного усилителя 7У-17

фона. Схема входа показана на рис. XI-14. Входное гнездо K_2 предназначено для подключения шланга от магнитной звуковоспроизводящей головки. Входное гнездо K_1 служит для подключения микрофонного шланга. Входной сигнал вводится в схему через резисторно-емкостный делитель, образуемый конденсатором сравнительно малой емкости C_2 и резистором R_1 . Эта цепочка понижает усиление на низких частотах. Далее сигнал через разделитель-

ный конденсатор большой емкости C_1 подводится к базе транзистора $T-1$. (Используется транзистор П13Б). Первый каскад собран по схеме с общим эмиттером. Смещение на базу осуществляется сопротивлением R_2 , подключенным одним концом к коллектору.

При работе от микрофона понижается также усиление на высоких частотах; для этого параллельно выходным зажимам включен конденсатор C_3 . Включение этого конденсатора производится одним из контактов вилки микрофонного кабеля, замыкающим вывод от конденсатора на общий провод схемы. Снижение усиления на низких и высоких частотах при работе от микрофона через приставку 7У-17 необходимо ввиду того, что частотная характеристика приставки имеет значительные подъемы на низких и высоких частотах, необходимые при работе с магнитной головкой.

§ 3. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВОСПРОИЗВОДЯЩИХ ГОЛОВОК

Один из источников звукового сигнала — магнитная головка, позволяющая воспроизводить записи с магнитной фонограммы.

Особенность магнитной головки как источника электрического сигнала в том, что э. д. с. головки прямо пропорциональна частоте (рис. XI-15, кривая 1). Поэтому входная цепь усилителя или первые каскады должны иметь частотную характеристику, являющуюся ее зеркальным отражением (рис. XI-15, кривая 2) для получения суммарной прямолинейной частотной характеристики.

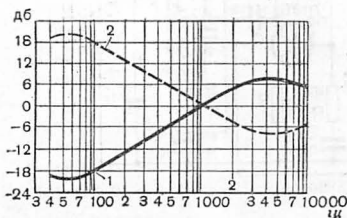


Рис. XI-15. Частотная характеристика воспроизводящей магнитной головки (1) и требуемая частотная характеристика усилителя при воспроизведении магнитной записи (2)

Магнитные воспроизводящие головки бывают высокоомные с большим числом витков в обмотке и низкоомные с малым числом витков.

Э. д. с. головки составляет примерно 1,5 мв (низкоомных) и 3—4 мв (высокоомных) на частоте 1000 гц, что требует дополнительного каскада усиления по сравнению с уси-

лителями, работающими от фотоэлемента, фотоумножителя или звукоснимателя.

Преимущество низкоомных головок в том, что их можно удалить на несколько метров от усилителя. Кроме того, они обладают меньшей склонностью к микрофонному эффекту.

Возможны два крайних режима подключения головок к входу усилителя:

а) режим, близкий к короткому замыканию, когда магнитная головка работает на малое нагрузочное сопротивление, и

б) режим, близкий к холостому ходу, когда головка работает на большое входное сопротивление.

В первом случае ток, создаваемый головкой, подчас независим от частоты, так как хотя э. д. с. растет с частотой, но одновременно возрастают и сопротивления цепи, определяемые главным образом индуктивностью (сумма активных сопротивлений мала). Напряжение на входе не меняется с частотой. В режиме короткого замыкания входное напряжение очень мало, а сопротивление, на которое нагружена головка (50—100 ом), не согласуется с входным сопротивлением лампы или транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

При малом входном сигнале собственный шум первой

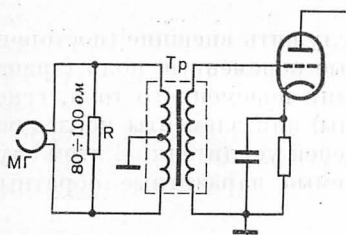


Рис. XI-16. Схема включения звуковоспроизводящей магнитной головки на вход лампового усилителя

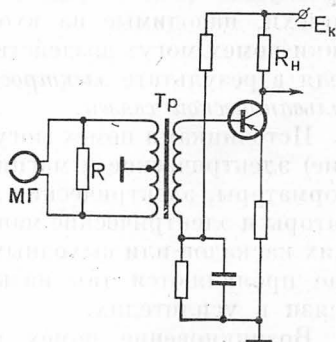


Рис. XI-17. Схема включения звуковоспроизводящей магнитной головки на вход транзисторного усилителя

лампы дает значительный уровень шумов. Все это требует применения повышающего трансформатора.

На рис. XI-16 и XI-17 показано включение головки. Как и при включении микрофона, для уменьшения электростатических помех применяется симметрированный вход,

т. е. трансформатор с заземленной средней точкой первичной обмотки.

Работа в режиме, близком к режиму холостого хода, получается, когда первый каскад собран на транзисторе по схеме с общим коллектором, а головка через разделительный конденсатор связана с базой. Здесь больше выходное отношение сигнала к шумам, ибо входное напряжение почти равно э. д. с. Но в этом случае входное напряжение на низких и средних частотах растет пропорционально частоте. Для выравнивания частотной характеристики в последующих усилительных каскадах должна быть обязательно введена частотная коррекция, создающая уменьшение усиления с частотой на низких и средних частотах.

§ 4. ЭКРАНИРОВКА ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ

При работе современной звуковоспроизводящей киноустановки, имеющей большое усиление, часто прослушиваются различные помехи, значительно снижающие качество звукового материала фильма.

Одной из главных причин их возникновения, часто прослушиваемых в виде неприятного гудения, являются помехи, наводимые на входные цепи усилителя. Источники помех могут воздействовать на входную цепь усилителя в результате *электростатической, индуктивной или гальванической связей*.

Источниками помех могут служить внешние (посторонние) электрические и магнитные переменные поля (трансформаторы, электрические линии переменного тока, генераторы и электрические машины) или элементы последующих каскадов или выходных цепей усилителя. В этом случае проявляются так называемые паразитные обратные связи в усилителях.

Возникновение помех из-за электростатической или емкостной связи объясняется наличием между входной цепью усилителя и источником переменного напряжения, например проводами тока промышленной частоты, некоторой паразитной емкости $C_{\text{п}}$. Как видно из рис. XI-18, *а*, возникает новая электрическая цепь: источник помехи, паразитная емкость, входное сопротивление, земля, по которой протекает переменный ток. Этот ток создает на сопротивлении $R_{\text{вх}}$ падение напряжения — напряжение помех. Величина этого падения напряжения прямо про-

порциональна величине входного сопротивления и если оно велико, напряжение помех может стать сопоставимым с полезным сигналом.

Считают, что помехи не должны превышать 0,3—0,5 % от величины полезного сигнала, иначе они совершенно недопустимо снижают качество звуковоспроизведения.

Однако добиться резкого снижения уровня помех путем уменьшения величины входного сопротивления нельзя,

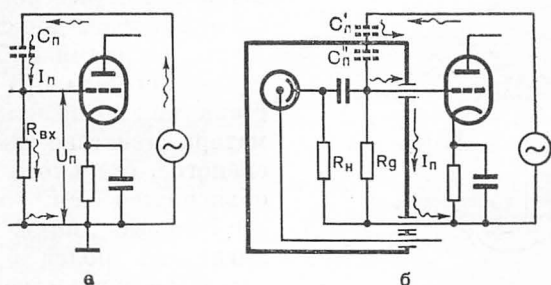


Рис. XI-18. Схема возникновения электрических помех во входной цепи усилителя (а) и действие электростатического экрана (б)

особенно при работе от фотоэлементов, так как входные сопротивления усилителей должны быть в этом случае большими.

Поэтому добиваются снижения уровня электростатических помех путем тщательной экранировки всех входных цепей, кабеля фотоэлементов, магнитных головок и звукоснимателей, установки специальных металлических экранов на фотоэлементы и магнитные головки, т. е. помещении всех деталей в общий металлический экран, который заземляется (рис. XI-18, б) — соединяется с корпусом шасси или с нулевым проводом усилителя.

Соблюдение последнего условия совершенно обязательно: как по требованиям техники безопасности, так и потому, что если экран не присоединен к общей нулевой точке, то возникает цепь паразитной обратной связи через две последовательные емкости и снижения уровня помех не произойдет.

Возникновение помех из-за индуктивной связи особенно ощутимо, когда во входной цепи имеется трансформатор, и объясняется тем, что магнитные поля, образуемые более мощными выходными или силовыми трансформато-

рами, могут пересекать витки обмоток входного трансформатора (рис. XI-19).

В целях борьбы с индуктивными помехами при монтаже деталей схемы всегда стараются как можно дальше разнести входные и выходные цепи и главным образом входные и выходные трансформаторы. Но этого недостаточно. Основным способом защиты входных цепей и входного трансформатора от индуктивных помех является приме-

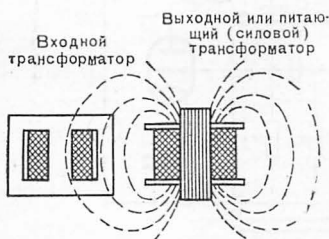


Рис. XI-19. Схема возникновения индуктивных помех от выходного или силового трансформатора

нение металлического (стального) экрана с довольно толстыми стенками и большого воздушного зазора между стенками экрана и трансформатора. Действие такого массивного стального экрана объясняется тем, что почти все силовые линии внешних магнитных полей будут замыкаться через стенки экрана, не проникая внутрь, так как сталь обладает значительно меньшим сопротив-

лением для магнитного потока, чем воздух.

Говоря о защите цепей от электростатических и индуктивных наводок, следует особо подчеркнуть, что металлические экраны дают эффект только при экранировке входных цепей, где протекают более слабые сигналы.

Возникновение помех в усилителях из-за гальванических связей объясняется наличием общих источников питания, а способом борьбы с ними могут быть развязывающие фильтры.

Рассматривая схему включения фотоэлектронного умножителя (см. рис. XI-5), мы видим, что питание анода и эмиттера потребовало установки дополнительных развязывающих фильтров.

Как известно, во время работы многокаскадного усилителя напряжение общего источника питания изменяется в соответствии с колебаниями тока последней лампы. Так как анодная цепь и цепь эмиттера фотоэлектронного умножителя питаются от общего источника питания, то на них попадут и пульсации напряжения источника питания. Таким образом образуется гальваническая обратная связь, являющаяся вредной. Установка развязывающих фильтров, состоящих из ячейки резистора R_{ϕ} и емкости C_{ϕ} ,

включенных в цепи анода и эмиттера, сильно снижает пульсации напряжения питания в этих цепях.

Коэффициент фильтрации одного звена резисторно-емкостного фильтра RC приближенно равен:

$$\Phi \approx \omega C_{\phi} \cdot R_{\phi}.$$

Часто установка одного звена фильтра оказывается недостаточной. Тогда устанавливают две или более ячеек, причем коэффициент фильтрации многозвенного фильтра равен:

$$\Phi = \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \Phi_3 \dots$$

Развязывающие фильтры необходимы во всех усилительных устройствах, анодные цепи которых питаются от одного общего кенотронного выпрямителя. Он обладает большим внутренним сопротивлением, что является основной причиной паразитной связи через источник питания.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется входной цепью усилителя?
2. Расскажите об особенностях входных цепей усилителей.
3. Объясните свойства простейшей схемы включения обычного фотоэлемента на вход усилителя.
4. Как влияет выбор величины сопротивления нагрузки фотоэлемента на величину входного напряжения усилителя и частотную характеристику звуковоспроизведения?
5. Из каких компонентов складывается величина входной емкости усилителя?
6. Объясните преимущества схем с параллельным питанием фотоэлемента с включением нагрузки со стороны катода.
7. Объясните, почему при включении фотоэлектронного умножителя применяется исключительно схема с нагрузкой со стороны анода.
8. Чем объясняются шумы транзисторов и какой величиной они оцениваются?
9. С помощью каких приборов воспроизводятся оптические фонограммы в транзисторных усилителях?
10. Объясните различие открытой и закрытой схем включения звукоснимателя. Можно ли включить пьезоэлектрический звукосниматель по открытой схеме?
11. Почему общее сопротивление делителя или потенциометра звукоснимателя в звуковоспроизводящих усилителях не должно быть мало?
12. Какие преимущества дает применение повышающего трансформатора при включении микрофона на вход усилителя?
13. Какие преимущества создает симметрирование входа при включении микрофона на вход усилителя?

14. Как осуществлена схема включения микрофона на вход транзисторного усилителя 7У-17?
15. Почему необходимо снижение усиления на низких и высоких частотах при работе от микрофона через приставку 7У-17?
16. В чем состоит особенность магнитной головки как источника электрического сигнала и какие требования предъявляются к входной цепи усилителя?
17. В чем преимущество низкоомных магнитных воспроизводящих головок по сравнению с высокоомными?
18. Расскажите о двух крайних режимах подключения магнитных воспроизводящих головок к входу усилителя.
19. Объясните причины появления помех, прослушиваемых в виде неприятного гудения при работе усилителя.
20. Как защитить входные цепи от электростатических полей?
21. Как защитить входные цепи от индуктивных помех?
22. Почему экран входной цепи должен быть изолирован от корпуса усилителя и присоединен к нему только в той точке, где заземляются все детали входа?
23. Как возникают помехи из-за гальванической связи через общий источник питания?
24. Как снижают помехи, возникающие из-за гальванической связи через общий источник питания?
25. Чему равен коэффициент фильтрации многозвенного развязывающего фильтра?

КОРРЕКЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

§ 1. СПОСОБЫ КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Тракт звукопередачи, в том числе и в звуковом кино, состоит из многих звеньев. Каждое звено, например в схеме воспроизведения звука: фонограмма, фотоэлемент, предварительный усилитель, усилитель мощности, громкоговоритель — вносит частотные искажения. Часто суммарные частотные искажения всего тракта превышают допустимую величину. Немалое значение для качественного звуковоспроизведения играют и акустические условия зрительного зала.

Если рассматривать только усилитель, который состоит из нескольких каскадов, то, учитывая, что каждый из них вносит частотные искажения, может оказаться, что частотные искажения всего усилителя будут превышать допустимую величину.

Чтобы получить нужную частотную характеристику усилителя или всего тракта, приходится исправлять (корректировать) или изменять частотную характеристику какого-либо звена. Чаще всего таким звеном оказывается

усилительный каскад, так как именно здесь проще всего изменить частотную характеристику.

Необходимость коррекции частотной характеристики усилителя при воспроизведении звука определяется двумя основными факторами: типом звуконосителя (оптическая фонограмма, магнитная фонограмма, грамзапись) и акустическими свойствами зрительного зала.

Объясняется это тем, что, например, при воспроизведении звука с фонограммы 16-мм фильма для уменьшения частотных искажений всем комплектом звуковоспроизводящей установки желательно иметь такие усилители, коэффициент усиления которых возрастает на высоких частотах. В больших кинотеатрах с недостаточной акустической обработкой бывает необходимо получить в усилителе значительный спад частотной характеристики в области низких частот. Поглощение звука стенами зрительного зала обычно уменьшается на низких частотах, поэтому низкие частоты звучат более громко и речь становится неразборчивой. На слух это воспринимается как «бубнение».

Подчеркивание низких частот обусловлено не только акустическими свойствами зрительного зала, но и некоторыми специфическими особенностями звукозаписи.

Иногда при записи в силу различных причин низкие звуковые частоты записываются сильнее, чем следовало бы. При воспроизведении звука с изношенного фильма, на фонограмме которого имеются царапины, для уменьшения шумов применяют усилитель, частотная характеристика которого имеет крутой спад после частоты 5000—6000 *гц*. Оптическая фонограмма не позволяет записывать колебания с частотами выше 6000—7000 *гц* (при скорости записи и воспроизведения 24 *кадр/сек* для 35-мм фильма) и свыше 4500—5000 *гц* (при скорости 16 *кадр/сек* для 16-мм фильма).

Поэтому спад частотной характеристики на частотах выше 6000 *гц* не только не ухудшит качества звуковоспроизведения, а, наоборот, улучшит его, так как в паузах не будут прослушиваться шумы, лежащие выше 6000—7000 *гц*. Правда, полного устранения шумов получить не удастся, так как часть из них лежит в области ниже 5000 *гц*.

Коррекция частотной характеристики нужна и при воспроизведении магнитной фонограммы, так как э. д. с. развивается воспроизводящей головкой прямо пропорцио-

нально частоте, т. е. частотная характеристика имеет плавный подъем, начиная с нижней граничной частоты. Но на верхних частотах начинается спад частотной характеристики, обусловленный, во-первых, большим влиянием саморазмагничивания и, во-вторых, конечной шириной зазора в сердечнике магнитной головки, когда длина волны записи соизмерима с шириной зазора. Усилитель должен иметь частотную характеристику с подъемом нижних и верхних частот относительно средних.

Из приведенных примеров становится ясным, что возникает необходимость получать частотную характеристику усилителя не прямолинейной, а довольно сложной формы с заранее заданным подъемом или спадом на определенную величину.

Коррекция основана на введении в усилитель корректирующих каскадов или отдельных корректирующих элементов — емкостей или индуктивностей, величина сопротивления которых, как известно, зависит от частоты, что и позволяет изменять коэффициент усиления для разных частот. По способу коррекции схемы делятся на три основные группы:

1) схемы, в которых используется резонанс токов или напряжений;

2) схемы, дающие подъем характеристики в одной области за счет подавления усиления в других областях;

3) схемы, в которых изменение усиления получается изменением глубины обратной связи в определенной области частот.

§ 2. СХЕМЫ КОРРЕКЦИИ

К схемам, в которых используется резонанс токов или напряжений, относятся дроссельный, трансформаторный и резисторно-трансформаторный каскады (см. главу VII, где приведены частотные характеристики указанных каскадов).

В трансформаторном каскаде можно получить подъем в области высоких частот за счет резонанса напряжений между индуктивностью рассеяния L_s и входной емкостью C_0' .

В резисторно-трансформаторном каскаде может быть получен подъем частотной характеристики в области нижних частот за счет резонанса напряжений между индуктивностью первичной обмотки трансформатора L_1 и переход-

ной емкостью C_g и подъем в области верхних частот за счет резонанса напряжений между индуктивностью рассеяния L_s и входной емкостью C_0' .

На рис. XII-1 приведена схема резисторного каскада с дросселем в цепи сетки, с помощью которой можно получить некоторый подъем частотной характеристики в области низких частот. Для этого следует выбрать такую емкость конденсатора C , чтобы на самой низкой частоте звукового

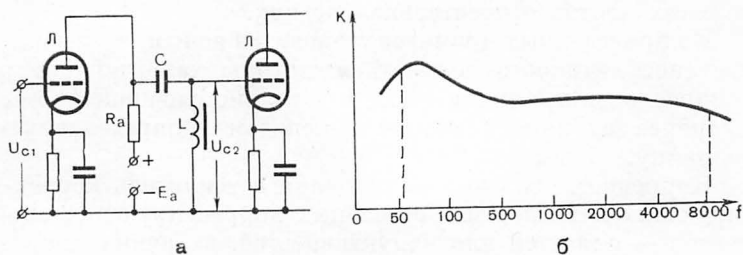


Рис. XII-1. Схема резисторного каскада с дросселем в цепи сетки (а) и его частотная характеристика (б)

диапазона емкостное сопротивление его было равно индуктивному сопротивлению дросселя L , т. е.:

$$\frac{1}{2\pi f_n C} = 2\pi \cdot f_n \cdot L.$$

При выполнении этого условия в цепи, состоящей из лампы, конденсатора и дросселя, включенных последовательно, возникает резонанс напряжений. На дросселе, с которого снимается напряжение к следующему каскаду, на частоте, близкой к резонансной, напряжение может превышать напряжение источника (т. е. лампы). Следовательно, коэффициент усиления каскада на частотах, близких к резонансной, может быть больше коэффициента усиления каскада на средних частотах.

Рассмотренная схема коррекции имеет ряд недостатков: сложность, высокую стоимость моточных деталей (дросселя или трансформатора в трансформаторном каскаде) и большие нелинейные искажения на частотах, близких к резонансной частоте. Все это ограничивает их применение в современных усилительных устройствах, тем более что существует ряд более простых и дешевых схем, где подъем характеристики в одной области достигается за счет подавления усиления в других областях.

На рис. XII-2, *a* дана схема резисторного каскада с коррекцией частотной характеристики в области высоких частот. В схему включен корректирующий элемент, состоящий из параллельно соединенных емкости C_k и резистора R_k . По мере понижения частоты усиливаемого переменного напряжения емкостное сопротивление конденсатора C_k возрастает и увеличивается падение напряжения на корректирующем элементе (между точками *a* и *б*), вследствие чего напряжение на выходе каскада уменьшается.

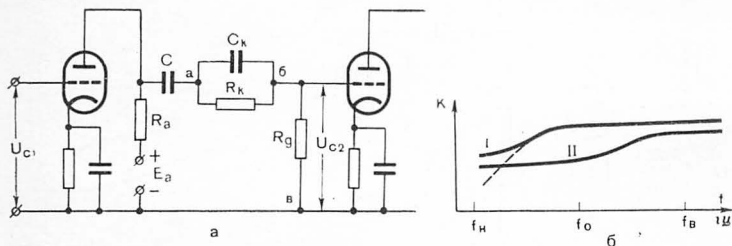


Рис. XII-2. Схема резисторного каскада с корректирующей цепочкой (*a*) и частотные характеристики, которые на ней могут быть получены (*б*)

Иными словами можно сказать, что по сравнению с простой схемой резисторного каскада, в котором напряжение к сетке следующей лампы снимается между точками *a* и *б*, в этой схеме включен частотно-зависимый делитель напряжения, состоящий из двух плеч, причем напряжение к сетке лампы следующего каскада снимается между точками *б* и *в*.

В таком каскаде с корректирующим элементом удастся получить не только уменьшение усиления на низких частотах (кривая *I* на рис. XII-2, *б*), но и уменьшение усиления на низких и средних частотах (кривая *II* на том же рисунке).

Частотная характеристика типа кривой *I* получается в том случае, если конденсатор C_k выбирается так, чтобы его емкостное сопротивление на самой низкой частоте было больше R_g и R_k . При малой емкости сопротивление ее велико на низких и средних частотах, на корректирующем элементе падает значительное напряжение, а напряжение, подводимое к сетке следующего каскада, и соответственно его усиление падает.

По мере увеличения частоты сопротивление емкости уменьшается, уменьшается падение напряжения на корректирующем элементе и, начиная с частоты примерно

500 гц и выше, сопротивление конденсатора становится столь малым, что коэффициент усиления практически имеет такую же величину, как и в обычном резисторном усилителе (точки *a* и *b* на рис. XII-2, *a* как бы замкнуты накоротко).

Если выбрать емкость C_k так, что емкостное сопротивление будет сравнительно велико только для нижних частот, а для средних и тем более верхних частот им можно пренебречь, то усиление будет подавляться только на ниж-

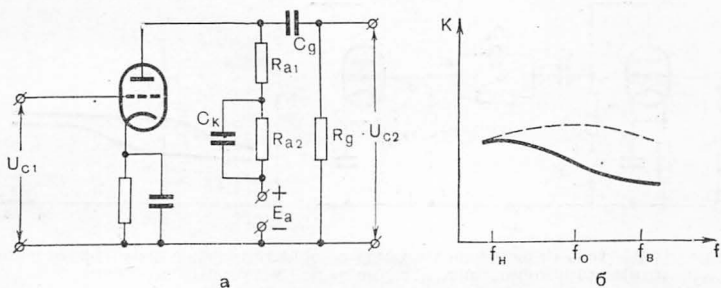


Рис. XII-3. Схема резисторного каскада с корректирующим конденсатором, шунтирующим часть сопротивления анодной нагрузки

них частотах, и получается спад нижних частот (кривая *II*). Так как параллельно конденсатору C_k включен резистор R_k , спад частотной характеристики на низких частотах получается не таким крутым, как при уменьшении емкости переходного конденсатора (пунктирная кривая) в простом резисторном каскаде, и, кроме того, самые нижние частоты не срезаются.

Следует отметить, что получение частотных характеристик типа кривой *II* в воспроизводящих усилителях необходимо главным образом для компенсации тех частотных искажений, которые создаются фотоэлементами, работающими на линию, обладающую емкостью.

Относительный подъем нижних частот за счет уменьшения усиления на средних и верхних частотах может быть получен от схемы на рис. XII-3, *a*, в которой корректирующий конденсатор шунтирует часть сопротивления анодной нагрузки.

На низких частотах сопротивление емкости велико. Анодной нагрузкой является сумма сопротивлений: $R_{a1} + R_{a2}$. На средних и верхних частотах анодное сопро-

тивление становится равным только R_{a1} , так как для этих частот общее сопротивление R_{a2} и $\frac{1}{2\pi f \cdot C_k}$ очень мало.

С уменьшением сопротивления анодной нагрузки усиление уменьшается. Таким образом, в этой схеме относительный подъем частотной характеристики на нижних частотах (рис. XII-3, б) получается за счет подавления средних и высоких частот по сравнению с частотной характеристикой обычного резисторного каскада (пунктирная кривая на том же рисунке). Аналогичные частотные характеристики можно получить в схеме резисторного каскада с развязывающим фильтром $R_{\phi} \cdot C_{\phi}$ в анодной цепи.

Схема коррекции с подъемом частотной характеристики в области нижних частот имеет практическое значение и находит применение при воспроизведении магнитной записи звука.

Но при воспроизведении магнитных фонограмм возникает необходимость иметь подъем в области высоких частот. Такой подъем можно получить, применяя схему, показанную на рис. XII-4, в которой коррекция осуществляется на входе усилителя путем включения параллельно первичной обмотке входного трансформатора последовательно с сопротивлением нагрузки R_n индуктивности L_k . По мере увеличения частоты сигнала увеличивается и индуктивное сопротивление ωL_k , а с ним растет и величина входного сигнала.

Широкое применение коррекции частотной характеристики находят схемы, основанные на использовании глубокой отрицательной обратной связи для уменьшения усиления в той или иной области частот.

На рис. XII-5, а дана принципиальная схема коррекции за счет отрицательной обратной связи по напряжению, а на рис. XII-5, б — возможные виды частотных характеристик, которые можно получить с помощью такой схемы.

Напряжение обратной связи снимается с вторичной обмотки выходного трансформатора и часть его подается на вход усилителя. Цепь обратной связи состоит из источ-

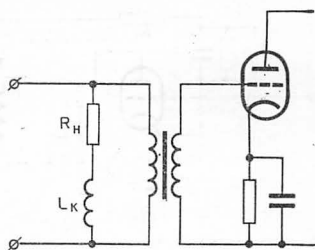


Рис. XII-4. Схема коррекции, дающая подъем верхних частот

ника напряжения (вторичная обмотка выходного трансформатора), гасящего сопротивления R_1 (одно плечо делителя) и сопротивления R_2 (второе плечо делителя). Поворот фазы на 180° достигается тем, что обратной связью охвачены три элемента, каждый из которых поворачивает фазу напряжения на 180° — это предоконечный каскад, окончательный каскад и выходной трансформатор.

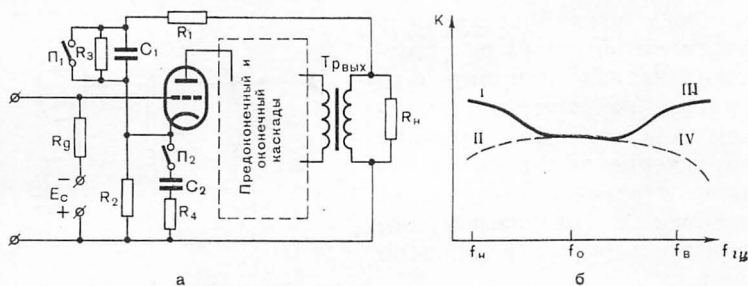


Рис. XII-5. Принципиальная схема коррекции за счет обратной связи по напряжению (а) и возможные частотные характеристики (б)

В целях коррекции частотной характеристики в цепь обратной связи с помощью переключек P_1 и P_2 могут быть подключены корректирующие элементы C_1-R_3 и C_2-R_4 .

Здесь можно рассмотреть несколько случаев.

1. Пусть переключка P_1 разомкнута, следовательно, конденсатор C_1 включен последовательно с гасящим сопротивлением R_1 . На низких частотах сопротивление гасящего плеча делителя сильно возрастает и таким образом напряжение отрицательной обратной связи уменьшается и усиление возрастает (кривая I, рис. XII-5, б). Резистор R_3 ограничивает рост усиления на нижних частотах, так как общее сопротивление цепи C_1 и R_2 не может стать больше R_3 .

2. Переключка P_1 замкнута. В этом случае коррекция на низких частотах выключается (кривая II).

3. Переключка P_2 замкнута. В этом случае второе плечо делителя — резистор R_2 — шунтируется емкостью C_2 . На высоких частотах емкостное сопротивление конденсатора, а следовательно, и всего второго плеча делителя мало, мало и падение напряжения отрицательной обратной связи на нем, благодаря чему усиление на высоких частотах возрастает (кривая III). Резистор R_4 ограничивает подъем характеристики в области верхних частот.

4. Переключка Π_2 разомкнута. В этом случае коррекция не осуществляется.

На практике коррекцию частотной характеристики путем включения корректирующих элементов в цепь обратной связи применяют не в последних, а в первых каскадах, что приводит к меньшим нелинейным искажениям и стабильности работы усилителя.

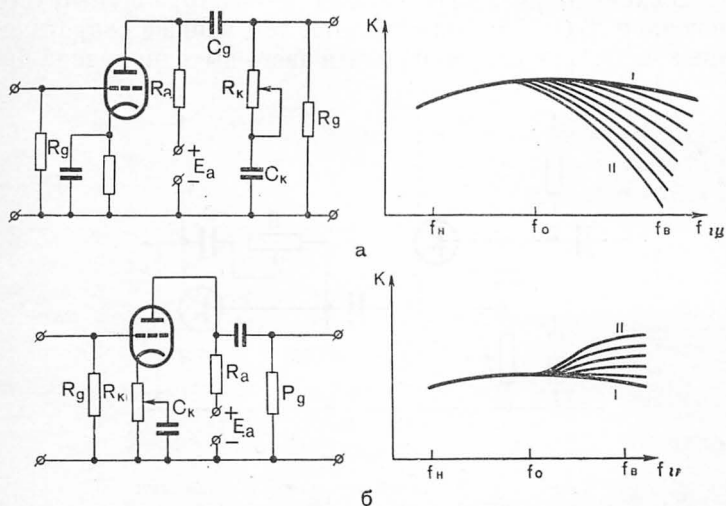


Рис. XII-6. Схемы переменной коррекции на верхних частотах: а — с помощью цепочки $R_k C_k$ и ее область регулирования частотной характеристики; б — за счет отрицательной обратной связи по току и ее область регулирования: I — движок вниз; II — движок вверх

Помимо постоянной коррекции возможна переменная коррекция частотной характеристики. Это чаще всего тон-контроль, т. е. плавное изменение глубины спада или подъема частотной характеристики в области нижних и верхних частот.

Достигается переменная коррекция с помощью переменных сопротивлений или емкостей, включенных в схему так, как показано на рис. XII-6, а и б. Все эти схемы регулируют тембр в области высоких частот.

На рис. XII-7, а и б показаны простейшие схемы регулировки тембра в транзисторном каскаде. Простые схемы регулировок осуществляют с помощью конденсаторов, соединяемых последовательно с переменным сопротивлением. Такая цепочка RC включается в цепь межкаскадной связи

или в цепь отрицательной обратной связи. Если конденсатор в цепи межкаскадной связи установлен последовательно, то его действие сказывается в ослаблении низкочастотных составляющих сигнала по сравнению с составляющими средних и высоких частот. Параллельное включение конденсатора ослабляет высокочастотные составляющие сигнала.

В схеме на рис. XII-7, а вход транзистора шунтируется цепочкой $R \cdot C$. Чем выше частота, тем меньше сопротивление конденсатора и тем большая часть выходного тока пре-

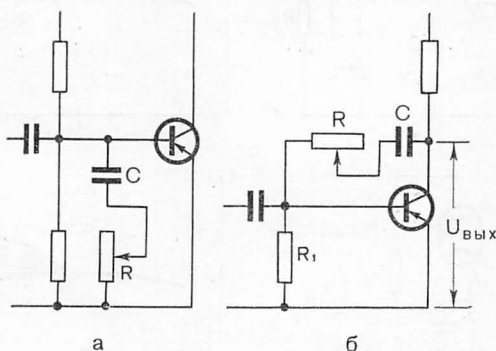


Рис. XII-7. Простейшие схемы регулировки тембра в транзисторном каскаде

дыдущего каскада ответвляется в цепь регулировки. При большом значении сопротивления R даже на высоких частотах сопротивление цепи велико и весь ток сигнала будет протекать через входную цепь транзистора. При малых значениях R высокочастотные составляющие тока сигнала будут замыкаться через цепь регулировки. Таким образом, рассматриваемая схема позволяет регулировать усиление на высоких частотах.

В другой схеме регулировки тембра (рис. XII-7, б), конденсатор и переменное сопротивление включены последовательно друг другу в цепь отрицательной обратной связи по напряжению. Все выходное напряжение действует на делителе напряжения, состоящего из C , R и R_1 ; часть этого напряжения, падающая на R_1 , действует на входе, уменьшая входной сигнал. Чем выше частота сигнала, тем меньше сопротивление цепочки $R \cdot C$ и тем

равнивание) частотной характеристики в этой схеме происходит благодаря тому, что увеличение величины емкости C_0 вызывает рост спада на высоких частотах входного напряжения и одновременно приводит к росту усиления каскада.

Схема автоматической коррекции действует лишь в том случае, когда внутреннее сопротивление источника переменного напряжения R_i велико (при включении на вход фотоэлемента или фотоэлектронного умножителя, внутреннее сопротивление которых около 10—15 мгом). При включении источника переменного напряжения с малым R_i (например, звукоснимателя) это сопротивление будет почти накоротко замыкать нижнее плечо второго делителя — сопротивление R_6 , — что приведет почти к полному выключению обратной связи; в результате этого общее усиление увеличится, а спад в области верхних частот не компенсируется.

Схема, аналогичная рассмотренной, применяется и в передвижном усилителе 90У-2. Это универсальный усилитель, предназначенный для работы с 16-мм кинопроектором ПП-16-4 или с кинопроекторами КН-13 (одним или двумя в комплекте двухпостной стационарной киноустановки).

В первом случае усилитель работает от фотоэлектронного умножителя ФЭУ-2, расположенного в корпусе самого усилителя, и входная линия сведена до минимума, благодаря чему и входная емкость линии мала.

При работе с кинопроекторами КН-13, когда фотоэлемент расположен на корпусе кинопроектора, соединение с входом усилителя производится через переходную коробку с помощью одного или двух фотошлангов со значительной распределенной емкостью. Эта входная емкость вносит заметные частотные искажения на высоких частотах, и ее желательно компенсировать. Примененная в усилителе 90У-2 схема автоматической коррекции частотной характеристики в области высоких частот (рис. XII-9) полностью удовлетворяет поставленным требованиям. В ней сохранены заводские номера резисторов и конденсаторов, что должно облегчить в дальнейшем рассмотрение заводской схемы, прилагаемой к усилителю.

Первый каскад усилителя собран на пентоде 6Ж7 по резисторной схеме с отрицательной обратной связью по напряжению. Так как переходной конденсатор C_1 и конденсатор C_3 фильтра анодного питания фотоэлектронного

умножителя для переменного тока представляют собой малое сопротивление, то ими можно пренебречь и не учитывать их влияния при рассмотрении работы схемы.

Напряжение отрицательной обратной связи снимается с выхода каскада — резистора R_{12} — и подается на пер-

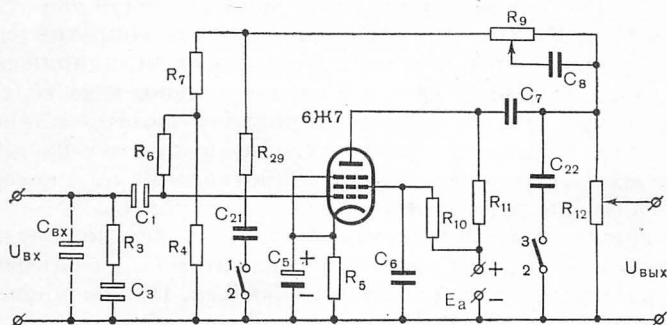


Рис. XII-9. Схема автоматической коррекции усилителя 90У-2

вый делитель, состоящий из резисторов R_9 , R_7 и R_4 , а с последнего из этих сопротивлений напряжение подается на второй делитель, состоящий из сопротивления утечки сетки R_6 и сопротивления нагрузки фотоэлектронного умножителя R_3 . С сопротивления R_3 напряжение обратной связи вместе с входным сигналом поступает на сетку лампы.

На рис. XII-10 показаны частотные характеристики, которые могут быть получены с помощью цепей коррекции в усилителе 90У-2. Кривая I применяется тогда, когда усилитель работает с кинопроекторами К-13. Входная емкость фотошлангов шунтирует сопротивление R_3 . В этом случае действует автоматическая коррекция обратной связи, выравнивающая частотную характеристику.

Кривые II могут быть получены с помощью регулятора тона в области высоких частот. Для этого в цепь обратной связи включены переменное сопротивление R_9 и конден-

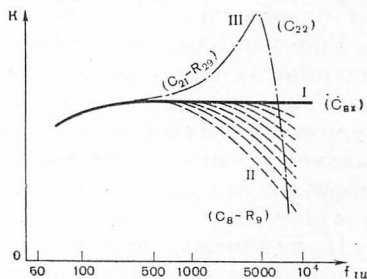


Рис. XII-10. Частотные характеристики усилителя 90У-2: I и II при разомкнутой, III — при замкнутой перемычке коррекции

сатор C_8 . Спад частотной характеристики на высоких частотах необходим для уменьшения шума изношенной фонограммы.

Кривая III получается, когда замыкаются перемычкой контакты 1—2, благодаря чему включается конденсатор C_{21} . Конденсатор шунтирует сопротивления обратной связи R_7 и R_4 . По мере повышения частоты сопротивление конденсатора уменьшается, уменьшается и напряжение обратной связи на R_7 и R_4 , а следовательно, и на R_3 становится меньше, что приводит к подъему частотной характеристики на высоких частотах. Ее подъем на частотах выше 4000 *гц* ограничивается сопротивлением R_{29} , которое включено последовательно с конденсатором C_{21} .

Перемычка с контактами 3—2 позволяет подключить параллельно выходу каскада конденсатор C_{22} . Включение его срезает шумы, лежащие выше 5000 *гц*. При воспроизведении фонограммы 16-мм фильма в этой области уже нет полезного сигнала.

§ 4. РЕГУЛИРОВАНИЕ ГРОМКОСТИ

Регуляторы громкости, или регуляторы усиления, предназначены для установки в зрительном зале кинотеатра требуемого уровня громкости в зависимости от объема зала и его заполнения зрителями.

Громкость может регулироваться двумя принципиально различными способами. Первый заключается в изменении величины усиливаемого сигнала на входе или в одном из промежуточных каскадов и в итоге в изменении величины выходного сигнала. Второй способ состоит в изменении коэффициента усиления схемы, что приводит к тому же результату.

В ламповых усилителях почти всегда применяется первый способ. Величина сигнала обычно меняется с помощью потенциометра, установленного в цепи сетки одной из ламп — движок потенциометра соединен с сеткой лампы. Такое включение потенциометра допустимо потому, что входное сопротивление лампы очень велико и регулировка положения движка изменяет не параметры схемы, а лишь величину сигнала, подаваемого на сетку.

Необходимость иметь регулятор громкости в усилителе вызвана еще тем обстоятельством, что любой усилитель рассчитан на наименьшее возможное в нормальных условиях эксплуатации входное напряжение сигнала,

Когда движок потенциометра приближается к эмиттеру, противосвязь уменьшается и коэффициент усиления каскада возрастает. Недостаток схемы в том, что она не позволяет уменьшить громкость полностью. Кроме того, при изменении величины обратной связи меняется входное сопротивление каскада.

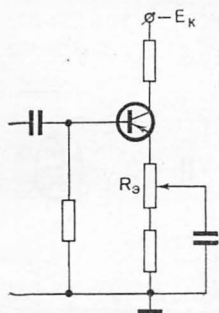


Рис. XII-13. Регулировка громкости переменным эмиттерным сопротивлением

В стационарные усилительные устройства звукового кино обычно входят выносные регуляторы громкости, которые устанавливаются в зрительном зале кинотеатра. Иметь выносной регулятор громкости надо потому, что киномеханик, находящийся в аппаратной, не слышит звука в зале и не может с помощью установочного регулятора установить нужную громкость в зрительном зале.

Пульт 60К35 выносного регулятора громкости показан на рис. XII-14. Выносной регулятор громкости составляет из проволочных или непроволочных резисторов, включенных между контактами переключателя. Переключение производится движком без разрыва цепи.

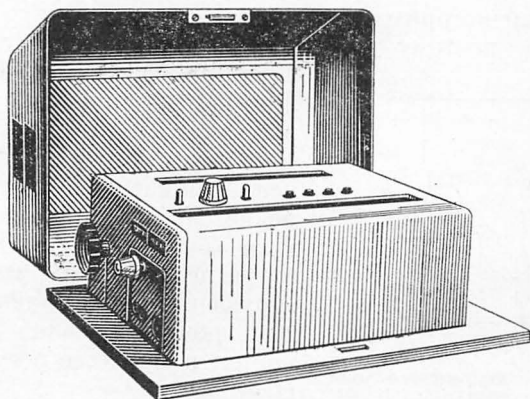


Рис. XII-14. Внешний вид пульта 60К35 с выносным регулятором громкости

Схема включения выносного регулятора громкости показана на рис. XII-15. Выносной регулятор громкости представляет собой сопротивление утечки сетки второго

каскада, вынесенное в зал. Однако если он отключен, то цепь усилителя разорвана и усилитель работать не будет. Для того чтобы этого не произошло, внутри усилителя смонтировано эквивалентное сопротивление R . Для его включения достаточно поставить переключку между кон-

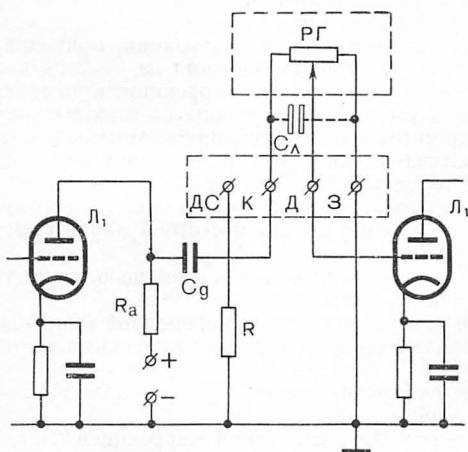


Рис. XII-15. Схема включения выносного регулятора громкости

тактами $ДС-К-Д$, одновременно устраняющую разрыв между каскадами при отключенном регуляторе громкости.

Важным при включении выносного регулятора громкости является то обстоятельство, что линия, соединяющая его с усилителем, обладает большой распределенной емкостью, шунтирующей сопротивление регулятора, что приводит к снижению усиления на высоких частотах.

Для того чтобы частотные искажения, вносимые линией выносного регулятора громкости, не были велики, применяют регуляторы с относительно небольшой величиной сопротивления ($10 \div 30 \text{ ком}$) и в каскаде перед выносным регулятором громкости применяют лампу с малым внутренним сопротивлением (триод или пентод в триодном соединении).

Наиболее эффективна схема катодного повторителя перед выносным регулятором громкости. Выходное сопротивление такого каскада составляет всего $100-300 \text{ ом}$. Уменьшаются при этом и наводки на линию выносного регулятора громкости.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется коррекцией частотной характеристики усилителя?
2. Какими причинами обуславливается необходимость коррекции частотной характеристики усилителя?
3. Перечислите виды коррекции частотной характеристики.
4. Перечислите способы получения коррекции.
5. Объясните простейшие схемы коррекции, приводящие к уменьшению или к увеличению усиления на нижних частотах.
6. Объясните простейшие схемы коррекции, приводящие к уменьшению или к увеличению усиления на верхних частотах.
7. Какой недостаток имеют простейшие схемы коррекции?
8. В каких случаях применяют резонансные фильтры в качестве элементов коррекции?
9. Какие существуют способы использования отрицательной обратной связи для коррекции частотной характеристики усилителя?
10. Объясните схему коррекции с помощью отрицательной обратной связи по току.
11. Нарисуйте и объясните схему переменной коррекции.
12. Объясните назначение переменной коррекции частотной характеристики.
13. Нарисуйте и объясните схему переменной коррекции с помощью отрицательной обратной связи.
14. Что называется автоматической коррекцией?
15. Нарисуйте и объясните схему автоматической коррекции.
16. Объясните схему коррекции частотной характеристики усилителя 90У-2.
17. Объясните назначение регуляторов усиления.
18. Как регулируется усиление?
19. Перечислите виды регуляторов усиления и укажите их особенности.
20. Объясните назначение установочного регулятора громкости, перечислите требования к нему и укажите назначение выносного регулятора громкости.
21. Почему регуляторы громкости не включают на входе или на выходе усилителя?
22. Объясните схему включения выносного регулятора громкости.
23. Перечислите и объясните требования, предъявляемые к каскаду, после которого следует выносной регулятор громкости.
24. Объясните устройство выносных регуляторов громкости усилителей звукового кино и перечислите требования, предъявляемые к ним.

ГЛАВА XIII

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

§ 1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬ

Громкоговорителем называется преобразователь электрических колебаний звуковой частоты в звуковые колебания.

По способу преобразования громкоговорители подразделяются на электродинамические, электромагнитные, пьезоэлектрические и электростатические. В настоящее время в кинотехнике, как и радиовещании, применяются почти исключительно громкоговорители электродинамической системы. Поэтому здесь рассматриваются принцип действия и устройство только электродинамических громкоговорителей.

Работа электродинамического громкоговорителя основана на законе взаимодействия между проводником с током и магнитным полем.

Пусть между северным и южным полюсами магнита в горизонтальном направлении проходят магнитные силовые линии (рис. XIII-1). В магнитном поле в горизонтальном положении помещен проводник длиной l , через кото-

рый проходит электрический ток I , вызывающий появление вокруг проводника магнитного поля, силовые линии которого направлены по окружности вокруг проводника. В итоге взаимодействия обоих магнитных полей (т. е. поля, в котором находится проводник, и поля самого проводника) возникает механическая сила, стремящаяся двигать проводник в магнитном поле.

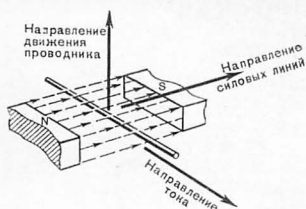


Рис. XIII-1. Проводник с током в магнитном поле

Направление движения проводника, как известно, перпендикулярно направлению тока и направлению силовых линий магнитного поля. Если в проводнике переключить направление тока на обратное, то направление движения также изменится. Это легко проверить, применяя правило левой руки.

Сила, действующая на провод, тем больше, чем больше индукция магнитного поля B , сила тока I в проводнике и его длина l , т. е. $F=0,1 BIl$.

Основанная на использовании взаимодействия проводника с током, помещенного в магнитное поле, электродинамическая головка громкоговорителя состоит из следующих основных элементов:

- а) подвижной системы,
- б) магнитной системы,
- в) поддерживающих и закрепляющих деталей (шайбы, диффузородержателя и др.).

На рис. XIII-2 показана одна из конструкций головки.

Магнитная система представляет собой сочетание магнитопровода и магнита. Она состоит из стального стакана 1 и 2 , в дне которого укреплен стальной цилиндрический сердечник — kern 3 . Стакан снабжен крышкой 4 , называемой верхним фланцем. Верхний фланец имеет круглое отверстие такого диаметра, что между ним и керном образуется воздушный зазор. Kern или стакан представляют собой постоянный магнит.

Воздушный зазор пересекается радиальным потоком силовых линий. В этот воздушный зазор помещается проводник, намотанный в несколько слоев на цилиндрический бумажный или изготовленный из алюминиевой фольги легкий каркас 6 .

Каркас с намотанным на него проводом называется звуковой, или подвижной, катушкой. Звуковая катушка подвешивается в воздушном зазоре с помощью центрирующей шайбы 5 таким образом, что может перемещаться вдоль воздушного зазора, но не в стороны.

Если через звуковую катушку пропустить переменный ток звуковой частоты, то под влиянием взаимодействия

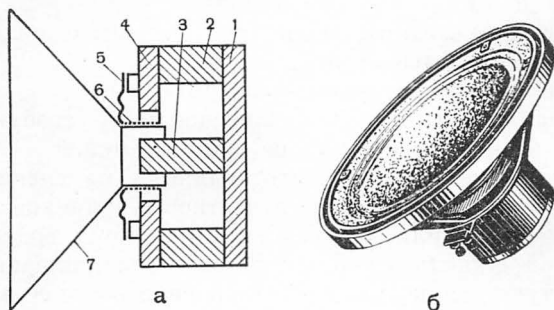


Рис. XIII-2. Разрез диффузорного электродинамического громкоговорителя (а) и его внешний вид (б)

(звуковая катушка рассматривается нами как проводник с током) между магнитным потоком и током в проводнике звуковая катушка будет смещаться вдоль воздушного зазора, причем направление ее перемещения будет меняться с частотой переменного тока.

Следовательно, пропуская через звуковую катушку ток звуковой частоты (от усилителя), мы заставляем катушку совершать движения вдоль воздушного зазора с частотой подводимого тока и амплитудой, пропорциональной амплитуде силы тока в каждый данный момент.

Таким образом, под действием э. д. с. звуковой частоты, подводимой от усилителя, происходят механические колебания звуковой катушки с той же частотой, т. е. происходит преобразование механических колебаний звуковой катушки в акустические, в колебания частичек воздуха, воспринимаемые при своем распространении органами нашего слуха как звук.

В диффузорном громкоговорителе для выполнения этой задачи служит диффузор, который представляет собой изготовленный путем литья из бумажной массы конус 7.

К вершине конуса прикрепляется (приклеивается) звуковая катушка. Колеблющаяся в зазоре магнитной цепи звуковая катушка заставляет колебаться и скрепленный с ней диффузор, который, в свою очередь, передаст колебания окружающему воздуху. Катушка вместе с диффузором составляет подвижную систему.

Таким образом, нами рассмотрены принцип действия электродинамической головки громкоговорителя и основные детали, из которых она состоит.

Магнитная система. Магнитные системы головок громкоговорителей бывают двух видов:

- 1) системы с постоянными магнитами и
- 2) электромагниты, имеющие катушку возбуждения, которые в настоящее время не применяются.

Постоянные магниты изготавливаются из специальных сортов стали или сплавов, в частности широкое распространение получили сплавы альни и альнико, содержащие алюминий, никель и кобальт. Применение сплавов позволяет получить в зазоре магнитной цепи высокое значение магнитной индукции (до 20 000 гс*).

В магнитных цепях с электрическим возбуждением по катушке электромагнита протекает постоянный ток.

Основным требованием, предъявляемым к обоим видам магнитной цепи, является получение возможно большей индукции магнитного поля в воздушном зазоре, так как чем больше индукция поля, тем больше будет при одном и том же токе через звуковую катушку и механическая сила, приводящая подвижную систему в движение ($F=0,1 B \cdot I \cdot l$).

Величина индукции поля зависит от ряда факторов: размеров воздушного зазора, объема магнита, сорта материала для магнитной системы и др.

Цепи с постоянными магнитами имеют разнообразные конструкции (рис. XIII-3). С эксплуатационной точки зрения преимущества применения постоянных магнитов очевидны:

- 1) постоянные магниты не требуют электрической мощности для создания магнитного поля. Следовательно, при

* Гаусс (гс) — единица магнитной индукции в системе единиц СГС (сантиметр, грамм, секунда). Единицей магнитной индукции по Международной системе единиц (СИ) (ГОСТ 9867 — 61) установлена тесла (тл). $1 \text{ тл} = (1 \text{ вб}) : (1 \text{ м})^2$. Соотношение между единицами магнитной индукции систем СГС и СИ такое: $1 \text{ гс} = 10^{-4} \text{ вб/м}^2 = 1 \text{ тл}$.

их применении устраняется необходимость в дополнительных источниках постоянного тока, что особенно важно в передвижных устройствах;

2) громкоговорители с постоянными магнитами не вносят в передачу помех в виде фона, который обычно

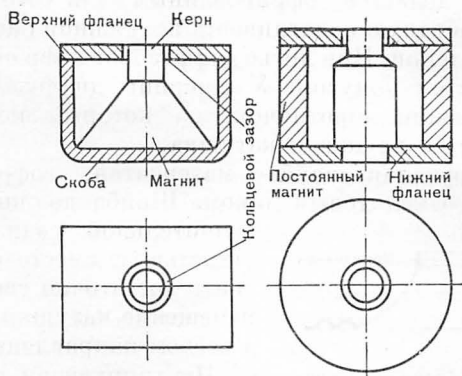


Рис. XIII-3. Магнитные системы головок громкоговорителей с постоянными магнитами

вносят конструкции с электромагнитом, если катушка возбуждения питается плохо сглаженным выпрямленным током. Такой фон появляется в результате того, что в звуковой катушке индуктируется некоторая э. д. с. за счет пульсаций выпрямленного тока;

3) отпадает необходимость в дополнительной линии аппаратная — зрительный зал при монтаже киноустановки.

Подвижная система.

Центрирующая шайба 1, диффузор 2 и звуковая катушка образуют подвижную систему (рис.

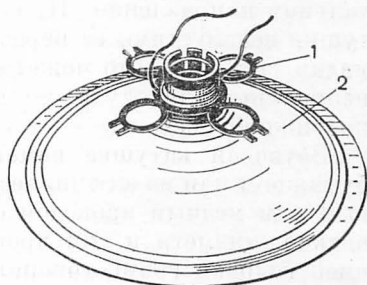


Рис. XIII-4. Подвижная система громкоговорителя

XIII-4) головки диффузорного громкоговорителя. Диффузор представляет собой конус с криволинейной или прямой образующей. Диффузоры изготавливаются осаждением жидкой бумажной массы на специальные формы с последующей просушкой. Этот способ дает возможность

изменять в широких пределах состав бумажной массы и, следовательно, физические свойства материала диффузора, от которых зависят его акустические качества: плотность, упругость, внутреннее трение. Внешнее кольцо, которым диффузор (рис. XIII-5) закрепляется в ободке диффузородержателя, делается гофрированным, для того чтобы обеспечить свободную податливость подвижной системы в осевом направлении. При литье диффузоров гофр обычно отливается вместе с конусом. У вершины диффузора имеется цилиндрический воротничок, на который надевается и приклеивается звуковая катушка.

Центрирующая шайба матерчатая, гофрированная, пропитана бакелитовым лаком. Шайба должна обладать значительной радиальной жесткостью и вместе с тем допускать достаточно свободное перемещение катушки с конусом в осевом направлении.

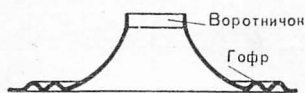


Рис. XIII-5. Диффузор с криволинейной образующей

Центрирующая шайба прикрепляется к верхнему фланцу магнитной системы посредством специальных стоек и двух или трех винтов. Назначение центрирующих деталей заключается в сохранении положения подвижной катушки во время движения в середине зазора и создании жесткости шайбы в горизонтальном направлении. При колебательном движении катушки недопустимы ее перекосы и трение о стенки деталей магнитной цепи, что может вызвать не только искажения, неприятные для слуха, но и механические повреждения подвижной системы.

Звуковая катушка наматывается на цилиндрическом бумажном или из алюминиевой фольги каркасе алюминиевым или медным проводом с эмалевой изоляцией. Число витков, диаметр и тип провода определяются конструкцией головки громкоговорителя и выходным сопротивлением усилителя, в комплекте с которым должен работать громкоговоритель.

Так, например, звуковая катушка диффузорной головки 2А-9 наматывается медным эмалированным проводом ПЭ $\varnothing 0,12$ мм на каркас из алюминиевой фольги толщиной 0,2 мм.

Каркас, представляющий собой незамкнутый цилиндр, имеет специальную канавку для размещения катушки. Благодаря этому, а также благодаря тщательной про-

клейке катушки при намотке механическая прочность ее весьма велика.

Концы звуковой катушки укрепляются на диффузоре, спаиваются с мягким многожильным проводом, который, в свою очередь, припаивается к контактам на диффузородержателе. На катушку намотано 240 витков в четыре слоя. Наружный диаметр катушки не более 54,4 мм. Внутренний диаметр катушки 51,8 мм. Высота намотки 18 мм. Сопротивление звуковой катушки постоянному току 12 ± 1 ом. Полное сопротивление звуковой катушки на частоте 200 гц 18 ± 2 ом.

Намотка звуковой катушки производится в несколько — два-четыре — слоев (четное число) так, чтобы выводные концы выходили на одну сторону. При намотке каждый слой тщательно приклеивается специальным клеем для закрепления витков звуковой катушки на каркасе.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

В системе воспроизведения звука громкоговоритель является завершающим элементом — источником, создающим звуковое давление под действием подведенных к нему электрических колебаний.

Об отдаче громкоговорителем подведенной к нему электрической энергии можно судить по одной из двух величин: величине чувствительности или величине к. п. д.

Чувствительность E громкоговорителя обычно оценивается по величине звукового давления p , которое создает громкоговоритель на определенном расстоянии по оси (принято определять чувствительность на расстоянии 1 м) при определенном подводимом к нему напряжении U :

$$E = \frac{p}{U} \left(\frac{\sigma_{ap}}{s} \right).$$

Это понятие еще ничего не говорит о коэффициенте полезного действия громкоговорителя, но очень удобно для сравнения различных громкоговорителей. Но по величине чувствительности можно сравнивать между собой только головки громкоговорителей с равным сопротивлением звуковых катушек. Нельзя сравнивать по чувствительности головки с различными сопротивлениями.

Сравнение оказывается, однако, возможным, если мы будем брать отношение звукового давления не к напряжению на клеммах громкоговорителя, а к квадратному корню из подводимой электрической мощности:

$$\sqrt{P} = \frac{U}{\sqrt{z}}.$$

Тогда получим величину, характеризующую эффективность электроакустического преобразования гораздо лучше, нежели чувствительность:

$$E_{\text{абс}} = \frac{P}{\sqrt{P}} = \frac{P}{U} \cdot \sqrt{z} = E \cdot \sqrt{z}.$$

Величина $E_{\text{абс}}$ называется *абсолютной чувствительностью*.

Во время работы головки громкоговорителя электрическая мощность подводится к ней не в виде синусоидального переменного тока, а в виде тока сложной формы, соответствующей звуковому сигналу, записанному на фонограмме. Поэтому в отдельные, очень короткие отрезки времени, подводимая мощность может быть гораздо выше номинальной. Наибольшая мгновенная мощность тока звуковой частоты называется *пиковой*.

Коэффициент полезного действия. Под к. п. д. головки громкоговорителя принято понимать отношение излучаемой акустической мощности P_a к подводимой электрической мощности P . К. п. д. выражается в процентах:

$$\text{к. п. д.} = \frac{P_a}{P} \cdot 100\%.$$

Эта величина, показывающая, какую долю подводимой к громкоговорителю электрической мощности он превращает в мощность акустическую, характеризует эффективность электроакустического преобразования. Обычно к. п. д. громкоговорителя не высок — не выше нескольких процентов.

Так как измерить акустическую мощность очень сложно и, следовательно, трудно определять к. п. д. громкоговорителя, то об эффективности громкоговорителя косвенно судят по его чувствительности.

Частотная характеристика. Основным требованием к громкоговорителю является одинаковая степень его отдачи на всем диапазоне воспроизводимых частот, т. е. чувствительность громкоговорителя должна быть не только

достаточно высокой, но и не должна сильно отклоняться от средней величины для всего диапазона частот.

Зависимость чувствительности громкоговорителя от частоты называется частотной характеристикой громкоговорителя и обычно изображается в виде кривой, нанесенной в системе координат. На оси абсцисс откладываются частоты (чаще всего в логарифмическом масштабе для сокращения графика), на оси ординат — величины чувствительности или звукового давления, развиваемого громкоговорителем (рис. XIII-6).

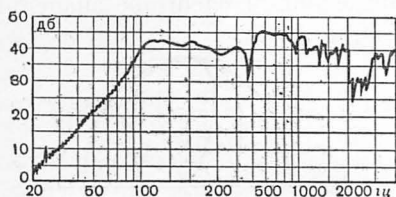


Рис. XIII-6. Частотная характеристика громкоговорителя

Важной величиной является неравномерность частотной характеристики (отклонения от некоторого среднего уровня). Она позволяет судить о величине частотных искажений, которые вносятся громко-

говорителем во время его работы. Обычно определяют неравномерность в каком-то диапазоне частот и указывают эти границы в относительных единицах — децибелах.

В технических данных часто не приводится график, а ход частотной характеристики записывают словами, например: «Неравномерность частотной характеристики в рабочем диапазоне частот $40 \div 10\,000$ гц не превышает 16 дб».

Нелинейные искажения. При работе громкоговоритель, являющийся нелинейной системой, помимо частотных вносит еще и нелинейные искажения. Нелинейные искажения прослушиваются как хрипы, дребезжания и другие неприятные звуковые ощущения. В условиях воспроизведения речи и музыки подводимая к громкоговорителю мощность распределена по различным областям частот неравномерно. Наибольшие пиковые мощности приходятся на область от 250 до 500 гц — для симфонической музыки и на область от 500 до 1000 гц — для речи. На области нижних и верхних частот приходится относительно очень небольшая доля общей пиковой мощности. Поэтому к громкоговорителю не предъявляются требования иметь одинаково малый коэффициент нелинейных искажений во всем диапазоне частот, в частности в области низких частот. Считается допустимым, чтобы на частотах меньше

50 гц коэффициент нелинейных искажений составлял $10 \div 15\%$, в диапазоне 50—100 гц — $3 \div 5\%$ и на частотах свыше 100 гц — до 1%.

Направленность. Громкоговоритель обладает свойством направленности действия, т. е. по-разному излучать звуковую энергию в разных направлениях.

Характеристика направленности диффузорного электродинамического громкоговорителя показана на рис. XIII-7. Диаграмма строится следующим образом: на градусную сетку наносят в определенном масштабе значения

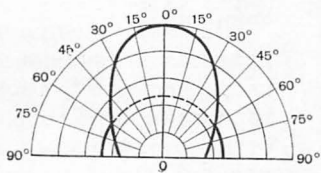


Рис. XIII-7. Характеристика направленности диффузорного громкоговорителя

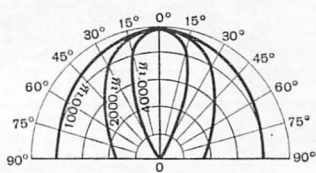


Рис. XIII-8. Характеристики направленности диффузорного громкоговорителя для различных частот

звукового давления, измеренные на одном и том же расстоянии от громкоговорителя, но под разными углами к его оси (направление этой оси соответствует отметке 0°). Полученные точки соединяют плавной кривой, представляющей характеристику направленности. Форма характеристики направленности громкоговорителя зависит от его размеров по сравнению с длиной волны, которую он излучает, и от вида акустического оформления.

На рис. XIII-8 приведен ряд характеристик направленности диффузорного громкоговорителя для различных частот. Из кривых видно, что с увеличением частоты громкоговоритель превращается из ненаправленного в остронаправленный. Эта особенность является одним из недостатков диффузорных громкоговорителей.

§ 3. РАБОТА ДИФFUЗОРНОГО ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ СО ЩИТОМ И В ЯЩИКЕ

При работе диффузорного громкоговорителя на низших частотах наблюдается снижение отдачи в этой области частот, т. е. значительная неравномерность частотной характеристики звукового давления.

Объясняются эти явления отчасти интерференцией между звуковыми волнами от передней и задней сторон диффузора. Двигаясь вперед, диффузор сжимает воздух перед собой и разрежает его позади себя. В результате этих сжатий и разрежений воздуха, прилегающего к диффузору, создаются звуковые волны, которые различаются по фазе на 180° , что соответствует половине длины волны ($\lambda/2$).

Если в точку пространства, где производится прослушивание звука, придут обе волны — прямая и огибающая — от задней стороны диффузора, то, накладываясь одна на другую, они взаимно почти полностью уничтожатся и звук будет резко ослаблен. Такой эффект называется акустическим коротким замыканием (рис. XIII-9). При этом вместо того, чтобы возбудить звуковые волны, распространяющиеся дальше, диффузор будет перегонять воздух с одной стороны на другую.

Акустическое короткое замыкание проявляется только в области самых низких звуковых частот (до 300 *гц*), при которых размеры диффузора малы по сравнению с длинами этих волн. Для более высоких звуковых частот, при которых длина волны меньше, воздействие волны от задней стороны диффузора ослабляется самим диффузором.

Так, например, если громкоговоритель 4A18/A от киноустановки «Украина» излучает звук частотой $f=700$ *гц*, то длина волны звука этой частоты

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340 \cdot 100}{700} \approx 50 \text{ см.}$$

Так как диаметр рабочей части диффузора громкоговорителя 4A18/A равен 200 *мм*, то для прихода в точку прослушивания, находящуюся на оси громкоговорителя, волна от задней стороны диффузора должна пройти путь, приблизительно на 200 *мм* больший, чем волна от передней его стороны (рис. XIII-10). Из-за этой разницы пути звуковая волна от задней стороны диффузора придет в точку приема с дополнительным сдвигом фазы, который будет определяться отношением разности длины путей от передней и задней сторон диффузора к длине волны.

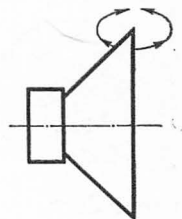


Рис. XIII-9. Акустическое короткое замыкание

Дополнительный сдвиг фазы в нашем примере составит:

$$\varphi_{\text{доп}} = \frac{200}{500} = 0,4\lambda.$$

Поскольку звуковая волна от задней стороны диффузора всегда сдвинута по фазе на $0,5\lambda$, результирующий

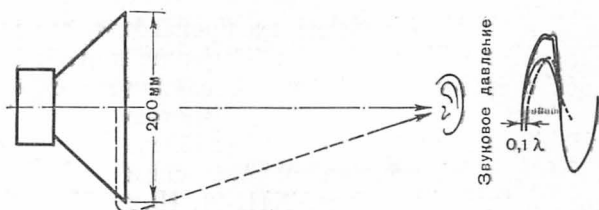


Рис. XIII-10. Интерференция между звуковыми волнами от передней и задней сторон диффузора

сдвиг фазы рассматриваемой волны по отношению к волне от передней стороны диффузора составит:

$$\varphi_{\text{общ}} = 0,4\lambda + 0,5\lambda = 0,9\lambda.$$

Это означает, что волны от обеих сторон диффузора придут в точку приема почти в одинаковой фазе (сдвиг фазы составит $0,1\lambda$) и сложатся, в результате чего звуковое давление возрастет. Для звука частотой 50 *гц* ($\lambda = 680$ *см*) при том же диаметре диффузора создается условие, при котором сдвиг фазы вследствие огибания диффузора составит всего лишь

$$\varphi'_{\text{доп}} = \frac{20}{680} \approx 0,03\lambda,$$

а общий сдвиг фазы

$$\varphi'_{\text{общ}} = 0,03\lambda + 0,5\lambda = 0,53\lambda.$$

При таком сдвиге фазы звуковые волны от обеих сторон диффузора будут вычитаться одна из другой, и звуковое давление резко упадет.

Из примера следует, что если общий сдвиг фазы волны от задней стороны диффузора в точке приема равняется целому числу длин волн (λ , 2λ , 3λ и т. д.), то эта волна будет складываться с волной от передней стороны диффузора, и звук будет усиливаться; если же сдвиг фазы равен

нечетному числу полуволин ($0,5\lambda$; $1,5\lambda$; $2,5\lambda$ и т. д.), то волны будут вычитаться и звук будет ослабляться.

Вычитание и сложение звуковых волн различных частот в точке их приема создают максимумы и минимумы (подъемы и провалы) звукового давления. Наибольшая неравномерность частотной характеристики звукового давления наблюдается вдоль оси диффузора при осевой симметрии громкоговорителя. Это происходит потому, что при этом сдвиг фазы звуковой волны за счет огибания будет одинаковым вокруг всего диффузора (громкоговорителя).

В стороне от оси громкоговорителя из-за разницы в длине пути для волн от различных частей диффузора до точки прослушивания сдвиг фазы волны от обратной стороны диффузора также оказывается различным. Поэтому сбоку от оси громкоговорителя провалы и подъемы частотной характеристики звукового давления, развиваемого громкоговорителем, сглаживаются и характеристика получается более ровной.

Чтобы устранить крайне нежелательное явление интерференции волн низших частот передней и задней сторон диффузора, применяют различные виды акустического оформления громкоговорителей: акустический экран (щит), открытый или закрытый ящик, фазоинвертор и направляющий рупор.

Акустический экран. Наиболее простым способом борьбы с акустическим коротким замыканием и интерференцией в области низших частот является установка головки громкоговорителя в акустический деревянный щит. Размеры прямоугольного щита должны быть довольно большими. Например, для воспроизведения без ослабления звука частоты 50 *гц*, длина волны которого равна 680 *см*, нужно, чтобы сторона экрана приблизительно равнялась половине длине волны, т. е. более 3 *м*.

Нежелательна также симметричность экрана относительно оси диффузора, так как при этом в частотной характеристике громкоговорителя появится глубокий провал в результате акустического короткого замыкания. Значительное улучшение частотной характеристики достигается или несимметричным экраном, или асимметричным расположением громкоговорителя в экране правильной формы.

Ящик. Громкоговоритель можно поместить в ящик, который с открытой задней стенкой эквивалентен пло-

скому акустическому экрану со стороны $d=a+2\epsilon$. Глубина ϵ равна 0,125 длины волны низшей воспроизводимой частоты (рис. XIII-11). Такие ящики с открытой задней стенкой применяют в комплекте кинопередвижек, например в кинопередвижке «Украина». Раскрытый ящик можно рассматривать как некоторое подобие акустического экрана.

Наряду с ящиками, имеющими открытую заднюю стенку, применяют и ящики с закрытой задней стенкой, которые отличаются по своему влиянию на частотную характеристику излучения громкоговорителя от акустического экрана. На первый взгляд закрытая задняя стенка должна улучшать воспроизведение низших частот тем, что она исключает излучение от задней стороны диффузора. Однако упругость находящегося в ящике объема воздуха, особенно если этот объем не слишком велик, складывается с упругостью подвижной системы громкоговорителя и повышает его резонансную частоту, чем ухудшает отдачу на низших частотах.

Кроме того, замкнутый объем воздуха вызывает дополнительные резонансные явления на более высоких частотах, уменьшающие равномерность частотной характеристики громкоговорителя. Для устранения дополнительных резонансов, создаваемых воздушным объемом ящика, применяют покрытие внутренних поверхностей ящика звукопоглощающим материалом.

Фазоинвертор. В стационарных киноустановках широкое распространение получило акустическое оформление громкоговорителей в фазоинверторах — разновидности закрытого ящика, имеющего отверстие на одной стороне с головкой громкоговорителя, и по величине приблизительно равное площади диффузора. Отверстие служит для использования излучения задней стороны диффузора громкоговорителя и увеличивает отдачу на низких частотах.

Идея устройства сводится к тому, чтобы обратить (или, как иначе можно сказать, инвертировать) фазу излучения оборотной стороны диффузора. При этом волна, излучае-

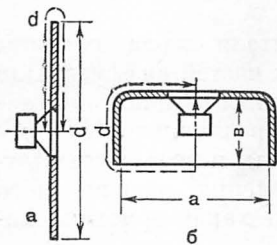


Рис. XIII-11. Размещение громкоговорителя: а — на экране с расчетным размером d ; б — в ящике с эквивалентным размером $d=a+2\epsilon$

мая передней стороной диффузора, и волна, выходящая из ящика с обращенной фазой, имеют вблизи от ящика одинаковые фазы, и их интерференция уже не приводит к ослаблению звука.

На рис. XIII-12 показана схема фазоинвертора. Работает он следующим образом. Когда конус диффузора движется от магнитной системы, создавая вне ящика сжатие, воздух в отверстии движется наружу, так же создавая перед отверстием сжатие. Напротив, когда конус движется к магнитной системе, создавая вне ящика разрежение, воздух в отверстии движется внутрь ящика и перед отверстием получается тоже разрежение.

Таким образом и происходит желаемое обращение (инверсия) фазы излучения оборотной стороны диффузора и устраняются невыгодные последствия интерференции прямой и обратной волн. Происходит это потому, что диффузор громкоговорителя связан через упругость воздушного объема ящика с массой воздуха в отверстии. Масса воздуха в отверстии ведет себя подобно диффузору, являясь дополнительным излучателем звука. Отдача увеличивается преимущественно на резонансной частоте объема фазоинвертора, которая выбирается равной или несколько ниже основной резонансной частоты головки громкоговорителя.

Хорошо рассчитанный и изготовленный фазоинвертор не только улучшает частотную характеристику звуковоспроизведения в области низших частот, но и способствует уменьшению нелинейных искажений вблизи частоты резонанса головки громкоговорителя.

Так как эффективная площадь диффузора мощных современных громкоговорителей (а в мощных системах устанавливается несколько головок) значительна, то и объем фазоинвертора достигает значительных размеров, что наглядно видно на фотографии заэкранированных громкоговорителей, установленных в кинотеатре «Россия» в Москве (рис. XIII-13).

Рупор — весьма распространенный акустический элемент, согласующий относительно высокое полное акусти-

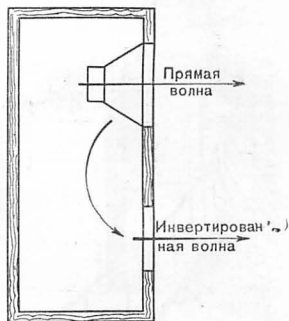


Рис. XIII-12. Схема фазоинвертора

ческое сопротивление громкоговорителя с довольно низким сопротивлением нагрузки, т. е. воздушной средой.

Причина незначительной эффективности заключается в том, что источник звука сравнительно небольших размеров излучает шаровую волну, которая расходится по всем направлениям от источника. Энергия, отдаваемая источ-

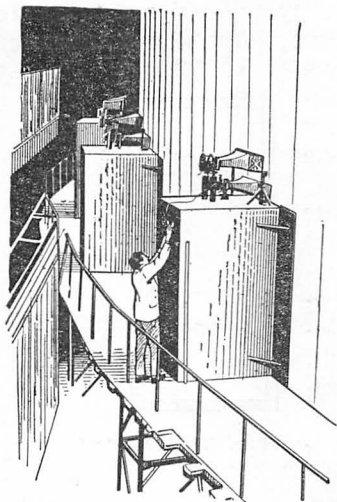


Рис. XIII-13. Заэкранные громкоговорители в кинотеатре «Россия»

ником, распределяется по поверхности, возрастающей с квадратом расстояния от источника, вследствие чего амплитуда звукового давления вблизи от излучателя очень быстро падает.

Если заставить излучатель звука работать на рупор, т. е. на трубу постепенно возрастающего сечения, то закон уменьшения амплитуды с расстоянием определяется уже формой рупора. Выбирая ту или иную форму рупора, можно получить довольно медленное убывание амплитуды звукового давления вблизи излучателя. С помощью рупора соответствующей формы удастся нагрузить излучатель до-

вольно большим сопротивлением излучения, зависящим от частоты лишь в очень незначительной степени.

Какую же форму нужно придать рупору, чтобы получить наиболее благоприятный закон убывания давления с расстоянием?

В своей начальной части рупор должен расширяться очень медленно, чтобы вблизи от расположенного там излучателя звуковое давление не уменьшалось слишком резко. Оконечное отверстие (устье) рупора, где звуковая волна переходит в неограниченное пространство, должно быть достаточно велико с целью избежать скачкообразного изменения давления на границе рупора с внешней средой; в противном случае значительная часть энергии волны отразится от оконечного отверстия обратно в рупор.

Этим требованиям наиболее полно отвечает экспоненциальный рупор. Его сечение возрастает тем медленнее,

чем оно меньше, и, значит, тем быстрее, чем оно больше. Другими словами, при переходе на заданный отрезок осевой длины рупора его сечение должно увеличиваться в одно и то же число раз, где бы ни выбрать этот отрезок. На рис. XIII-14 изображен разрез такого рупора; его сечение увеличивается в 2,09 раза при переходе на каждые 10 см в сторону от горла.

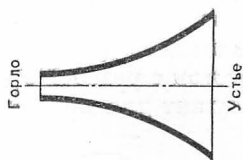


Рис. XIII-14. Экспоненциальный рупор

Роль рупора хорошо видна из рассмотрения рис. XIII-15, где показано, как уменьшается звуковое давление в экспоненциальном рупоре по мере удаления от излучателя (кривая а); на том же графике для сравнения представлено убывание давления в шаровой волне, т. е. в том случае, когда рупор снят (кривая б).

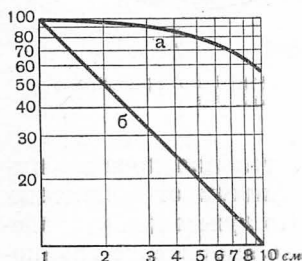


Рис. XIII-15. Ход уменьшения звукового давления в экспоненциальном рупоре (а) и шаровой волне (б)

Несмотря на то, что рупор увеличивает к. п. д. громкоговорителя, для эффективного воспроизведения низких звуковых частот он должен быть значительных размеров, что и составляет главный недостаток этого вида акустического оформления.

Поэтому в настоящее время рупорные громкоговорители находят широкое применение в качестве высокочастотных звеньев в двух- и трехполосных акустических агрегатах, так как для воспроизведения высших частот размеры рупора и всего громкоговорителя должны быть небольшими.

На рис. XIII-16 показано устройство высокочастотной головки нормального рупорного громкоговорителя.

Подвижная система состоит из звуковой катушки 1, жестко связанной с металлической диафрагмой 2, имеющей форму невысокого сферического купола; сферическая форма придается диафрагме для жесткости. Звуковая катушка наматывается алюминиевым проводом. Плоский воротник диафрагмы зажимается по окружности, сообщая подвижной системе необходимую податливость в осевом направлении. Рупор 3, начинающийся внутри керн, со-

единяется с предрупорной камерой 4 посредством радиальных каналов 5 (об их значении будет сказано позднее).

Магнитная система имеет центральный керн 6. Керн является одним из полюсов магнитной системы, другой полюс — передний фланец. В кольцевом зазоре между керном и передним фланцем, где проходят магнитные силовые линии, помещается звуковая катушка. Крышка 8 защищает диафрагму от механических повреждений. Отросток с резьбой 9 на заднем фланце 7 магнитной системы служит для привертывания рупора.

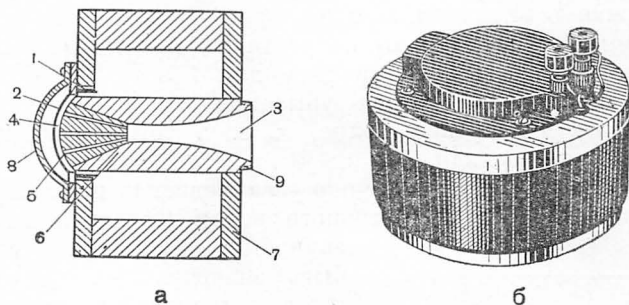


Рис. XIII-16. Высокочастотная головка рупорного громкоговорителя: а — разрез; б — общий вид

Воздушные каналы в горловине головки должны выравнивать пути, проходимые колебаниями от различных точек диафрагмы до горла рупора. Это нужно для устранения резких провалов в частотной характеристике громкоговорителя, которые могут происходить из-за разности расстояний от различных частей диафрагмы до горла рупора. Каналы выравнивают эти длины путей.

Рассмотрим некоторые показатели рупорного громкоговорителя.

Хорошие рупорные громкоговорители имеют довольно высокую отдачу (до 10 %) в области средних частот. Максимальное значение отдачи имеет на частоте резонанса подвижной системы (обычно в области 500—800 *гц*). Однако рупорный громкоговоритель не может создать равномерного воспроизведения необходимой в звуковом кино полосы частот. В области высоких звуковых частот отдача рупорного громкоговорителя уменьшается по мере роста частоты, что объясняется влиянием массы подвижной системы, которая не может быть сделана достаточно легкой.

Подвижная система, масса которой составляет 3—5 г, оказывает инерциальное сопротивление. Сделать подвижную систему более легкой нельзя, так как она, во-первых, будет даже при слабых колебаниях ударяться о стенки предрупорной камеры и возникнут нелинейные искажения, а во-вторых, это приведет к снижению мощности громкоговорителя.

Рупорный громкоговоритель имеет еще одно важное свойство — более равномерную направленность излучения на разных частотах по сравнению с диффузорным громкоговорителем.

Более или менее ясно выраженная направленность излучения, сохраняющая постоянство своей характеристики в возможно более широком диапазоне частот, дает возможность направить прямую звуковую энергию на зрительские места, до известной степени устраняя совершенно бесполезный разброс акустической мощности по поверхности, ограничивающей зрительный зал.

Это свойство широко используется для создания громкоговорителей с направляющим рупором. Головка такого громкоговорителя представляет собой обычный диффузорный громкоговоритель с конусом несколько меньшего размера. В этом случае повышается к. п. д. громкоговорителя.

ДВУХПОЛОСНЫЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

При рассмотрении работы диффузорного громкоговорителя указывался ряд его недостатков. Одним из них является трудность получения удовлетворительной частотной характеристики во всем диапазоне частот. Чтобы воспроизвести низкие частоты, подвижная система должна быть, очевидно, тяжелой, а упругость ее крепления — небольшой. Для воспроизведения высоких частот предъявляются обратные требования.

Применение только рупорных громкоговорителей имеет также свои неудобства, так как для излучения низких частот необходимо, чтобы рупор был гигантских размеров, в то время как высокие частоты могут воспроизводиться очень небольшими рупорами. Это обстоятельство навело на мысль о возможности применения для воспроизведения всего необходимого диапазона частот комбина-

ции из двух или более громкоговорителей различных конструкций.

Одним из таких акустических агрегатов явилось объединение диффузорного громкоговорителя для воспроизведения низких частот с относительно небольшим рупорным громкоговорителем для воспроизведения высоких частот. В низкочастотном громкоговорителе обычно применяется головка диффузорного типа, работающая в фазоинверторе.

Необходимо отметить, что соединение элементов агрегата с усилителем отличается от обычного метода включения громкоговорителей. В агрегате, как уже указывалось, имеются по крайней мере два элемента (высокочастотный и низкочастотный). Следовательно, кроме включения двух

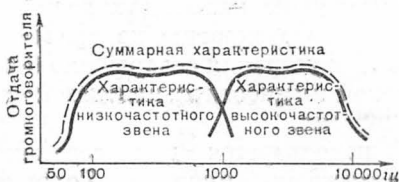


Рис. XIII-17. Частотные характеристики двухполосных громкоговорителей

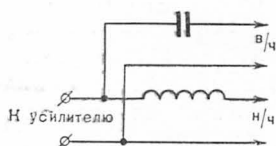


Рис. XIII-18. Схема простого разделительного фильтра

или нескольких агрегатов в цепь усилителя нужно включить между собой элементы самого агрегата. Схема включения элементов комбинированного громкоговорителя должна быть устроена так, чтобы полная подводимая от усилителя мощность делилась соответственно между низкочастотным и высокочастотным элементами.

Кроме того, диапазоны частот, воспроизводимые обоими элементами, должны быть строго разграничены.

Для разделения частотного диапазона между двумя элементами нужно, чтобы частотные характеристики обоих элементов дополняли друг друга. Например, если низкочастотный элемент должен воспроизводить частоты от 50 до 1000 *гц*, а высокочастотный — от 1000 до 10 000 *гц*, желательно, чтобы спады частотной характеристики низкочастотного и высокочастотного звеньев имели большую крутизну в нерабочей зоне для уменьшения зоны совместной работы звеньев (рис. XIII-17).

Для этого включение двух звеньев агрегата обычно производится с помощью специального фильтра, служащего для разделения диапазона частот между обоими

звеньями. Схема включения разделительного фильтра показана на рис. XIII-18.

Звуковая катушка высокочастотного громкоговорителя соединяется с выходом усилителя через последовательно включенный конденсатор. Обладая большим сопротивлением на низких частотах, конденсатор ограничивает подводимую к громкоговорителю энергию в этом диапазоне частот. На более высоких частотах влияние конденсатора постепенно уменьшается, так как его сопротивление падает при увеличении частоты.

Помимо уменьшения отдачи высокочастотного громкоговорителя на низких частотах конденсатор защищает громкоговоритель от попадания тока низкой частоты, который излишне перегружал бы его.

Низкочастотный громкоговоритель включается при помощи последовательно включенной индуктивной катушки. Ее роль заключается в ограничении попадающей на низкочастотный громкоговоритель энергии сравнительно высоких частот.

В современных двухполосных громкоговорителях крутизна спада частотной характеристики разделительного фильтра равна 12 ± 2 дБ на октаву. Частота, на которой мощность делится поровну между громкоговорителями, называется частотой деления. Частота деления, например, фильтра двухполосных громкоговорителей комплекта звуковоспроизведения «Звук» равна 1200 гц.

Многоячейковый секционированный рупор. Как мы уже знаем, высокочастотный рупорный громкоговоритель имеет узкую характеристику направленности на высших частотах. Для расширения характеристики направленности применяют секционированный рупор, в результате него высокочастотный рупорный громкоговоритель превращается в пучок примыкающих друг к другу рупоров меньшего сечения, оси которых прямолинейны и располагаются веро́м (рис. XIII-19).

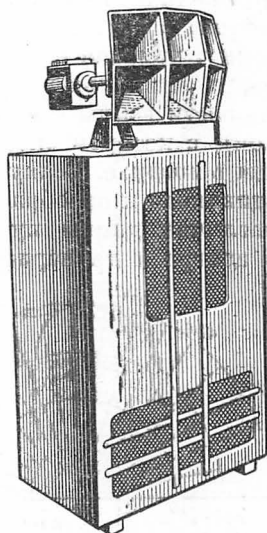


Рис. XIII-19. Многоячейковый секционированный рупор

Здесь угол раствора характеристик направленности практически мало зависит от частоты, так как определяется пространственным расположением отдельных секций рупора.

Другим эффективным средством ослабления направленности рупорного громкоговорителя является акустическая линза, более простая в изготовлении, чем секционированный многоячейковый рупор. Принцип действия акустической линзы подобен действию оптических рассеивающих линз, преобразующих плоскую волну, распространяющуюся вдоль оси, в сферическую или цилиндрическую волну меньшей направленности.

Различие между оптическими и акустическими линзами состоит в том, что оптическая линза преобразует плоскую волну, изменяя ее скорость при прохождении сквозь линзу, и тем больше, чем больше ее путь в линзе. Изменение скорости волны в линзе обусловлено ее материалом (стеклом), в котором скорость распространения света меньше, чем в воздухе. В акустической линзе скорость звука везде одинакова и преобразование волны происходит вследствие различия длины путей волн, проходящих через линзу в центре и на периферии. Изменение длины путей волн

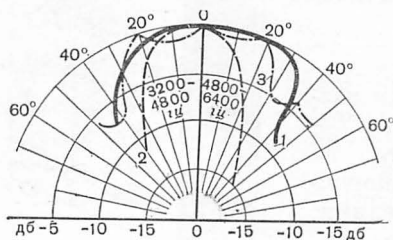


Рис. XIII-20. Характеристики направленности высокочастотного громкоговорителя 30А-3 : 1 — с линзой; 2 — без линзы; 3 — с 6-ячейковым секционированным рупором

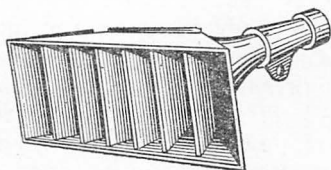


Рис. XIII-21. Акустическая линза с рупором для высокочастотного громкоговорителя

в акустической линзе осуществляется наклонными каналами или щелями, удлиняющими путь звуковой волны, создаваемой громкоговорителем.

Результаты применения секционированного рупора и акустической линзы приведены на характеристиках направленности (рис. XIII-20). На рис. XIII-21 показана линза с рупором для высокочастотного громкоговорителя 30А-3, расширяющая диаграмму направленности громко-

говорителя в горизонтальной плоскости, которая изображена на предыдущем рисунке.

Еще одним способом достижения определенной направленности излучаемой звуковой энергии являются звуковые колонки. В прямоугольном или цилиндрическом ящике установлены вертикально в один или два ряда пять-восемь однотипных головок громкоговорителей, что позволяет получить малую направленность в вертикальной плоскости и увеличивает направленность в горизонтальной плоскости. Колонки применяются при звукоусилении в различных общественных помещениях.

§ 4. ТЕЛЕФОН, МИКРОФОН, ЗВУКОСНИМАТЕЛЬ

Электромагнитный телефон предназначен для преобразования электрической энергии в энергию акустическую.

Основными характеристиками телефонов являются чувствительность и частотная характеристика. Чувствительность телефона определяется, как отношение звукового давления, создаваемого телефоном в полости уха, к величине подводимого к телефону напряжения. Измеряется чувствительность в барах на вольт (*бар/в*). Телефон должен обеспечить достаточную разборчивость речи и обычно к нему не предъявляется высоких требований. Поэтому его частотная характеристика ограничивается частотным диапазоном от 200 до 3000—4000 *гц* при довольно большой величине допустимых отклонений от равномерности.

Наиболее широкое применение нашли телефоны электромагнитной системы, устройство которых показано на рис. XIII-22. Телефон состоит из магнита, полюсных наконечников, на которые надета звуковая катушка, и стальной мембраны, закрепленной по наружному краю.

Под действием постоянного магнита мембрана всегда несколько выгнута в сторону полюсных наконечников. Если же по звуковой катушке проходит переменный ток, то возникающий дополнительный магнитный поток в течение одного полупериода усиливает поток постоянного магнита, а в течение другого полупериода ослабляет его.

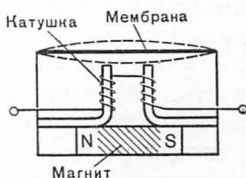


Рис. XIII-22. Устройство телефона электромагнитной системы

Вследствие этого мембрана телефона будет колебаться около своего первоначального положения с частотой переменного тока, проходящего через звуковую катушку телефона.

Телефоны используют для контроля работы усилительных устройств и магнитофонов в тех случаях, когда нежелательно или невозможно использовать громкоговорители.

Важной характеристикой телефона является величина сопротивления звуковой катушки. Различают высокоомные и низкоомные телефоны, причем следует согласовать сопротивления телефона с сопротивлением выхода усилителя при их соединении. Чаще всего используется пара телефонов, соединенных с помощью оголовья.

Микрофон. Микрофоном называется преобразователь звуковых колебаний в электрические. По способу преобразования микрофоны подразделяются на динамические, или катушечные, ленточные, конденсаторные (электростатические) и пьезоэлектрические.

Микрофон — первичное звено при записи звука в процессе создания звукового кинофильма. На киностудиях широко используются динамические и конденсаторные микрофоны. На киноустановках используются для усиления речи в основном динамические микрофоны.

Основные параметры микрофонов: осевая чувствительность, диапазон частот и неравномерность частотной характеристики, сопротивление номинальной нагрузки, характеристика направленности и относительный уровень собственных шумов. Нелинейные искажения для микрофонов всех типов весьма малы.

Чувствительностью называется отношение величины напряжения, развиваемого микрофоном на активном сопротивлении, равном сопротивлению номинальной нагрузки микрофона, к величине звукового давления в точке, где расположен чувствительный элемент микрофона.

Величина чувствительности измеряется в милливольт-тах на бар (*мв/бар*) *.

Обычно определяется осевая чувствительность микрофона, всегда наибольшая.

* ГОСТ 8849 — 58 не рекомендует называть единицу звукового давления, равную одной дине на квадратный сантиметр ($дин/см^2$), — баром, однако это название настолько широко вошло в практику и применяется в технической литературе, что отказ от него затруднил бы пользование обширным справочным материалом и литературой.

Частотной характеристикой микрофона называется графическое изображение зависимости его чувствительности от частоты. Чувствительность микрофона различна для различных частот.

Неравномерностью частотной характеристики называется выраженное в децибелах отношение максимального значения чувствительности к минимальной, измеренных в пределах номинального диапазона частот.

Неравномерность частотной характеристики дешевых, бытовых динамических микрофонов составляет 8—12 дб, т. е. довольно значительную величину, и это их серьезный недостаток.

Сопротивлением номинальной нагрузки называется такое сопротивление, при котором микрофон отдает наибольшую полезную мощность. Микрофон должен быть нагружен на сопротивление, равное его внутреннему полному электрическому сопротивлению, с тем чтобы он развивал наибольшую полезную мощность.

Характеристикой направленности называется зависимость чувствительности микрофона на данной частоте от угла между акустической (рабочей) осью и направлением из источника звука. Вид характеристики направленности зависит от устройства звукоприемной части микрофона.

Уровень собственного шума. Незначительные изменения (флюктуация) давления воздуха вокруг микрофона, не зависящие от звуковых колебаний, вместе с тепловым шумом сопротивлений в электрических цепях микрофона создают на его выходе шумовое напряжение. Уровень этого шума обычно мал (—50 дб и меньше), а потому указывается только для высококачественных микрофонов.

Наиболее широкое распространение получили *д и н а м и ч е с к и е* (катушечные) микрофоны. Звукоприемником в них служит куполообразная диафрагма из тонкой полистироловой пленки или алюминиевой фольги. Диафрагма жестко связана с звуковой катушкой, намотанной алюминиевым проводом толщиной 0,05 мм. Катушка находится в радиальном зазоре магнитной системы. Такая конструкция типична для звукоприемников давления.

На рис. XIII-23 показана схема устройства динамического микрофона. В радиальном зазоре магнитной цепи 1 подвешена звуковая катушка 2, жестко связанная с диафрагмой 3. Воздействие звукового давления приводит диафрагму и звуковую катушку в состояние колебательного движения. При пересечении витками звуковой катушки

силовых линий в катушке индуцируется электродвижущая сила, пропорциональная звуковому давлению.

Все динамические микрофоны во время эксплуатации и при перевозках следует предохранять от ударов и резких сотрясений. По окончании работы на микрофон необходимо надеть чехол, препятствующий попаданию в него пыли и железных опилок.

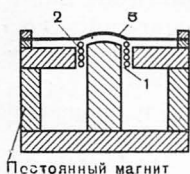


Рис. XIII-23. Схема устройства динамического микрофона

Хранить микрофон следует в помещении с относительной влажностью воздуха не выше 80% и температурой не ниже 5° С.

Микрофоны других типов (ленточные, конденсаторные, пьезоэлектрические) имеют ограниченное применение в киносети, так как требуют более сложных трактов звукоусиления.

Звукосниматели. Механическая запись звука основана на механической деформации материала звуконосителя с помощью специального прибора — записывателя (рекордера).

Существуют два основных метода механической записи звука: поперечная и глубинная. При поперечном методе записи резец колеблется параллельно поверхности звуконосителя и перпендикулярно к направлению его движения в месте записи. При глубинном методе записи резец совершает колебания перпендикулярно поверхности звуконосителя. В последнее десятилетие широкое распространение получила стереофоническая запись, при которой резец совершает колебания под углом 45° к поверхности звукоснимателя. Обычные и долгоиграющие монофонические граммофонные пластинки имеют поперечную механическую запись.

Звук с пластинки воспроизводится прибором, называемым звукоснимателем. Звукосниматели бывают механические, электромагнитные и пьезоэлектрические.

В механическом звукоснимателе игла соединена с мембраной, которая заключена в горле рупора.

Звукосниматель электромагнитной системы (рис. XIII-24) представляет собой электроакустический преобразователь механических колебаний граммофонной иглы в электрические колебания, которые могут быть усилены и воспроизведены громкоговорителем. Электромагнитный звукосниматель представляет собой стальной якорь 1, связанный с иглой 2, который движется внутри катушки 3,

находящейся в поле постоянного магнита 4. Из-за дифференцированных плоских наконечников 5 колебания якоря вызывают изменения направления магнитного потока, пересекающего катушку, и в последней наводится э. д. с. (0,15—0,25 в).

Пьезоэлектрический звукосниматель (рис. XIII-25) состоит из пьезоэлемента, скручивающее усилие на кото-



Рис. XIII-24. Звукосниматель электромагнитной системы

рый вызывает появление э. д. с. (0,5—1 в). Работа звукоснимателя основана на использовании пьезоэффекта: некоторые кристаллы, например сегнетовой соли, имеют то свойство, что если их подвергать сжатию, растяжению, скручиванию, т. е. механически деформировать, то на противоположных гранях кристалла появляется э. д. с.

Если, как указано на рис. XIII-25, к одним противоположным граням прикладывается механическое усилие, то на другой паре граней возникает разность потенциалов. Напряжение снимается благодаря наклеиваемым станиолевым листкам, к которым подпаиваются отводящие проводники.

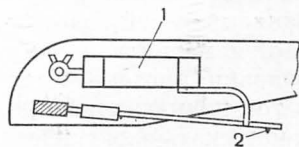


Рис. XIII-25. Схема головки пьезоэлектрического звукоснимателя: 1 — пьезоэлемент; 2 — игла

Пьезоэлектрические звукосниматели имеют более широкую рабочую полосу частот (50—8000 гц), большую величину нагрузочного сопротивления (0,5—2 мгом), оказывают меньшее давление на пластинку (30—70 г) по сравнению с электромагнитным звукоснимателем, у которого указанные величины соответственно составляют 75—6500 гц, 0,2—1 мгом, 60—120 г. Частотные характеристики достаточно равномерны.

§ 5. МАГНИТНЫЕ ГОЛОВКИ

В магнитной записи в отличие от фотографической используется не светочувствительная пленка, а магнитная лента. Магнитная лента представляет собой ферромагнитный слой толщиной около 0,01—0,015 мм, состоящий из мельчайших кристаллов магнитного порошка — гамма-оксида железа — часто с добавлением солей кобальта и связующего вещества. Слой наносится на кинопленку в виде дорожек или на ленту из лавсана, полихлорвинила и т. п. шириной 6,25 мм для использования в магнитофонах.

Такой слой обладает способностью намагничиваться и обеспечивает высокую отдачу магнитной фонограммы и неизменность ее свойств.

Важнейшим элементом устройства для магнитной записи звука является электромагнит, по которому протекает электрический ток.

Электромагнит, с помощью которого производится запись звука на магнитной ленте, называют записывающей головкой (ГЗ). На рис. XIII-26 схематически показан процесс записи на магнитную ленту. Вблизи зазора 1 записывающей головки 2 с постоянной скоростью продвигается магнитная лента 3. По катушке 4 записывающей головки протекает электрический ток звуковой частоты и ток подмагничивания. Если по катушке электромагнита пропускать электрический ток такой же формы, как и звуковые колебания, а вблизи электромагнита протягивать ленту, то участки магнитной ленты при ее движении вблизи электромагнита будут намагничиваться по-разному (в соответствии с питающим электромагнит током) и лента, таким образом, станет звуконосителем. При магнитной записи в записывающую головку подается еще ток подмагничивания, который нужен, чтобы избежать искажений звука при записи. В качестве тока подмагничивания используется ток высокой (десятки килогерц) частоты. Его источником служит ламповый высокочастотный генератор.

Роль подмагничивания в магнитной звукозаписи исключительно велика. Дело заключается в том, что для неиска-

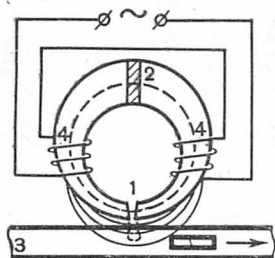


Рис. XIII-26. Схема процесса записи на магнитную ленту

женной записи звуковых колебаний можно использовать только прямолинейный участок кривой остаточной намагниченности (рис. XIII-27). Так как он расположен не в начале координат, потребуется сместить и начальную точку намагниченности к середине прямолинейного участка. Это может быть достигнуто за счет неизменной по величине напряженности магнитного поля H_0 с помощью постоянного тока, питающего обмотку головки записи одновременно с током звуковой частоты.

Однако и в этом случае запись звука не обеспечит качественных результатов, так как прямолинейный участок кривой остаточной намагниченности невелик, а из-за его небольшой крутизны динамический диапазон магнитной фонограммы мал. Кроме того, при воспроизведении подмагниченной постоянным током фонограммы повышается уровень шумов, что связано с неоднородностью магнитной структуры феррослоя.

Лучшее качество магнитной фонограммы получают, когда работают при звукозаписи в режиме с использованием тока подмагничивания ультразвуковой частоты (60 000 гц). В этом случае перед записывающей головкой устанавливают стирающую головку (ГС), на обмотку которой подается ток ультразвуковой частоты от высокочастотного генератора. Участок магнитной ленты до соприкосновения с головкой записи подвергается действию высокочастотного перемагничивания с помощью стирающей головки и подходит к записывающей головке совершенно размагниченным.

Помимо тока звуковой частоты через обмотку записывающей головки пропускается также ток от генератора ультразвуковой частоты (рис. XIII-28).

Применение подмагничивания полем ультразвуковой частоты линеаризирует (спрямляет) амплитудную характеристику звуконосителя (магнитного слоя ленты), что позволяет глубже его модулировать и получать большую величину полезного сигнала, увеличивая динамический диапазон записи.

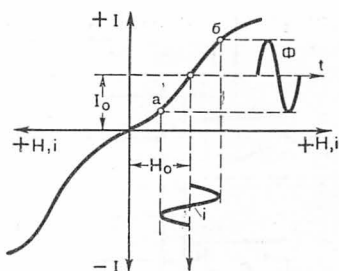


Рис. XIII-27. Смещение рабочего участка кривой намагниченности. Прямолинейный участок между точками a и b

Сердечник головки записи кольцевого типа набран из высококачественного листового пермаллоя. Сердечник головки записи (и стирания) состоит из двух половин, симметричных по отношению к зазору. Обмотку

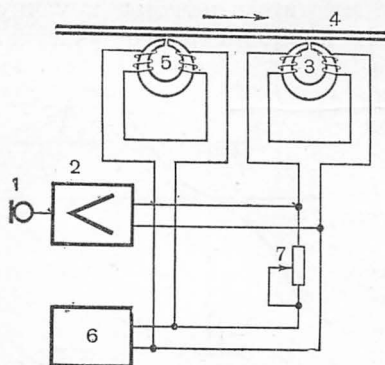


Рис. XIII-28. Схема магнитной записи звука с использованием токов высокой частоты: 1 — микрофон; 2 — усилитель; 3 — головка записи; 4 — магнитная лента; 5 — головка стирания; 6 — генератор высокой частоты; 7 — сопротивление

разделяют на две половины, помещаемые симметрично на обеих половинах сердечника. Ширина зазора стандартных головок записи и воспроизведения — 15—20 мкм, стирающих головок — 200—500 мкм. У головок записи с обратной стороны находится дополнительный воздушный зазор шириной 0,25—0,3 мм. Основное назначение этого зазора — создать линейную зависимость между током записи и индукцией в рабочем зазоре головки. Конструкция и общий вид головки кольцевого типа показаны на рис. XIII-29.

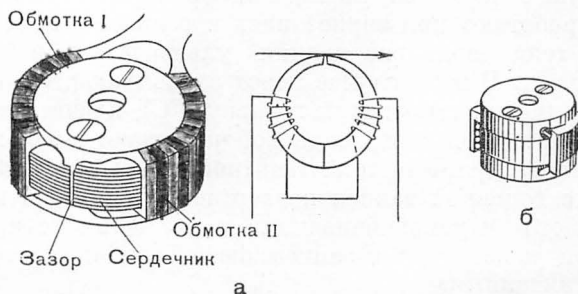


Рис. XIII-29. Конструкция (а) и общий вид (б) головки кольцевого типа

Воспроизведение звука (рис. XIII-30) с магнитной фонограммы заключается в том, что при продвижении намагниченной ленты 3 в том же направлении и с той же скоростью, что и при записи, вблизи зазора 1 воспроизводящей головки 2 в катушке 4 возникает ток, соответствующий зву-

ковым колебаниям. Пунктиром показан путь магнитного потока звуконосителя, который пересекает витки катушки.

Основная задача при изготовлении воспроизводящих головок сводится к получению на выходе головки возможно большей э. д. с. Заметим, что вместо понятия э. д. с. применительно к головкам часто пользуются понятием отдача, понимая под этим напряжение, практически создаваемое головкой на входе усилителя воспроизведения, с учетом потерь как в самой головке, так и во входной цепи усилителя.

Для получения большой э. д. с. (или большой отдачи) необходимо прежде всего, чтобы сердечник головки вбирал в себя возможно больше магнитных силовых линий, выходящих из пленки, т. е. он должен иметь высокую магнитную проницаемость. Это достигается путем изготовления сердечников из специальных магнитных сплавов: железоникелевого 80НХС (пермаллой) или железоалюминиевого 16Ю (альфенол).

Сердечники набираются из тонких (0,1—0,25 мм) пластин; это уменьшает потери на вихревые токи (токи Фуко).

Повышения отдачи головки добиваются также увеличением числа витков обмотки. Обычно оно составляет от 400 до 1200. Для намотки применяется провод марки ПЭВ-1—2 $\varnothing 0,05 \div 0,1$ мм. Увеличению числа витков препятствуют ограниченные размеры оправы головки и окна сердечника — пространства между поставленными полусердечниками. Важную роль играют и технологические трудности, например в производственных условиях сложно намотать обмотку из очень тонкой проволоки ($\varnothing 0,02 \div 0,03$ мм).

Существует и еще одна наиболее важная причина ограничения числа витков: с их ростом увеличиваются индуктивность и собственная емкость головки, а значит, снижается частота резонанса. Это может привести к тому, что частота собственного резонанса головки переместится в область звуковых частот.

В лобовой части головки между полусердечниками при сборке вставляется немагнитная прокладка из фольги

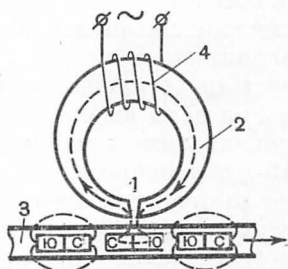


Рис. XIII-30. Схема процесса воспроизведения звука с магнитной фонограммы

бериллиевой бронзы. Толщина фольги соответствует длине рабочей щели и составляет 10—20 мм.

Чтобы защитить головку от воздействия внешних магнитных полей, например от поля рассеяния двигателя кинопроектора или трансформатора питания, ее заключают в электромагнитный экран. Силовые линии внешних магнитных полей замыкаются по экрану и не воздействуют на обмотку головки. Экран делается из такого же сплава с высокой магнитной проницаемостью, как и сердечник головки.

Для воспроизведения звука в кинотеатрах служат головки двух видов: одноканальные и многоканальные. Одноканальные головки МГ-14В и МГ-14ВМ применяются в 16-мм кинопроекторах «Украина» и КПС-162А(М). Головки отличаются очень малым размером, что вызвано конструктивными требованиями: их монтируют внутри гладкого барабана кинопроектора. Оправа головок одновременно является и электромагнитным экраном. Сердечник головки закрепляют в оправе с помощью специальной массы. Головка МГ-14ВМ отличается от головки МГ-14В устройством крепления и регулирования. Высота набора сердечника головки на 0,2—0,3 мм меньше, чем ширина магнитной дорожки записи.

Ширина дорожки практически неравномерна, и если бы не было этой разницы, то отдача головки изменялась в зависимости от изменения ширины дорожки. На более широких участках она была бы больше, а на узких — меньше.

Многоканальные магнитные головки применяются для одновременного воспроизведения звука с нескольких дорожек, записанных на 35- и 70-мм киноплёнке, — в широкоэкранным и широкоформатном кино.

Чтобы одновременно воспроизвести звук, например, с 4-канальной широкоэкранный фильмокопии, четыре воспроизводящие головки объединяют в одной оправе, состоящей из двух половин. Оправа изготавливается из массивной немагнитной заготовки, в которой фрезеруются пазы для установки полусердечников головок. В киноаппаратуре применяют оправу из алюминиевого сплава Д16Т. Полусердечники вставляются в оправу и закрепляются специальным клеем. Между смежными головками вставляются ферромагнитные пластины-экраны, препятствующие влиянию одного канала на другой при воспроизведении звука. Обе половины оправы стягиваются винтами. Голов-

ки, собранные в оправе, образуют так называемый многоканальный блок головок.

В блоке воспроизводящих головок 7Д-5 для широкоэкранного кино смонтированы четыре головки: три — с высотой набора по 1,25 мм и одна — с высотой набора 0,85 мм.

В блоке воспроизводящих головок ГВУ-1 смонтировано десять головок, причем для воспроизведения звука в широкоформатном кино (на 70-мм киноплёнке) служат только шесть из них — по три с каждого края блока. Высота набора сердечника у каждой из этих головок одинаковая — 1,25 мм. Кроме того, в средней части блока смонтированы четыре головки, которые служат для воспроизведения звука в широкоэкранном кино (на киноплёнке шириной 35 мм). Размеры их и размещение такие же, как и в блоке 7Д-5, т. е. блок ГВУ-1 универсальный, с его помощью можно воспроизводить звук как с широкоформатных, так и с широкоэкранных фильмокопий. Недостаток головок этого блока — малая величина индуктивности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изложите принципы действия головки электродинамического громкоговорителя.
2. Опишите конструкцию диффузорной головки громкоговорителя.
3. Что такое чувствительность головки громкоговорителя?
4. Что понимается под коэффициентом полезного действия головки громкоговорителя?
5. Объясните назначение акустического экрана.
6. Что такое характеристика направленности громкоговорителя?
7. В чем основные различия рупорного громкоговорителя и диффузорного?
8. Что такое акустический агрегат, из каких звеньев он состоит?
9. Как отделяется низкочастотное звено от высокочастотного?
10. Из каких деталей состоит подвижная система головки громкоговорителя?
11. Зачем нужна центрирующая система?
12. Какими способами расширяют характеристику направленности высокочастотного рупорного громкоговорителя?
13. Объясните назначение акустической линзы.
14. Изложите принцип действия динамического микрофона.
15. Расскажите о характеристиках направленности микрофона.
16. Как работает пьезоэлектрический звукосниматель?
17. Какую э. д. с. развивает пьезоэлектрический звукосниматель?
18. Изложите устройство и принцип действия звукоснимателя электромагнитной системы.
19. Как устроена воспроизводящая магнитная головка?
20. Расскажите о назначении высокочастотного подмагничивания в магнитной звукозаписи.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА КИНОУСТАНОВОК

§ 1. КОМПЛЕКТ ПЕРЕДВИЖНОГО ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕГО УСТРОЙСТВА КУУП-56

Комплект универсального передвижного звуковоспроизводящего устройства КУУП-56 предназначен для воспроизведения звука от фотографических фонограмм 16-мм фильмокопий при работе с передвижными узкоплечными кинопроекторами ПП-16-1, ПП-16-2, ПП-16-4 и 35-мм фильмокопий при работе с передвижными и стационарными кинопроекторами КПСМ, К-303М, 35-ОСК-1, КН-11 и КН-13 в кинотеатрах вместимостью до 200 зрителей. ✓

Кроме того, с дополнительной приставкой — предварительным усилителем 7У-17 — комплект позволяет воспроизводить звук от магнитных фонограмм 16-мм фильмокопий при работе с модернизированным кинопроектором ПП-16-4, имеющим магнитный блок. ✓

Комплект может быть использован также для воспроизведения грамзаписи с помощью любого электромагнитного или пьезоэлектрического звукоснимателя, а в случае использования предварительного усилителя 7У-17 и для

усиления речевых передач от электродинамического микрофона любого типа.

КУУП-56 выпускается Ленинградским объединением оптико-механических предприятий в трех комплектах — для работы с узкоплечными кинопроекторами и для работы с одним или двумя широкоплечными проекторами.

Выходная мощность комплекта вполне достаточна для создания необходимой громкости звуковоспроизведения в зрительных залах небольших кинотеатров и составляет 10 *вт.*

Комплект КУУП-56 питается от электрической сети переменного тока и потребляет около 750 *вт.* Столь сравнительно небольшая мощность не требует специальной электропроводки с увеличенным сечением проводов, что позволяет применять комплект повсеместно. Небольшое напряжение питания (110 *в.*) позволяет включать его через автотрансформатор в обычные осветительные электрические сети переменного тока частоты 50 *гц* напряжением 127 или 220 *в.*

В комплект входят: усилитель, громкоговорители, кабели и соединительные шланги, штырь для заземления. Для работы в стационарных условиях с 35-мм кинопроекторами применяется громкоговоритель 25А-17, состоящий из двух частей, укрепляемых по обеим сторонам экрана; в каждую из них вмонтировано по одной головке 4А-18 с постоянными магнитами. На время транспортировки обе части громкоговорителя скрепляются вместе.

Кроме того, в комплекте имеется контрольный громкоговоритель 0,25ГД-III, согласующий трансформатор которого пересчитан на входное напряжение 9 *в.*; мощность контрольного громкоговорителя 0,25 *вт.* Так как контрольный громкоговоритель устанавливается в изолированной от зрительного зала киноаппаратной комнате, то на нем установлен регулятор громкости, что позволяет киномеханику добиваться нужной ему громкости.

Для работы с 16-мм кинопроектором служит один громкоговоритель 25А-13.

Универсальный усилитель 90У-2 выпускается более десяти лет, и за эти годы претерпел ряд схемных изменений. На практике можно встретить усилители, схемы которых отличаются одна от другой, поэтому на усилителе указывается номер схемы, по которой данный усилитель собран, — чаще это № 8, 9, 10 и др. Здесь описывается

принципиальная схема усилителя 90У-2 (схема № 10) комплекта КУУП-56.

Особенностью данного усилителя является его универсальность. Это означает, что усилитель позволяет иметь различные частотные характеристики, необходимые для работы от 16- и 35-мм кинопроекторов.

Различные частотные характеристики получают простым переключением переключки коррекции в схеме усилителя. На рис. XII-10 показаны два вида частотных характеристик усилителя, которые можно получить при максимальном усилении при замкнутой и разомкнутой переключке коррекции.

В каких случаях следует иметь ту или иную частотную характеристику?

При воспроизведении оптической фонограммы 16-мм фильма характеристике необходимо придавать специальную форму с большим подъемом на высоких частотах и с крутым спадом выше 4500 *гц*, а при воспроизведении оптической фонограммы 35-мм фильма — характеристика должна быть достаточно равномерной в диапазоне 80—6000 *гц*. Кроме того, при работе с 16-мм кинопроектором последний устанавливается на корпус усилителя, где находится и фотоэлемент и отпадает необходимость иметь фотошланг.

При работе с 35-мм кинопроектором фотошланг имеет длину 1,25 м и обладает из-за этого значительной распределенной емкостью.

В усилителе 90У-2 схема первого каскада построена таким образом, что частотная характеристика усилителя, включая и входную цепь, в известных пределах не зависит от величины емкости входа. Это замечательное свойство схемы основано на том, что спад частотной характеристики на высоких частотах, который получается из-за включения на вход усилителя фотошланга, обладающего емкостью, автоматически компенсируется в первом каскаде обратной связью.

Приводим техническую характеристику комплекта.

1. Возможность работы усилителя с 16- и 35-мм проекторами делает его универсальным.

2. Источником тока для комплекта служит сеть однофазного переменного тока частоты 50 *гц* при напряжении 110 *в*, получаемом от автотрансформатора КАТ-15, входящего в комплект кинопроектора.

3. Мощность, потребляемая усилителем от источника тока, не превышает 110 *вт*.

4. Номинальное напряжение для читающей лампы 4 в при токе 0,8 а и пульсациях выпрямленного напряжения, не превышающих 0,3% от номинального значения. Напряжение снимается с отдельного селенового выпрямителя, смонтированного в усилителе.

5. Входное сопротивление усилителя для фотоэлектронного умножителя равно 1,8 мгом и одинаково как при работе с 35-мм, так и с 16-мм кинопроекторами.

6. Вход усилителя рассчитан на работу от однокаскадных сурьмяно-цезиевых фотоэлектронных умножителей ФЭУ-1 и ФЭУ-2, имеющих чувствительность 400÷800 мка/лм. ФЭУ-1 применяется при работе КУУП-56 с 35-мм кинопроекторами.

При работе с двумя широкоплечными проекторами схема предусматривает ограниченную регулировку напряжения на эмиттере одного из фотоэлектронных умножителей, позволяющую изменять отдачу фотоэлектронного умножителя примерно в два раза.

7. Входное напряжение, при котором усилитель развивает номинальную выходную мощность на частотах 500 и 1000 гц, равно 55 ± 15 мв на входе для фотоэлектронного умножителя и 75 ± 25 мв на входе для грамофонного звукоснимателя.

8. Рабочий диапазон частот усилителя при воспроизведении звука с фонограмм 35-мм кинофильмов — от 80 до 6000 гц. Спад частотной характеристики не превышает 3 дб на низких частотах и 6 дб на высоких (при двух проекторах) относительно уровня на частоте 1000 гц.

9. Рабочий диапазон частот усилителя при воспроизведении звука с фонограмм 16-мм кинофильмов — от 80 до 4500—5000 гц. Спад частотной характеристики не превышает —3 дб на низких частотах относительно уровня на частоте 500 гц.

Для компенсации частотных искажений, вносимых фонограммами на узкой пленке, частотная характеристика на частоте максимального подъема имеет подъем от 10 до 16 дб.

10. Полное введение регулятора тембра вызывает дополнительный спад частотной характеристики по отношению к исходным характеристикам (при полностью выведенном регуляторе тембра): для широкой пленки — не менее 4 дб на частоте 6000 гц и для узкой пленки — не менее 12 дб на частоте максимального подъема характеристики.

Все виды частотных характеристик усилителя 90У-2 см. на рис. XII-10.

11. Номинальная выходная мощность усилителя 10 *вт* при коэффициенте гармоник не более 3% на средних частотах.

12. Максимальная выходная мощность усилителя 15 *вт* при коэффициенте гармоник не более 6% на средних частотах. Эта мощность отмечается вспыхиванием неоновго индикатора перегрузки.

13. Уровень собственных помех усилителя при полном усилении и неосвещенном фотоэлектронном умножителе лежит на 48 *дб* ниже уровня номинальной выходной мощности 10 *вт* (напряжение помех примерно в 250 раз меньше напряжения, соответствующего номинальной выходной мощности).

14. Номинальное сопротивление нагрузки усилителя 30 *ом* соответствует полному сопротивлению звуковых катушек на частоте 400 *гц* для последовательно соединенных головок громкоговорителя.

15. Диапазон частот, воспроизводимых громкоговорителем, — от 100 до 6000 *гц* с отклонениями не более ± 8 *дб*.

16. Величина среднего стандартного звукового давления громкоговорителя 25А-17 в полосе частот 100÷6000 *гц* — 3,5 *бар*.

Вес комплекта КУУП-56 около 40 *кг*.

В усилителе следующее количество электронных, вспомогательных и сигнальных ламп: 6Ж7—1 шт.; 6Н9С — 1 шт.; 6ПЗС — 2 шт.; 5Ц4С — 1 шт.; МН-3—1 шт.; МН-15 (6,3 *в* 0,28 *а*) — 1 шт.

Современная аппаратура для усиления и воспроизведения звука может быть построена: по однополосной системе звуковоспроизведения; по системе с однополосным усилителем и двухполосными громкоговорителями; по сквозной двухполосной системе.

КУУП-56 построен по однополосной системе звуковоспроизведения, при которой весь диапазон воспроизводимых частот усиливается одним усилителем, к выходу которого подключен широкополосный громкоговоритель. Это самая простая система звуковоспроизведения.

Применение однополосной системы воспроизведения звука, частотные и нелинейные искажения заставляют отнести усилитель 90У-2 к II классу усилителей.

Чтобы облегчить ознакомление с усилителем 90У-2, рассмотрим его простую структурную схему (рис. XIV-1).

Усилитель 90У-2 представляет собой трехкаскадный усилитель. Первый каскад — усилитель напряжения. Он собран по резисторной схеме на лампе 6Ж7, являющейся высокочастотным пентодом. Эта лампа позволяет получить высокий коэффициент усиления каскада, т. е. сразу значительно повысить уровень полезного сигнала и уменьшить относительную величину помех, возникающих после первого каскада. Кроме того, она имеет сравнительно низкий уровень собственного шума. Все это и определило выбор этой лампы для использования в первом каскаде усилителя.

Второй каскад — также усилитель напряжения. Ввиду того, что он является и предоконечным каскадом, работающим на двухтактный оконечный каскад, то он собран по фазоинверсной схеме. В нем используется лампа 6Н9С — двойной триод.

Наконец, оконечным каскадом, являющимся усилителем мощности, служит третий каскад, собранный по двухтактной схеме на двух лампах 6П3С — лучевых тетрадах.

Такая структурная схема дает только общее представление о построении усилителя, в частности усилителя 90У-2. Она не позволяет увидеть ряда цепей и элементов, играющих важную роль в структуре усилителя.

Рассмотрим эти элементы и цепи и укажем их место в структурной схеме.

Отличительная особенность усилителя 90У-2 — устройство его *входной цепи*. Оригинальная схема входной цепи позволяет включать на вход усилителя один или два шланга фотоэлектронных умножителей (соответственно для работы с одним или двумя кинопроекторами КН-13), а также звукосниматель для воспроизведения грамзаписи. Место входной цепи в структурной схеме определяется ее названием.

Важным элементом в любом усилителе для воспроизведения звука является *регулятор громкости*. В усилителе 90У-2 регулятор громкости расположен между первым и вторым каскадами усиления напряжения. Это нужно, чтобы не производить регулирования на входе, где уровень сигнала очень низкий.

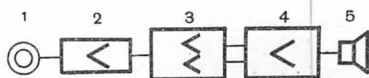


Рис. XIV-1. Структурная схема усилителя 90У-2: 1 — фотоэлемент; 2 — первый каскад; 3 — второй каскад; 4 — оконечный каскад; 5 — громкоговоритель

Оконечный и предоконечный каскады охвачены *цепью отрицательной обратной связи*, что дает снижение нелинейных искажений.

Цепью отрицательной обратной связи охвачены также

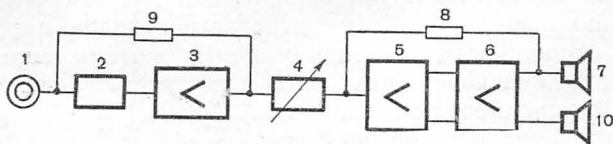


Рис. XIV 2. Структурная схема усилителя 90У-2 с введением элементов и цепей: 1 — фотозлемент; 2 — входная цепь; 3 — первый каскад; 4 — регулятор громкости; 5 — второй каскад; 6 — оконечный каскад; 7 — громкоговоритель; 8 — цепь отрицательной обратной связи; 9 — цепь коррекции; 10 — контрольный громкоговоритель

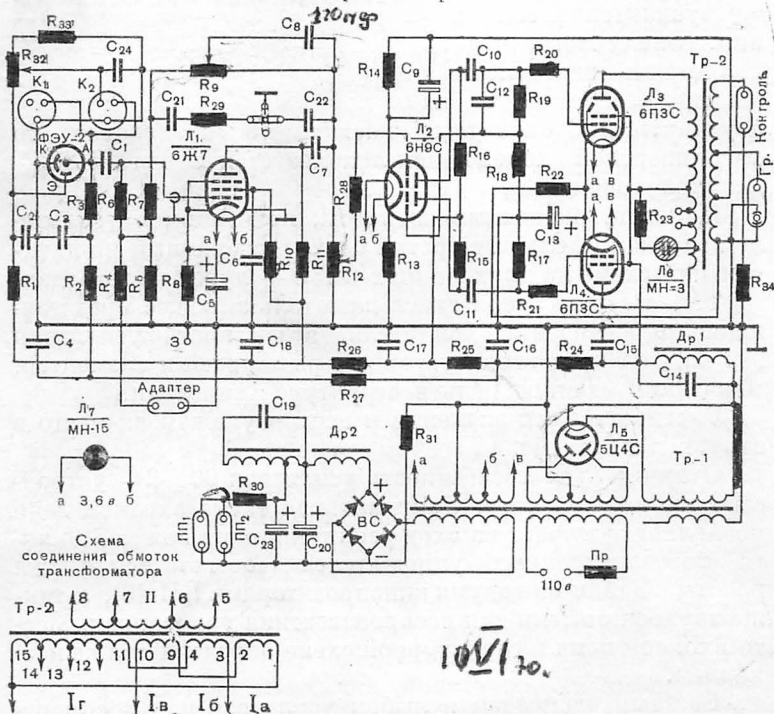


Рис. XIV-3. Принципиальная схема усилителя 90У-2 (схема № 10)

первый каскад и входная цепь. Эта цепь обратной связи используется для коррекции частотной характеристики усилителя и поэтому называется *цепью коррекции*.

Теперь с введением элементов и цепей структурная схема примет вид, показанный на рис. XIV-2. Она определяет и конструктивное решение усилителя; так как число элементов в нем невелико, соответственно небольшими должны быть габариты и вес такого усилителя. Размеры 90У-2 $425 \times 260 \times 190$ мм и вес около 14 кг.

Принципиальная схема усилителя 90У-2 (схема № 10) представлена на рис. XIV-3.

1 Первый каскад собран по резисторной схеме на лампе 6Ж7. На рис. XIV-4 показана схема первого каскада.

Элементами обычного резисторного каскада, собранного на пентоде, являются: сопротивление анодной нагрузки R_{11} *, переходный конденсатор C_1 , сопротивление утечки сетки, состоящее из двух резисторов: R_5 и R_6 , цепь автоматического смещения: резистор R_8 и конденсатор C_5 . В цепи экранной сетки стоит ячейка развязывающего фильтра, состоящая из резистора R_{10} и конденсатора C_6 .

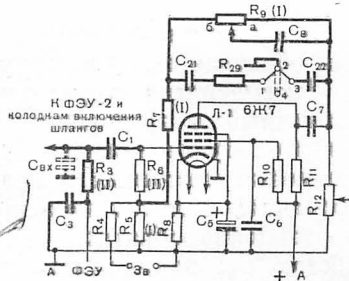


Рис. XIV-4. Принципиальная схема первого каскада

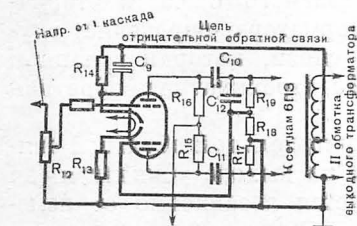


Рис. XIV-5. Принципиальная схема второго каскада

на 180° , в усилителе 90У-2 предоконечный каскад собран по фазоинверсной схеме (рис. XIV-5).

Анодными нагрузками служат резисторы R_{15} и R_{16} . Конденсаторы C_{10} и C_{11} являются переходными на управ-

* Здесь и далее обозначение резисторов, конденсаторов, моточных деталей и выводных концов дано по заводской схеме, прилагаемой к аппаратуре.

ляющие сетки ламп 6ПЗС. Утечками управляющих сеток ламп 6ПЗС служат резисторы: R_{18} и R_{19} — для первого плеча и R_{17} — для второго.

Отрицательная обратная связь по току применена с целью упрощения схемы и стабилизации работы усилителя.

В основном плече предоконечного каскада отрицательная обратная связь по току отсутствует.

Рассматривая структурную схему, мы указывали, что оконечный и предоконечный каскады охвачены отрицательной обратной связью по напряжению. Это сделано для снижения частотных и нелинейных искажений. С части вторичной обмотки выходного трансформатора через сопротивление обратной связи R_{14} , зашунтированное емкостью C_9 , напряжение подводится к сетке лампы. Это напряжение действует между катодом и управляющей сеткой лампы предоконечного каскада. По фазе оно противоположно напряжению, поступающему на вход основного плеча предоконечного каскада.

Напряжение, действующее на части вторичной обмотки, оказывается приложенным между катодом основного триода предоконечного каскада и заземленным проводом. Управляющая сетка триода через сопротивление регулятора громкости присоединена к заземленному проводу.

Величина напряжения, снимаемого с части вторичной обмотки выходного трансформатора, определяет глубину отрицательной обратной связи, которая в данном усилителе равна примерно 9 дБ (трехкратная обратная связь).

При достаточно глубокой отрицательной обратной связи по напряжению напряжение на выходе усилителя (на громкоговорителе) стабилизируется независимо от изменения сопротивления громкоговорителя в широких пределах, и этим самым в значительной степени улучшается звуковоспроизведение всего комплекта.

Следует отметить, что обратная связь по напряжению приводит к уменьшению общего усиления второго и третьего каскадов. Объясняется это тем, что напряжение обратной связи подается на вход второго каскада в противофазе с напряжением сигнала, подводимым от первого каскада. Таким образом, действующее напряжение на входе второго каскада оказывается равным разности напряжений, подводимых от первого каскада и напряжения обратной связи.

Каскады, охваченные отрицательной обратной связью, склонны к генерации (самовозбуждению) на сверхзвуковых частотах. Чтобы такая генерация не возникла, в цепь управляющей сетки предоконечного каскада включен резистор R_{28} , образующий вместе с входной емкостью лампы фильтр высоких частот. Этот фильтр снижает усиление на сверхзвуковых частотах и тем самым защищает усилитель от возникновения генерации.

В тех же целях в цепи сеток окончательных ламп включены резисторы R_{20} и R_{21} , составляющие с входными емкостями ламп фильтры высоких частот.

Третий, окончательный, каскад усилителя собран по двухтактной схеме на лампах 6ПЗС (рис. XIV-6). Эти лампы — лучевые тетроды. Основными элементами мощного каскада, собранного по двухтактной схеме, являются: выходной трансформатор $Tr-2$, включенный в анодные цепи для ламп мощного каскада; сопротивление автоматического смещения R_{22} , зашунтированное конденсатором C_{13} ; сопротивление утечки сетки ламп окончательного каскада R_{17} и $R_{18} + R_{19}$.

Выходной трансформатор служит для согласования сопротивления громкоговорителя (нагрузки усилителя) с эквивалентным внутренним сопротивлением ламп 6ПЗС. Его первичная обмотка состоит из четырех секций, которые попарно соединяются последовательно (см. рис. XIV-3).

Вторичная обмотка выходного трансформатора имеет два дополнительных отвода: отвод 6, к которому присоединяется цепь отрицательной обратной связи, охватывающей окончательный и предоконечный каскады, и отвод 8, присоединяемый к одному из гнезд штепсельной колодки для включения контрольного громкоговорителя. Часть вторичной обмотки выходного трансформатора с выводными концами 5—7 присоединена к специальной колодке для включения громкоговорителя.

К части первичной обмотки подключена неоновая индикаторная лампа МН-3 с балластным сопротивлением R_{23} . Неоновая лампа служит указателем перегрузки и вспыхи-

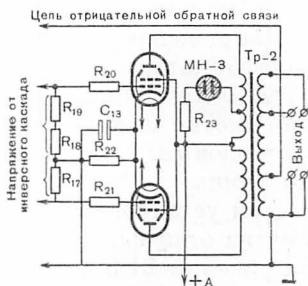


Рис. XIV-6. Схема окончательного каскада

вает при отдаче усилителем мощности около 15 *вт*, являющейся предельной для данного усилителя. При дальнейшем увеличении выходной мощности нелинейные искажения, вносимые лампами 6ПЗС, сильно возрастают, что снижает качество звуковоспроизведения. На перегрузку усилителя указывают не кратковременные вспышки лампы, а ее продолжительное горение. Лампа МН-3 зажигается при напряжении $47 \div 59$ *в*.

Напряжение на всей первичной обмотке выходного трансформатора при отдаваемой мощности 15 *вт* составляет 280 *в*. Поэтому лампа МН-3 подключена к части первичной обмотки между средней точкой (концы 1 и 15) и одним из отводов 12, 13, 14, в зависимости от потенциала зажигания лампы.

При установке лампы на заводе ее подключают к одному из отводов, чтобы обеспечить загорание лампы при напряжении 21,5 *в* на нагрузке усилителя. Балластное сопротивление ограничивает величину тока в цепи лампы при ее горении.

Цепи питания усилителя. Питание усилителя 90У-2 производится от сети переменного тока через кенотронный выпрямитель, смонтированный вместе с усилителем на одном шасси. Кенотронный выпрямитель собран по обычной двухполупериодной схеме и состоит из силового трансформатора, двухполупериодного кенотрона 5Ц4С, сглаживающего Г-образного фильтра, состоящего из дросселя *Др-1* и конденсатора C_{14} . Дроссель с помощью конденсатора C_{15} настроен в резонанс на частоту первой гармоники напряжения пульсации, равную 10 *гц*. Такая резонансная система представляет собой фильтр-пробку для частоты 100 *гц* и резко уменьшает напряжение пульсации на конденсаторе C_{15} .

Первичная обмотка силового трансформатора *Тр-1* включается в сеть через плавкий предохранитель *Пр* на 2 *а*. Трансформатор имеет пять вторичных обмоток: повышающую обмотку для питания анодных цепей кенотрона 5Ц4С, понижающую обмотку для питания нити накала кенотрона, понижающую секционированную обмотку для питания нитей накала ламп усилителя, понижающую обмотку для питания селенового выпрямителя (предназначенного для питания лампы просвечивания проектора) и экранирующую обмотку.

Схема анодного питания каскадов усилителя показана на рис. XIV-7.

Анодные цепи и цепи экранных сеток всех каскадов, а также фотоэлектронный умножитель питаются через дополнительные ячейки развязывающих фильтров. Развязывающие фильтры в цепях анодного питания каскадов усиления работают, с одной стороны, как сглаживающие фильтры, а с другой — разъединяют (развязывают) цепи одного каскада от цепей другого каскада для предотвращения возможности возникновения генерации, т. е. направлены против возникновения паразитных обратных связей.

Напряжение на аноды и сетки ламп оконечного каскада снимается с конденсатора C_{15} . Напряжение на аноды лампы предоконечного каскада снимается после двух последовательно включенных

резисторно-емкостных ячеек: $R_{24}-C_{16}$ и $R_{25}-C_{17}$. После ячейки $R_{26}-C_{18}$ подается напряжение на первый каскад усилителя и эмиттер фотоэлектронного умножителя.

Напряжение на анод фотоэлектронного умножителя подается через две резисторно-емкостные ячейки: $R_{27}-C_4$ и R_2-C_3 , включенные после ячейки $R_{24}-C_{16}$ (см. рис. XIV-3).

Нити накалов ламп усилителя питаются переменным током от силового трансформатора. Нити накалов ламп 6ПЗС и 6Н9С питаются напряжением 6,3 в и включены на всю накальную обмотку (выводы *a* и *в*) трансформатора.

Нить накала лампы первого каскада питается пониженным напряжением (5,5 в) от части накальной обмотки (выводы *a* и *б*). Понижение напряжения накала первой лампы примерно на 10% уменьшает помехи, которые могут возникнуть при несовершенстве изоляции между нитью накала и катодом лампы. При недостаточной изоляции возникает ток утечки, который протекает от источника накала.

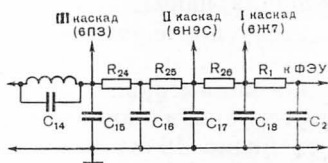


Рис. XIV-7. Схема анодного питания каскадов усилителя

Конструктивное оформление усилителя 90У-2 позволяет использовать его как в работе с широкоплечными проекторами (в комплекте киноустановки КН-14), так и с узкоплечными кинопроекторами ПП-16. В последнем случае кинопроектор устанавливается на крышку усилителя. Усилитель имеет подъемный механизм, позволяющий

изменить угол наклона оптической оси 16-мм кинопроектора.

Корпус усилителя представляет собой плоское шасси с двумя приваренными боковинами. Сверху на шасси размещены трансформаторы *Тр-22А*, *Тр-22З*, дроссели *Др-46*, *Др-48*, электронные лампы 6Ж7, 6Н9С, 6ПЗС (2 шт.), селеновый столб АВС-40-81, фотоэлемент ФЭУ-2 в кожухе.

На лицевой стороне шасси установлена на винтах наклонная панель, на которую вынесены элементы управления усилителем и наблюдения за его работой: регулятор громкости, регулятор коррекции частотной характеристики на высоких частотах, предохранитель, указатель перегрузки и лампочка для освещения лентопротяжного механизма 16-мм кинопроектора, которая при работе в комплекте КН-14 не используется.

С противоположной стороны шасси расположены лампы, закрываемые съемной крышкой, перфорированной для охлаждения ламп. Лицевая сторона усилителя с панелью управления и шасси закрыта общей крышкой, закрепляемой винтами на боковинах шасси. На верхней части крышки имеется заслонка с ручкой для закрывания отверстия над фотоэлектронным умножителем при работе с широкоплочным кинопроектором и при транспортировке.

На нижней стороне шасси находятся все остальные элементы схемы и монтаж. Для удобства при ремонте и чтобы легче разобраться в схеме, монтаж выполнен цветными проводами. Расположение монтажных проводов выбрано таким, чтобы по возможности уменьшить паразитные связи между отдельными цепями схемы. Поэтому при ремонте усилителя следует сохранять заводское расположение проводов.

Снизу усилитель закрывается дном, на внутренней стороне которого наклеивается схема. Дно крепится винтами к боковинам шасси. Усилитель снабжен ножками-амортизаторами, две из которых крепятся на дне и две другие на планке подъемного механизма.

На боковых стенках шасси размещаются колодки для соединения усилителя с другими элементами комплекта киноустановки КН-14. На правой боковой стенке (от лицевой панели усилителя) расположены две входные колодки с экранирующими заглушками, закрывающими колодки при работе усилителя с 16-мм кинопроектором. В эти колодки подключаются шланги фотоэлементов от двух кинопроекторов КН-13, входящих в комплект киноустановки

КН-14. На этой же стенке укреплены колодки для включения звукоснимателя и читающей лампы, гнездо для присоединения провода заземления, головка винта подъем-

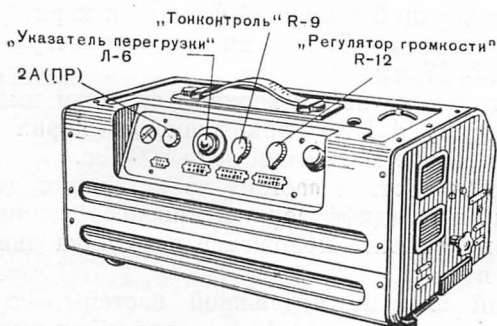


Рис. XIV-8. Усилитель 90У-2. Вид на лицевую панель

ного механизма и регулятор напряжения на эмиттере ФЭУ-1, ось которого выведена под шлиц.

На левой боковой стенке, частично перфорированной для теплообмена, помещены колодки для включения громкоговорителя, контрольного громкоговорителя и читающей лампы, а также розетка с утопленными штырьками для включения усилителя к источнику тока (к гнездам «110 в» на автотрансформаторе КАТ-15).

Усилитель 90У-2 показан на рис. XIV-8.

В комплект КУУП-56 входит громкоговоритель 25А-17 (рис. XIV-9). Он представляет собой чемодан, складывающийся из двух частей. В каждую часть чемодана вмонтировано по одной головке громкоговорителя 4А-18. На время транспортировки обе части громкоговорителя скрепляются вместе.

Головка 4А-18 представляет собой однополосный диффузорный громкоговоритель с постоянным магнитом.

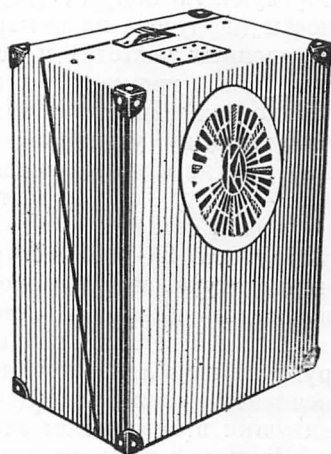


Рис. XIV-9. Громкоговоритель 25А-17

Магнитная система головки громкоговорителя состоит из магнита и магнитопровода. Магнитная система 4А-18 изготавливается из сплава альни и включает в себя кольцевой магнит, верхний и нижний фланцы и керн.

Высота магнита — 51 мм; внешний диаметр — 105 мм, внутренний — 67 мм.

Зазор между керном и верхним фланцем имеет радиальную ширину 1,3 мм при диаметре керна 25,2 мм. Индукция в зазоре магнитной цепи 8000 гс.

Подвижная система состоит из источника движения, излучателя звука (диффузора) и приспособлений, обеспечивающих правильное положение источника движения в магнитном поле.

Основной элемент подвижной системы — диффузор. Диффузоры для головок 4А-18 изготавливаются путем осаждения волокон из жидкой бумажной массы на специальную форму с последующей прессовкой и сушкой. Поэтому такие диффузоры часто называют литыми, т. е. бесшовными.

Диффузоры для головок 4А-18 имеют криволинейную образующую конуса, что исключает возбуждение поверхности диффузора из-за параметрического резонанса на определенных частотах и появление неприятных призывков при работе громкоговорителя, особенно при повышенных мощностях. Диффузор имеет различную по своему сечению толщину, увеличивающуюся от основания к вершине. Раструб диффузора переходит в гофрированный воротник — гофр. Гофр является важным элементом громкоговорителя, так как от его упругости зависит подвижность диффузора. 4А-18 имеет трехзвенный гофр, что по сравнению с двухзвенным гофром позволило расширить воспроизводимый диапазон в сторону более низких частот.

Важной деталью подвижной системы является центрирующая шайба, изготавливаемая из текстолита. Шайба обеспечивает правильное (центральное) положение звуковой катушки в воздушном зазоре магнитной системы.

Звуковая катушка служит источником движения всей подвижной системы. Она наматывается медным эмалированным проводом на бумажный или металлический (из алюминиевой фольги) каркас. Звуковая катушка 4А-18 имеет 158 витков провода ПЭЛ 0,16, намотанных в четыре слоя. Высота намотки составляет 9 мм. Вес сбмотки 2,5 г. Такая намотка имеет сопротивление постоянному току $11,5 \pm 1,0$ ом.

К вспомогательной системе относятся диффузорная прокладка, кольца и крепление. У 4А-18 диффузородержатель штампованный из металла.

Ящик (часть чемодана), в который вмонтирована головка 4А-18, представляет собой акустический экран небольшого размера, который необходим для устранения акустического короткого замыкания. Акустическое короткое замыкание заключается в том, что при движении диффузора его передняя и задняя поверхности создают давление противоположных фаз (см. рис. XIII-9).

Вследствие дифракции (огибание волн) происходит наложение одной волны на другую и давление выравнивается. В этом случае большинство подводимой энергии расходуется на перегонку воздуха с одной стороны диффузора на другую; излученная энергия очень мала — происходит акустическое короткое замыкание.

При оборудовании стационарной установки КН-12 или КН-14 обе части громкоговорителя 25А-17 рекомендуется подвешивать сбоку от экрана примерно на высоте $\frac{2}{3}$ от его нижней кромки. Обе части имеют специальные петли для подвески на стене.

Головки громкоговорителя 25А-17 соединяются последовательно, причем обязательно с соблюдением фазировки. Под фазировкой следует понимать синфазную работу головок. В одно и то же время диффузоры должны смещаться в одном и том же направлении — вперед или назад.

Нарушение фазировки приводит к уменьшению отдачи на низких частотах. Последнее обстоятельство и можно использовать для проверки правильности фазировки головок, для чего к звуковым головкам, соединенным последовательно, подводится напряжение частотой 50 или 100 гц. Проще всего низкочастотный фон можно получить, поднеся к фотоэлементу обычную осветительную лампу, питаемую от сети. Прослушивая уровень воспроизводимого громкоговорителем фона, меняют подключение концов одной из головок на обратное. Если включение головок было правильным, то при перемене концов уровень громкости упадет. Проведя такую операцию несколько раз, легко установить правильность фазировки головок.

При работе КУУП-56 в комплекте киноустановки КН-12 или КН-14 зрительный зал отделен от киноаппаратной. Поэтому нужно иметь контрольный громкоговоритель в аппаратной комнате. Такой громкоговоритель

0,25ГД-III-1 входит в комплект КУУП-56, рассчитанный для работы с широкоплечными кинопроекторами.

На рис. XIV-10 показан контрольный громкоговоритель. Внизу справа расположена ручка регулировки громкости. Контрольный громкоговоритель подключен к гнездам «Контроль» на усилителе на всю вторичную обмотку выходного трансформатора (напряжение на гнездах «Контроль» 9 в). В ящике контрольного громкоговорителя размещен согласующий трансформатор. Мощность контрольного громкоговорителя 0,25 вт.

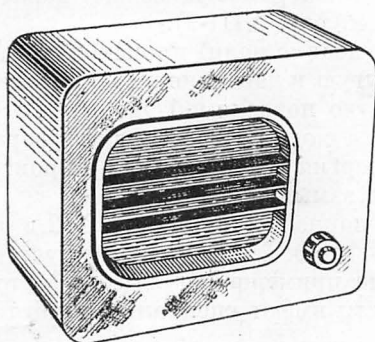


Рис. XIV-10. Контрольный громкоговоритель 0,25ГД-III-1

Усилительное устройство КУУП-56 стабильно и надежно в работе при правильной эксплуатации. Под этим понимается прежде всего бережное отношение, контроль за питающим напряжением и регулярный контроль электрического режима усилителя.

Как известно, усилительное устройство рассчитано на питание переменным током напряжением 110 в. При работе киноустановки необходимо постоянно следить за показаниями вольтметра на киноавтотрансформаторе, с тем чтобы все время поддерживать это номинальное напряжение. Значительное увеличение напряжения питания, подаваемого на усилитель, может привести к аварии — выходу из строя одного из элементов усилительного устройства.

Помимо контроля за питающим напряжением следует периодически (при нормальной работе усилительного устройства или если замечены какие-либо ненормальности при звуковоспроизведении) производить контрольную проверку электрического усилителя.

Электрический режим усилителя должен соответствовать номинальному (табл. 5), который указан в паспорте усилительного устройства. Для облегчения проверки на рис. XIV-11 показана рабочая карта электрического режима усилителя. Она представляет собой схему с указанием величин напряжений и сопротивлений, которые должны

- Условия измерений:
- Сопротивления, измеренные относительно катода кенотрона
 - Сопротивления, измеренные относительно общего провода
- 1 Электрический режим измерять в паузе прибором ТТ-1
 - 2 Напряжения, обозначенные знаком (*), измерять на шкале 10 В
 - 3 Напряжения, обозначенные знаком (**), измерять на шкале 50 В
 - 4 Напряжения могут отличаться от указанных на карте до $\pm 10\%$

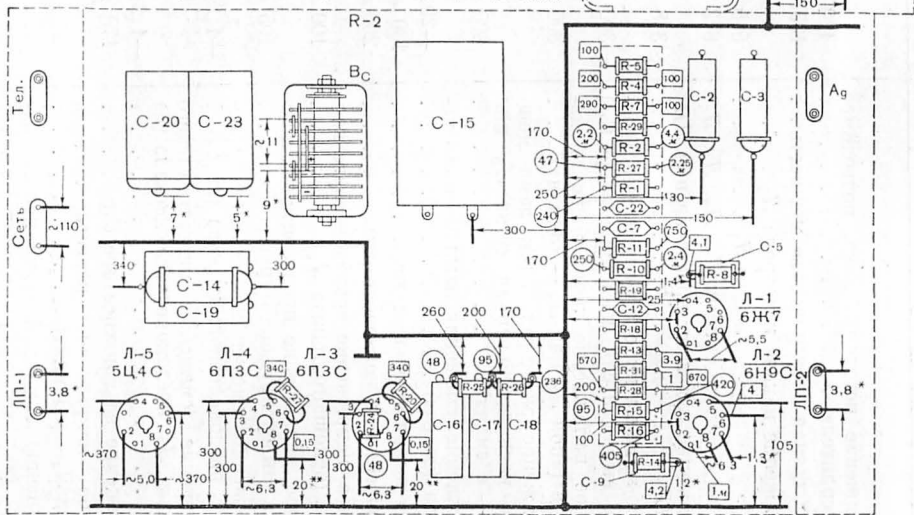


Рис. XIV-11. Рабочая карта режимов усилителя 90У-2

Таблица 5

Номинальный электрический режим усилителя 90У-2

Измеряемая величина	В паузе	При номинальной мощности
Напряжение источника тока, подводимое к усилителю	110 в	110 в
Потребляемая электрическая мощность . .	105 в _а	110 в _а
Напряжение накала кенотрона L_5	5 в	5 в
» » лампы L_1	5,5 в	5,5 в
» » ламп L_2, L_3, L_4, L_7 .	6,3 в	6,3 в
Напряжение для ламп просвечивания $ЛП_1$ и $ЛП_2$	3,8 в	3,8 в
Напряжение на выходе фильтра кенотронного выпрямителя (на конденсаторе C_{15})	300 в	295 в
Анодное напряжение ламп мощного каскада (анод L_3 или L_4 — «Земля») . . .	300 в	295 в
Напряжение экранных сеток ламп мощного каскада (экранная сетка L_3 или L_4 — «Земля»)	300 в	295 в
Напряжение смещения ламп мощного каскада (на C_{12})	-20 в	-20,5 в
Общий выпрямительный ток	130 м _а	130 м _а
Напряжение на конденсаторе C_{17}	200 в	195 в
Анодное напряжение предоконечного каскада (основного триода L_2)	100 в	95 в
Анодное напряжение предоконечного каскада (инвертирующего триода L_2) . . .	105 в	100 в
Напряжение смещения основного триода L_2 предоконечного каскада (на C_9). .	-1,2 в	-1,2 в
Напряжение смещения инвертирующего триода L_2 предоконечного каскада (на R_{13})	-1,3 в	-1,3 в
Напряжение на конденсаторе C_{18}	170 в	165 в
Анодное напряжение первого каскада (анод L_1 — «Земля»)	25 в	24 в
Напряжение экранной сетки первого каскада (экр. сетка L_1 — «Земля»)	25 в	24 в
Напряжение на конденсаторе C_{16}	260 в	255 в
Напряжение смещения лампы первого каскада (на C_3)	-1,4 в	-1,4 в

быть получены при измерении в указанных точках прибором определенного типа. Обычно в рабочих картах указываются не абсолютные, а условные величины напряжений и сопротивлений, и этого вполне достаточно, чтобы можно было обнаружить происшедшие в схеме усилителя изменения.

Такая рабочая карта значительно упрощает технику измерений и облегчает проверку усилительного устройства, так как она выполнена в виде схемы расположения деталей усилителя с подписанными величинами напряжений и сопротивлений, которые должны быть получены при измерении.

В рабочей карте указано, между какими точками следует измерять напряжения прибором какого типа и на какой шкале. Цифры между стрелками указывают не действительную величину напряжения, а условную. Если напряжения, измеренные между указанными в карте точками питания фотоэлектронного умножителя («А» — анод и «З» — земля) прибором ТТ-1, соответствуют написанным величинам, то, следовательно, эта часть схемы исправна (по постоянному току).

Но полученные при измерении величины напряжений не являются действительными величинами, так как напряжение на аноде ФЭУ составляет 220 в и на эмиттере 170 в, а по карте получается на аноде всего лишь 60 в и на эмиттере 150 в.

Такое несоответствие объясняется тем, что ток прибора, протекая через сопротивления в цепи анода ФЭУ ($R_3 + R_2 + R_{27}$), которые в общей сложности имеют сопротивление 14,5 мгом, создаст падение (потери) напряжения.

В цепи эмиттера величина сопротивлений, через которые протекает ток прибора, меньше ($R_1 + R_{26} + R_{25} + R_{24}$) — всего 0,32 мгом, поэтому и потери напряжения меньше.

Рабочая карта (см. рис. XIV-11) дополнена значениями величин сопротивлений в данной точке относительно катода кенотрона (значения сопротивлений обведены кружком) и относительно общего провода (цифры помещены в квадратах). Величина сопротивлений указана в килоомах. Если рядом с цифрой стоит буква «М», то, значит, сопротивление указано в мегомах.

Здесь почти все измеренные сопротивления имеют величины, соответствующие заводским данным, с отклонениями, не превышающими допустимой величины. Исключение составляют сопротивления R_5 , R_7 , R_9 , R_{12} , которые

образуют цепь обратной связи и оказываются включенными параллельно друг другу. Полученные численные значения для этих сопротивлений являются условными, но в любом усилителе 90У-2 они должны быть такими же, в противном случае цепь неисправна.

Таким образом, не прибегая к распайке схемы, можно проверить все сопротивления усилителя, пользуясь рабочей картой. Такая проверка дает возможность судить о техническом состоянии усилителя. Отклонение от данных карты свидетельствует о нарушениях в нормальной работе усилителя.

Рабочую карту электрических режимов по постоянному току целесообразно дополнить данными по переменному току звуковой частоты и проставить их в точках схемы, в которых были произведены измерения относительно общего провода («Земля»).

Пользуясь такой картой напряжений звуковой частоты, можно быстро проверить усилитель и найти неисправность. Карта напряжений звуковой частоты особенно полезна для обнаружения неисправности усилителя, так как проверка режима по постоянному току не позволяет обнаружить некоторые неисправности.

Так, например, неисправности в цепи усиливаемого напряжения могут не влиять на режим постоянного тока или могут происходить не из-за изменения величины сопротивления, например обрыва конденсатора, шунтирующего экранную сетку лампы первого каскада, высыхания электролитических конденсаторов смещения, обрыва или короткого замыкания цепи обратной связи. Такие неисправности можно обнаружить посредством измерений напряжения звуковой частоты.

Режим работы усилительного устройства можно проверить авометром ТТ-1 или другим высокоомным вольтметром с сопротивлением прибора не менее 5000—7000 ом/в.

ТТ-1 очень удобен и должен обязательно входить в комплект киноустановки.

Усилитель 7У-17 — приставка к усилителю 90У-2 для воспроизведения магнитных фонограмм 16-мм фильмокопий. Такие фонограммы воспроизводятся магнитной головкой МГ-14В, установленной на кинопроекторе ПП-16-4.

Сигнал, получаемый с магнитной головки узкоплечного кинопроектора, мал по величине. По техническим условиям магнитная головка МГ14-В при воспроизведении фонограммы контрольного фильма частотой 400 гц

должна давать напряжение 400 мкв. Так как напряжение на головке понижается с уменьшением частоты сигнала, при воспроизведении фонограммы частотой 80 гц эта же головка даст напряжение 80 мкв. Малую величину этого напряжения можно оценить, вспомнив, что на нагрузке однокаскадного фотоэлектронного умножителя ФЭУ при воспроизведении фотографического контрольного фильма напряжение сигнала на низких и средних звуковых частотах 40—50 мв, т. е. напряжение, получаемое с магнитной головки, меньше примерно в 500 раз.

Итак, для воспроизведения магнитной фонограммы узкополосного фильма чувствительность усилителя, работающего от ФЭУ, нужно увеличить примерно в 500 раз, а частотную характеристику изменить, чтобы она имела подъем в области высоких частот.

Это дополнительное усиление с необходимой частотной коррекцией в комплекте КУУП-56 осуществляется предварительным транзисторным усилителем 7У-17.

Принципиальная схема предварительного усилителя 7У-17 приведена на рис. XI-14. В обоих каскадах усилителя работают малощумные германиевые транзисторы П13Б. Первый каскад усилителя собран по простейшей схеме: в цепи коллектора включено сопротивление нагрузки, ток смещения подается на основание транзистора через сопротивление, соединяющее основание с коллектором. Присоединение сопротивления смещения к коллектору создает параллельную отрицательную обратную связь по напряжению, которая стабилизирует режим работы транзистора и усиление каскада. Некоторый недостаток такой отрицательной обратной связи — уменьшение входного сопротивления каскада, что, впрочем, не имеет большого значения при работе от низкоомного источника сигнала — магнитной головки МГ14-В. Для уменьшения собственных шумов предварительного усилителя транзистор первого каскада работает при малом напряжении на коллекторе.

С коллектора транзистора первого каскада сигнал через переходной конденсатор подается на основание транзистора второго каскада. Вход второго каскада шунтируется конденсатором частотной коррекции. Так как сопротивление конденсатора понижается с ростом частоты, то входное напряжение второго каскада и, следовательно, коэффициент усиления предварительного усилителя также уменьшаются с ростом частоты. Чтобы уменьшить емкость

и размеры конденсатора частотной коррекции, в схеме увеличены выходное сопротивление первого каскада и входное сопротивление второго каскада.

Выходное сопротивление увеличено включением сопротивления последовательно с переходным конденсатором, входное сопротивление второго каскада увеличено применением последовательной обратной связи по току (сопротивление в цепи эмиттера) и исключением параллельной обратной связи по напряжению. Последнее достигается тем, что сопротивление смещения транзистора, работающего на втором каскаде усилителя, присоединено не к коллектору, а к конденсатору фильтра в цепи коллектора.

Последовательно с конденсатором частотной коррекции включено сопротивление, благодаря которому коэффициент усиления уменьшается лишь до определенной частоты. Подъем частотной характеристики в области высоких частот, необходимый для компенсации завала, вносимого конечными размерами читающего зазора, осуществляется резонансным контуром, включенным в цепи коллектора транзистора второго каскада. Резонансный контур настроен на частоту максимального подъема частотной характеристики 7500 *гц*.

Напряжение с выхода второго каскада усилителя 7У-17 через переходной конденсатор подается на вход «Адаптер» усилителя 90У-2.

Усилитель 7У-17 имеет микрофонный вход, напряжение с которого подается на вход первого каскада через конденсатор со сравнительно малой емкостью. Срезание низких частот улучшает разборчивость речи. Включение вилки микрофонного шланга закорачивает разрезное гнездо, шунтируя выход второго каскада конденсатором, срезающим резонансный пик. Таким образом в усилителе 7У-17 при включении микрофона автоматически корректируется частотная характеристика.

Усилитель 7У-17 питается от выпрямителя лампы просвечивания усилителя 90У-2. Так как предварительный усилитель потребляет ток порядка 1 *ма*, то выпрямитель, рассчитанный на питание лампы просвечивания с током 0,75 *а*, работает практически вхолостую с выходным напряжением 15 *в*.

Большинство деталей усилителя 7У-17 смонтировано на гетинаксовой плате с печатным монтажом. На плате укреплены контактные штыри, при помощи которых уси-

литель 7У-17 включается в гнездо «Адаптер» и «Лампа просвечивания» усилителя 90У-2. Детали усилителя закрыты металлическим кожухом, на котором укреплены коаксиальный разъем шланга магнитной головки и гнезда включения микрофона.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ УСИЛИТЕЛЯ 7У-17

Номинальное входное напряжение на частоте 400 *гц* — не более 0,25 *мв* по магнитному входу и не более 1 *мв* по микрофонному входу.

Номинальное выходное напряжение — 100 *мв* на нагрузке 200 *ком*.

Уровень шумов на выходе усилителя 90У-2 при работе с предварительным усилителем 7У-17 — не более — 35 *дб*.

Размеры усилителя — 50 × 55 × 230 *мм*.

Вес — 520 *г*.

Усилитель 7У-17 компактен и в общем надежен в работе. Опыт эксплуатации комплекта, в котором работает этот предварительный усилитель, показал, что наиболее частой и почти единственной причиной неисправности являются плохие контакты в разъемах шланга магнитной головки.

Повреждения усилителя 7У-17 вызываются, как правило, неправильным включением выпрямителя лампы просвечивания.

В выпускаемых в настоящее время усилителях 90У-2 полярность напряжения на гнездах лампы просвечивания безусловно соответствует той, которая необходима для питания предварительного усилителя 7У-17. В усилителях же старых выпусков, и тем более бывших неоднократно в ремонте, полярность напряжения на гнездах питания лампы просвечивания может оказаться неправильной, а выпрямитель лампы просвечивания — заземленным.

Если в гнездах питания предварительного усилителя 7У-17 заземлено нужное гнездо, а полярность перепутана, то могут быть повреждены или конденсаторы фильтра предварительного усилителя, или транзисторы, или то и другое вместе. Если же в гнездах питания заземлено не то гнездо, то выпрямитель лампы просвечивания оказывается закороченным «земляным» проводником печатной схемы усилителя 7У-17. Этот проводник сразу же перегорит.

Заземление минусовой стороны выпрямителя лампы просвечивания может быть вызвано, в частности, нарушением исправности изоляции между корпусом электролитического конденсатора фильтра этого выпрямителя и шасси усилителя 90У-2. Вместо сгоревшего проводника печатного монтажа можно впаять проволочную перемычку, обязательно устранив причину аварии.

Поврежденные транзисторы нужно заменить. Замена может понадобиться как после аварии, вызванной подачей неправильного по величине или полярности напряжения, так и из-за заметного увеличения собственных шумов предварительного усилителя, вызванного скрытым браком малошумных транзисторов.

Приступить к замене транзисторов в предварительном усилителе можно лишь убедившись в необходимости этой замены. Так, например, если обнаружен увеличенный уровень шумов, то нужно, не доверяя слуху, либо измерить уровень шумов, либо сравнить шумы этого усилителя с шумами заведомо исправного предварительного усилителя. Если усилитель 7У-17 совершенно не работает, то прежде чем выпаивать транзисторы, нужно ориентировочно проверить исправность их при помощи омметра типа ТТ-1 или аналогичного.

Сущность проверки исправности транзисторов омметром состоит в том, что транзистор можно представить в виде двух соединенных навстречу друг другу диодов. Каждый диод, как известно, имеет малое сопротивление в одном направлении и большое в другом. Если измерять сопротивления диодов омметром, то показания омметра при исправном диоде должны заметно меняться при переполюсовке щупов.

Когда сопротивление при обоих измерениях велико, то это значит, что в диоде обрыв. При малых сопротивлениях в обоих направлениях диод пробит.

Измеряя омметром транзистор, нужно проверить исправность переходов эмиттер — основание и основание — коллектор, а также промерить сопротивление между коллектором и эмиттером. В этом случае сопротивления должны быть сравнительно большими при обоих измерениях.

Если при измерениях транзистор не выпаивается из схемы усилителя, то нужно учитывать влияние шунтирующих сопротивлений. В большинстве случаев ими можно пренебречь.

§ 2. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ НОВОЙ УНИФИЦИРОВАННОЙ ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ КИНОТЕАТРОВ, КЛУБОВ И ТЕАТРОВ

Для удовлетворения основных требований развивающейся киносети с одновременным учетом нужд звукофикации театров и клубов разработана новая звуковоспроизводящая аппаратура. Отличительной особенностью новых марок усилительных устройств и электроакустической аппаратуры является то, что они созданы на базе единого унифицированного ряда типов аппаратов следующего назначения.

Для стационарных киноустановок. а) Одноканальная аппаратура — для демонстрации фильмокопий с одноканальным звуковым сопровождением. Выходная электроакустическая мощность 25 *вт*. Используется для оборудования стационарных 16- и 35-мм киноустановок с залами до 300 мест.

Предусмотрена также возможность использования одноканальной аппаратуры в двойной комплектации (в режиме 2×25 *вт*);

б) четырехканальная аппаратура — для демонстрации широкоэкранных фильмокопий со стереофоническим звуковым сопровождением. Выходная электрическая мощность 25 и 50 *вт* в канале. Используется для оборудования кинотеатров с залами до 500 мест при мощности 25 *вт* в канале и до 1000 мест при мощности 50 *вт* в канале;

в) шестиканальная аппаратура — для воспроизведения фонограмм широкоформатных фильмокопий. Выходная электрическая мощность 50 и 100 *вт* в канале. Используется для оборудования кинотеатров с залами до 1000 мест при мощности 50 *вт* в канале и до 2000 мест при мощности 100 *вт* в канале;

г) девятиканальная аппаратура — для воспроизведения фонограмм панорамных фильмокопий. Выходная мощность 50 и 100 *вт* в канале. Используется для оборудования панорамных кинотеатров с залами до 1000 мест при мощности 50 *вт* в канале и до 2000 мест при мощности 100 *вт* в канале.

Девятиканальная аппаратура является нетиповой и может изготавливаться по специальному заданию с обязательным использованием типовых блоков.

При звукофикации театров и клубов. а) Двухканальная аппаратура с выходными мощностями 25 и 50 *вт* в канале в переносном оформлении для обслуживания выездных спектаклей. Эта же аппаратура может применяться для звукоусиления в концертных и конференц-залах;

б) шестиканальная стационарная аппаратура с выходной мощностью 50 *вт* в канале для театров вместимостью до 1000 зрителей;

в) клубная аппаратура с выходными мощностями 25 и 50 *вт* в канале, обеспечивающая возможность использования ее как для кинопоказа, так и для звукового оформления спектаклей в клубах и дворцах культуры.

Источники сигналов. Звуковоспроизводящая аппаратура, используемая в стационарной киносети, театрах и клубах, обеспечивает воспроизведение звука от следующих видов фонограмм и источников сигналов:

а) одноканальная аппаратура 35-мм киноустановок: фотографических фонограмм 35-мм фильмокопий;

б) одноканальная аппаратура 16-мм киноустановок: фотографических фонограмм 16-мм фильмокопий, магнитных фонограмм 16-мм фильмокопий.

Оба типа одноканальной аппаратуры, кроме этого, воспроизводят звук от: грамофонных записей, электродинамического микрофона, радиовещательного приемника, стандартного магнитофона. Предусматривается возможность одновременной работы от микрофона и от фонограмм любого вида;

в) четырехканальная аппаратура: фотографических фонограмм 35-мм фильмокопий, магнитных стереофонических фонограмм 35-мм широкоэкранных фильмокопий, грамофонных записей, электродинамического микрофона; радиовещательного приемника, стандартного магнитофона;

г) шестиканальная аппаратура: фотографических фонограмм 35-мм фильмокопий, магнитных стереофонических фонограмм 35-мм широкоэкранных фильмокопий, магнитных стереофонических фонограмм широкоформатных фильмокопий, грамофонных записей, электродинамического микрофона, радиовещательного приемника, стандартного магнитофона;

д) девятиканальная аппаратура: фотографических фонограмм 35-мм фильмокопий, магнитных стереофонических фонограмм 35-мм широкоэкранных фильмокопий, магнитных стереофонических фонограмм широкоформат-

ных фильмокопий, магнитных стереофонических девятиканальных фонограмм панорамных фильмокопий, граммофонных записей, электродинамического микрофона, стандартного магнитофона, радиовещательного приемника.

Кроме того, в четырех- и шестиканальной аппаратуре предусмотрено:

воспроизведение фотографической фонограммы в режиме повышенной мощности при параллельной работе трех заэкранированных каналов;

работа от микрофона, магнитофона, радиоприемника или воспроизведение грамзаписи как через заэкранированные каналы, так и через каналы зала;

одновременная работа от микрофона и от фонограммы любого вида.

Аппаратура для киносети рассчитана на работу:

а) одноканальная и четырехканальная — от любых двух проекторов трехпостной киноустановки;

б) шестиканальная — от любого кинопроектора четырехпостной киноустановки;

в) девятиканальная — от двух фильмфонографов, а также от любого кинопроектора четырехпостной киноустановки.

Способ резервирования многоканальной аппаратуры обеспечивает возможность продолжения киносеанса без перерыва (или с кратковременным перерывом) при выходе из строя любого из блоков комплекта и исключает необходимость установки резервного комплекта в кинотеатре.

В одноканальной аппаратуре предусмотрена возможность резервирования одним из нижеуказанных способов:

а) для кинотеатров малой вместимости с напряженным эксплуатационным режимом — заменой отдельных блоков комплекта;

б) для кинотеатров большей вместимости или для кинотеатров с напряженным эксплуатационным режимом — установкой второго полного канала, работающего параллельно.

Каждый звуковоспроизводящий канал многоканальной аппаратуры автономен и независим от других каналов.

Каждый усилительный канал стационарной аппаратуры состоит из системы предварительного и оконечного усиления. Предусмотрена возможность выносного регулирования громкости из зрительного зала.

Система коммутации аппаратуры обеспечивает переход с поста на пост при воспроизведении как однородных, так и разнородных (магнитной и фотографической) фонограмм без перерыва в киносеансе. В театральных и клубных комплектах система коммутации позволяет обеспечивать осуществление всех функций установки (воспроизведение, запись, звукоусиление и пр.).

Аппаратура построена по блочному принципу. Усилительные устройства имеют отдельные блоки оконечных усилителей, блоки предварительных усилителей и вспомогательные блоки. Блоки оконечных усилителей, в зависимости от назначения аппаратуры, имеют выходную номинальную электрическую мощность 25, 50 или 100 *вт*.

Блоки предварительных усилителей и ряд вспомогательных блоков и элементов максимально унифицированы, что позволяет использовать их в аппаратуре различного назначения. В аппаратуре для киносети с числом каналов до шести питание предварительных усилителей как по анодноэкранным цепям, так и по цепям накала осуществляется от оконечных усилителей, а в театральной и кино-театральной аппаратуре с количеством каналов шесть и более — таким же способом или от отдельного источника питания, в зависимости от назначения и схемы коммутации комплекта. Цепи накала предварительных усилителей питаются переменным током.

Аппаратура рассчитана на непрерывную работу в течение 16 *час* в сутки при окружающей температуре от +5 до +40° С.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТУРЕ

1. Все технические характеристики обеспечиваются в аппаратуре заводского изготовления, которая по соответствующим показателям имеет необходимые производственные запасы.

2. Питание аппаратуры осуществляется:

а) одноканальный комплект — от однофазной сети переменного тока частоты 50 *гц* с номинальным напряжением 220 *в* при колебаниях напряжения сети в пределах +10 ÷ -30% относительно номинального значения;

б) многоканальные комплекты — от одно- или трехфазной сети переменного тока частоты 50 *гц* при колебаниях напряжения сети +10 ÷ -20% относительно номинального

значения и при перекосе фаз при трехфазном питании до $\pm 10\%$. Номинальное напряжение питания блоков комплектов 220 в и $3 \times 220/380$ в.

3. Номинальная выходная мощность каждого канала аппаратуры, в зависимости от ее назначения при нагрузке оконечного усилителя на активное сопротивление номинальной величины, должна составлять:

а) 25 вт — при коэффициенте гармоник не более 1% в диапазоне частот 120—6000 гц и не более 2,5% — на граничных частотах воспроизводимого диапазона;

б) 50 вт — при коэффициенте гармоник не более 1% в диапазоне частот 120—6000 гц и не более 2% — на граничных частотах воспроизводимого диапазона;

в) 100 вт — при коэффициенте гармоник не более 1% в диапазоне частот 120—6000 гц и не более 2% — на граничных частотах воспроизводимого диапазона.

4. Воспроизводимый диапазон частот усилительного тракта аппаратуры 40—12 000 гц. Отклонения частотных характеристик от горизонтальных не должны превышать следующих значений (относительно частоты 400 гц):

а) в режиме воспроизведения магнитных фонограмм с 35- и 70-мм пленки в интервале частот 100—8000 гц — не более ± 5 дб, в диапазонах частот 40—100 и 8000—12 000 гц — не более $\pm 2,5$ дб;

б) в режиме воспроизведения магнитной фонограммы с 16-мм пленки в интервале частот 100—5000 гц — не более $\pm 1,5$ дб; в диапазоне частот 50—100 и 5000—10 000 гц — не более $\pm 2,5$ дб;

в) в режиме воспроизведения фотографических фонограмм с 35-мм фильмокопий и грамзаписи в интервале частот 40—8000 гц — не более ± 2 дб;

г) в режиме воспроизведения фотографических фонограмм с 16-мм пленки в интервале частот 60—6000 гц — не более ± 2 дб;

д) при работе от речевого микрофона в интервале частот 400—3000 гц — не более ± 1 дб, со спадом на частоте 50 гц — не менее 12 дб и на частоте 1000 гц — не менее 6 дб.

5. Отношение сигнал/шум в каждом из усилительных каналов при номинальном коэффициенте усиления канала в целом, измеренное с фильтром, имеющим частотную характеристику «В», должно быть не хуже 50—60 дб.

6. Все усилительные каналы аппаратуры для кинослухи должны иметь выносное регулирование громкости из

зрительного зала. Число ступеней регулировки — не менее 20. Общий диапазон регулирования составляет не менее 26 дб с возможностью полного выключения звука.

Дополнительные частотные искажения, вносимые регуляторами при всех возможных затуханиях, не могут превышать $+3,0 \div -1,5$ дб при общей емкости каждого из экранированных проводов соединительных линий до 5000 пф.

Выносной регулятор громкости включается в тракт на уровне не ниже 0,775 в.

Конструкция пультов дистанционного регулирования громкости допускает:

а) в одноканальной аппаратуре — отдельное регулирование громкости звука фонограмм кинофильмов и звука от микрофона, магнитофона, звукоснимателя;

б) в четырех- и шестиканальной аппаратуре — совместное регулирование громкости звука всех каналов при воспроизведении фонограмм кинофильмов; совместное регулирование громкости звука основных каналов и отдельное — канала звуковых эффектов; отдельное регулирование громкости звука от микрофона, магнитофона, звукоснимателя;

в) в театральной и клубной аппаратуре регуляторы громкости устанавливаются на пульте управления и требования к ним определяются назначением и схемой установки.

7. В кинотеатральной и клубной аппаратуре предусматривается питание читающей лампы напряжением 6 и 10 в при токе 5 а. В случае использования постоянного тока пульсации не должны превышать 0,5%. Система питания читающих ламп допускает кратковременное (до 30 сек) включение двух ламп.

8. В многоканальной киноаппаратуре предусмотрена система автоматического управления каналом звуковых эффектов при демонстрации широкоэкранных стереофонических фильмокопий.

9. Контрольно-измерительная система аппаратуры предусматривает возможность:

а) прослушивания суммарного сигнала на выходах всех каналов у каждого кинопроекторного поста с возможностью регулирования громкости;

б) измерения прибором следующих величин: напряжения питания комплекта; анодных токов выходных каскадов оконечных усилителей; анодных и экранных напряже-

ний окончательных усилителей; напряжения питания анодных цепей предварительных усилителей; напряжения смещения управляющих сеток ламп выходных каскадов окончательных усилителей.

В многоканальной аппаратуре можно прослушать сигнал и измерить его уровень на выходе каждого канала.

10. Аппаратура должна быть защищена от воздействия импульсных помех, возникающих при замыкании и размыкании контактов в цепях управления электросиловым, проекционным и осветительным оборудованием кинотеатров.

11. В аппаратуре предусмотрена ступенчатая регулировка усиления на высоких частотах, дающая спад усиления на частоте 8000 *гц* относительно частоты 400 *гц* на 6—8 *дб* и действующая при воспроизведении звука фотографических фонограмм и при работе от звукоусилителя.

В клубной и особенно театральной аппаратуре предусмотрены более широкие возможности регулирования частотных характеристик с учетом того, что аппаратура соответствующих комплектов используется не только для воспроизведения, но и для звукозаписи.

12. Конструкции однотипных блоков аппаратуры, выпускаемых различными заводами-изготовителями, допускают полную взаимозаменяемость их во всех комплектах аппаратуры.

То же требование предъявляется к отдельным деталям и узлам блоков усилительных устройств (трансформаторы, дроссели, регулировочные сопротивления и др.), в дальнейшем поставляемым в киносеть как запасные части.

Конструкция однотипных головок громкоговорителей, вне зависимости от завода-изготовителя, должна обеспечивать взаимозаменяемость подвижных систем и одинаковую величину посадочных размеров.

13. Конструкция блоков и элементов аппаратуры должна позволить иметь удобный доступ к электронным лампам и основным деталям схем для их осмотра, замены и проверки внешним измерительным прибором. В окончательных блоках также должна иметься возможность проверки схемы и режимов работы ламп и деталей без удаления этих блоков из общей конструкции.

14. На месте установки аппаратуры допускается монтаж только минимально необходимых внешних цепей:

сетевого питания, выходных линий, линий к выносному регулятору громкости, линий цепей и линий заземлений. Отдельные элементы аппаратуры соединяются с помощью придаваемых к аппаратуре готовых кабелей с разъемами или зажимами.

15. Конструкция аппаратуры предусматривает эксплуатацию надежный тепловой режим ламп и деталей без принудительной вентиляции. Для аппаратуры, где мощность рассеивания превышает 2 *квт*, допускается принудительное охлаждение общей системой вытяжной вентиляции аппаратной.

16. Конструкция аппаратуры учитывает требования правил техники безопасности, распространяемых на профессиональную звукоусилительную аппаратуру соответствующей мощности.

§ 3. УНИФИЦИРОВАННАЯ ЗВУКО- ВОСПРОИЗВОДЯЩАЯ АППАРАТУРА «ЗВУК»

В соответствии с требованиями, изложенными в § 2, отечественная промышленность начала выпускать аппаратуру звуковоспроизведения, получившую название «Звук».

Единый ряд аппаратуры предназначен для оборудования стационарных киноустановок вместимостью от 200 до 2500 зрителей и соответственно приняты три градации выходной электроакустической мощности: 25, 50 и 100 *вт* в канале.

В зависимости от вместимости зрительного зала и вида кинематографа (обычный, широкоэкранный, широкоформатный), устанавливается аппаратура:

1. «Звук 1-25» — одноканальная, с выходной мощностью 25 *вт*. Она используется при демонстрации 35-мм фильмокопий с фотографической фонограммой на киноустановках с залами вместимостью до 300 человек. Комплект не содержит резерва, поэтому его целесообразно использовать в клубах, домах отдыха и других установках с малой эксплуатационной нагрузкой. При большой эксплуатационной нагрузке устанавливают два таких комплекта, причем в этом случае работа ведется либо двумя каналами параллельно на зрительный зал, либо один из каналов используется для обслуживания фойе, танцплощадки и т. п.

Для воспроизведения звука с фотографической и магнитной фонограмм 16-мм фильма применяется аппаратура «Звук 1-25 У».

2. «Звук 4-25» — четырехканальная, с выходной мощностью 25 *вт* в каждом канале, предназначенная для воспроизведения стереофонического звука широкоэкранных фильмов в залах вместимостью до 500 человек.

3. «Звук 1-50» — одноканальная, с выходной мощностью 50 *вт* для кинотеатров до 300 мест с обычным кинопоказом.

4. «Звук 4-50» — четырехканальная, с выходной мощностью 50 *вт* в каждом канале, предназначенная для воспроизведения стереофонического звука широкоэкранных фильмов в залах вместимостью до 100 человек.

5. «Звук 6-50» — шестиканальная, с выходной мощностью 50 *вт* в каждом канале, предназначенная для воспроизведения стереофонических фонограмм широкоформатных фильмов в залах вместимостью до 1200 зрителей.

6. «Звук 6-100» — шестиканальная, с выходной мощностью 100 *вт* в канале, предназначенная для воспроизведения стереофонических фонограмм широкоформатных фильмов в залах вместимостью до 2500 человек.

Все комплекты, кроме того, позволяют воспроизводить звук от микрофона, звукоснимателя, усиление от радиоприемника. В многоканальной аппаратуре имеется возможность перевода иностранного текста фильма через заэкранные и зальные громкоговорители.

Суть унификации состоит в том, что комплекты построены по блочному принципу. Каждый блок — вполне самостоятельный элемент, который может быть использован в любом комплекте. Число различных блоков доведено до минимума: имеется всего три типа блоков оконечных усилителей (УО-11 на 25 *вт*, УО-13 на 50 *вт* и УО-15 на 100*вт*), два блока предварительного усилителя (фото УП-25 и магнитный УП-27), блок контрольного усилителя (УК-19), три типа шкафов (одно-, четырех- и шестиканальный), один шкаф предварительных усилителей и т. д.

Унифицированы также источники сигналов. Все магнитные воспроизводящие головки для киносети, независимо от числа каналов, должны иметь индуктивность 80 *мгн*. В дальнейшем намечается значительно облегчить труд кинемеханика путем установки магнитных и светооптических звукочитающих систем, не требующих юстировки. Кроме

того, предполагается использовать единую читающую лампу К6×30 с фокусирующим фланцем. Унифицированы также основные электроакустические параметры, указанные в § 2.

Все громкоговорители ряда рассчитаны на одно выходное напряжение 60 в, для чего каждый из них снабжен соответствующим согласующим трансформатором. Это очень удобно при монтаже, так как нужно только следить, чтобы общая мощность громкоговорителей, подключаемых к усилителю, не превышала его установочной мощности.

В аппаратуре «Звук» особое место уделено унификации громкоговорителей, которыми комплектуются звуковоспроизводящие устройства. В зависимости от назначения комплекта, громкоговорители образуют следующий ряд: заэкранные мощностью 12, 25, 50 и 100 в_а; зальные и для фойе мощностью 12 и 6 в_а.

Многоканальные кинотеатральные комплекты оснащаются двухполосными заэкранными громкоговорителями мощностью 25, 50 и 100 в_а, а одноканальные («Звук 1-25») — широкополосными мощностью 12 в_а.

В табл. 6 приведены данные громкоговорителей аппаратуры «Звук» и их места установки.

Проведена унификация головок и оформления громкоговорителей. Громкоговорители ряда содержат шесть типов головок: две широкополосные головки I и II классов (ШП-I и ШП-II); две низкочастотные головки (НЧ-I и НЧ-II); две высокочастотные головки (ВЧ-I и ВЧ-II). В контрольных громкоговорителях применена одна маломощная головка трансляционного типа.

Использованы ранее применявшиеся головки 2А-9, 1А-17 и новые головки, например головка I класса 4А-32. Применение широкополосных головок, воспроизводящих всю полосу частот, упрощает конструкцию громкоговорителей и облегчает их эксплуатацию по сравнению с двухполосными громкоговорителями.

В высокочастотных головках 1А-16 и 1А-17 диафрагмы из дюралюминия заменены лавсановыми, что улучшило качество звучания, повысило стабильность свойств головок и увеличило срок их службы.

Модернизированы диффузоры и центрирующие шайбы головок II класса — широкополосной 4А-28 и низкочастотной 2А-9. В результате понижена частота механического резонанса системы и уменьшено количество призвуков.

Таблица 6

Громкоговорители аппаратуры «Звук»

Тип комплекта	Место установки							
	экран		зал		фойе		контроль	
	шифр	количество	шифр	количество	шифр	количество	шифр	количество
«Звук 1-25»	30А-46	2	—	—	25А-44	1	Абонентский 0,15ГД-III-2	1
«Звук 4-25»	30А-68	3	25А-44	8	25А-44	3	То же	3
«Звук 4-50»	30А-64	3	25А-44	12	25А-44	5	» »	3
«Звук 6-50»	30А-66	5	30А-46	8	30А-46	5	25А-46	4
«Звук 6-100»	30А-62	5	30А-46	16	30А-46	8	25А-46	4

Унифицировано оформление громкоговорителей. Вместо высокочастотных рупоров с рассеивающими звуковыми линзами, сменившими в свое время в кинотеатральных громкоговорителях дорогие и сложные секционированные рупоры, теперь применены простые по конструкции рупоры новой формы, причем рассеивающие свойства их такие же, как и у линз.

«Звук 4-50», «Звук 6-50» и «Звук 6-100» имеют один и тот же низкочастотный рупор-фазоинвертор, в котором устанавливаются головки 2А-9 или 2А-11. Оформление низкочастотного звена в комплекте «Звук 6-100» получают соединением двух рупоров комплектов «Звук 6-50», что облегчает его транспортировку и установку в зале.

Все двухполосные громкоговорители ряда имеют разделительные фильтры с одинаковой частотой разделения 1200 *гц*. Цель повышения частоты разделения по сравнению с прежними двухполосными агрегатами (550 и 800 *гц*) — снизить искажения в высокочастотных головках и увеличить срок их службы.

Комплектация громкоговорителей ряда, шифры, тип и назначение головок, а также их количество на один громкоговоритель; типы и количество оформлений (ящики, рупоры); шифры и мощность согласующих трансформаторов, а также шифры и входное сопротивление разделительных фильтров указаны в табл. 7. Там же приведены основные электроакустические показатели и конструктивные данные громкоговорителей ряда.

Комплектация громкоговорителей ряда

Шифр громкоговорителя	Головки		Оформление		Вспомогательные элементы			
	шифр	количество	тип	количество	согласующие трансформаторы		разделительные фильтры	
					шифр	мощность, <i>вт</i>	шифр	входное сопротивление, <i>ом</i>
30А-46	4А-32	1	Ящик-фазоинвертор	1	Ю-49, 85, 025	12	—	—
30А-68	1А-17	1	Высокочастотный рупор	1	Ю-49, 85, 022	25	Ю-49, 12, 003	15
	2А-9	1	Ящик-фазоинвертор	1				
30А-64	1А-17	2	Высокочастотный рупор	1	Ю-49, 85, 026	50	Ю-49, 12, 004	30
	2А-9	2	Рупор-фазоинвертор	1				
30А-66	1А-16	2	Высокочастотный рупор	1	Ю-49, 85, 026	50	Ю-49, 12, 004	30
	2А-11	2	Рупор-фазоинвертор	1				
30А-62	1А-16	4	Высокочастотный рупор	2	Ю-49, 85, 026	100	Ю-49, 12, 003	15
	2А-11	4	Рупор-фазоинвертор	2				
25А-44	4А-28	1	Закрытый ящик	1	Ю-49, 85, 023	6	—	—
25А-46	4А-28	1	Закрытый ящик	1	Ю-49, 85, 024	1,5	—	—

Рассмотрим конструкции некоторых громкоговорителей ряда. Громкоговоритель 30А-46 (для «Звук 1-25») представляет собой деревянный ящик-фазоинвертор, на передней стенке которого укреплены широкополосная головка 4А-32 и согласующий трансформатор. Лицевая стенка громкоговорителя затянута радиотканью; на боковой скошенной стенке имеются две клеммы для включения в звуковую линию. Передняя стенка укреплена на шурупах и в случае необходимости может быть снята, тогда открывается доступ к головкам и трансформатору, укрепленным на ней.

Двухполосные громкоговорители 30А-62, 30А-64 и 30А-66 имеют совершенно одинаковые низкочастотные рупоры-фазоинверторы (в 30А-62 один рупор ставится на другой).

Двухполосный громкоговоритель 30А-68 представляет собой ящик-фазоинвертор, в котором применен новый высокочастотный рупор.

Громкоговоритель 25А-44 — небольшой ящик, в котором смонтированы широкополосная головка 4А-28 и согласующий трансформатор. Для переключения трансформатора панель с лепестками располагается снаружи ящика. Та же головка установлена в громкоговорителе 25А-46, который собран в небольшом ящике полуцилиндрической формы. В нем же установлены трансформатор и потенциометр для регулирования громкости.

Все головки громкоговорителей электродинамического типа с постоянными магнитами. Широкополосные и низкочастотные головки — диффузорные прямого излучения, высокочастотные — рупорные.

В вершинах бумажных диффузоров широкополосных головок 4А-28 и 4А-32 вклеен дополнительный высокочастотный излучатель, также отлитый из бумаги. Он увеличивает чувствительность головок на частотах выше 6—8 кГц.

Основные параметры громкоговорителей аппаратуры «Звук», головок громкоговорителей ряда и данные согласующих трансформаторов приведены в приложении 2.

Почти все трансформаторы имеют обмотки с отводами, что позволяет включать громкоговоритель на полную мощность или вводить затухание в 3 или 6 дБ, т. е. на громкоговоритель может подаваться половина или четверть номинальной мощности.

Выводы от обмоток заведены на расшивочные платы; при монтаже и наладке аппаратуры, припаивая концы линий к различным лепесткам платы, можно получать необходимое затухание или подавать на громкоговоритель полную мощность.

Фильтры включаются между согласующими трансформаторами и головками громкоговорителей. Такое включение позволило обойтись двумя типами фильтров: на нагрузку 15 и 30 Ом.

Переключатели, имеющиеся у разделительных фильтров, позволяют переключать на затухание 3, 6 или 9 дБ, причем частотная характеристика при этом не изменяется.

ОКОНЕЧНЫЕ УСИЛИТЕЛИ АППАРАТУРЫ «ЗВУК»

Блоки окончных усилителей всех трех типов (УО-11, УО-13 и УО-15) имеют почти одинаковую схему. Каскады предварительного усиления и фазоинверсный каскад у них полностью одинаковые, а оконечные каскады отличаются числом ламп и данными выходных трансформаторов.

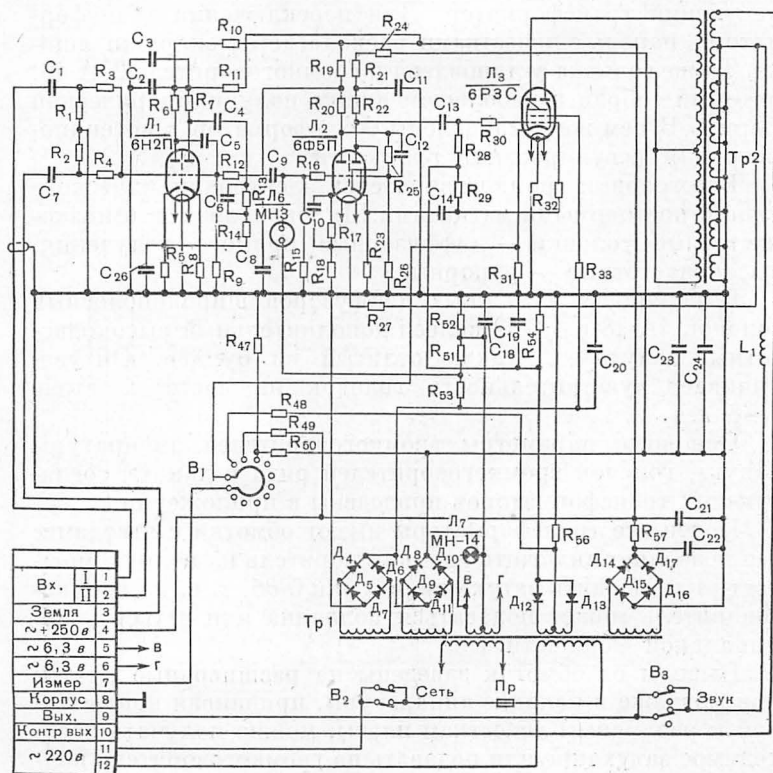


Рис. XIV-12. Принципиальная схема оконечного усилителя УО-11

сформаторов. Принципиальные схемы оконечных усилителей УО-11 и УО-15 приведены на рис. XIV-12 и XIV-13. Усилитель предназначен для усиления сигналов, поступающих от предварительных усилителей, до мощности, нужной для питания громкоговорителей. На входе усилителя

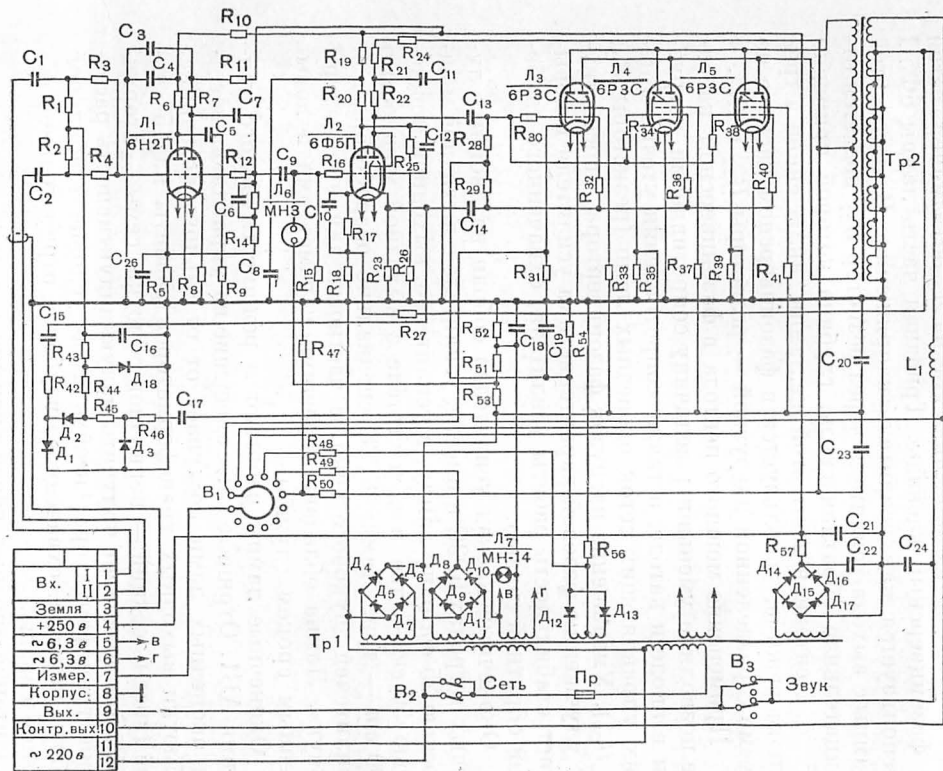


Рис. XIV-13. Принципиальная схема оконечного усилителя УО-15

имеется делитель из резисторов R_1 и R_2 , обеспечивающий работу блока от двух независимых источников сигналов.

Первые два каскада усиления построены на лампе L_1 типа 6Н2П. Они охвачены глубокой отрицательной обратной связью по напряжению. Лампа L_2 объединяет третий и фазоинверсный каскады. Триодная часть лампы 6Ф5П используется как усилитель напряжения. В катод этой лампы с выхода усилителя через резистор R_{27} подается отрицательная обратная связь, глубина которой примерно 25 дБ. Пентодная часть этой же лампы, включенной в триодном режиме, используется в фазоинверсном каскаде по схеме с разделенной нагрузкой — резисторы R_{22} и R_{23} .

Применение мощного пентода в фазоинверсном каскаде позволило уменьшить величину сопротивлений нагрузки в аноде и катоде, а также сопротивления утечки в цепях управляющих сеток оконечных ламп (резисторы R_{20} и R_{29}). Уменьшение нагрузок фазоинвертора способствует улучшению фазовой характеристики усилителя и повышает стабильность работы усилителя, охваченного глубокой обратной связью.

Оконечный каскад усилителей собран на двойных лучевых тетрадах 6РЗС и имеет в усилителе с выходной мощностью 25 Вт одну лампу, в усилителе с выходной мощностью 50 Вт — две и в усилителе с выходной мощностью 100 Вт — три. Лампа 6РЗС специально разработана для усилителей звукового кино, в частности для аппаратуры «Звук». Лампа обладает хорошими параметрами и повышенным сроком службы.

Оконечные лампы работают в режиме глубокого усиления АБ1. Отрицательное смещение на управляющие сетки оконечных ламп поступает от отдельного источника. Обмотки выходных трансформаторов разбиты на 15 секций (восемь секций — первичной обмотки, семь — вторичной), что позволяет получить малую индуктивность рассеяния трансформатора, необходимое условие стабильной работы каскада, охваченного глубокой отрицательной обратной связью.

Питание анодных цепей оконечных ламп, а также второго и четвертого каскадов производится от выпрямителя из двух последовательно соединенных мостиковых схем, работающих на полупроводниковых диодах от D_4 до D_{11} . Анодное напряжение на 6РЗС в усилителях УО-11 и УО-13 составляет 400 в, в усилителе УО-15—500 в.

Для повышения устойчивости работы всего усилительного канала на низких частотах питание анодных цепей первого и третьего каскадов оконечного усилителя и предварительных усилителей производится от отдельного выпрямителя, собранного на диодах от D_{14} до D_{17} .

Питание экранных сеток оконечных ламп осуществляется от моста на диодах $D_4 - D_7$.

Фильтры выпрямителей — емкостные. Величина емкостей конденсаторов фильтров выбрана такой, чтобы при изменении отдаваемой усилителем мощности от нуля до номинальной питающие напряжения изменились не более чем на 8—10%.

Выпрямитель напряжения смещения собран по двухполупериодной схеме на диодах $D_{13} - D_{12}$. В качестве выпрямителей используются новые кремниевые диоды $D-226$. В мостах $D_4 - D_7$ и $D_8 - D_{11}$ оконечного усилителя УО-15 применены более мощные диоды — $D-205$.

Основные данные оконечных усилителей приведены в табл. 8.

Таблица 8

Основные данные оконечных усилителей

Параметры	Типы оконечных усилителей		
	УО-11	УО-13	УО-15
Номинальная выходная мощность, <i>вт</i>	25	50	100
Коэффициент гармоник не более, %:			
на частоте 1000 <i>гц</i>	0,8	0,8	0,8
на частотах 40 и 12 000 <i>гц</i>	2,3	1,8	1,8
Неравномерность частотной характеристики в диапазоне частот 40—12 000 <i>гц</i> , <i>дб</i>	± 1	± 1	± 1
Номинальная чувствительность, <i>в</i>	0,775	0,775	0,775
Номинальное выходное напряжение, <i>в</i>	60	60	60
Уровень помех усилителя относительно номинального выходного уровня, <i>дб</i>	-70	-70	-70
Напряжение питания усилителя, <i>в</i>	$220 \pm 5\%$	$220 \pm 5\%$	$220 \pm 5\%$
Потребляемая от сети мощность, <i>вт</i>	130	240	400
Вес, <i>кг</i>	10	12	15
Габариты, <i>мм</i>	264 × 261 × 205		

Частотная характеристика усилителя имеет спад на частотах, лежащих ниже 40 *гц* (за счет переходной цепи

C_9, R_{15}). Тем самым оконечный каскад и выходной трансформатор предохраняются от перегрузки на частотах ниже 40 гц.

Усилители снабжены системой защиты экранных сеток оконечных ламп при перегрузке по входу. Для этой цели установлена лампа МН-3, которая ограничивает амплитуду сигнала при его повышении на 2—3 дб над номинальным. Усилители УО-13 и УО-15 содержат также схему защиты анодов оконечных ламп от перегрева при коротком замыкании входа.

Конструктивно оконечный усилитель выполнен в виде самостоятельного блока, смонтированного на вертикальном шасси, включающегося в шкаф с помощью ножевого разъема. Лампы L_1 и L_2 с большинством схемных элементов установлены на двух соединенных между собой платах с печатным монтажом.

Использование печатного монтажа является важнейшей особенностью блоков, благодаря чему стабилизируются электрический монтаж в производстве и параметры усилителя. Печатная плата оконечного усилителя — единая для всех трех типов блоков. Платы с печатным монтажом крепятся на шарнирах, что позволяет повернуть их для осмотра и ремонта. Плата защищена крышкой от механических повреждений. На крышке расположены выключатель сети, предохранитель, сигнальная лампа, переключатель для контроля режимов усилителя.

На задней стороне шасси находятся силовой и выходной трансформаторы, конденсаторы фильтров выпрямителя, диоды.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ УП-25

В аппаратуре «Звук» имеются два вида предварительных усилителей: один — для усиления сигнала от фотоэлектронных умножителей ФЭУ-2 (УП-25), а другой — от магнитных головок ГВУ (УП-27).

Предварительный усилитель УП-25 усиливает сигналы от ФЭУ-2 чувствительностью 400—500 мка/лм при воспроизведении фотографических фонограмм, а также сигналы от звукоснимателя и микрофона.

Принципиальная схема УП-25 приведена на рис. XIV-14. Это четырехкаскадный усилитель с катодным повторителем на выходе. В первом каскаде применена новая специальная лампа 6Ж32П — малошумный пентод, допус-

кающий питание нити накала переменным током. Это позволило отказаться от дорогостоящих выпрямителей накала, упростить коммутацию и повысить надежность предварительного усилителя.

Первый каскад усилителя охвачен глубокой отрицательной обратной связью, допускающей подключение к

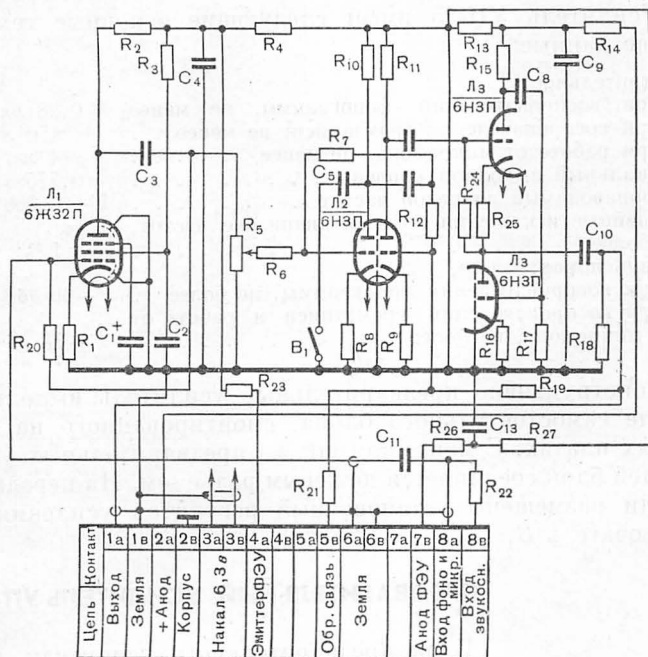


Рис. XIV-14. Принципиальная схема предварительного усилителя УП-25

его входу фотошлангов общей длиной 10—12 м (емкость фотошлангов от 150 до 1500 пф). Это позволяет подключить к усилительному устройству фотошланги сразу от всех трех кинопроекторов, а также обеспечивает большую свободу выбора места в киноаппаратной для установки усилительного устройства.

После первого каскада включен установочный регулятор уровня сигнала.

При воспроизведении изношенной фонограммы включается выключатель B_1 («спад в. ч.»), благодаря чему созда-

ется спад частотной характеристики предварительного усилителя на частоте 8000 *гц* на 6 *дб*.

В режиме воспроизведения грамзаписи предусматривается усиление сигнала от пьезоэлектрического звукоснимателя, причем сигнал проходит такой же путь, как и при работе от фотоэлектронного умножителя. Не изменяется путь сигнала и при работе от динамического микрофона.

Усилитель УП-25 имеет следующие основные технические данные:

Чувствительность:

при воспроизведении фонограммы, не менее	0,28 <i>мкв</i>
при воспроизведении грамзаписи, не менее . . .	150 <i>мв</i>
при работе от микрофона, не менее	1 <i>мв</i> .
Номинальный выходной уровень	0,775 <i>в</i>
Воспроизводимый диапазон частот	40—12 000 <i>гц</i>
Нелинейные искажения на всем диапазоне частот, не более	1 %
Уровень помех:	
при воспроизведении фонограммы, не более . . .	—60 <i>дб</i>
при воспроизведении грамзаписи и работе от микрофона, не более	—58 <i>дб</i>

Конструктивно предварительный усилитель выполнен в виде самостоятельного блока, смонтированного на печатных платах. С монтажом шкафа предварительных усилителей блок соединяется ножевым разъемом. На передней панели размещены установочный регулятор усиления и выключатель B_1 .

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ УП-27

Блок предварительного усилителя для воспроизведения магнитных фонограмм имеет два независимых входа с отдельной по каждому входу регулировкой усиления и коррекции на высоких частотах. К блоку подключаются одновременно магнитные головки двух работающих постов и с помощью имеющихся ручек регулировок устанавливается необходимое усиление и частотная характеристика для головки каждого поста.

Раздельные два входа предусмотрены для их поочередного использования при работе от двух кинопроекторов. Неработающий вход отключается реле, расположенным вне усилителя, которое замыкает на землю выход одного из входных каскадов.

Усилитель четырехкаскадный с катодным повторителем на выходе. В усилителе имеются два независимых тран-

сформаторных входа. Входные каскады собраны на новых маломощных пентодах 6Ж32П. Та же лампа используется и во втором каскаде. Третий и четвертый каскады используют лампу 6Н3П.

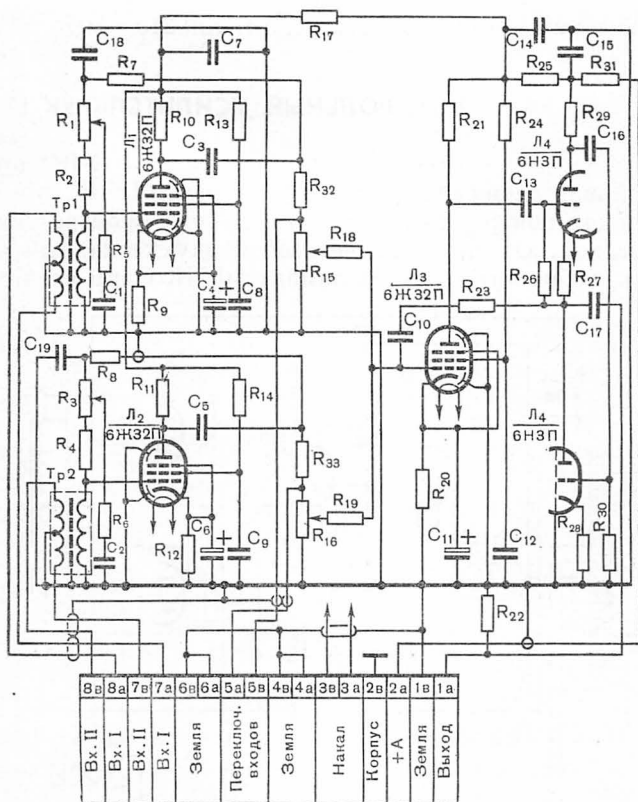


Рис. XIV-15. Принципиальная схема предварительного усилителя УП-27

Принципиальная схема предварительного усилителя УП-27 дана на рис. XIV-15. Приводим его основные технические данные:

Чувствительность, не менее	0,66 мв
Номинальный выходной уровень	0,775 в
Воспроизводимый диапазон частот	40—12 000 гц
Нелинейные искажения на всем диапазоне частот, не более	1 %
Уровень помех, не более	—58 дб

Конструктивно предварительный усилитель выполнен в виде самостоятельного блока, смонтированного на трех печатных платах. На передней панели блока размещены регуляторы усиления и коррекции высоких частот обоих выходов усилителя. С монтажом шкафа блок соединяется ножевым разъемом. Габариты усилителя: $215 \times 204 \times 52$ мм. Вес 1,55 кг.

КОНТРОЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ УК-19

Контрольный усилитель УК-19, принципиальная схема которого дана на рис. XIV-16, предназначен для контроля за качеством звуковоспроизведения в аппаратуре. Он представляет собой двухкаскадный усилитель, собранный на двух лампах 6Ф5П. Один каскад —

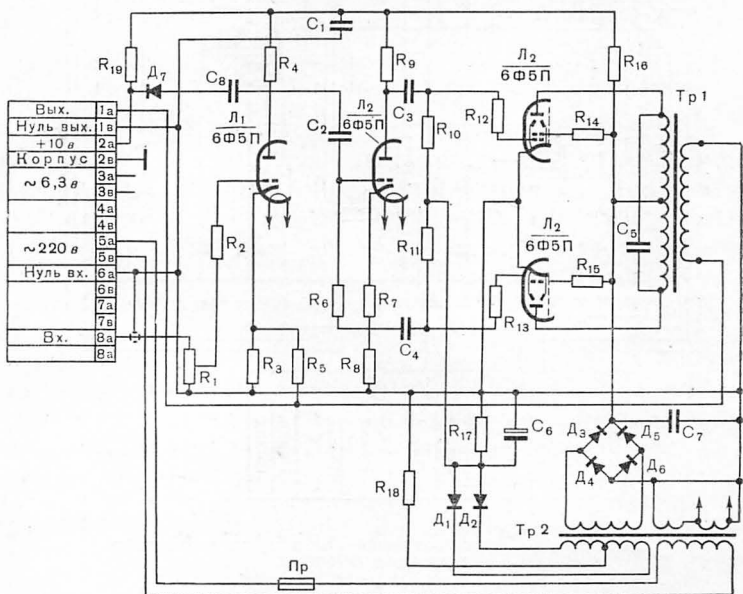


Рис. XIV-16. Принципиальная схема контрольного усилителя УК-19

фазоинверсный (используются триодные части ламп 6Ф5П) — собран по схеме с разделенной нагрузкой, второй каскад — двухтактный оконечный (используются пентодные части этих же двух ламп 6Ф5П). Оконечный каскад работает в режиме глубокого усиления АБ₁. Усилитель охвачен

глубокой отрицательной обратной связью (около 17 дБ), которая подается в катод первого каскада вторичной обмотки выходного трансформатора.

Для уменьшения индуктивности рассеяния выходного трансформатора его обмотки разбиты на семь секций. Для предотвращения самовозбуждения усилителя на высоких частотах предусмотрены антигенерационные элементы (резисторы R_2 , R_{12} и R_{13} , конденсатор C_8).

Контрольный усилитель УК-19 имеет следующие основные технические данные:

Номинальная выходная мощность	5 <i>вт</i>
Коэффициент гармоник на частотах 80 и 8000 <i>гц</i>	3 %
Номинальное выходное напряжение	60 <i>в</i>
Чувствительность	6 <i>в</i>
Неравномерность частотной характеристики в диапазоне частот 80—8000 <i>гц</i>	± 2 <i>дб</i>
Уровень помех относительно номинального выходного уровня	-55 <i>дб</i>
Мощность, потребляемая от сети	40 <i>вт</i>

Усилитель питается от сети переменного тока напряжением 220 *в* $\pm 5\%$. Выпрямитель собран на диодах Д-226, включенных по мостовой схеме. Фильтр анодного напряжения — емкостный. Смонтирован усилитель на штампованном шасси и подключается к монтажу каскада с помощью ножевого разъема.

Из основных усилительных блоков собирается звуковоспроизводящая установка «Звук».

Блоки оконечных усилителей устанавливаются в шкаф оконечных усилителей; блоки предварительных усилителей — в шкаф предварительных усилителей. В шкафы помещаются и питающие устройства. Кроме того, в комплекты входят и другие элементы, например выносной пульт регулировки громкости, переходные коробки и др., о которых будет сказано при рассмотрении комплекта «Звук 6-100».

КОМПЛЕКТ СТЕРЕОФОНИЧЕСКОЙ ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ АППА- РАТУРЫ «ЗВУК 6-100»

«Звук 6-100» предназначен для установки в больших кинотеатрах (до 2500 зрителей) и воспроизведения звука с шестиканальной магнитной фонограммы 70-мм фильма, стереофонической фонограммы 35-мм ши-

рокозкранный фильм и фотографической фонограммы 35-мм фильма.

В комплект «Звук 6-100» входят:

- Шкаф оконечных усилителей шестиканальный 50У47 (рис. XIV-17) 1 шт.
 Шкаф предварительных усилителей воспроизведения магнитных фонограмм 50У51 1 шт.

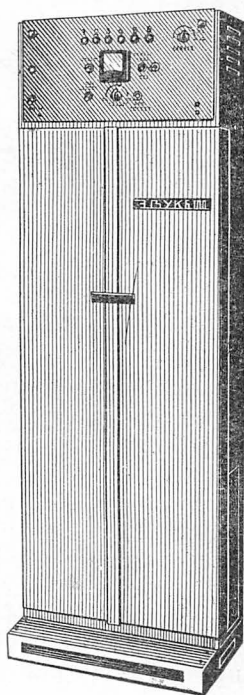


Рис. XIV-17. Шкаф оконечных усилителей 50У47

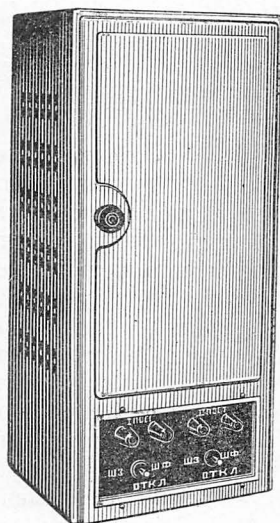


Рис. XIV-18. Шкаф предварительных усилителей 50У49

- Шкаф предварительных усилителей воспроизведения фонограмм широкоэкранных фильмов 50У49 (рис. XIV-18) 1 шт.
 Выносной регулятор громкости 6К35 1 шт.
 Переходная коробка 6К179 1 шт.
 Заэкранный громкоговоритель 5 шт.
 Громкоговоритель звуковых эффектов 12 шт.
 Громкоговоритель фойе 6 шт.

Контрольный громкоговоритель	4 шт.
Рабочий комплект ламп и предохранителей 1 компл.	
Запасной комплект ламп и предохранителей	1 компл.
Измерительный прибор ТТ-3	1 шт.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КОМПЛЕКТА

Питание комплекта от однофазной сети 220 в, 50 гц.
Мощность, потребляемая от сети, около 3 ква.

Вход рассчитан на работу от магнитных головок ГВУ-1 и ФЭУ-2 четырех универсальных кинопроекторов.

Номинальная мощность на выходе каждого канала 100 вт при коэффициенте нелинейных искажений 2%.

Номинальное выходное напряжение оконечных усилителей 60 в.

Общее количество каналов — 6, в том числе: работающих на заэкранные громкоговорители — 5; работающий на громкоговорители звуковых эффектов — 1. Полоса воспроизводимых частот — 40—12 000 гц.

Уровень собственных помех в режиме воспроизведения магнитной фонограммы — 55 дб; фотографической фонограммы — 60 дб.

Изменение уровня громкости в зале выносным регулятором громкости 26 дб.

Номинальная мощность контрольного усилителя — около 5 вт при коэффициенте нелинейных искажений до 3%. Напряжение питания читающей лампы 6 в, ток 5 а. Переход с поста на пост осуществляется релейной системой мгновенного действия.

Переход с одного вида фонограммы на другой — релейный мгновенного действия.

Шкаф оконечных усилителей для нормальной работы при температуре воздуха от +5 до +35° С требует принудительной вытяжки 500 м³ воздуха в час.

На рис. XIV-19 дана скелетная схема звуковых цепей комплекта, на которой показаны кинопроекторы с установленными на них магнитными головками или фотоэлектронными умножителями, шкафы предварительных усилителей, выносные регуляторы уровней громкости, шкаф оконечных усилителей и громкоговорители. На схеме показаны реле: аноды первых каскадов каждого из предварительных усилителей замкнуты на землю через контакты

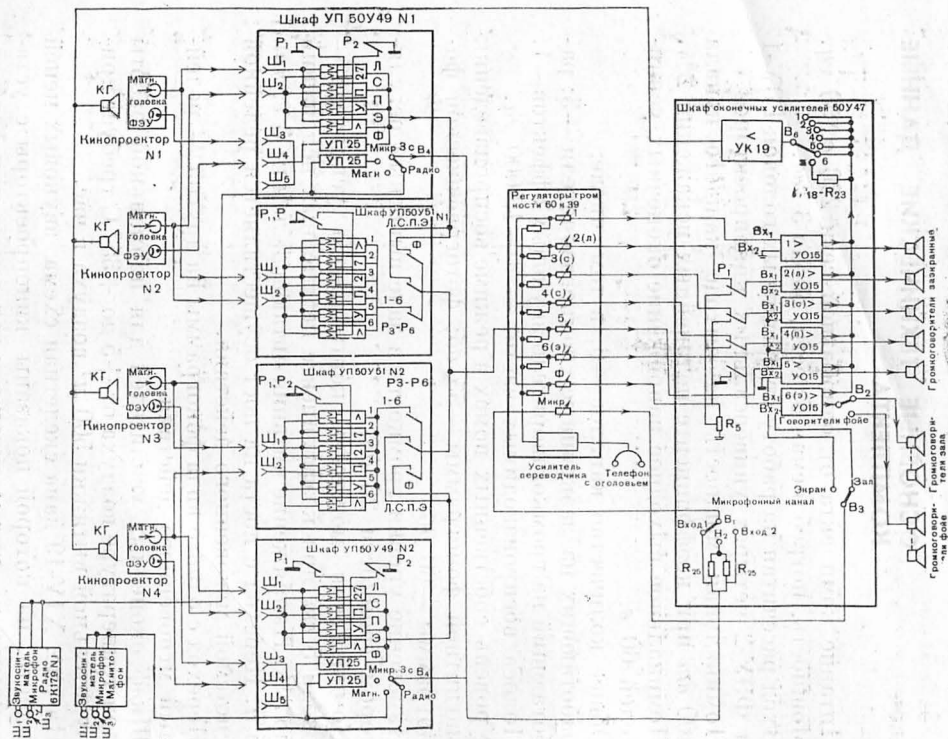


Рис. XIV-19. Скелетная схема звуковых цепей комплекта «Звук 6-100»

реле P_1 и P_2 . При открывании заслонки одного из кинопроекторов срабатывает одно из этих реле, открывая необходимые входы.

Сигналы с входов усилителей УП-27 через контакты реле P_3 и P_4 шкафов 50У51 и через контакты реле P_5 того же шкафа попадают на выносные регуляторы громкости, далее в шкаф на первые входы оконечных усилителей и, наконец, к громкоговорителям. В этом случае сигналы каналов 2 (Л), 3(С), 4(П) проходят через нормально замкнутые контакты типового реле P_1 панели 6К175, выполняющие переход комплекта с воспроизведения магнитных фонограмм на фотографические.

Вторые выходы оконечных усилителей каналов 1 и 5 замкнуты на «Землю». Вторые входы оконечных усилителей 2(Л), 3(С), 4(П) и 6 (эфф'ектов) каналов используются для работы звуковоспроизводящего устройства от микрофона и звукоснимателя.

При воспроизведении фотографических фонограмм сигнал, снимаемый с ФЭУ, подается по кабелям на один из шести разъемов, расположенных на двух шкафах предварительных усилителей 50У49, и далее на вход соответствующего предварительного усилителя УП-25.

С выхода предварительного усилителя через контакты реле P_6 шкафа 50У51 сигнал подается на регулятор громкости и далее на шкаф оконечных усилителей. В шкафу оконечных усилителей сигнал проходит через контакты реле P_1 панели коммутации 6К175 и подается на первые входы оконечных усилителей второго, третьего и четвертого каналов, причем на канал 3 непосредственно, а на 2 и 4 — после регулятора R_1 панели 6К175.

Реле P_1 панели срабатывает при включении читающей лампы. С выхода оконечных усилителей сигнал поступает на соответствующие громкоговорители зрительного зала.

На переходной коробке 6К179 (рис. XIV-20) имеются гнезда для включения микрофона, магнитофона, звукоснимателя и радиоприемника.

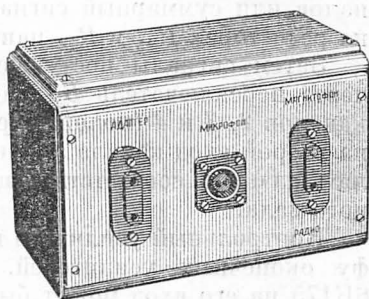


Рис. XIV-20. Переходная коробка 6К179

Сигнал с микрофона или звукоснимателя поступает на вход одного из двух усилителей УП-25 микрофонных каналов. В шкафу 50У49 переключателем B_4 выбирается необходимый режим работы. После переключателей B_4 шкафов 50У49 сигналы поступают в шкаф оконечных усилителей на переключатель B_7 панели 6К175. С помощью этого переключателя выбирается один из двух микрофонных каналов или суммарный сигнал обоих каналов, сложенный на резисторах R_{25} и R_{26} панели 6К175.

Затем сигналы поступают на регулятор громкости и через переключатель B_3 панели 6К175 на вторые входы каналов 2, 3 и 4 (положение переключателя «Экран») или на второй вход канала эффектов (положение переключателя «Зал») и на соответствующие громкоговорители зрительного зала.

Контрольный усилитель комплекта расположен в шкафу оконечных усилителей. Переключателем B_6 панели 6К175 на его вход может быть подан сигнал с выхода одного из каналов или суммарный сигнал всех шести каналов. В пульте регулятора громкости размещен усилитель переводчика. На его вход подается суммарный сигнал с выходов предварительных усилителей, а на выход включаются контрольные телефоны.

Питание комплекта осуществляется следующим образом: оконечные и контрольные усилители имеют собственные выпрямители. Кроме того, напряжение питания через переключатель B_4 панели 6К175 подводится к блокам 10В-19 питания читающих ламп и через контакты реле P_2 — P_5 к блокам питания 20В-89, расположенным в панели коммутации.

Питание четырех предварительных усилителей производится от соответствующих блоков 20В-89. Усилитель переводчика и освещение пульта регуляторов уровня громкости питаются от питающего устройства контрольного усилителя.

Коммутационное устройство комплекта позволяет производить выбор рода работы и переходить с поста на пост. Необходимый род работ выбирается переключателем B_1 (пост 1) и B_2 (пост 2) шкафов 50У51. Эти переключатели имеют три положения «ШФ» (широкоформатное), «ШЭ» (широкоэкранный) или «Фото» (обычное).

В комплекте имеется несколько блоков питания. Блок питания 10В-19 (см. рис. III-14) предназначен для питания читающей лампы кинопроекторов и питания катушек

реле звуковоспроизводящего устройства. Выпрямленное напряжение на выходе до 8 в при токе 5 а. Пульсации выпрямленного напряжения не превышают 0,5%.

Питающее устройство 20В-89 служит для питания анодных цепей лам предварительных усилителей. Оно собрано по мостовой схеме с кремниевыми вентилями. Выпрямитель имеет П-образный фильтр с резонансными контурами, настроенными на частоту 100 гц. Для стабилизации выпрямленного напряжения при изменении тока нагрузки применено термосопротивление R_1 .

Выносной регулятор уровня громкости 60К35 (см. рис. XII-14) позволяет при воспроизведении магнитных фонограмм производить регулировку уровней громкости регуляторами $P_{г1}$ и $P_{г2}$. Они позволяют вести отдельную и совместную регулировку уровня громкости в каналах, связанных с заэкранированными громкоговорителями, и канале эффектов. Для регулировки уровня громкости при воспроизведении фотографических фонограмм служит $P_{г3}$. Диапазон регулировки всех трех регуляторов 26 дб.

На лицевой панели находится также потенциометр R_8 регулирования уровня громкости микрофонного канала, сигнальные кнопки $КН_1$, переключатель фокусировки B_1 и переключатель дежурного света B_2 . Панель освещается лампами. Внутри корпуса имеется усилитель на транзисторах для переводчика.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

РЕЗИСТОРЫ (СОПРОТИВЛЕНИЯ)

В усилительной аппаратуре звукового кино широко применяются различные электрические сопротивления — резисторы. Принцип их действия основан на использовании свойства тел оказывать определенное сопротивление прохождению через них электрического тока. Величина сопротивления зависит от материала проводника, его размеров и температуры. Измеряется величина сопротивления в омах. В практике применяют также следующие производные от ома: килоом ($к\text{ом}$) = $1000 \text{ ом} = 10^3 \text{ ом}$, а также мегом ($м\text{гом}$ или $М\text{ом}$) = $1000\ 000 \text{ ом} = 10^6 \text{ ом}$.

Все сопротивления широкого применения могут быть разбиты на две основные группы: проволочные и непроволочные. Как те, так и другие могут быть регулируемыми (переменными) и нерегулируемыми (постоянными).

Проволочные сопротивления применяются в цепях, когда нужна высокая стабильность их величины при длительном воздействии больших нагрузок и особенно в условиях большого диапазона температур и влажности окружающей среды (например, в цепях автоматического смещения оконечных каскадов усилителей или делителей напряжения для питания экранных сеток ламп оконечных каскадов). Проволочные сопротивления представляют собой теплостойкий изоляционный каркас, на котором намотана проволока из сплавов с большим удельным сопротивлением (нихром, манганин и др.). Сверху обмотка обычно покрывается защитным слоем эмали.

Непроволочные сопротивления выгодно отличаются от проволочных малыми размерами. Они дешевы в производстве, имеют постоянную величину сопротивления в широком диапазоне частот, небольшую величину собственной индуктивности и емкости, что и обусловило их широкое применение.

Все сопротивления характеризуются следующими основными техническими параметрами: номинальной величиной омического

сопротивления, классом точности, номинальной мощностью, температурным коэффициентом и величиной собственных шумов сопротивления.

Сопротивления широкого применения выпускаются с номинальной величиной от единиц ом до тысячи мегомов (*гигаом*), согласно установленной ГОСТом 2825—67 шкале номинальных величин (табл. 1).

Класс точности определяет величину отклонения активного сопротивления от номинальной величины резистора. Для сопротивления I класса точности это отклонение не должно превышать $\pm 5\%$, II класса — $\pm 10\%$ и III класса — $\pm 20\%$.

Таблица 1

Номинальные величины постоянных сопротивлений
(ГОСТ 2825—67)

Допускаемые отклонения											
$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$
ом			ом, ком, Мом, Гом								
0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0	10	10	10	100	100	100
		0,11			1,1			11			110
		0,12			1,2			12			120
0,15	0,15	0,13	1,5	1,5	1,3	15	15	13	150	150	130
		0,16			1,6			16			160
		0,18			1,8			18			180
0,22	0,22	0,2	2,2	2,2	2,0	22	22	20	220	220	200
		0,24			2,4			24			240
		0,27			2,7			27			270
0,33	0,33	0,3	3,3	3,3	3,0	33	33	30	330	330	300
		0,36			3,6			36			360
		0,39			3,9			39			390
0,47	0,47	0,43	4,7	4,7	4,3	47	47	43	470	470	430
		0,51			5,1			51			510
		0,56			5,6			56			560
0,68	0,68	0,62	6,8	6,8	6,2	68	68	62	680	680	620
		0,75			7,5			75			750
		0,82			8,2			82			820
		0,91			9,1			91			910

Примечание. Настоящий стандарт распространяется на постоянные резисторы общего применения и устанавливает ряды номинальных сопротивлений в пределах от 0,1 ом до 10 Мом для проволочных резисторов и от 1 ом до 1 Гом для непроволочных резисторов с допускаемым отклонением от номинальной величины $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ и $\pm 20\%$.

В результате процесса старения величина непроволочных сопротивлений может изменяться, обычно возрастать на 1—2% от начальной величины.

Под номинальной мощностью резистора понимают максимальную мощность, которую он может рассеивать в неподвижном воздухе при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ без повреждения проводящего элемента.

Непроволочные резисторы изготавливаются на номинальную мощность в широких пределах — от 0,05 до 10 *вт*. Проволочные — от 2,5 до 150 *вт*.

Кроме номинальной мощности для каждого типа резисторов существует также максимальное напряжение, при котором оно может нормально работать. Превышать его нельзя, так как возможен пробой резистора искрой или дуговым разрядом. Чем длиннее резистор (чем больше расстояние между выводами), тем выше его максимальное напряжение.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) показывает величину относительного изменения активного сопротивления в процентах на 1°C .

ТКС у непроволочных резисторов не превышает 0,04—0,2% на 1°C , а у проволочных — $\pm 0,003$ —0,02% на 1°C .

При прохождении постоянного электрического тока через непроволочное сопротивление на его концах всегда возникает некоторое паразитное (шумовое) напряжение, что объясняется хаотическими изменениями частиц материала резистора. Величину э.д.с. шумов, возникающую на концах непроволочного резистора, оценивают в микровольтах на один вольт приложенного напряжения постоянного тока.

По величине э.д.с. шумов непроволочные сопротивления делятся на две группы:

группа А — с э.д.с. шумов не более 1 *мкв/в*;

группа Б — с э.д.с. шумов не более 5 *мкв/в*.

На резисторах наносится маркировка, указывающая их номинальную величину. На малогабаритных сопротивлениях обозначение *ком* заменяют одной буквой *К*, а обозначение *Мом* — одной буквой *М*.

На резисторе указывают либо отклонение от номинальной величины в процентах (3,6 *К*·5%), либо класс его точности (390 *К*·II). На резисторах третьего класса точности указывается только его номинальная величина.

Номинальная мощность указывается только на непроволочных резисторах, имеющих большие размеры (например, ВС-2, ВС-5 и др.). Определение номинальной мощности у других типов резисторов производится по размерам их корпуса.

Переменные сопротивления, так же как и постоянные, подразделяются на две основные группы: непроволочные и проволочные. Все они применяются для регулирования напряжения. У переменных сопротивлений кроме указанных выше показателей имеют значение еще следующие:

1. Величина максимального и минимального сопротивления.

2. Плавность изменения и устойчивость величины сопротивления в различных положениях подвижного контакта.

3. Закон изменения сопротивления от угла поворота подвижного контакта.

4. Электрическая прочность относительно корпуса.

Номинальные величины переменных сопротивлений соответствуют шкале номинальных величин ГОСТа 2825—67 (см. табл. 1).

СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОСТОЯННЫЕ УГЛЕРОДИСТЫЕ

Сопротивления ВС представляют собой фарфоровое основание в виде цилиндрика, на поверхности которого нанесен тонкий слой углерода. На концах цилиндрика имеются два гибких вывода для подключения к цепи. Проводящий слой резистора для предохранения от порчи покрывается слоем краски, на которую наносится маркировка. Сопротивления ВС выпускаются шести видов: ВС-0,25; ВС-0,5; ВС-1; ВС-2; ВС-5 и ВС-10 (цифры указывают номинальную мощность рассеяния). Они изготавливаются по I, II и III классам точности с номиналами от 27 *ом* до 10 *Мом* в обычном исполнении и с повышенной влажостойкостью.

В табл. 2 указаны технические данные сопротивлений ВС.

Таблица 2

Сопротивления ВС

Вид сопротивления	Номинальная мощность рассеяния, <i>вт</i>	Пределы значений сопротивлений, <i>ом</i>	Максимальное напряжение постоянного и переменного тока, <i>В действ</i>	Размеры корпуса, <i>мм</i>	
				диаметр	длина
ВС-0,25	0,25	27—5,1·10 ⁶	350	5,4	18,5
ВС-0,5	0,5	27—1·10 ⁷	500	5,4	28,5
ВС-1	1	47—1·10 ⁷	700	7,2	32,5
ВС-2	2	47—1·10 ⁷	1000	9,5	53
ВС-5	5	47—1·10 ⁷	1500	18,5	77
ВС-10	10	47—1·10 ⁷	3000	28,5	123

Сопротивления УЛМ (углеродистые лакированные малогабаритные) выпускаются по I, II и III классам точности с номинальными значениями от 27 *ом* до 1 *Мом*, согласно шкале номинальных величин (см. табл. 1). Предельное рабочее напряжение 100 *в*, номинальная мощность рассеяния 0,12 *вт*. Диаметр корпуса 1,5 *мм*, длина 6,5 *мм*.

Сопротивления МЛТ (металлизированные лакированные теплостойкие) выпускаются по I, II и III классам точности четырех видов: МЛТ-0,25; МЛТ-0,5; МЛТ-1 и МЛТ-2. Основные данные сопротивлений МЛТ приведены в табл. 3.

Сопротивления УЛИ (углеродистые лакированные измерительные) по своей конструкции аналогичны сопротивлениям ВС, но имеют большие габариты. Эти сопротивления отличаются большей стабильностью параметров и специально предназначены для работы в измерительной аппаратуре.

Сопротивления МТ (металлизированные теплостойкие) выпускаются пяти видов: МТ-0,125; МТ-0,25; МТ-0,5; МТ-1 и МТ-2

Таблица 3

Сопrotивления МЛТ

Вид сопро- тивления	Номиналь- ная мощ- ность рас- сеяния, <i>вт</i>	Пределы зна- чений сопро- тивления, <i>ом</i>	Предельное рабо- чее напряжение постоянного или переменного тока, <i>В</i> _{действ}	Размеры корпуса, <i>мм</i>	
				диаметр	длина
МЛТ-0,25	0,25	100·3·10 ⁶	250	2,8	7
МЛТ-0,5	0,5	100·5·10 ⁶	350	4,2	10,8
МЛТ-1	1	100·10 ⁷	500	6,6	13
МЛТ-2	2	100·10 ⁷	750	8,6	18,5

по I, II и III классам точности. Они имеют широкий интервал рабочих температур (от -60 до $+200^{\circ}$ C).

Сопrotивления МОН (металлоокисные низкоомные) предназна- чены для работы в цепях постоянного и переменного тока и в им- пульсном режиме. Выпускаются трех видов: МОН-0,5; МОН-1 и МОН-2 по I и II классам точности. Применяются в радио- и теле- визионной аппаратуре.

Сопrotивления КИМ (композиционные изолированные малога- баритные) выпускаются двух видов: КИМ-0,5 и КИМ-0,125 с но- минальными значениями от 10 *ом* до 1000 *Мом*. Это очень мало- габаритные сопротивления, вес которых 0,1—0,2 *г*.

Сопrotивления КЛМ (композиционные лакированные мегом- ные) предназначены для работы при напряжении не более 300 *в*. Выпускаются двух видов: КЛМ-1 и КЛМ-2.

СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОСТОЯННЫЕ
ПРОВОЛОЧНЫЕ

Сопrotивления ПЭ (проволочные эмалиро- ванные) предназначены для работы в тех случаях, когда необходимо обеспечить постоянство величины сопротивления или когда мощ- ность, рассеиваемая на резисторе, имеет значительную величину. Они представляют собой каркас (трубку) из керамики, пластмассы или слюды, на который наматывается провод с высоким удель- ным сопротивлением. Для уменьшения собственной индуктивности и емкости применяется бифилярная, секционированная или пере- крестная намотка константановым проводом. Для повышения влагостойкости сопротивление после намотки иногда заключается в пластмассовый корпус. Выпускаются с величинами от долей ома до 100—200 *ком*.

Интервал рабочих температур от -60 до $+70^{\circ}$ C. Основные данные по сопротивлениям типа ПЭ приведены в табл. 4.

Сопrotивления ПЭВ (проволочные эмалированные влагостой- кие) изготавливаются в двух вариантах: ПЭВ — постоянные и ПЭВР (ПЭВХ) — регулируемые хомутиком. Эти сопротивления с номинальной мощностью от 3 до 100 *вт* и с интервалом рабочих

Таблица 4

Сопротивления ПЭ

Вид сопротивления	Номинальная мощность рассеяния, <i>вт</i>	Номинальная величина сопротивления, <i>ом</i>	Размеры корпуса, <i>мм</i>	
			диаметр	длина
ПЭ-7,5	7,5	3—5100	10	40
ПЭ-15	15	3—5100	14	50
ПЭ-20	20	2,5—5100	18	50
ПЭ-25	25	4,7—5600	23	50
ПЭ-50	50	1—15 000	23	90
ПЭ-75	75	1—30 000	23	160
ПЭ-150	150	0,9—50 000	30	215

температур от -60 до $+100^{\circ}\text{C}$ изготавливаются по I и II классам точности. Основные технические данные сопротивлений ПЭВ даны в табл. 5.

Таблица 5

Сопротивления ПЭВ и ПЭВР (ПЭВХ)

Вид сопротивления	Номинальная мощность рассеяния, <i>вт</i>	Пределы значений сопротивления, <i>ом</i>		Размеры корпуса, <i>мм</i>		
		ПЭВ	ПЭВР	диаметр	длина	
ПЭВ-3	—	3	45—430	—	13,5	26
ПЭВ-7	—	7	3—3300	—	14	35
ПЭВ-10	ПЭВР-10	10	3—10 000	3—200	14	41
ПЭВ-15	ПЭВР-15	15	3—15 000	20—220	17	45
ПЭВ-20	ПЭВР-20	20	10—20 000	20—430	17	51
ПЭВ-25	ПЭВР-25	25	10—25 000	10—510	21	51
ПЭВ-30	ПЭВР-30	30	10—30 000	20—1000	21	71
ПЭВ-40	—	40	20—51 000	—	21	87
ПЭВ-50	ПЭВР-50	50	20—51 000	24—1500	29	91
ПЭВ-75	—	75	51—51 000	—	29	140
ПЭВ-100	ПЭВР-100	100	51—56 000	51—2700	29	170

Сопротивления ПЭВТ (проволочные эмалированные влагостойкие) предназначены для работы в особо тяжелых условиях.

СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫЕ
НЕПРОВОЛОЧНЫЕ

В измерительной, усилительной и радиоаппаратуре находят применение непроволочные и проволочные переменные сопротивления. Они используются как регуляторы громкости и регуляторы тембра, потенциометры и т. п.

Конструктивно непроволочные сопротивления представляют собой дужку из гетинакса, на которую нанесен токопроводящий слой из углеродистого или композиционного состава. Если в качестве изолятора используется керамика, то слой запрессовывается в дугообразную канавку.

По токонесущему слою, образующему сопротивление, может двигаться специальный ползунок, механически соединенный с осью, на которой укреплен ручка.

По характеру изменения сопротивления между крайним и средним выводами, в зависимости от угла поворота оси, переменные сопротивления подразделяются на три группы: А — линейные, Б — логарифмические, В — обратно-логарифмические (показательные).

Так, например, маркировка сопротивления «ВК-100А-0,2» означает, что это переменное сопротивление типа ВК с линейной зависимостью изменения сопротивления, номинальная мощность рассеяния 0,2 *вт*, полное сопротивление 100 *ком*.

Сопротивления типа ВК и ТК относятся к группе переменных сопротивлений старого типа. Номинальная мощность сопротивлений 0,2; 0,4 и 0,5 *вт* (при полностью включенном сопротивлении). ТК отличается от ВК тем, что имеет выключатель сети на общей оси. Выключатель обычно используется для включения или отключения усилительного устройства от питающей сети (усилитель 1У-75).

Номинальные значения сопротивлений ТК и ВК приведены в табл. 6.

Таблица 6

Номинальные значения сопротивлений ТК и ВК

ом	ком	ком	Мом
	10	100	1,0
	15	150	1,5
	20	200	2,0
2500	25	2500	2,5
3600	36	3600	3,6
5000	50	500	5,0
7500	75	750	7,5

Примечание. Сопротивления с логарифмической зависимостью имеют номинальные величины от 15 *ком* до 2 *Мом*, с показательной — от 36 *ком* до 2 *Мом*.

Начальная величина сопротивления при номинальных величинах до 100 *ком* не более 100 *ом*, свыше 100 *ком* — не более 250 *ом*.

Сопротивления переменные (потенциометры) композиционные СП предназначены для регулирования напряжения в цепях постоянного и переменного тока. По конструкции сопротивления СП подразделяются на пять типов: СП-1 — одинарный потенциометр без стопора оси; СП-2 — одинарный потенциометр со стопором оси;

СП-3 — двойной потенциометр без стопора оси; СП-4 — двойной потенциометр со стопором оси; СП-5 — одинарный потенциометр без стопора оси и фиксаторов корпуса.

Основные данные сопротивлений СП приведены в табл. 7.

Таблица 7
Сопротивления СП

Тип потенциометра	Характер изменения сопротивления	Номинальная мощность рассеяния, <i>вт</i>	Пределы номинального сопротивления
СП-1	Линейный	2	
СП-2			
СП-1	(А)	1	
СП-2			
СП-5	Нелинейный	0,5	470 <i>ом</i> —4,7 <i>Мом</i>
СП-1			
СП-2	(Б, В)	1	
СП-1			
СП-2		0,5	
СП-5		0,25	

Сопротивления СПО (переменные объемные) изготовлены на керамической основе. Они отличаются малыми габаритами и повышенной влагостойкостью. Все типы этих сопротивлений имеют только линейную зависимость изменения сопротивления от угла поворота оси.

Сопротивления СНК (двойные непровольочные с концентрическими осями без выключения), **СНБК** (с однополюсным выключателем сети на 250 *в* 1 *а*) и **СНБК-Д** (с двухполюсным выключателем сети) предназначены для работы в радиовещательной аппаратуре, установках записи и воспроизведения звука, телевизорах.

Сопротивления имеют прямолинейную, логарифмическую и показательную зависимость. Выпускаются на мощность 0,2 и 0,5 *вт*, работают в интервале температур от +5 до +60° С.

Сопротивления СПП (подстроечные, переменные) предназначены для работы в радиовещательной аппаратуре и в аппаратуре звукового кино не находят применения.

Сопротивления СПД (переменные дисковые) предназначены для малогабаритной транзисторной аппаратуры. Выпускаются с номинальной мощностью 0,05 и 0,06 *вт*. Отличаются малыми габаритами: диаметр 17,5 *мм*, толщина 4,4 *мм* (вместе с выводами — 7,7 *мм*).

СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫЕ ПРОВОЛОЧНЫЕ

Проволочные переменные сопротивления находят ограниченное применение в аппаратуре звукового кино, но подчас встречаются в различной электро- и радиоизмерительной аппаратуре. Они изготавливаются с номинальными значениями от

долей она до десятков килоом, с номинальной мощностью рассеяния 1—5 и более ватт, на рабочее напряжение 400—600 в.

Сопrotивления ПП1-1 и ПП1-3 с номинальной мощностью рассеяния 1 вт выпускаются по II классу точности. Токотпроводящий элемент намотан на пластмассовом каркасе. Полный угол поворота оси около 275°. Зависимость величины активного сопротивления от угла поворота оси линейная.

Сопrotивления ПП3-1, ПП3-4, ПП3-11 и ПП3-12 отличаются от предыдущих только большей мощностью рассеяния (3 вт) и большими габаритами.

Сопrotивления ППБ (проволочные переменные бескаркасные) изготовлены в керамических корпусах. Выпускаются шести видов, в зависимости от мощности рассеяния.

Проволочные потенциометры по конструкции аналогичны переменным сопротивлениям, но у них сделаны выводы от обоих концов проволочной спирали.

Номинальные значения величины активного сопротивления проволочных переменных резисторов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Проволочные переменные сопротивления

Виды сопротивления	Номинальные величины активного сопротивления, ом
ПП1-1	4,7, 5,6, 6,8, 8,2, 10, 12
ПП1-3	15, 18, 24, 22
ПП3-1	2,7, 3,3, 3,9, 4,7, 5,6, 8,2, 10
ПП3-4	12, 15, 18, 22, 24
ПП3-11	27, 33, 39, 47, 56, 68, 82, 100, 120, 180, 270, 330, 390, 470, 510, 560, 680, 820, 1000, 1200, 1500, 1800
ПП3-12	2200, 2700, 3300, 4700, 5100, 5600, 6800, 8200, 10 000, 12 000, 15 000, 18 000, 20 000
Потенциометры одинарные	8, 25, 85, 100, 200, 510, 1000, 2000, 3500, 5000, 10 000, 20 000
ПП2	10 000, 15 000, 20 000, 30 000, 40 000
ППБ-1, ППБ-2	100, 120, 160, 200, 250, 310, 400, 500, 630, 800, 1000, 1200, 1600, 2000, 2500, 3100, 4000, 5000, 6300, 8000, 10 000

На условных знаках сопротивлений, или, как их называют, — резисторах, наносится еще один дополнительный знак, указывающий на допустимую мощность рассеяния.

В усилителях звукового кино и электроакустической аппаратуре используют несколько типов резисторов.

Они различаются по внешнему виду и по номинальному значению сопротивления. Величина сопротивления в омах (килоомах и мегамах) обычно написана на самом резисторе. Однако, зная только величину сопротивления, его нельзя установить в ту или иную цепь усилителя. В зависимости от тока и напряжения, действующих в этой цепи, на резисторе будет выделяться различная мощность, и чтобы правильно выбрать подходящий резистор, необходимо знать, какую он имеет допустимую мощность рассеяния.

На рис. 1 даны условные обозначения, показывающие допустимую мощность рассеяния резистора. На схемах цифры, выражающие допустимую мощность рассеяния, обычно не ставят, ограничиваясь только условными значками.

Цифры, которые стоят рядом с резистором, указывают его величину. В табл. 9 дана расшифровка этих цифр. Например, на схеме рядом со знаком резистора стоит цифра 2,0 — это означает, что резистор имеет сопротивление 2 *Мом*; обозначение 5 *К* говорит о величине сопротивления 5 *ком*, и, наконец, просто цифра 2 говорит о том, что это 2 *ом*. В последнее время появились и дробные (меньше единицы) знаки сопротивлений. В этом случае рядом с цифрой пишут слово «ом». Например, 0,1 *ом*, 0,5 *ом*.

Таблица 9

Обозначение на схемах	Величина сопротивления
От 0 до 999	От 1 до 999 <i>ом</i>
От 1 <i>К</i> до 999 <i>К</i>	От 1000 до 999 000 <i>ом</i>
От 1,0 до ∞	От 1 000 000 <i>ом</i> до бесконечности

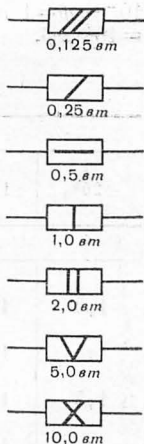


Рис. 1. Условные обозначения, показывающие допустимую мощность рассеяния резистора, применяемые на схемах

ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Фотосопротивления представляют собой непроволочные полупроводниковые устройства, омическое сопротивление которых определяется степенью освещенности. Они находят применение в некоторых типах аппаратуры звукового кино (в частности, в любительской аппаратуре), в аппаратуре автоматики, для контроля производственных процессов и т. п.

В зависимости от материала полупроводника фотосопротивления подразделяются на сернисто-свинцовые (ФС-А1, ФС-А4 и др.), сернисто-кадмиевые (ФС-К1, ФС-К2 и др.), сернисто-висмутовые (ФС-Б2) и полукристаллические селенисто-кадмиевые (ФС-Д).

КОНДЕНСАТОРЫ

В звуковоспроизводящей аппаратуре одним из важнейших элементов электрических схем являются конденсаторы — устройства, способные накапливать электрические заряды или обладающие определенной электрической емкостью. Емкость

идеального конденсатора прямо пропорциональна площади его электродов и диэлектрической проницаемости диэлектрика и обратно пропорциональна расстоянию между электродами.

Единица емкости — фарада (ϕ) — это емкость такого конденсатора, увеличение заряда которого на 1 кулон (κ) вызывает изменение разности потенциалов между обкладками на 1 в.

Практически применяются более мелкие единицы емкости: $10^{-6}\phi = 1 \text{ мк}\phi$ (микрофарада); $10^{-9}\phi = 1 \text{ н}\phi$ (нанофарада); $10^{-12}\phi = 1 \text{ п}\phi$ (пикофарада). Заметим, что $1 \text{ мк}\phi = 10^6 \text{ п}\phi$, $1 \text{ н}\phi = 10^3 \text{ п}\phi$.

Конденсаторы электрические.

Допускаемые								
$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$
<i>пф</i>								
1,0	1,0	1,0	10	10	10	100	100	100
		1,1			11			110
		1,2			12			120
1,5	1,5	1,3	15	15	13	150	150	130
		1,5			15			150
		1,6			16			160
2,2	2,2	1,8	22	22	18	220	220	180
		2,0			20			200
		2,2			22			220
3,3	3,3	2,4	33	33	24	330	330	240
		2,7			27			270
		3,0			30			300
4,7	4,7	3,3	47	47	33	470	470	330
		3,6			36			360
		3,9			39			390
6,8	6,8	4,3	68	68	43	680	680	430
		4,7			47			470
		5,1			51			510
8,2	8,2	5,6	82	82	56	820	820	560
		6,2			62			620
		6,8			68			680
9,1	9,1	7,5	91	91	75	910	910	750
		8,2			82			820
		9,1			91			910

Примечания. 1. Настоящий стандарт распространяется жидким диэлектриком и устанавливает ряды номинальных емкостей. Стандарт не распространяется на конденсаторы специального назначения.

2. Для номинальных емкостей с допускаемым отклонением $\pm 20\%$ в технических условиях, утвержденных в установленном порядке.

3. Номинальные емкости электролитических конденсаторов 5000 мкф. Допускаемые отклонения от номинальной емкости

В зависимости от материала диэлектрика, конденсаторы подразделяются на бумажные, металлобумажные, электролитические, слюдяные, пленочные, стеклоэмалевые, керамические, вакуумные и с воздушным диэлектриком.

Конденсаторы оцениваются величиной емкости, классом точности, номинальной величиной напряжения, температурным коэффициентом емкости (ТКЕ), сопротивлением изоляции или сопротивлением утечки конденсатора и тангенсом угла потерь. Все эти характеристики определяют область применения тех или иных конденсаторов.

Таблица 10

Ряды номинальных емкостей

отклонения							
$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$ $\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$ и $\pm 20\%$	
<i>мкф</i>							
1000	1000	1000	0,010	0,010	0,10	1,0	10 100
		1100		0,012			
1500	1200	1200	0,015	0,012	0,15	1,5	15
	1500	1300		0,015			
	1800	1800		0,018			
		2000					
2200	2200	2200	0,022	0,022	0,22	2,2	22
		2400		0,027			
	2700	2700		0,027			
		3000					
3300	3300	3300	0,033	0,033	0,33	3,3	33
		3600		0,039			
	3900	3900		0,039			
		4300					
4700	4700	4700	0,047	0,047	0,47	4,7	47
		5100		0,056			
	5600	5600		0,056			
		6200					
6800	6800	6800	0,068	0,068	0,68	6,8	68
		7500		0,082			
	8200	8200		0,082			
		9100					

на электрические конденсаторы постоянной емкости с твердым и стей в пределах от 1 *пф* до 5000 *мкф*. назначения.

возможны отклонения более $\pm 20\%$, которые указываются в стан-порядке.

должны соответствовать 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, ± 10 и $\pm 20\%$.

В звуковом кино наиболее широкое применение находят бумажные, слюдяные и электролитические конденсаторы.

Ряды номинальных емкостей электролитических конденсаторов приведены в табл. 10.

Конденсаторы КБГ (бумажные герметизированные) предназначены для работы при напряжении не ниже 10 в. Они выпускаются четырех видов: КБГ-И — в цилиндрическом корпусе из изоляционного материала; КБГ-М₁ и КБГ-М₂ — в металлическом цилиндрическом корпусе; КБГ-МП — в металлическом прямоугольном плоском корпусе; КБГ-МН — в металлическом прямоугольном корпусе (нормальный).

При работе в цепях переменного тока частотой 50 гц величина допустимого напряжения не должна превышать значений, указанных в табл. 11.

Таблица 11

Конденсаторы КБГ

Номинальное напряжение постоянного тока, в	Допустимое напряжение переменного тока, В действ.	
	номинальная емкость до 2 мкф	номинальная емкость 4—10 мкф
200	160	130
400	250	200
600	300	250
1000	400	350
1500	500	—

Конденсаторы КБГ-МП выпускаются с номинальной емкостью 0,01—0,25 мкф. Кроме того, блоками 2×0,05; 2×0,25; 3×0,1; 3×0,25 мкф на напряжения 200, 400, 600 и 1000 в.

Конденсаторы КБГ-МН выпускаются с номинальной емкостью 0,25—10 мкф и блоками 2×0,25; 2×1,0; 2×2,0 мкф на напряжения 200, 400, 600, 1000 и 1500 в.

Другие виды бумажных конденсаторов: К40П (БГМ — бумажные герметизированные малогабаритные), БМ (бумажные малогабаритные), БМТ (бумажные малогабаритные теплостойкие), БМГТ (бумажные малогабаритные опрессованные) и КБП (бумажные проходные) практически не применяются в аппаратуре звуковоспроизведения киноустановок.

КОНДЕНСАТОРЫ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ

Электролитический конденсатор представляет собой алюминиевый сосуд, внутри которого помещены две свернутые в рулон полосы алюминиевой фольги, между которыми находится пропитанная электролитом фильтровальная бумага. Диэлектриком служит тонкий слой оксида, полученный на одной или

обеих обкладках конденсатора. Вследствие ничтожно малой толщины оксида в электролитических конденсаторах удается получить очень большие емкости. Благодаря своей большой удельной емкости (большая емкость при малых размерах) они получили очень широкое применение.

Однако они имеют и значительные недостатки: большой ток утечки, сильную зависимость величины емкости от температуры, сравнительно небольшой срок службы и обладание полярностью

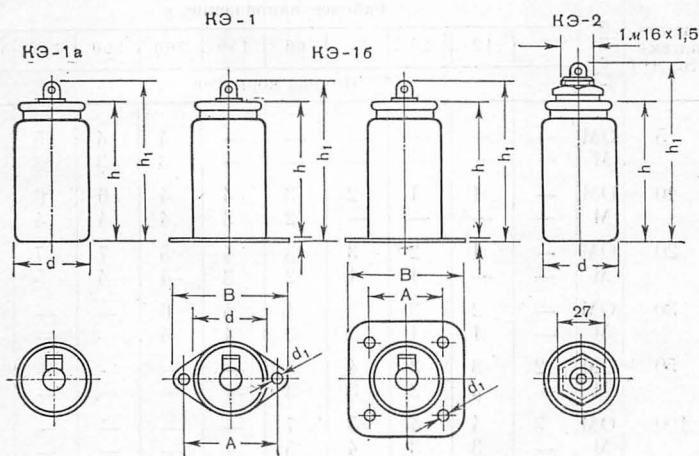


Рис. 2. Электролитические конденсаторы типа КЭ

что позволяет использовать их только в цепях постоянного и пульсирующего тока.

Вывод от положительной обкладки конденсатора укреплен на крышке корпуса, а отрицательная обкладка соединена с его корпусом.

При включении в схему электролитических конденсаторов необходимо соблюдать указанную на них полярность.

Неправильное включение конденсатора недопустимо, так как приводит к его порче. Электролитические конденсаторы выпускаются в диапазоне рабочих напряжений 8—500 в. Конденсаторы с рабочим напряжением до 50 в называются низковольтными и применяются для блокировки сопротивлений автоматического смещения. Конденсаторы с рабочим напряжением выше 50 в называются высоковольтными и применяются обычно в фильтрах выпрямителей передвижной и стационарной аппаратуры.

По хладоустойчивости электролитические конденсаторы подразделяются на следующие группы: Н — неморозоустойчивые ($-10 \div +60^\circ \text{C}$), М — морозоустойчивые ($-40 \div +60^\circ \text{C}$), ПМ — повышенной морозоустойчивости ($-50 \div +60^\circ \text{C}$) и ОМ — особо морозоустойчивые ($-60 \div +60^\circ \text{C}$).

Конденсаторы КЭ и КЭ-2-Н (с алюминиевым анодом) (рис. 2) изготавливаются в нескольких конструктивных оформлениях: КЭ-1а — без крепежной планки, КЭ-1б — с крепежной планкой, КЭ-2 кре-

пятся гайкой, КЭ-3 имеют выводы. Конденсаторы имеют емкость от 5 до 2000 *мкф*, ток утечки 1,3—3 *ма*, срок службы 1200 *час*.

Данные о номинальных величинах емкостей конденсаторов типа КЭ, их рабочих напряжений, а также размеры корпусов приведены в табл. 12 и 13.

Т а б л и ц а 12

Данные электролитических конденсаторов типа КЭ

Номинальная емкость, <i>мкф</i>	Группа	Рабочее напряжение, <i>в</i>									
		8	12	20	30	60	150	300	400	450	500
		Номера корпусов									
5	OM	—	—	—	—	—	—	4	4	5	5
	M	—	—	—	—	—	—	3	3	3	4
10	OM	—	1	1	2	3	4	4	6	6	7
	M	—	—	—	—	2	3	4	4	4	5
20	OM	—	1	2	3	3	4	5	7	7	8
	M	—	—	1	1	2	3	4	4	5	6
30	OM	—	2	3	3	4	5	6	—	—	—
	M	—	1	1	2	3	4	4	—	—	—
50	OM	2	3	3	4	5	—	—	—	—	—
	M	—	2	2	3	3	—	—	—	—	—
100	OM	3	4	4	5	7	—	—	—	—	—
	M	—	3	3	4	5	—	—	—	—	—
200	OM	4	5	5	7	—	—	—	—	—	—
	M	—	4	4	5	—	—	—	—	—	—
500	OM	6	6	7	8	—	—	—	—	—	—
	M	—	5	6	7	—	—	—	—	—	—
1000	OM	7	8	9	—	—	—	—	—	—	—
	M	—	7	8	—	—	—	—	—	—	—
2000	OM	9	9	—	—	—	—	—	—	—	—
	M	—	8	9	—	—	—	—	—	—	—

Конденсаторы ЭГЦ (электролитические герметизированные цилиндрические) изготавливаются в двух конструктивных вариантах для крепления, рассчитаны на напряжение 6—600 *в*, емкостью 2—2000 *мкф*.

Конденсаторы ЭМ (электролитические малогабаритные) выпускаются на напряжение 4—150 *в*, емкостью 0,5—50 *мкф*.

Конденсаторы ЭФ (электролитические фотоосветительные) предназначены для цепей питания импульсных ламп-вспышек. Рассчитаны на напряжения 130—300 *в*, емкостью 300—1500 *мкф*.

Конденсаторы ЭМИ (электролитические миниатюрные) предназначены для малогабаритной транзисторной аппаратуры. Они выпускаются на номинальное напряжение постоянного тока 3 *в*, емкостью 0,5; 1,25 и 10 *мкф*. Ток утечки при температуре +20° С составляет 0,5—3 *мкв*. Диаметр корпуса 3 *мм*, длина 10,5—12 *мм*. Срок службы 500 *час*.

Размеры электролитических конденсаторов КЭ

Номера корпусов	Размеры, мм (по рис. 2)						Форма фланца
	d	h	h_1	A	B	d_1	
1	16	28	36	22	28	3,2	Овал
2	19	28	36	25	31	3,2	
3	21	35	43	27	33	3,2	
4	26	60	68	32	38	3,2	Квадрат
5	34	65	73	29	36	3,2	
6	34	90	98	29	36	3,2	
7	34	114	122	29	36	3,2	
8	50	114	122	41	50	4,3	
9	65	114	122	54	65	4,8	

Примечание. Конденсаторы с корпусами 1, 2, 8, и 9 изготавливаются только типа КЭ-1.

Кроме перечисленных промышленностью выпускается еще целый ряд электролитических конденсаторов специального назначения: ЭК (электролитические кольцевые), ЭТО (электролитические танталовые объемнопористые), К50-3 и К33-1 — новый тип окисно-полупроводниковых танталовых конденсаторов без электролита и др. В звуковом кино они пока не находят применения.

КОНДЕНСАТОРЫ СЛЮДЯНЫЕ

Слюдяные конденсаторы обладают замечательным свойством — очень небольшими потерями, т. е. в них практически отсутствует ток утечки. Поэтому они применяются в качестве переходных конденсаторов в схемах усилителей.

Диэлектриком в этих конденсаторах служат пластинки слюды, обкладки — из алюминиевой, свинцовой или красно-медной фольги. Для защиты от влияния внешней среды конденсаторы запрессовываются в пластмассу.

Конденсаторы КСО (слюдяные опрессованные) изготавливаются шести видов на номинальные напряжения постоянного тока 250—7000 в, емкостью 51—50 000 нф по I, II и III классам точности. Тангенс угла потерь 0,01—0,004, сопротивление изоляции 7500 Мом. Конденсаторы очень стабильны в отношении изменения температуры.

Конденсаторы КСОТ (слюдяные опрессованные, тепло- и влагостойкие) изготавливаются шести видов на напряжения 250—1000 в, емкостью 51—1000 нф.

Конденсаторы КСГ (слюдяные герметизированные) выпускаются двух видов на напряжение 500 и 1000 в, емкостью от 470 до 0,1 мкф.

Конденсаторы СГМ (слюдяные герметизированные малогабаритные) изготавливаются на номинальные напряжения 250—1500 в, емкостью 51—10 000 нф.

Конденсаторы пленочные, керамические, стекло-эмалевые и другие специального назначения в аппаратуре звукового кино не применяются и поэтому здесь сведения о них не приводятся.

На принципиальных схемах конденсаторы иногда обозначают с наклонной линией со стрелкой или без нее. Это означает, что конденсатор переменной емкости или подстроечный. На низковольтных конденсаторах кроме цифры, указывающей значение емкости, как правило, написано и значение рабочего или пробивного напряжения. Для обычных конденсаторов постоянной емкости с твердым диэлектриком и небольших конденсаторов переменной емкости на схемах не указывается рабочее напряжения. Рабочее напряжение не указывается, так как перечисленные конденсаторы выдерживают значительно большие напряжения, чем те, которые действуют в усилителях киноустановок.

Электролитические конденсаторы, наоборот, очень чувствительны к перегрузкам. Если обычные конденсаторы выдерживают часто двукратную перегрузку по напряжению, то электролитические даже при небольшой перегрузке выходят из строя. Причем иногда, особенно крупные конденсаторы, в момент пробоя могут взорваться и повредить монтаж. Поэтому в обозначение электролитического конденсатора кроме его условного символа и величины емкости обязательно входит цифра, показывающая номинальное рабочее напряжение. Величина емкости любого конденсатора обозначается на схеме цифрами, расшифровка которых дана в табл. 14.

Таблица 14

Обозначение на схеме	Величина емкости
От 1 до 999	От 1 до 999 <i>пф</i>
От 0,01 до 0,999	От 0,01 до 0,999 <i>мкф</i>
От 1,0 до ∞	От 1 <i>мкф</i> до бесконечности

Например, конденсатор емкостью 6800 *пф* на схеме обозначают просто цифрой 6800. Конденсатор емкостью 50 000 *пф* обозначают цифрой 0,05, так как емкость его равна 0,05 *мкф*.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ, ГОЛОВОК И СОГЛАСУЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ АППАРАТУРЫ «ЗВУК»

Таблица 1

Основные параметры громкоговорителей аппаратуры «Звук»

Шифр громко- говорителя	Электроакустические показатели				Конструктивные данные	
	номинальная электрическая мощность, <i>вт</i>	номинальное входное электри- ческое сопротив- ление, <i>ом</i>	воспроизводимый диапазон частот (неравномерность 12 <i>дб</i>), <i>гц</i>	среднее стандартное звуковое давление, <i>н/м²</i>	размеры (высота, ширина, глубина), <i>мм</i>	вес, <i>кг</i>
30А-46	12	300	60—14 000	0,35	980×490×360	40
30А-68	25	144	55—12 000	0,3	1160×730×460	65
30А-64	50	72	50—12 000	0,3	1760×1382×1021	315
30А-66	50	72	40—14 000	0,35	1760×1382×1021	325
30А-62	100	36	40—14 000	0,35	3237×1382×1021	615
25А-44	6	600	80—12 000	0,25	330×330×210	8
25А-46	1,5	2400	100—12 000	0,25	300×269×280	7

Основные параметры головок громкоговорителей аппаратуры «Звук»

Шифр, назначение и класс	Электроакустические показатели					Конструктивные данные		
	номиналь- ная мощность, вт	номинальное электрическое сопротив- ление, ом	частота механи- ческого резонанса, гц	диапазон частот (неравно- мерность 12 дб), гц	среднее стандартное звуковое давление, н/м ²	размеры (диаметр, глубина), мм	диаметр излучателя или выходного отверстия, мм	вес, кг

Диффузорные головки

4А-28 ШП—II	6	15	50—70	60—14 000	0,28	258; 90	235	1,5
4А-32 ШП—I	12	15	40	40—14 000	0,35	352; 210	280	10
2А-9 НЧ—II	25	15	35—55	40—1 200	0,3	385; 195	330	13,5
2А-11 НЧ—I	25	15	25—40	35—3 000	0,35	485; 190	410	15

Рупорные головки

1А-17 ВЧ—II	8	20	—	800—12 000	0,7	144; 95	28	6
1А-16 ВЧ—I	10	26	—	500—14 000	0,8	126×124; 162	28	7,3

59675
315
59980

Таблица 3

Трансформаторы громкоговорителей апаратуры «Звук»

Шифр трансформатора	Мощность, <i>вт</i>	Выходные напряже- ния, <i>в</i>
Ю — 49.85.022	25	19,4; 9,7
Ю — 49.85.023	6	7,75; 3,85; 1,93
Ю — 49.85.024	1,5	4,75
Ю — 49.85.025	12	13,5; 6,8; 3,4
Ю — 49.85.026	50	39; 19,5

Приложение 3

Цоколевка полупроводниковых приборов, применяемых в звуковоспроизводящих устройствах.

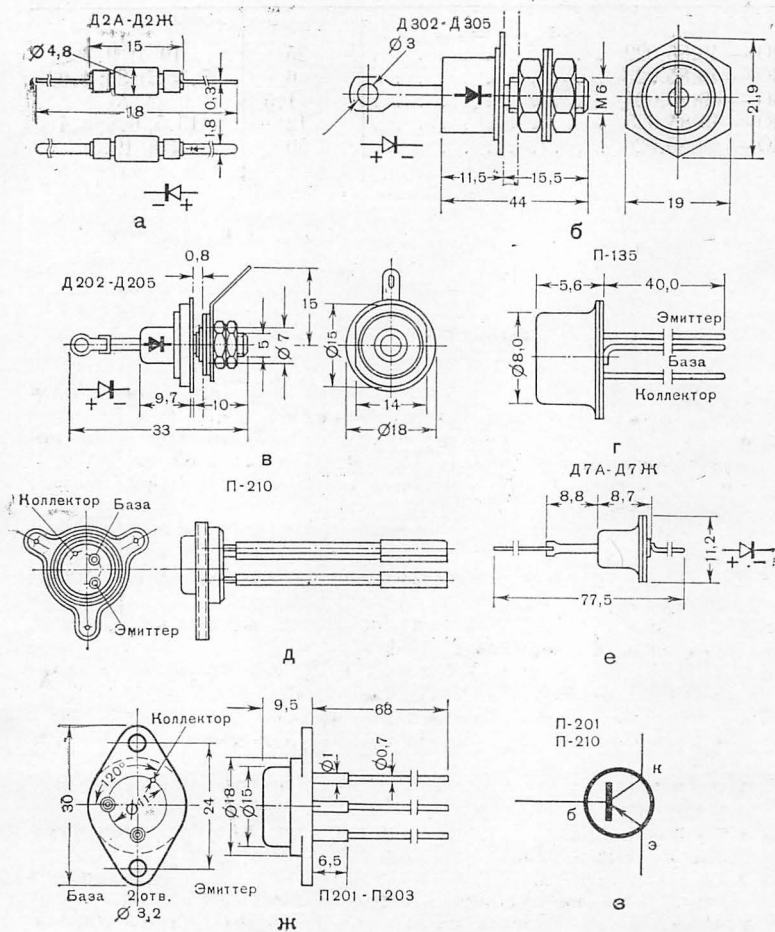


Рис. 3. Цоколевка некоторых полупроводниковых приборов, применяемых в звуковоспроизводящих устройствах: а — диоды Д2А—Д2Ж; б — диоды Д302—Д305; в — диоды Д202—Д205; г — транзистор П-135; д — транзистор П-210; е — диоды Д7А—Д7Ж; ж — транзисторы П2 в 1—П203; з — условное обозначение транзисторов П-201 и П-210

ЛИТЕРАТУРА

- Андеррег Г. Ф., Барбанель С. Р., Справочная книга киномеханика и кинотехника, Лениздат, 1959.
- Андеррег Г. Ф., Регулировка кинопроекционной и звуковоспроизводящей аппаратуры, «Искусство», 1963.
- Бенедиктов А. А., Звуковая часть кинопроектора, «Искусство», 1962.
- Болотников И. М., Громкоговорители звукового кино, «Искусство», 1957.
- Бялик Г. И., Усилители звуковой частоты на транзисторах, «Искусство», 1965.
- Войшвилло Г. В., Усилители низкой частоты на электронных лампах, Связьиздат, 1959.
- Качерович А. Н., Хомутов Е. Е., Акустика и архитектура кинотеатра, «Искусство», 1961.
- Каририди С. Д., Контрольные фильмы, «Искусство», 1965.
- Ломанович В. А., Справочник по радиодеталям, ДОСААФ, 1966.
- Муромцев В. В., Усилительные устройства и электроакустика, изд. 2, «Искусство», 1957.
- Панфилов Н. Д., Гардашьян В. М., Акустика кинотеатра, «Искусство», 1957.
- Подкуйко С. И., Третьякова А. А., Измерения в усилителях киноустановок, «Искусство», 1960.
- Сажин Л. И., Электропитание стационарных киноустановок, «Искусство», 1963.
- Ухин П. Н., Техника безопасности на кинопредприятиях, «Искусство», 1962.
- Федосеев П. Г., Выпрямители и стабилизаторы, «Искусство», 1960.
- Федосеев П. Г., Электротехника, «Искусство», 1963.

- Федосеева Е. О., Усилительные устройства, «Искусство», 1961.
- Федосеева Е. О., Звуковоспроизводящая аппаратура киноустановок, «Искусство», 1963.
- Чудновский И. Я., Электровакуумные приборы и усилители, «Искусство», 1955.
- Чудновский И. Я., Устранение неисправностей в усилителях, «Искусство», 1965.
- «Кинемеханик» № 7, 8, 9, 11 и 12 за 1966 г. и № 1, 3, 4, 5, 6 и 7 за 1967 г. Описание аппаратуры «Звук» (авторы Волошин Г., Мебель Э.).

II часть.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Звук	3
§ 1. Основные понятия о звукозаписи и воспроизведе- нии звука	3
§ 2. Физические характеристики звука	12
§ 3. Физиологические характеристики звука	18
§ 4. Акустика помещений	29
§ 5. Акустические требования к кинотеатру	42
Глава II. Вентили	48
§ 1. Основные понятия о строении вещества и ато- ма. Виды проводимости	48
§ 2. Классификация вентиляей и их параметры	55
§ 3. Электронные вентили (кенотроны)	58
§ 4. Ионные вентили (газотроны)	64
§ 5. Полупроводниковые вентили	69
Глава III. Выпрямители однофазного тока	79
§ 1. Однополупериодный выпрямитель	79
§ 2. Двухполупериодный выпрямитель	82
§ 3. Мостовая схема выпрямления	84
§ 4. Сглаживающие фильтры	85
§ 5. Выпрямители в комплекте звуковоспроизводя- щей аппаратуры киноустановок	93
Глава IV. Электронные лампы	101
§ 1. Физическое представление процессов в триоде	101
§ 2. Характеристики и параметры триодов	106
§ 3. Использование триода для усиления электри- ческих колебаний	117
§ 4. Искажения, возникающие при усилении трех- электродной лампы	121
§ 5. Способы подачи отрицательного смещения	127
§ 6. Многоэлектродные электронные лампы	130
§ 7. Электронно-лучевые трубки	136
Глава V. Транзисторы (полупроводниковые триоды)	141
§ 1. Устройство и принцип работы транзистора	141
§ 2. Схемы включения транзисторов	146
§ 3. Характеристики и параметры транзистора	151

4444

Глава VI. Фотоэлементы	156 ✓
§ 1. Фотоэлектронная эмиссия	156
§ 2. Электровакуумные фотоэлементы	158
§ 3. Фотоэлектронные умножители	162
§ 4. Полупроводниковые фотоэлектрические приборы	164
Глава VII. Усилители низкой частоты	167 ✓
§ 1. Назначение и классификация усилителей низкой частоты	167
§ 2. Резисторный каскад	179
§ 3. Трансформаторный и дроссельный каскады усиления напряжения	207
Глава VIII. Оконечные и предоконечные каскады	223 ✓
§ 1. Назначение и особенности выходных каскадов	223
§ 2. Режим работы ламп мощного каскада	228
§ 3. Эквивалентная схема двухтактного выходного каскада	236
§ 4. Двухтактные выходные каскады на транзисторах	237
§ 5. Предоконечные каскады	240
Глава IX. Обратные связи в усилителях	250 ✓
§ 1. Схемы обратной связи	250
§ 2. Положительная и отрицательная обратная связь	252
§ 3. Самовозбуждение многокаскадных усилителей	256
§ 4. Паразитные связи в усилителях и способы предотвращения генерации	260
Глава X. Катодный повторитель	264 ✓
§ 1. Схема катодного повторителя и ее особенности	264
§ 2. Способы подачи отрицательного напряжения смещения на сетку лампы катодного повторителя	270
§ 3. Применение катодного и эмиттерного повторителей	271
Глава XI. Входные цепи усилителей	275 ✓
§ 1. Схемы входа при работе от фотоэлементов	275
§ 2. Схемы входа при работе от звукоснимателя и микрофона	280
§ 3. Схемы включения магнитных воспроизводящих головок	286
§ 4. Экранировка входных цепей	288
Глава XII. Коррекция частотной характеристики усилителя	293 ✓
§ 1. Способы коррекции частотной характеристики	293
§ 2. Схемы коррекции	295
§ 3. Схемы автоматической коррекции	303
§ 4. Регулирование громкости	306
Глава XIII. Электроакустическая аппаратура	311 ✓
§ 1. Электродинамический громкоговоритель	311
§ 2. Основные характеристики громкоговорителей	317
§ 3. Работа диффузорного громкоговорителя со щитом и в ящике	320
§ 4. Телефон, микрофон, звукосниматель	333
§ 5. Магнитные головки	338

Глава XIV. Промышленные усилительные устройства киноустановок	344
§ 1. Комплект передвижного звуковоспроизводящего устройства КУУП-56	344
§ 2. Основные направления создания новой унифицированной звуковоспроизводящей аппаратуры для кинотеатров, клубов и театров	369
§ 3. Унифицированная звуковоспроизводящая аппаратура «Звук»	376
Приложения	398
Литература	419

360

897404

89716

120

199+

82+

4+

285+

13+

298+

~~852404ас~~

$$24162 \text{ м.} =$$

$$= 66 \text{ мес } 72 \text{ м.}$$

Панфилов Николай Дементьевич
УСИЛИТЕЛИ КИНОУСТАНОВОК

Редактор Л. О. Эйсымонт.
Художественный редактор В. Д. Карандашов.
Художник Г. Я. Нагорянский.
Технический редактор В. У. Борисова.
Корректор В. П. Акулинина

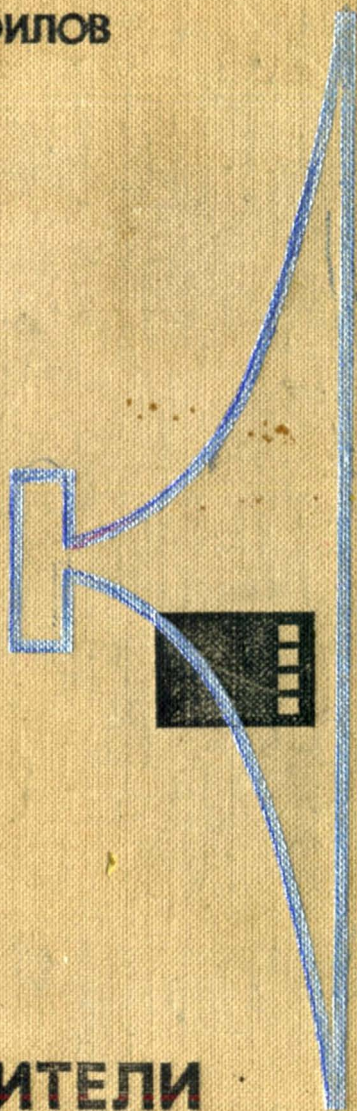
А06532. Сдано в набор 3/1 1968 г. Подписано
к печати 1/VII 1968 г. Формат бумаги 84×108^{1/32}.
Бумага типографская № 1. Усл. печ. л. 22,26.
Уч.-изд. л. 21,442. Тираж 33 000 экз.
Издат. № 16537

Издательство «Искусство», Москва, К-51, Цвет-
ной бульвар, 25. Заказ тип. 2296

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография
имени А. А. Жданова Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Москва, Ж-54, Валуевая, 28.

Цена 1 р. 32 к.

Н. Д. ПАНФИЛОВ



**УСИЛИТЕЛИ
КИНОУСТАНОВОК**