

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПАРАЗИТНЫЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ

3-1. ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ НА РАБОТУ УСИЛИТЕЛЕЙ

Разработка усилителя так же, как и большинства радиоэлектронных приборов, разбивается на два этапа: проектирование и экспериментальная доводка. Разброс параметров ламп, контуров и деталей, невозможность точного учета обратных связей и потерь в контурах, влияние расположения деталей и длины соединительных проводов приводят к тому, что экспериментальная доводка является почти неизбежной частью разработки усилителя. Чем больше факторов, определяющих работу усилителя, учтено при его расчете и конструировании, чем тщательнее и продуманнее выполнен его монтаж, тем, очевидно, проще и быстрее производится экспериментальная доводка усилителя. В идеальном случае она могла бы свестись к простому его испытанию. Наоборот, при неудачном проекте усилителя добиться удовлетворительных результатов удастся только после длительного экспериментирования с рядом последовательно изготавливаемых образцов.

Сложность регулирования и настройки разрабатываемого усилителя почти целиком определяется наличием в нем обратных связей. Хорошо экранированный усилитель, в котором предусмотрено подавление паразитных связей по всем возможным путям их возникновения, может быть настроен достаточно быстро. Усилитель, экранированный недостаточно или неверно, можно безрезультатно настраивать месяцами. Причины возникновения в усилителях нежелательных обратных связей можно разбить на две основные группы. К первой группе относятся обратные связи, возникающие через емкость анод — сетка C_{ag} электронной лампы, и через сопротивление обратной связи r_{12} полупроводникового триода (транзистора).

Ко второй группе отнесем обратные связи, возникающие вследствие несовершенного экранирования отдельных каскадов усилителя друг

от друга.

Ниже разбираются разнообразные цепи паразитных обратных связей в усилителях, за исключением связи через сопротивление r_{12} в транзисторе. Это сопротивление является одной из основных составных частей эквивалентной схемы транзистора, и его влияние не может рассматриваться изолированно от общей теории транзисторных схем.

3-2. ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРИОДА

При подключении цепи сетки лампы к источнику входного напряжения U_{BX} этот источник нагружается. (рис. 3-1) эквивалентным активным сопротивлением R_{BX} и эквивалентной входной емкостью C_{BX} . Величины этих нагрузок зависят от реакции анодной и катодной цепей лампы на сеточную цепь. При правильном подборе типа лампы работа происходит на не слишком высоких для нее частотах. В этом случае влияние вре-

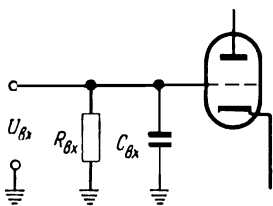


Рис. 3-1. Входная емкость и входное активное сопротивление лампы.

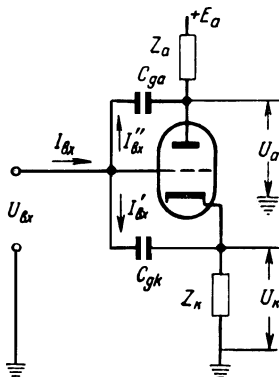


Рис. 3-2. К расчету входного сопротивления триода.

мени пролета электронов в промежутке катод—сетка—анод можно не учитывать и считать, что реакция на сеточную цепь происходит только через внутриламповые емкости.

Для анализа входного сопротивления триода определяют ток I_{BX} (рис. 3-2), который протекает во входной цепи лампы, разветвляясь на два тока: I'_{BX} , протекающий по цепи сетка—катод через емкость C_{gk} , и I''_{BX} , протекающий по цепи сетка—анод через емкость C_{ga} .

Емкость C_{gk} находится под разностью потенциалов

$$\bar{U}_{BX} - \bar{U}_k = \bar{U}_{BX} - \bar{K}_k \bar{U}_{BX} = \bar{U}_{BX} (1 - \bar{K}_k)$$

где $\bar{K}_k = \frac{\bar{U}_k}{\bar{U}_{BX}}$ — комплексный коэффициент усиления каскада от сетки

до катода с учетом фазы, определяемой катодным сопротивлением \bar{Z}_k .

Эта разность потенциалов вызовет через емкость C_{gk} ток

$$\bar{I}'_{ex} = \bar{U}_{ex} j\omega C_{gk} (1 - \bar{K})$$

Емкость C_{ga} находится под разностью потенциалов

$$\bar{U}_{ex} - \bar{U}_a = \bar{U}_{ex} - (-\bar{K}_a \bar{U}_{ex}) = \bar{U}_{ex} (1 + \bar{K}_a)$$

где $\bar{K}_a = -\frac{\bar{U}_a}{\bar{U}_{ex}}$ комплексный коэффициент усиления

каскада от сетки до анода с учетом фазы, определяемой анодным сопротивлением Z_a , и без учета поворота фазы на 180° , даваемого электронным током лампы. Эта разность потенциалов вызовет через емкость C_{ga} ток

$$\bar{I}''_{ex} = \bar{U}_{ex} j\omega C_{ga} (1 + \bar{K}_a)$$

Суммарный ток во входной цепи лампы будет

$$\bar{I}_{ex} = \bar{I}'_{ex} + \bar{I}''_{ex} = \bar{U}_{ex} j\omega [C_{gk} (1 - \bar{K}_k) + C_{ga} (1 + \bar{K}_a)]$$

Отсюда следует, что входное сопротивление триода с нагрузкой в аноде и в катоде равно

$$\bar{Z}_{ex} = \frac{\bar{U}_{ex}}{\bar{I}_{ex}} = \frac{1}{j\omega [C_{gk} (1 - \bar{K}_k) + C_{ga} (1 + \bar{K}_a)]} \quad (3-1)$$

Комплексные коэффициенты усиления K_k и K_a можно представить в тригонометрической форме

$$\bar{K}_k = K_k \cos \varphi_k + jK_k \sin \varphi_k$$

и

$$\bar{K}_a = K_a \cos \varphi_a + jK_a \sin \varphi_a$$

где K_k и K_a — модули, т. е. абсолютные значения коэффициентов усиления по катоду и аноду без учета их фазы;

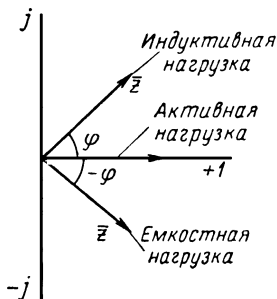


Рис. 3-3. Фазовый угол сопротивления нагрузки.

φ_k и φ_a — фазовые углы полных сопротивлений нагрузок в цепях катода \bar{Z}_k и анода \bar{Z}_a (рис. 3-3).

Подставляя это соотношение в уравнение (3-1) и учитывая, что согласно рис. 3-1 входное сопротивление лампы представляется в виде параллельного соединения $R_{вх}$ и $C_{вх}$, после преобразований получаем

$$\frac{1}{Z_{вх}} = \frac{1}{R_{вх}} + j\omega C_{gk} K_a \sin \varphi_k - \omega C_{ga} K_a \sin \varphi_a + j\omega [C_{gk}(1 - K_k \cos \varphi_k) + C_{ga}(1 + K_a \cos \varphi_a)]$$

Отсюда находим окончательные выражения для входной емкости триода

$$C_{вх} = C_{gk}(1 - K_k \cos \varphi_k) + C_{ga}(1 + K_a \cos \varphi_a) \quad (3-2)$$

и для входного активного сопротивления

$$R_{вх} = \frac{1}{\omega C_{gk} K_k \sin \varphi_k - C_{ga} K_a \sin \varphi_a} \quad (3-3)$$

3-3. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ЧЕРЕЗ ВНУТРИЛАМПОВЫЕ ЕМКОСТИ НА РАБОТУ УСИЛИТЕЛЕЙ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ, ВИДЕОУСИЛИТЕЛЕЙ И КАТОДНЫХ ПОВТОРИТЕЛЕЙ

В реостатных усилителях низкой частоты и в некорректированных видеосилителях анодная нагрузка для низких и средних частот всегда чисто активна, а при высоких частотах к ней добавляется емкостная составляющая. В этих условиях фазовый угол анодной нагрузки φ_a всегда отрицателен ($\varphi_a < 0$).

Если катодное сопротивление R_k (рис. 3-4), включаемое для получения автоматического смещения, отсутствует или зашунтировано большой емкостью C_k , то в выражениях (3-2) и (3-3) $K_k = 0$ и они обращаются в

$$C_{вх} = C_{gk} + C_{ga}(1 + K_a \cos \varphi_a) \quad (3-4)$$

$$R_{вх} = -\frac{1}{\omega C_{ga} K_a \sin \varphi_a} \quad (3-5)$$

При отрицательных фазовых углах $\cos \varphi_a > 0$ и $\sin \varphi_a < 0$.

Отсюда следует, что в указанных усилителях $R_{вх}$ всегда положительно, и обратная связь через емкость анод—сетка не может привести к самовозбуждению.

Она может вызвать только сильный спад усиления на высоких частотах из-за большой величины $C_{вх}$ и уменьшения $R_{вх}$ с повышением частоты.

Так, например, каскад усиления на сверхминиатюрном триоде 6С6Б с параметрами $S = 5 \text{ ма/в}$, $\mu = 25$, $R_i = 5 \text{ ком}$, $C_{гk} = 3,3 \text{ пф}$, $C_{га} = 1,42 \text{ пф}$ при сопротивлении нагрузки $R_a = 20 \text{ ком}$ будет иметь следующие показатели:

а) коэффициент усиления на средних частотах

$$K_a = K_0 = \frac{\mu R_a}{R_i + R_a} = \frac{25 \cdot 20}{5 + 20} = 20;$$

б) входная емкость на средних частотах, при которых можно пренебречь емкостью в анодной цепи и считать, что $\varphi_a = 0$:

$$C_{вх} = C_{гk} + C_{га}(1 + K_a) = 3.3 + 1.42 \cdot 21 = 20;$$

в) входное сопротивление $R_{вх}$ определим на частоте 1 МГц, которую условно будем считать граничной. На этой частоте сопротивление всех распределенных емкостей, шунтирующих анодную нагрузку R_a , приводит к тому, что коэффициент усиления K_a падает до 0,7 от значения на средних частотах, т. е. до 14.

В этом случае полное сопротивление анодной нагрузки упадет от величины $R_a = 20 \text{ ком}$ до величины $\bar{Z}_a = 6,4 \text{ ком}$, откуда

$$\cos \varphi_a = \frac{6.4}{20} = 0.32 \quad \varphi_a = -71^\circ \quad \sin \varphi_a = -0.95$$

Входное сопротивление лампы упадет от $R_{вх} = \infty$ на средних частотах до

$$R_{вх} = \frac{1}{\omega C_{га} K_a \sin \varphi_a} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10^6 \cdot 1.42 \cdot 10^{-12} \cdot 0.95} = 8.5 \text{ кОм}.$$

Очевидно, что такое значение $R_{вх}$ резко снизит усиление предыдущего каскада на высоких частотах и оно не будет соответствовать расчету, проведенному без учета емкости $C_{га}$.

В корректированном видеоусилителе в нагрузку анодной цепи включается небольшой дроссель, который может привести к тому, что на некоторых частотах полное сопротивление анодной нагрузки \bar{Z}_a примет индуктивный характер ($\varphi_a > 0$). Тогда входное сопротивление $R_{вх}$ делается отрицательным, из-за чего может или чрезмерно возрасти усиление, или произойти самовозбуждение усилителя.

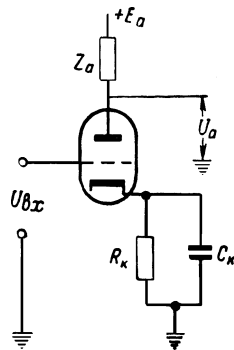


Рис. 3-4. Усилитель низкой частоты или видеоусилитель.

В схеме катодного повторителя (рис. 3-5) сопротивление R_a отсутствует, $K_a = 0$ и выражения (3-2) и (3-3) обращаются в

$$C_{вх} = C_{ga} + C_{gk}(1 + \cos \varphi_k)$$

$$R_{вх} = \frac{1}{\omega C_{gk} K_k \sin \varphi_k}$$

Обычной нагрузкой катодного повторителя является сопротивление R_k , зашунтированное емкостью $C_k = 10$ — 30 пф для схем, работающих на согласованный кабель, и

$C_k = 100$ — 1000 пф для схем, работающих на несогласованный кабель.

Фазовый угол такой нагрузки отрицателен и определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi_k = -\omega C_k R_k$$

Если в катод лампы 6С6Б включены $R_k = 10$ ком и $C_k = 1000$ пф, то на частоте в 1 МГц

$$\operatorname{tg} \varphi_k = -\omega C_k R_k = -2 \cdot \pi \cdot 10^6 \cdot 1000 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 10^3 = -62.8$$

Этому соответствует

$$\varphi_k = -80^\circ, \quad \sin \varphi_k = 0.9998, \quad \cos \varphi_k = 0.00175$$

и при $K_k = 0.9$

$$C_{вх} \approx C_{ga} + C_{gk} = 3.3 + 1.42 = 4.72 \text{ нФ}$$

$$R_{вх} = \frac{1}{\omega C_{gk} K_k \sin \varphi_k} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10^6 \cdot 3.3 \cdot 10^{-12} \cdot 0.9 \cdot 0.9998} = -54 \text{ кОм}$$

Величина отрицательного активного входного сопротивления катодного повторителя мало зависит от величины нагрузочной емкости C_k . При снижении ее в 10 раз фазовый угол изменится до $\varphi_k = -81^\circ$ и входное сопротивление возрастет всего на 1%. Даже при минимальной возможной емкости в катоде $C_k = 10$ пф фазовый угол изменится до -32° и входное сопротивление увеличится всего в два раза. Так же слабо зависит $R_{вх}$ от величины R_k .

Отрицательное входное сопротивление катодного повторителя обратно пропорционально частоте ω . На высоких частотах оно может полностью скомпенсировать потери резонансных контуров, подключенных к сеточной цепи, и вызвать самовозбуждение. На очень высоких частотах (порядка 100 МГц и выше) влияние индуктивности катодного вывода (0,02—0,05 мкГн) превосходит влияние емкостной нагрузки, фазовый угол пол-

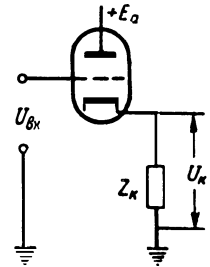


Рис. 3-5. Катодный повторитель.

ного сопротивления в цепи катода становится положительным и опасное для самовозбуждения отрицательное входное сопротивление становится также положительным.

Таким образом, самовозбуждение катодного повторителя может возникнуть в диапазоне частот 10—100 МГц, поэтому следует избегать включения в сеточную цепь резонансных контуров, настроенных на эти частоты, или сильно увеличивать их затухание. К таким контурам можно отнести цепи коррекции видеоусилителя, к которому подключается катодный повторитель и паразитные контура, возникающие в монтаже цепи сетки катодного повторителя.

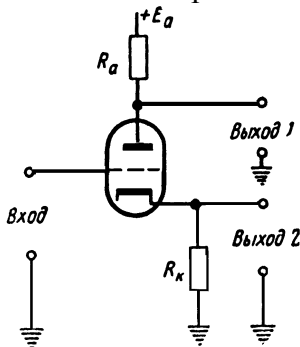


Рис. 3-6. Схема с сопротивлениями в анодной и катодной цепях.

Иногда схема включения электронной лампы и в анодной, и в катодной цепях содержит сопротивления, не зашунтированные большими емкостями (рис. 3-6). Если в такой схеме выходное напряжение снимается с анода (выход 1), то это будет схема усилительного каскада с отрицательной обратной связью по току; если используется выход 2, то это будет схема катодного повторителя, в которой сопротивление R_a

предохраняет лампу от перегрузок; если используются оба выхода, то это будет схема двухфазного повторителя. В этих случаях для определения входного сопротивления и входной

емкости приходится пользоваться полными выражениями (3-2) и (3-3). На средних частотах, при которых небольшими паразитными емкостями, шунтирующими R_a и R_k , можно пренебречь, $\varphi_k = \varphi_a = 0$; $R_{вх} = \infty$ и

$$C_{вх} = C_{gk}(1 - K_k) + C_{ga}(1 + K_a) \quad (3-8)$$

В усилителе низкой частоты и в видеоусилителе увеличение не зашунтированного емкостью сопротивления R_k приводит к увеличению коэффициента усиления по катоду K_k и к уменьшению коэффициента усиления по аноду. Эти величины связаны соотношением

$$K_a = K_0(1 - K_k) \quad (3-9)$$

где

$$K_0 = \frac{U_a}{U_{ск}} = \frac{\mu R_a}{R_i + R_a}$$

— коэффициент усиления каскада то аноду без обратной связи при зашунтированном емкостью сопротивлении R_k

Из выражений (3-8) и (3-9) следует, что введение сопротивления R_k и его $NexTube$

увеличение при одновременном увеличении R_a так, чтобы K_a оставалось неизменным, незначительно влияет на входную емкость. В выражении (3-8) уменьшается только первый член, который и без того во много раз меньше второго. Уменьшение $C_{вх}$, наблюдаемое при введении R_k , получается не из-за отрицательной обратной связи, а из-за уменьшения величины K_a . Почти такой же эффект можно получить при уменьшении K_a и другими способами.

В схеме двухфазного повторителя $R_a=R_k$. При этом

$$K_a = K_k = \frac{K_0}{K_0 + 1}$$

и входная емкость делается весьма малой, близкой к $C_{вх} \approx 2C_{га}$.

Активная составляющая входного сопротивления схем с нагрузкой в аноде и в катоде, определяемая уравнением (3-3), может иметь различную величину и различные знаки в зависимости от фазовых углов нагрузок и от соотношения первого и второго членов уравнения.

Неудачные комбинации этих величин могут привести к ненормальному падению усиления в области высоких частот, к ненормальному увеличению усиления или к самовозбуждению. При наличии таких эффектов необходимо произвести проверку входного сопротивления по уравнению (3-3) с учетом всех реактивностей в анодной и катодной цепях, включая индуктивности ламповых выводов.

В триодных усилителях низкой частоты и в видеоусилителях входная емкость в основном определяется членом выражения (3-2)

$$C_{га}(1 + K_a \cos \varphi_a).$$

Избыточная величина этого члена часто препятствует разработке высококачественного усилителя, что является основанием для применения экранированных ламп (пентодов или тетродов) со значительно меньшей емкостью $C_{га}$. Расчет входной емкости и активного входного сопротивления усилительных каскадов с экранированными лампами производится по тем же уравнениям (3-2)—(3-8) при условии правильного выбора емкости, блокирующей экранирующую сетку на катод (см. § 3-6). Вторым способом уменьшения влияния входной емкости усилительного каскада на триоде является применение катодного повторителя, малое

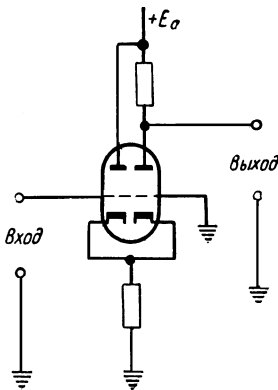


Рис. 3-7. Усилитель с катодной связью.

выходное сопротивление которого позволяет подключать довольно большую емкость без заметного ухудшения параметров. Из всех возможных вариантов такого введения минимальное число деталей имеет «усилитель с катодной связью» [27], выполняемый на двойном триоде (рис. 3-7) и являющийся комбинацией из катодного повторителя и усилителя с заземленной сеткой.

3-4. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ЧЕРЕЗ ВНУТРИЛАМПОВЫЕ ЕМКОСТИ НА РАБОТУ РЕЗОНАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ВЫСОКОЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ

В одноконтурном однокаскадном резонансном усилителе нагрузка в анодной цепи может иметь активный, емкостный или индуктивный характер в зависимости от частоты подаваемого на сетку входного напряжения.

Сопротивление, включаемое в катод усилителя, обычно блокируется большой емкостью на корпус, из-за чего $K_k \cos \varphi_k = 0$. На рис. 3-8 показаны амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики такого усилительного каскада. Сопоставляя эти характеристики с уравнениями (3-2) и (3-3), можно легко убедиться в том, что одноконтурный усилительный каскад будет иметь максимальную входную емкость на резонансной частоте ω_0 , для которой $\varphi_a = 0$, $\cos \varphi_a = 1$, $K_a = K_a \text{ макс}$ и входная емкость

$$C_{вх-макс} = C_{gk} + C_{ga}(1 + K_{a-макс})$$

Для определения величины активного сопротивления нужно рассмотреть произведение $K_a \sin \varphi_a$. На резонансной частоте ω_0 $\sin \varphi_a = 0$, $R_{вх} = \infty$ и активная составляющая входного тока отсутствует. При расстройке в обе стороны от ω_0 абсолютное значение φ_a и $\sin \varphi_a$ растет, значение K_a падает, а произведение $|K_a \sin \varphi_a|$ сначала растет, а затем уменьшается. Частоты, на которых произведение $|K_a \sin \varphi_a|$ будет максимальным, находятся путем составления уравнений частотной и фазовой характеристик усилителя и определения обычным путем максимума указанного произведения. В результате получается, что эти частоты соот-

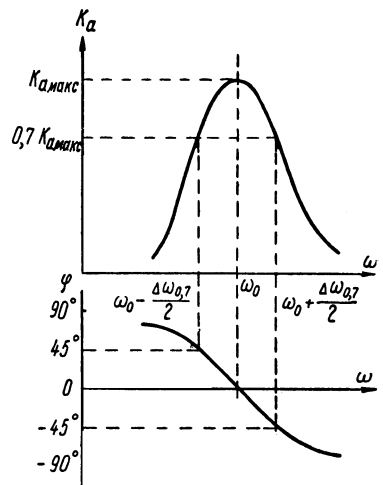


Рис. 3-8. Амплитудно- частотная и фазо-частотная характеристики одноконтурного усилительного каскада.

ветствуют краям полосы пропускания,

$$\omega_0 \pm \frac{\Delta\omega_{0.7}}{2}$$

на которых $K_a=0.7K_{a\text{макс}}$ и $\varphi_a\pm 45^\circ$.

Подставив эти значения в уравнение (3-3), получим минимальную величину входного сопротивления

$$|R_{вх\text{макс}}| = \frac{2}{\omega C_{га} K_{a\text{макс}}}$$

Это сопротивление имеет знак «+» на частоте края полосы пропускания выше ω_0 и знак «—» на частоте ниже ω_0 .

Таким образом, в резонансный контур, включенный на входе лампы, вносятся цепью обратной связи на различных частотах различные по величине и по знаку затухание, что приводит к искажению частотной характеристики или к самовозбуждению усилителя.

Для устранения вредного влияния емкости $C_{га}$ применяют экранированные лампы, пентоды или тетроды, имеющие емкость сетка—анод $C_{га}$ в 100—1000 раз меньшую, чем триоды. Использование экранированных ламп прежде всего устраняет увеличение входной емкости, вызываемое емкостью $C_{га}$, так как для этих ламп произведение $C_{га}(1+K_{a\text{макс}})$ при самых неблагоприятных условиях не превосходит 1 нФ . Так же резко увеличивается активное входное сопротивление $R_{вх}$.

Существует много схем для нейтрализации влияния емкости $C_{га}$ триодов [2] и экранированных ламп [20]. На практике в поемно-усилительных устройствах эти схемы не применяются, так как требуют кропотливого подбора и настройки. Всегда проще применить экранированные лампы и взять большее их число при меньшем усилении на каскад. Единственным известным исключением из этого правила является схема резонансного усилителя с минимальным уровнем шума, в которой для получения малого шума применены триоды, что потребовало нейтрализации емкости $C_{га}$.

Применение отрицательной обратной связи по току за счет включения в катод незаблокированного сопротивления почти не уменьшает входной емкости триода. Такое включение уменьшает только первый член выражения (3-2), который и без того значительно меньше второго.

Введение в катод пентода полностью или частично не зашунтированного сопротивления может заметно уменьшить входную емкость, так как в этом случае первый член выражения (3-2) больше второго. Такое включение также полезно для уменьшения изменения входной емкости и, следовательно, для уменьшения расстройки контуров усилителя при регули-

ровании усиления подачей на сетку отрицательного напряжения [27].

3-5. НАИБОЛЬШЕЕ УСТОЙЧИВОЕ УСИЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Подключение цепи сетки лампы, минимальное входное сопротивление $R_{вх\min}$ которой определяется уравнением (3-10) к резонансному контуру приводит к искажению его частотной характеристики. Это искажение удобно оценивать соотношением между эквивалентным сопротивлением контура R_3 , которое он имеет на резонансной частоте ω_0 , когда $R_{вх}=\infty$, и величиной этого же сопротивления R'_3 , когда контур шунтируется сопротивлением $R_{вх\min}$. Очевидно, что величинам R_3 и R'_3 обратно пропорциональны затухания d_3 и d'_3 , характеризующие частотную характеристику усилительного каскада.

На базе уравнения (3-10), задавшись 10%-ным изменением затухания контура от влияния C_{ag} , В. И. Сифоров [15] показал, что в резонансном усилителе с любым числом каскадов максимальное устойчивое усиление на каскад от сетки до анода не должно превосходить величины

$$K_{a\max.уст} = 0.42 \sqrt{\frac{S}{\omega_0 C_{ag}}} \quad (3-11).$$

Из этого выражения следует, что наибольшее устойчивое усиление не зависит от параметров контура и связи его с лампой, а определяется исключительно параметрами лампы и рабочей частотой усилителя.

К формуле (3-11) можно сделать следующие замечания:

- а) Она выведена для экранированных ламп, у которых $R_i \gg R_3$.
- б) Формула выведена в предположении, что паразитная обратная связь в усилителе возникает только через емкость C_{ag} . Экранирование усилителя выполнено настолько хорошо, что остальными видами воздействия последующих цепей усилителя на предыдущие можно пренебречь.
- в) В многокаскадном усилителе, отдельные каскады которого дают усиление от сетки до анода, соответствующее максимальному устойчивому $K_{a\max.уст}$, при всех наихудших случайных взаимных расстройках контуров затухание первого контура (не говоря уж о всех последующих) уменьшается не более чем на 10 % от затухания, которое контур имел при отсутствии обратной связи.
- г) В одноконтурных каскадах с полным включением контуров в анодные цепи ламп и с настройкой всех контуров на одну частоту усиление однолампового каскада от сетки до анода равно усилению от сетки этого каскада до сетки лампы следующего каскада. Для таких усилителей

$K_{a\text{макс уст}} = K_{01\text{макс уст}}$, где $K_{01\text{макс уст}}$ — максимальное устойчивое усиление одного каскада, и формулой (3-11) можно пользоваться без каких-либо оговорок.

Во всех остальных случаях, т. е. в усилителях с неполным включением контуров в анодные цепи ламп, с трансформаторной связью, с контурами, настроенными на две и более частоты, и с двухконтурными полосовыми фильтрами, необходимо учитывать, что величина $K_{a\text{макс}}$ данной проверяемой комбинации контур—лампа—контур на резонансной частоте может оказаться значительно больше среднего усиления одного каскада K_{01} рассчитываемого по формуле

$$K_{01} = \sqrt[n]{K_0}$$

где n — число каскадов и K_0 — полное усиление всего усилителя.

При правильном выборе усилительной лампы, соответствующем ее основному назначению, максимальное устойчивое усиление, рассчитанное по формуле (3-11), обычно оказывается значительно большим реально получаемого. Кроме того, в усилителе существует ряд других паразитных связей, которые оказывают более сильное влияние, чем связь через емкость C_{ag} . Все же во избежание ошибок при выборе ламп и неправильного учета усиления в расстроенной системе полезно проводить проверку всех проектируемых резонансных усилителей по формуле (3-11).

Рассмотренный в настоящем параграфе вопрос относится к широко применяемым резонансным усилителям с заземленным (общим) катодом. Изредка для уменьшения уровня шума применяются усилители на триодах, в которых приходится использовать схему с заземленной сеткой, так как схема с общим катодом неустойчива из-за большой емкости анод—сетка. В схеме с заземленной сеткой устойчивость определяется емкостью анод—катод, которая весьма мала благодаря экранирующему действию заземленной сетки. Работа усилителей с заземленной сеткой подробно освещена в литературе [10, 15, 21, 22].

3-6. ВЫБОР И ПОДКЛЮЧЕНИЕ К КОРПУСУ БЛОКИРОВОЧНОЙ ЕМКОСТИ В ЦЕПИ ЭКРАНИРУЮЩЕЙ СЕТКИ. ПОДКЛЮЧЕНИЕ К КОРПУСУ АНТИДИНАТРОННОЙ СЕТКИ

Указанные в справочниках электровакуумных приборов величины C_{ag} , определяющие максимальное устойчивое усиление, гарантируются заводом только при коротком замыкании экранирующей сетки на катод лампы.

При практическом использовании электронных ламп на экранирующую

сетку подается положительный потенциал, а по высокой частоте она соединяется с катодом через блокировочный конденсатор. В этих условиях экранирующее действие сетки уменьшается, особенно при недостаточной величине блокировочного конденсатора.

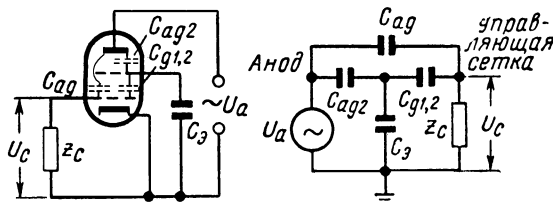


Рис. 3-9. Влияние емкости C_3 на устойчивость усилительного каскада.

Для расчета величины напряжения обратной связи U_c , возникающего на управляющей сетке лампы усилителя под воздействием переменного напряжения U_a на аноде, воспользуемся эквивалентной схемой рис. 3-9, где Z_c — сопротивление резонансного контура, подключенного к сетке лампы; C_{ag} — проходная емкость между управляющей сеткой и анодом; C_{ag2} — емкость между анодом и экранирующей сеткой; $C_{g1,2}$ — емкость между управляющей и экранирующей сетками и C_3 — емкость блокировочного конденсатора в цепи экранирующей сетки.

Емкости сетка—катод и анод—катод на схеме не показаны, так как они входят в анодную и сеточную нагрузки.

Если принять емкость C_3 бесконечно большой, то напряжение обратной связи, зависящее только от остаточной проходной емкости C_{ag} , будет равно

$$\bar{U}_{c1} = \frac{\bar{U}_a \bar{Z}_c}{\frac{1}{j\omega C_{ag}} + \bar{Z}_c}$$

Учитывая, что емкость C_{ag} весьма мала и, следовательно,

$$\frac{1}{j\omega C_{ag}} \gg \bar{Z}_c$$

получаем

$$\bar{U}_{c1} = \bar{U}_a j\omega C_{ag} \bar{Z}_c$$

При конечной величине емкости C_3 , кроме напряжения U_{c1} на управляющей сетке появится дополнительное напряжение

$$\bar{U}_{c2} = \bar{U}_a \frac{C_{ag2} C_{g1,2}}{C_3} j\omega \bar{Z}_c$$

Так как $C_3 \gg C_{ag2}$ и $\frac{1}{j\omega C_{g1,2}} > \bar{Z}_c$ то можно пренебречь в знаменателе

величинами C_{ag2} и \bar{Z}_c , несмотря на то, что последнее пренебрежение несколько снижает точность расчета. Тогда

$$\bar{U}_{c2} = \bar{U}_a \frac{C_{ag} 2C_{g1,2}}{C_3} j\omega \bar{Z}_c$$

Для того чтобы паразитная обратная связь вследствие недостаточной величины емкости C_3 не ухудшала качества электронной лампы, необходимо выполнение условия $\bar{U}_{c2} < \bar{U}_{c1}$. Допустим, что обратная связь изменяет напряжение на сетке на 10% относительно напряжения, при $C_3 = \infty$, т. е.

$$\bar{U}_{c2} = 0.1 \bar{U}_{c1}$$

или

$$\bar{U}_a \frac{C_{ag} 2C_{g1,2}}{C_3} j\omega \bar{Z}_c = 0.1 \bar{U}_a C_{ag} j\omega \bar{Z}_c$$

Решив это уравнение относительно C_3 , получим

$$C_3 = 10 \frac{C_{ag} 2C_{g1,2}}{C_{ag}}$$

Полагая, что $C_{ag2} = 0,5 C_{вых}$ и $C_{g1,2} = 0,5 C_{вх}$, получаем уравнение

$$C_3 = 2.5 \frac{C_{вх} C_{вых}}{C_{ag}} \quad (3-12)$$

из которого следует, что минимальная емкость C_3 , необходимая для нормальной работы экранирующей сетки электронной лампы, не зависит от параметров усилителя, а определяется только внутриламповыми емкостями.

Ниже приведены ориентировочные минимальные величины емкости блокировочного конденсатора в цепи экранирующей сетки, рассчитанные по уравнению (3-12) для некоторых типов металлических, сверхминиатюрных и пальчиковых ламп.

Уравнение (3-12) выведено без учета экранирующего действия антидинаatronной сетки, которое не зависит от величины C_3 . Несмотря на это, точность величин емкостей, приведенных в табл. 3-1, вполне достаточна для практического использования, так как значительный разброс величин C_3 мало отражается на работе усилителя.

Если получаемое от каскада усиление значительно меньше максимально-

го устойчивого, рассчитанного по формуле (3-11), то минимальная величина C_3 может быть снижена без особого ущерба для устойчивости каскада. Это замечание прежде всего относится к лампам типов 6Ж3, 6Ж8, 6К3, 6Ж4П и 6К4П, которые предназначены для узкополосных усилителей. Эти лампы имеют очень малую емкость C_{ag} , требуют по уравнению (3-12) большой блокировочной емкости C_3 и позволяют получить большое устойчивое усиление на относительно низких частотах.

Таблица 3-1

Минимальные величины емкости блокировочного конденсатора в цепи экранирующей сетки

Тип лампы	Междуэлектродные емкости лампы, пф			Емкость блокировочного конденсатора, пф
	$C_{вх}$	$C_{вых}$	C_{ag}	C_3
6Ж3	8,5	7,0	0,003	50000
6Ж4	10,0	6,0	0,015	10000
6Ж8	6,0	7,0	0,005	21000
6К3	6,0	7,0	0,003	35000
6К4	8,5	7,0	0,005	30000
6Ж1Б	4,8	3,8	0,03	1500
6Ж1П	4,7	2,8	0,035	1000
6Ж3П	6,5	1,5	0,025	1000
6Ж4П	6,3	6,3	0,0035	28000
6Ж5Б	6,0	4,0	0,05	1200
6Ж5П	8,5	2,2	0,03	1600
6Ж9П	8,5	3,0	0,03	2100
6Ж9Б	7,5	3,0	0,055	1000
6Ж10Б	6,5	4,5	0,05	1500
6Ж11П	13,5	3,5	0,04	3000
6Ж20П	8,6	2,5	0,04	1300
6Ж23П	13,5	3,0	0,075	1300
6Ж31Б	4,8	3,8	0,03	1500
6Ж33А	3,6	3,3	0,03	1000
6Ж40П	6,7	4,1	0,025	2700
6К4П	6,4	6,7	0,0045	24000
6К6А	3,6	3,3	0,03	1000
6К11Б	4,8	3,8	0,03	1500

При работе лампы в усилителях низкой частоты и в видеоусилителях минимальные значения величины C_3 , определяемые из условия допустимого искажения формы сигналов, получаются значительно больше величин, указанных в табл. 3-1.

В катодную цепь лампы большей частью включается сопротивление автоматического смещения за счет анодного тока. В этом случае иногда производят ошибочное подключение конденсатора C_3 непосредственно к катоду вместо шасси.

Как показано на эквивалентной схеме рис. 3-10, такое подключение создает дополнительную цепь обратной связи анода с сеткой через емкости C_{ag2} , C_3 и $C_{вх}$.

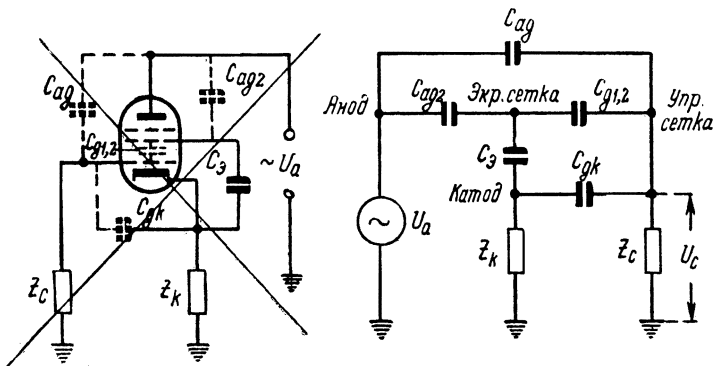


Рис. 3-10. Неверное подключение к катоду блокировочного конденсатора экранирующей сетки.

Эта дополнительная обратная связь зависит от величины сопротивления Z_k и больше всего проявляется на весьма высоких частотах, на которых даже при большей блокировочной емкости в катоду величина Z_k получается относительно большой благодаря влиянию индуктивности катодной цепи.

Аналогичная картина получается при присоединении антидинаatronной сетки к катоду. Из эквивалентной схемы рис. 3-11 видно, что и в этом случае получается дополнительная обратная связь через емкости C_{ag3} и C_{gk} , зависящая от величины Z_k .

Таким образом, конденсатор C_3 и антидинаatronную сетку следует всегда соединять с корпусом прибора. Чем выше рабочая частота каскада, тем более благотворно действует такое соединение. В некоторых типах ламп антидинаatronная сетка соединена с катодом внутри лампы и отдельного вывода не имеет. На частотах выше 10—20 Мгц такие лампы применять нежелательно.

При подключении антидинаatronной сетки к корпусу она получает не-

большой отрицательный потенциал.

В некоторых типах ламп от этого немного падает крутизна характеристики, с чем обычно не считаются.

При выборе типа конденсатора C_3 и при монтаже цепей экранирующей и антиднатронной сеток не следует забывать об индуктивности соединительных проводов и о собственной индуктивности конденсатора,

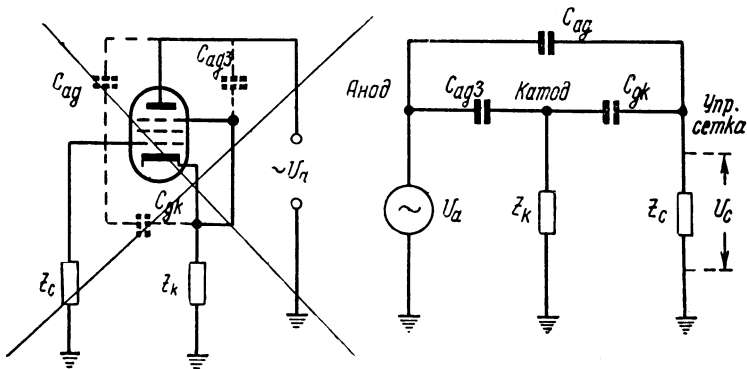


Рис. 3-11. Неверное Присоединение антиднатронной сетки к катоду.

которые могут резко исказить и усложнить разобранные здесь явления, особенно в усилителях, работающих на очень высоких частотах.

3-7. ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОЙ СТЕПЕНИ ЭКРАНИРОВАНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ

В многокаскадных усилителях существует большое число каналов, по которым усиленное напряжение может поступать из точек с большим уровнем напряжения в точки с меньшим уровнем напряжения. К таким каналам можно отнести все виды обратной связи между анодной и сеточной цепями в пределах каждого отдельного каскада, в пределах двух, трех и более каскадов и, наконец, передачу напряжения с выхода усилителя на его вход. Наличие большого числа каналов обратной связи не позволяет произвести теоретическое рассмотрение явления в общем виде. Для упрощения предположим, что обратные связи имеются только между выходом и входом усилителя. Этому предположению полностью соответствует однокаскадный усилитель, а из многокаскадных — только те, в которых экранирование выполнено настолько хорошо, что с влиянием связей между промежуточными точками можно не считаться. Сказанное не означает, что паразитными связями промежуточных каскадов между собой следует пренебрегать; при неудачной системе экранирования усилителя может оказаться что связи между промежуточными каскадами превосходят связи между первым и последним. Полагая, что последнее обстоятельство от-

NextTube

существует, рассмотрим условия устойчивой работы усилителя.

На рис. 3-12 показана скелетная схема усилителя с обратной связью. Он состоит из усилителя без обратной связи, коэффициент усиления которого равен \bar{K} , и цепи обратной связи, передающей на вход часть выходного напряжения $\bar{\beta}$ усилителя.

В общем случае \bar{K} и $\bar{\beta}$ являются комплексными величинами, зависящими от частоты. Если на вход усилителя подать напряжение $\bar{U}_{вх}$, то выходное напряжение $\bar{U}_{вых}$ определится напряжением входа, усиленным в \bar{K} раз, и выходным напряжением, которое пройдет через элементы \bar{K} и $\bar{\beta}$, т. е.

$$\bar{U}_{вых} = \bar{K}\bar{U}_{вх} + \bar{\beta}\bar{K}\bar{U}_{вых}$$

Решая это уравнение относительно $U_{вых}$, получаем

$$\bar{U}_{вых} = \frac{\bar{K}}{1 - \bar{\beta}\bar{K}} \bar{U}_{вх}$$

откуда находим коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$K_{ос} = \frac{K}{1 - \bar{\beta}\bar{K}} \quad (3-13)$$

При наличии обратной связи усиление возрастет, если абсолютное значение знаменателя $|1 - \bar{\beta}\bar{K}| < 1$. В этом случае обратная связь называется положительной. Если же абсолютное значение знаменателя $|1 - \bar{\beta}\bar{K}| > 1$, то это значит, что имеется отрицательная обратная связь, уменьшающая усиление.

В многокаскадных усилителях невозможно получить только один из указанных видов обратной связи и, следовательно, невозможно получение известных преимуществ, даваемых отрицательной обратной связью.* Дело в том, что величина и фаза произведения $\bar{\beta}\bar{K}$, называемого коэффициентом обратной связи, зависят от частоты. В пределах полосы пропускания усилителя он изменяется настолько, что на некоторых частотах наблюдается положительная обратная связь, а на других — отрицательная. Это приводит к генерации или к искажению частотных характеристик. Для получения неискаженных частотных характеристик при наличии обратной связи их корректируют, повышая каким-либо способом усиление на одних частотах или снижая на других. В резонансных усили-

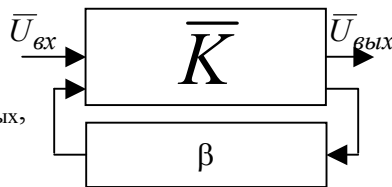


Рис. 3-12. Скелетная схема усилителя с обратной связью.

телях это чаще всего достигается путем расстройки отдельных контуров относительно расчетных частот настройки или путем изменения величин сопротивлений, шунтирующих контуры, а в видеоусилителях — применением корректирующих дросселей и конденсаторов.

Получение такими способами требуемой частотной характеристики вместо уменьшения паразитной обратной связи ухудшает ряд показателей усилителя: неизменность полосы пропускания при регулировании усиления, постоянство коэффициента усиления и формы частотной характеристики при изменении питающих напряжений и смене ламп, уровень шумов, повторяемость параметров при серийном производстве и т. д. Поэтому паразитную обратную связь любого вида в усилителях следует квалифицировать как явление вредное и подлежащее максимально возможному подавлению.

Прежде всего определим, какую часть выходного напряжения можно передавать на вход усилителя без особого ухудшения его параметров. Фаза коэффициента обратной связи $\overline{\beta K}$ в пределах полосы пропускания усилителя изменяется значительно и, следовательно, на некоторых частотах напряжение обратной связи, поступающее с выхода через цепь обратной связи В, совпадает по фазе с входным напряжением, а на других частотах прямо противоположно ему. В первом случае обратная связь действует как максимально глубокая положительная, а во втором — как отрицательная. Будем считать допустимой такую обратную связь, которая искажает частотную характеристику не больше чем на 5%, т. е. при которой усиление на любой частоте отличается от усиления без обратной связи не более чем на $\pm 5\%$, или

$$1 \pm |\overline{\beta K}| = 1 \pm 0.05$$

Отсюда максимальное допустимое значение коэффициента передачи по цепям паразитной обратной связи будет равно

$$|\beta_{\text{макс}}| = \frac{0.05}{|K|} \quad (3-14)$$

Это выражение позволяет если не рассчитать, то, во всяком случае, грубо оценить качество экранирования, необходимого для получения устойчивого усиления. Выражение (3-14) показывает, что качество экранирования должно быть прямо пропорционально коэффициенту усиления.

Многокаскадный усилитель с множеством каналов обратной связи

** Отрицательная обратная связь в усилителях низкой частоты и в видеоусилителях обычно охватывает один каскад. Охват двух-трех каскадов применяется очень редко [2]. В резонансных усилителях отрицательная обратная связь практически не применяется вовсе, хотя и имеется принципиальная возможность ее использования [11, 21].*

между любыми оконечными и промежуточными точками можно представить в виде комбинации отдельных усилителей (рис. 3-13), состоящих из одного, двух, трех и более каскадов, в которых имеется обратная связь только между входом и выходом с коэффициентами обратной связи

$$\bar{\beta}_1 \bar{K}_1, \bar{\beta}_2 \bar{K}_2, \dots, \bar{\beta}_{12} \bar{K}_{12}, \dots, \bar{\beta}_{23} \bar{K}_{23}, \dots, \bar{\beta} \bar{K}.$$

Это позволяет применить к многокаскадному усилителю изложенную элементарную теорию обратной связи, из которой следует, что чем большее усиление имеется между какими-либо точками усилителя, тем

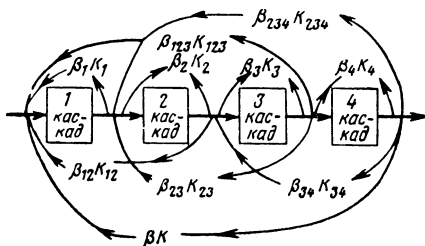


Рис. 3-13. Обратные связи в многокаскадном усилителе.

лучше следует экранировать эти точки друг от друга.

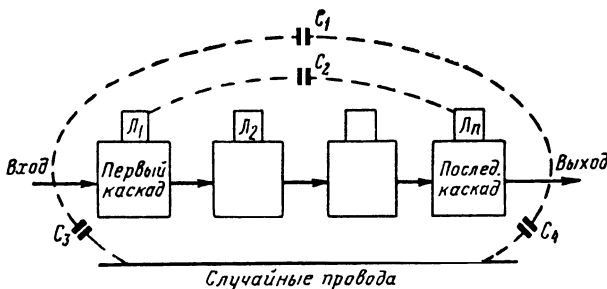


Рис 3-14. Емкостная паразитная обратная связь в усилителе.

Практически могут встретиться следующие основные виды паразитных связей, за счет которых передается напряжение с выхода усилителя на его вход:

а) Прямая емкостная связь между входной и выходной цепями усилителя (рис. 3-14). Этот вид связи получается при такой конструкции усилителя, в которой провода входной цепи проходят вблизи выходных (емкость C_1), отсутствуют экраны на лампах или они недостаточно экранированы (емкость C_2) и, наконец, при наличии в монтаже усилителя проводов (в том числе и проводов питания), не имеющих отношения к высокочастотным цепям, но связанных с ними емкостями C_3 и C_4 . В результате совместного действия этих цепей выходное напряжение - передается на вход усилителя ослабленным в M_c раз.

б) Обратная связь через взаимоиндуктивности между контурами усилителя

теля, в результате действия которой на вход поступает высокочастотное напряжение, ослабленное в M_n раз.

в) Обратная связь по проводам питания накала ламп. Этот вид паразитной связи создает на сетке первой лампы усилителя высокочастотное напряжение, ослабленное в M_n раз по сравнению с напряжением в анодном контуре последнего каскада.

г) Обратная связь путем передачи высокочастотного напряжения из анодной и экранной цепей последней лампы на сетку первой или второй лампы по проводу, питающему усилитель анодным напряжением. Для снижения высокочастотного напряжения, передаваемого по этому каналу связи, в анодные и экранные цепи включаются развязывающие ячейки, от действия которых напряжение ослабляется в M_a раз.

д) Обратная связь по проводам автоматического и ручного управления усилением, подключаемым к управляющим сеткам, антидинамронным сеткам или к катодам ламп. При этом на вход усилителя передается высокочастотное напряжение, ослабленное в M_c раз.

е) Обратная связь по шасси усилителя, являющемуся одним из проводов, соединяющих различные точки усилителя.* Этот вид паразитной связи создает на сетке первой лампы усилителя высокочастотное напряжение, ослабленное в M_k раз.

Очевидно, что все эти паразитные напряжения поступают на вход усилителя в самых разнообразных фазах и суммируются геометрически. Так как учесть все эти фазы не представляется возможным, то с запасом будем считать, что все напряжения поступают в фазе. Тогда в результате их совместного действия на входе усилителя получится напряжение

$$U_{oc} = U_{вых} \left(\frac{1}{M_c} + \frac{1}{M_u} + \frac{1}{M_a} + \frac{1}{M_e} + \frac{1}{M_n} + \frac{1}{M_k} \right)$$

Для того чтобы обратные связи не исказили частотную характеристику усилителя более чем на 5%, необходимо соблюдение условия

$$\frac{1}{M_c} + \frac{1}{M_u} + \frac{1}{M_a} + \frac{1}{M_e} + \frac{1}{M_n} + \frac{1}{M_k} \leq \beta_{max}.$$

Предположим, что напряжение обратной связи по каждому из разобранных путей ослабляется в одинаковое число раз, т. е.

$$M_c = M_u = M_a = M_e = M_n = M_k = M.$$

* Некоторые авторы [10 и 18] не производят детального рассмотрения путей индуктивной и емкостной обратных связей в усилителе и обратной связи по шасси, предпочитая замену их одним путем «волноводной обратной связи». Этот метод разобрать в §3-16, где показано, что он приводит к неверным результатам, ограничивающим уменьшение размеров усилителя.

Тогда, учитывая (3-14), получаем

$$\frac{6}{M} \leq \frac{0.05}{K}$$

откуда необходимое ослабление для любого канала обратной связи, считая от анода последней лампы усилителя до управляющей сетки лампы, на которую поступает напряжение обратной связи, может быть ориентировочно найдено из соотношения

$$M \leq 120K, \quad (3-15)$$

где K —(коэффициент усиления, отсчитываемый на том же участке усилителя, на котором определяется необходимое ослабление.

Выше подробно разобран наиболее тяжелый случай паразитных связей в усилителе. К нему относятся усилители, выполняемые на вакуумных приборах, работающие на достаточно высоких частотах и имеющие максимальное возможное число цепей паразитной обратной связи — шесть. В других типах усилителей число цепей паразитной связи будет меньше, и коэффициент 120 в уравнении (3-15) может быть снижен соответственно числу связывающих цепей вплоть до 20 при одной цепи паразитной связи. Так, например, в усилителе высокой частоты, выполняемом на транзисторах, отсутствует цепь накала, число цепей паразитной связи снижается до пяти и коэффициент в уравнении (3-15) уменьшается до 100. В многокаскадном усилителе низкой частоты отсутствуют все виды связи, кроме цепи, питающей аноды ламп или коллекторы транзисторов. В этом случае коэффициент снижается до 20.

Произведенная здесь оценка необходимой степени экранирования и фильтрации выполнена с некоторым запасом, величину которого определить невозможно. Учитывая, что подавление обратных связей является тяжелой и кропотливой работой, желательно сохранить весь этот запас при начальной разработке первого образца, если прибор выпускается небольшой партией. Если же прибор предназначается для крупносерийного или массового производства, то при отработке образцов следует проверить возможность некоторого упрощения экранировки и фильтрации проводов.

3-8. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО ЦЕПИ ПИТАНИЯ НАКАЛА

Цепь катода усилительной лампы с косвенным подогревом обычно соединяется с шасси усилителя непосредственно или через (конденсатор большой емкости. В первом приближении высокочастотный потенциал катода принимается равным потенциалу шасси. Это приближение неприменимо к усилителям с большим коэффициентом усиления, предназна-

ченным для работы на весьма высоких частотах. При использовании металлических лампы полную длину соединительных проводов от катода до шасси (рис. 3-15) трудно сделать короче 7 см, так как в нее входят участки, проходящие внутри лампы и ламповой панели, и конденсатор цепи автоматического смещения с монтажом от лепестка ламповой панели до шасси. Этой длине провода соответствует индуктивность порядка 0,07 мкГн, имеющая на частоте 3 МГц реактивное сопротивление около 1,4 ом и на частоте 30 МГц — около 14 ом. Для пальчиковых и сверхминиатюрных лампы (рис. 3-16) длина цепи катода сокращается примерно в два раза. Во столько же раз уменьшается ее индуктивность и реактивное сопротивление.

Емкость C_{fk} катод — подогреватель лампы имеет величину порядка 3—10 пф. Благодаря этой емкости высокочастотное напряжение U_n , оказавшееся почему-либо приложенным к накалу лампы (рис. 3-17), а вызывает между сеткой и катодом напряжение

$$U_k = \omega^2 L_k C_{fk} U_n \quad (3-16)$$

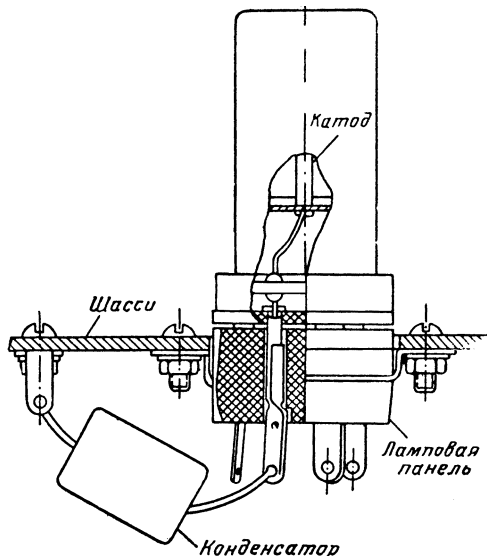


Рис. 3-15. Монтаж цепи катода металлической лампы.

Ниже приведены относительные величины этих напряжений в зависимости от частоты.

f, МГц	0,1	1	3	10	30	60	100
$\frac{U_H}{U_K}$	$1,4 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^2$	40	14

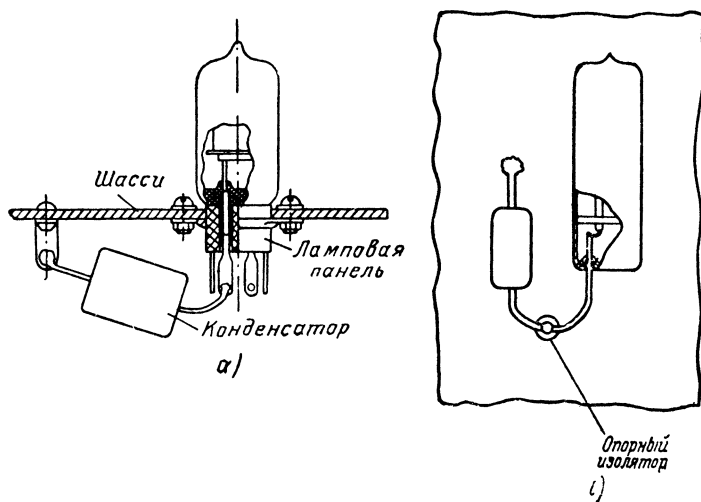


Рис. 3-16. Монтаж цепи катода:

а — пальчиковая лампа; б — сверхминиатюрная лампа.

Из приведенных цифр, рассчитанных для $L_k = 0,035$ мкГн и $C_{fk} = 5$ пф, видно, что на частотах, превышающих 3 МГц, достаточно большая часть напряжения, возбужденного в цепи накала, переходит в цепь сетки. Так как цепь накала проходит вдоль всего усилителя и к ней присоединяются все лампы, то неудачная схема этой цепи и плохое выполнение монтажа могут послужить причиной значительных обратных связей.

Снижения напряжения U_k переходящего из цепи накала в цепь сетки, без изменения схемы цепи накала можно достигнуть только уменьшением величины паразитного напряжения U_H , возбуждаемого в цепи накала, так как остальные величины, входящие в выражение (3-16), определяются конструкцией лампы и ламповой панели. На частотах ниже 3 МГц, а при не слишком большом усилении и на более высоких частотах достаточное снижение U_H получается в результате присоединения к корпусу прибора одного из проводов накала. Это соединение эквивалентно, грубо говоря, подключению к контуру $L_k C_{fk}$ половины индуктивности $L_H/2$ и половины сопротивления $R_H/2$ нити накала и соединительных проводов (рис. 3-17,6).

Благодаря этому подключению составляется дополнительная цепь делителя напряжения, в последовательное плечо которого входит паразитная

емкость $C_{\text{п}}$, связывающая цепь накала данной лампы с точками большого высокочастотного потенциала, а также индуктивности и емкости монтажных проводов. Параллельное плечо делителя состоит из индуктивности $L_{\text{н}}/2$ и сопротивления $R_{\text{н}}/2$.

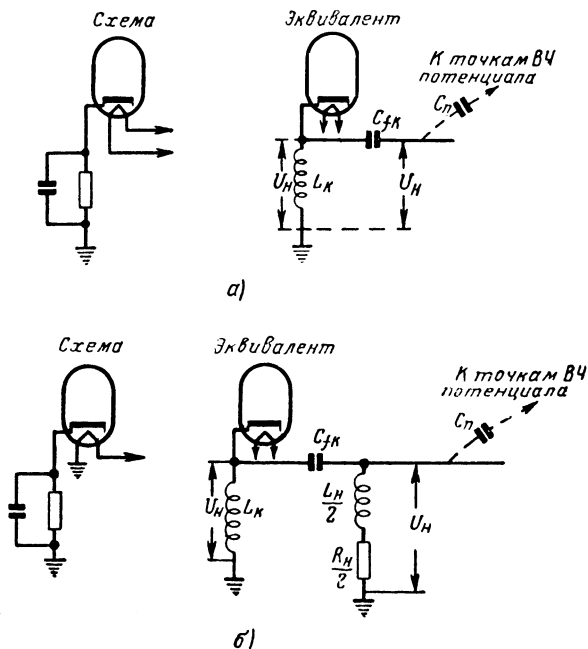


Рис. 3-17. Монтаж цепи накала:

а — цепь накала не соединена с корпусом; б — цепь накала соединена с корпусом.

На частоте 3 Мгц такой делитель дает значительное ослабление. Здесь можно пренебречь индуктивностями и емкостями монтажных проводов и индуктивностью цепи накала лампы. Тогда делитель будет состоять из емкости $C_{\text{п}}$ и сопротивления $R_{\text{н}}/2$. Рассматривая передачу напряжения от последнего каскада усилителя к первому, можно принять, что $C_{\text{п}}$ является емкостью катод— подогреватель последней лампы усилителя, равной примерно 6 пф.

Для большинства маломощных пальчиковых и сверхминиатюрных электронных ламп сопротивление нити накала в горячем состоянии $R_{\text{н}}=30$ ом. При этих величинах емкости и сопротивления делитель даст ослабление

$$M = \frac{2}{\omega C_{\text{п}} R_{\text{н}}} = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-12} \cdot 30} = 700$$

Таким образом, на частоте 3 Мгц, подключение к шасси одного из про-

дов накала только одной лампы уменьшит напряжение обратной связи в 700 раз, доведя его до $\frac{1}{11\,000\,000}$ от напряжения на катоде последнего каскада, против $\frac{1}{16\,000}$ при изолированной от шасси цепи накала.

На более высоких частотах, особенно при большом усилении, соединения с шасси одного из проводов накала часто бывает недостаточно. Иногда пытаются снизить U_n , блокируя второй провод накала конденсатором, соединенным с шасси. Эта блокировка большей частью действует слабо, так как емкостное сопротивление конденсаторов применяемых типов оказывается одного порядка с сопротивлением нити накала. В некоторых случаях блокировка действует даже в обратную сторону — повышает склонность усилителя к самовозбуждению. Обычно это происходит из-за неудачного объединения с другими цепями точки присоединения конденсатора к шасси на общих лепестках.

Чем выше частота, на которой работает усилитель, тем менее желательно параллельное присоединение накала всех ламп к одному проводу, так как индуктивное сопротивление общего для нескольких ламп участка провода является связывающим элементом цепи. Кроме того, провод накала, проходя вдоль всего усилителя, имеет паразитные емкости относительно самых разнообразных его точек. Через эти емкости на проводе возникают дополнительные высокочастотные напряжения.

Для уменьшения нежелательных связей в усилителях, работающих на высоких частотах, в провода накала включают реактивные сопротивления (дрессели). На рис. 3-18 показан иногда применяемый, но нерациональный вариант включения дросселей в цепь накала каждой лампы, на рис. 3-19 дана значительно более выгодная схема цепи накала, содержащая только два дросселя.

При разборе и анализе действия различных схем подавления паразитных связей, получающихся через цепи накала, прежде всего, необходимо исходить из того, что наиболее опасной связью между цепями усилителя является связь между последним и первым его каскадами. Учитывая это, разберем показанные на рис. 3-18 и 3-19 два варианта схем цепи накала шести каскадного усилителя.

Эквивалентные схемы этих цепей по высокой частоте изображены на тех же рисунках. Генератор паразитного напряжения U_n , поступающего в цепь накала из цепи катода лампы 6, будем считать подключенным между проводом накала и корпусом прибора, т. е. параллельно накалу лампы 6. Приемником паразитного напряжения U_{n1} служит катодная цепь

лампы 1. Из эквивалентных схем видно, что вариант рис. 3-19, в схему которого включены всего два дросселя, даст значительно большее ослабление напряжения, поступающего на катод лампы 1, чем вариант, показанный на рис. 3-18. Действительно, пренебрегая проводимостью вторичной обмотки трансформатора накала L_7 , видим, что в схеме рис. 3-18 шунтирующая цепь, состоящая из четырех параллельно включенных дросселей между LQ и L_1 , имеет большое сопротивление, в то время как в схеме рис. 3-19 эта цепь, составленная из двух параллельно включенных нитей накала лампы, имеет малое сопротивление. Считая, что обе схемы эквивалентны двухячеечным фильтрующим цепям и что индуктивное сопротивление дросселя равно 1000 ом и сопротивление нити накала 30 ом, можно получить цифры, характеризующие работу обеих схем.

Для схемы рис. 3-18 ослабление равно

$$M \approx \frac{1000}{250} \cdot \frac{1000}{30} = 130$$

Для схемы рис. 3-19 ослабление равно

$$M \approx \frac{1000}{15} \cdot \frac{1000}{15} = 4400$$

Кроме значительно большего ослабления напряжения, передаваемого из цепи катода последней лампы в цепь катода первой лампы, схема рис. 3-19 имеет еще то преимущество, что в ней общий провод, соединяющий трансформатор L_7 с нитью накала каждой лампы, разделен дросселями L_1 и L_6 на три участка. Этот провод в схеме рис. 3-18, проходя вдоль всего усилителя, может служить причиной паразитной обратной связи по постороннему проводу (см. рис. 1-9). В схеме рис. 3-19 фильтрующие ячейки, составленные из дросселей и нитей на кала лампы, снижают также любые случайные напряжения, передаваемые по общему проводу накала.

При недостаточности фильтрации, даваемой схемой с двумя дросселями (рис. 3-19), можно применять схемы с тремя, четырьмя и более дросселями, оставляя тот же принцип последовательного включения дросселей в общий провод питания накала. Предельный случай показан на схеме рис. 3-20, где дроссели включены между накальными ножками всех ламп. Эта схема, эквивалентная многоячеечному фильтру, дает максимальное ослабление паразитного напряжения, передаваемого по накальной цепи. Дополнительное достоинство схемы с последовательным включением дросселей в провод накала заключается в том, что в ней все каскады разделены фильтрующими ячейками. Чем дальше по схеме отстоят друг от друга отдельные каскады, тем большее число фильтрующих ячеек включено между ними.

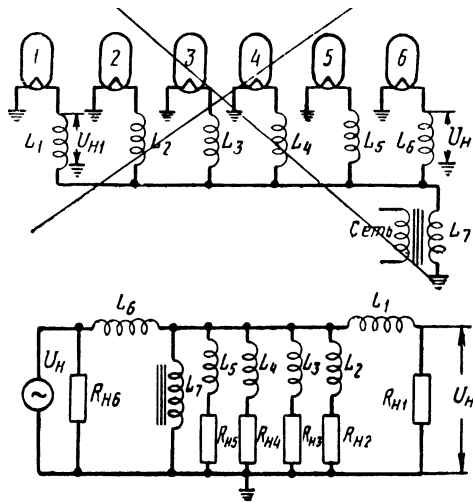


Рис. 3-18. Нерациональная схема включения дросселей в цепь каждой лампы.

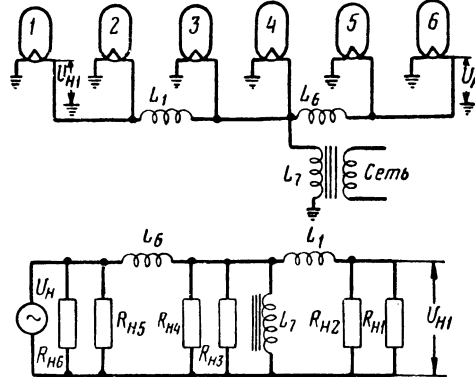


Рис. 3-19. Цепь накала с двумя дросселями.

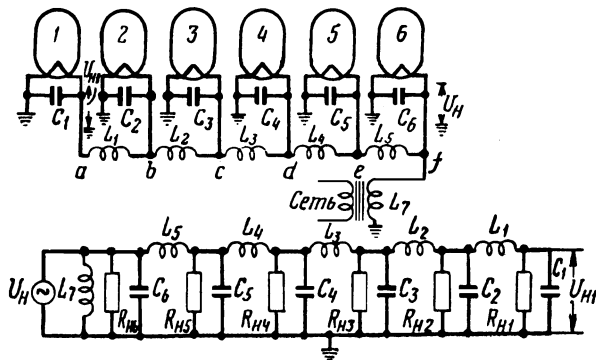


Рис. 3-20. Цепь накала с пятью фильтрующими ячейками.

В схеме рис. 3-20 показаны конденсаторы C_1, C_2, \dots, C_6 , включенные параллельно нити накала каждой лампы. В зависимости от рабочей частоты усилителя, коэффициента усиления и индуктивности примененных дросселей эти конденсаторы можно и не устанавливать.

Для примера определим ослабление обратной связи, даваемое схемой рис. 3-20 для шестикаскадного усилителя на лампах 6Ж1П. Сопротивление нити накала лампы 36 ом, индуктивность дросселя 0,3 мкГн, емкость конденсаторов 220 пф. Рабочая частота усилителя 200 МГц.

На основании описанного выше приближенного метода расчета получим следующие результаты:

а) ослабление, даваемое одной ячейкой без конденсатора,

$$\frac{\omega_0 L}{R_n} = \frac{2\pi \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 0.3 \cdot 10^{-6}}{36} = \frac{360}{36} = 10.6$$

б) ослабление, даваемое одной ячейкой с конденсатором,

$$\frac{\omega_0 L}{1} = 380 \cdot 2\pi \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \approx 106$$

$$\frac{1}{\omega_0 C}$$

в) ослабление, даваемое пятью ячейками без конденсаторов,

$$M = 10.6^5 \approx 1.3 \cdot 10^5$$

г) ослабление, даваемое пятью ячейками с конденсаторами,

$$M = 106^5 \approx 1.6 \cdot 10^{10}$$

Расчет показывает, что ослабление, даваемое вариантом с конденсаторами, в 105 раз больше. Несмотря на это, правильнее выбрать вариант без конденсаторов, так как даваемое им ослабление достаточно велико, а установка пяти конденсаторов излишне усложняет монтаж. Этот довод отпадает при использовании специальной ламповой панели (рис. 3-43) со встроенными конденсаторами, описанной в § 3-14.

В приведенном расчете данные включенных в схему дросселей и конденсаторов подобраны так, чтобы на рабочей частоте усилителя реактивное сопротивление дросселя было значительно больше сопротивления нити накала, а реактивное сопротивление конденсатора было значительно меньше этого сопротивления. Поэтому расчет ослабления выполняется весьма просто. Если не придерживаться этого правила, то расчет сильно усложняется необходимостью учета полных сопротивлений всех цепей. Такой усложненный расчет производить не следует, так как и без него очевидно, что включение в цепь накала дросселей и конденсаторов, реактивные сопротивления которых близки к сопротивлению нити накала,

даст лишь незначительное ослабление обратных связей. Так, например, если в предыдущем примере снизить рабочую частоту усилителя до 30 Мгц, оставив те же данные цепи накала, то реактивное сопротивление дросселя упадет с 380 до 56 ом, реактивное сопротивление конденсатора

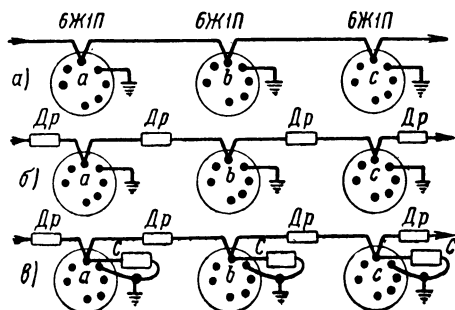


Рис. 3-21. Монтаж цепи накала трех каскадов широкополосного усилителя на пальчиковых лампах:

а — без дросселей; б — с дросселями; в — с дросселями и конденсаторами.

увеличится с 3,6 до 24 ом и оба сопротивления будут мало отличаться от сопротивления нити накала, равного 36 ом. Ослабление каждой ячейки будет порядка 2—3 раз и для удовлетворительной работы фильтрующей цепи придется, прежде всего, увеличить индуктивность дросселя так, чтобы его реактивное сопротивление в несколько раз превосходило сопротивление нити накала. Если после этого получится достаточное ослабление обратной связи, то лучше обойтись без конденсаторов. Вводить конденсаторы следует в последнюю очередь, когда невозможно увеличить индуктивность дросселей.

Конструкция дросселей по своим размерам мало отличается от обычных 0,25-вт непроволочных сопротивлений. На рис. 3-21 и 3-22 показан монтаж цепи накала трех ламп усилителя. Как видно из рисунков, включение дросселей в провода ab, bc не усложняет монтаж усилителя, в то время как установка конденсаторов, особенно при использовании пальчиковых и сверхминиатюрных ламп, требует дополнительного места и сильно загромождает монтаж усилителя.

Дроссели, включаемые в цепи накала, при малых габаритах и максимально возможной индуктивности должны иметь малое омическое сопротивление, так как через них проходит ток накала ламп. Поэтому для намотки дросселей нельзя употреблять тонкий провод, что ограничивает возможности уменьшения размеров дросселей и увеличения их индуктивности. Максимальная величина индуктивности дросселя зависит также от его собственной распределенной емкости. Как показано в § 2-8, макси-

мальное полное сопротивление имеет дроссель, собственная резонансная частота которого близка к рабочей частоте усилителя. Таким дросселем может служить однослойная катушка, намотанная на каркасе из диэлектрика, при длине провода, равной

$l = \frac{\lambda_0}{3}$. Дроссели накала с максимально возможным полным сопротивлением могут применяться для самых высоких рабочих частот усилителя. На меньших частотах порядка 10—60 Мгц приходится использовать дроссели с меньшим сопротивлением, так как дроссели, собственная частота которых лежит около 10—60 Мгц, имеют слишком большие габариты и большое омическое сопротивление. Большой частью дроссели наматываются на сердечниках из магнитодиэлектрика.

На рис. 3-20 трансформатор накала L_7 подключен к точке f цепи дросселей L_1, L_2, \dots, L_5 . Через Дроссель L_5 проходит суммарный ток накала пяти ламп, и этот дроссель определяет допустимую величину омического сопротивления примененных в системе дросселей. Трансформатор накала можно подключить и к любой из точек a, b, \dots, f , так как действие системы как фильтра высокой частоты не зависит от точки подключения трансформатора. Для получения же наиболее рациональной конструкции дросселей выгоднее подключить трансформатор к точке c или d . Тогда максимальный ток, равный суммарному току накала трех ламп, будет проходить через дроссель L_3 , который может быть выполнен из более тонкого провода, чем дроссель L_5 при подключении трансформатора к точке f .

Значительное ослабление нежелательных связей, получаемое при правильно выбранной схеме цепи накала, может быть сильно ухудшено вследствие наличия прямой паразитной связи между проводами накала первых и последних каскадов. Для предохранения от такой связи желательно при конструировании усилителя располагать его каскады в линию, т. е. так же, как они обычно изображаются на принципиальных схемах. Это приводит к конструкции усилителя, в которой первая и последняя лампы находятся на максимальном расстоянии друг от друга. В тех слу-

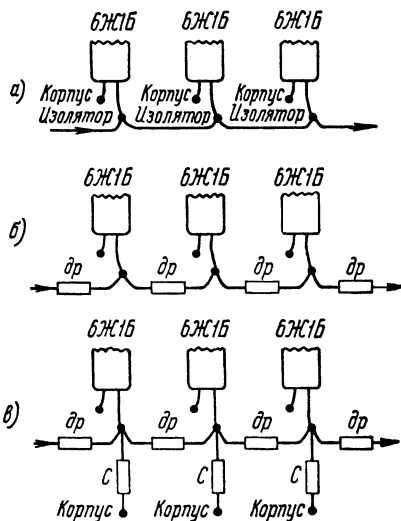


Рис. 3-22. Монтаж цепи накала трех каскадов широкополосного усилителя на сверхминиатюрных лампах: а — без дросселей; б — с дросселями; в — с дросселями и конденсаторами.

чаях, когда по общим конструктивным соображениям размещение ламп и каскадов в линейку невыполнимо, приходится применять экранирующие перегородки, а монтаж цепи накала выполнять экранированным проводом.

Приведенные в начале настоящего параграфа ориентировочные подсчеты напряжения, возбуждаемого в цепи катода, были основаны на том, что это напряжение является паразитным, т. е. возбуждается независимо от желаний конструктора, благодаря неустранимой индуктивности катодного вывода. Значительно большие напряжения возбуждаются в схемах с включением резонансного контура в цепь катода, например, в усилителях с заземленной сеткой и в некоторых вариантах схем детекторов, у которых катод находится под полным напряжением высокой частоты. При компоновке схемы усилителя следует учитывать указанное и по возможности избегать каскадов с незаземленным катодом. При необходимости применения таких каскадов следует улучшить фильтрацию паразитных напряжений в цепи накала. С этой точки зрения в качестве детекторов лучше применять полупроводниковые диоды, которые не требуют накала.

Рассмотренные в настоящем параграфе цепи питания накала в основном относятся к усилителям высокой, промежуточной и видеочастот, имеющим большое усиление и работающим на частотах выше 3 Мгц. Необходимость применения фильтров в цепи накала определяется расчетом по изложенной здесь методике. На частотах ниже 3 Мгц обычно оказывается достаточным присоединение к корпусу одного из концов нити накала.

В усилителях низкой частоты вопросы, связанные со схемой и монтажом цепи накала ламп, усложняются наводкой фона, создаваемого переменным напряжением накала. Эти вопросы разбираются в § 4-3, 4-5 и 4-6.

3-9. ПАЗАЗИТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО ЦЕПЯМ ПИТАНИЯ АНОДОВ И ЭКРАНИРУЮЩИХ СЕТОК В РЕЗОНАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Обратная связь по цепям питания анодов и экранирующих сеток электронных ламп относится к паразитной связи через общее сопротивление. Этот вид связи был разобран в § 1-1. Внутреннее сопротивление источника питания анода (рис. 3-23), на выходе которого обычно включается конденсатор весьма большой емкости $C_{\text{фп}}$ настолько мало, что с ним можно не считаться во всем диапазоне рабочих частот усилителя. В этих

условиях связь между точками с максимальным и минимальным

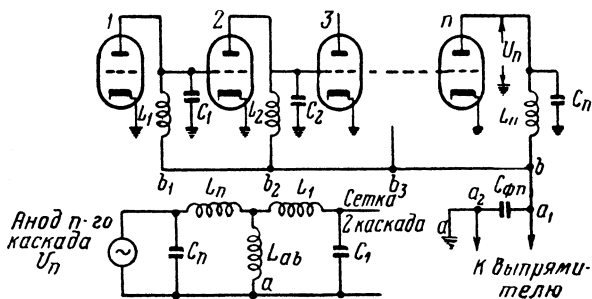


Рис. 3-23. Высокочастотная схема цепи последовательного питания анодов ламп. уровнями напряжения может возникнуть только за счет падения напряжения на общем участке провода питания ba_1a_2a , по которому проходит переменная составляющая анодного тока всех ламп усилителя.

(При длине общего провода $ab=10$ см он имеет индуктивность L_{ab} около $0,1$ мкГн. В резонансном усилителе контурные катушки L_1, L_2, \dots, L_n имеют индуктивность порядка 500 мкГн на частоте 465 кГц, 1 мкГн на частоте 30 МГц и $0,05$ мкГн на частоте 200 МГц. Как видно из эквивалентной схемы, показанной на рис. 3-23, первый и последний контуры усилителя оказываются связанными друг с другом через общую индуктивность L_{ab} . Коэффициент связи принимает следующие значения:

на частоте 465 кГц

$$k = \frac{0.1}{560 + 0.1} \approx 0.02\%$$

на частоте 30 МГц

$$k = \frac{0.1}{1 + 0.1} \approx 9\%$$

на частоте 200 МГц

$$k = \frac{0.1}{0.05 + 0.1} \approx 67\%$$

Такая связь между контурами приводит к передаче значительной части выходного напряжения усилителя U_n на сетку второго каскада. Кроме внесения обратной связи, участки ab_1, ab_2, ab_3 и т. д., входя в контуры усилителя последовательно с индуктивностями $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$, приводят к снижению устойчивости настройки усилителя, так как являются нестабильными частями индуктивности контуров. Подключение конденсаторов C_1, C_2, \dots, C_n к точкам b_1, b_2, \dots, b_n вместо шасси усилителя дает частичное улучшение устойчивости настройки и уменьшение обратной связи в узко-

полосных усилителях. В широкополосных усилителях такая возможность отсутствует, так как в них не применяется сосредоточенная емкость в контуре, а распределенная емкость всегда одним концом подключена к шасси.

Применяемая в широкополосных усилителях схема параллельного питания анодов ламп дает лучшие результаты. Здесь (рис. 3-24) индуктивность L_{ab} последовательно в контуры не входит и на устойчивость настройки усилителя не влияет. Величина напряжения обратной связи, передаваемого из анодной цепи последней лампы на сетку второго каскада, также уменьшается. При той же величине индуктивности общего провода

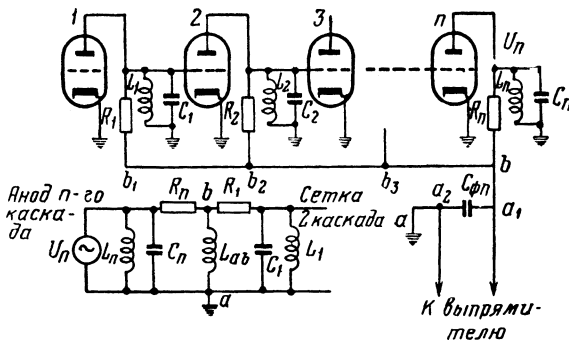


Рис. 3-24. Высокочастотная схема цепи параллельного питания анодов ламп.

$L_{ab}=0.1$ мкГн его сопротивление на частоте 30 МГц $\omega_0 L_{ab} \text{—} 20$ ом и на частоте 200 МГц $\omega_0 L_{ab} \text{—} 125$ ом. В анодную цепь широкополосных усилителей обычно включаются сопротивления R_1, R_2, \dots, R_n порядка 1000 ом. Напряжение на сетке второго каскада будет составлять:

на частоте 30 МГц

$$\frac{20}{1000 + 20} \approx 2\%$$

на частоте 200 МГц

$$\frac{125}{1000 + 125} \approx 11\%$$

от напряжения на аноде последнего каскада.

Для подавления обратной связи по цепи питания анода применяются развязывающие цепи, чаще всего включаемые то схеме рис. 3-25. Средний конденсатор $C_{фвч}$, включаемый параллельно конденсатору фильтра питания $C_{фп}$, шунтирует индуктивность L_{ab} бщего провода питания. Полезным такой конденсатор может быть толь ко, если его сопротивление на рабочей частоте усилителя $1/\omega_0 C_{фвч}$ будет значительно меньше сопротивления $\omega_0 L_{ab}$. В противном случае благодаря резонансу между $C_{фвч}$ и L_{ab} под-

ключение конденсатора может оказаться бесполезным и даже вредным. Эти соображения при $L_{ab}=0,1$ мкГн приводят к необходимости применять конденсаторы емкостью порядка 10 мкФ на частоте 465 кГц и емкостью (порядка 3000 пФ на частоте 30 МГц или не включать их вовсе.

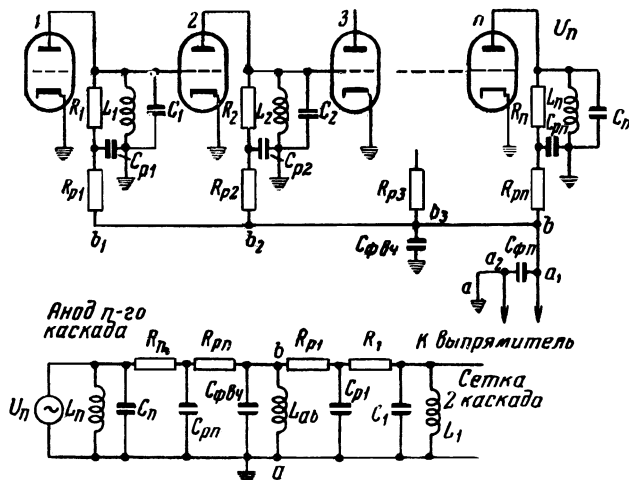


Рис. 3-25. Высокочастотная схема развязывания цепи питания анодов с тремя фильтрующими ячейками.

Как следует из эквивалентной схемы (рис. 3-25), развязывающая цепь состоит из трех ячеек: R_n , $R_{пn}C_{фвч}$ (или $R_{пn}L_{аб}$ при отсутствии $C_{фвч}$) и $R_{п1}C_{п1}$ независимо от числа каскадов и наличия развязывающих ячеек $R_{п2}C_{п2}$, $R_{п3}C_{п3}$ и т. д., которые могут отсутствовать, если не требуется развязывания промежуточных каскадов друг от друга. Увеличение ослабления в этой схеме может быть получено только за счет увеличения C_p и R_p , что связано с повышением напряжения питания, увеличением мощности, рассеиваемой на всех сопротивлениях R_p , и увеличением габаритов конденсаторов и сопротивлений. Недостатком схемы усилителя, состоящего из большого числа каскадов, также является наличие провода b_1, b , который проходит через все каскады усилителя и может служить причиной случайных паразитных связей между любыми точками схемы.

Соотношение между величинами C_p и R_p может быть, взято любое. Важно только, чтобы для каждой развязывающей ячейки величина сопротивления, включенного последовательно в провод питания, была значительно больше величины сопротивления, включенного параллельно между проводом питания и корпусом, и чтобы последовательное сопротивление не слишком снижало анодное напряжение. Цепи экранирующих сеток на схемах рис. 3-23, 3-24 и 3-25 не показаны для упрощения. Обычно эти сетки питаются от общего с анодами источника питания через гасящие

сопротивления, служащие для снижения напряжения на экранирующей сетке. Эти сопротивления вместе с блокировочными конденсаторами C_3 , роль которых разобрана в § 3-6, служат одновременно и развязывающими ячейками цепей экранирующих сеток, действующими аналогично схеме рис. 3-25.

В большинстве случаев выходное напряжение усилителя высокой или промежуточной частоты, подаваемое на детектор, не превосходит 1—2 в. Все лампы усилителя работают с весьма низким использованием постоянного анодного напряжения, не превышающим 10% даже для последнего каскада. В этих условиях допустимо иметь на аноде низкое напряжение, которое равно или несколько меньше напряжения на экранирующей сетке. Такой режим ламп позволяет объединить развязывающие сопротивления и емкости анодных цепей и цепей экранирующих сеток (рис. 3-26). На этом рисунке изображены принципиальные схемы одного усилительного каскада в соответствии с условной высокочастотной схемой рис. 3-25, на которой все отдельные каскады могут быть заменены на каскады, показанные на рис. 3-26.

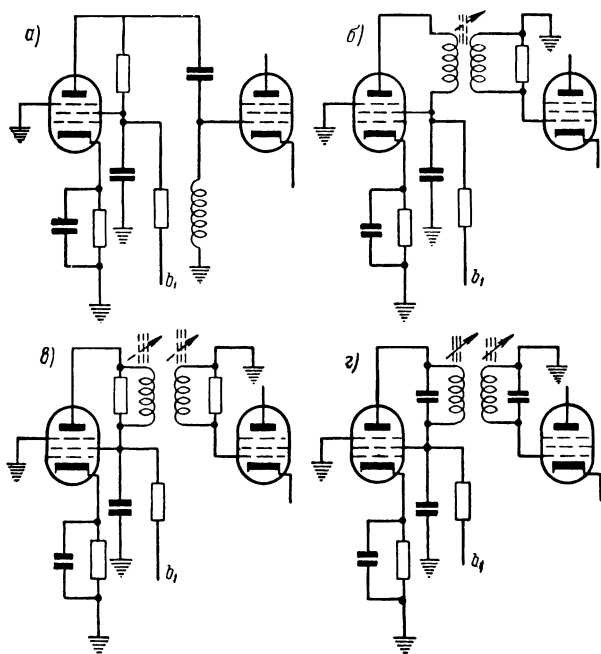


Рис. 3-26. Схемы с объединением развязывающих деталей цепей анода и экранной сетки: а — одноконтурный широкополосный усилитель с параллельным питанием анода; б — одноконтурный широкополосный усилитель с бифилярной намоткой контурной катушки; в — двухконтурный широкополосный усилитель; г — двухконтурный узкополосный усилитель.

При недостаточности фильтрации с помощью трех ячеек (рис. 3-25) можно увеличивать число ячеек, включая сопротивления последовательно в участки провода b_2b_3 , b_3b_4 , ... и соединяя точки b_2 , b_3 , b_4 , ... через конденсаторы с шасси. Это увеличивает количество деталей в усилителе и усложняет его монтаж.

На рис. 3-27 дана схема развязывания и питания цепей анода и экранирующих сеток, построенная аналогично по схеме рис. 3-20, служащей для развязывания цепей накала. Эта схема при минимальном количестве деталей дает максимальную фильтрацию. Так же, как и при развязывании цепи накала, здесь общий провод питания высоким напряжением разделен фильтрующими ячейками на участки, что исключает возможность случайной связи по этому проводу входных и выходных цепей усилителя. Фильтрующими ячейками разделены все каскады, и чем дальше они отстоят друг от друга, тем больше развязка между ними.

Выбор развязывающих деталей для схемы рис. 3-27 прост. Минимальная

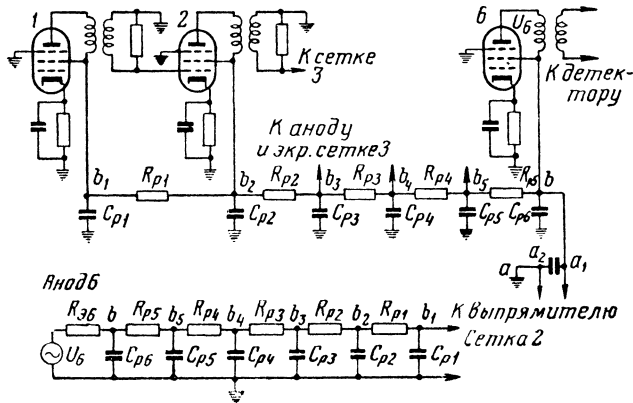


Рис. 3-27. Схема шестикаскадного широкополосного усилителя с последовательным включением развязывающих сопротивлений.

емкость конденсаторов определяется по табл. 3-1, а величины сопротивлений рассчитываются, исходя из рассеиваемой на них мощности и падения постоянного напряжения. Так, например, если провод от выпрямителя подключен к точке b и суммарный ток анода и экранирующей сетки лампы равен $I_s = 10$ ма, то для шестикаскадного усилителя через сопротивление R_{p5} будет протекать ток $5I_s = 50$ ма. Если применить одинаковые по величине сопротивления с рассеиваемой мощностью 0,25 вт, то и на сопротивлениях R_{p1} , R_{p2} , ..., R_{p5} падает напряжение соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 в. Расчет ослабления обратной связи выполняется согласно эквивалентной схеме рис. 3-27. Если ослабление будет недостаточным, то его можно увеличить следующими способами: увеличением емкости C_3 сверх минимального ее значения, увеличением сопротивлений R_{p1} , R_{p2} , R_{p3} и N_{exTube}

R_{p4} до величин, соответствующих рассеиваемой мощности 0,25 вт, и увеличением всех сопротивлений за счет повышения рассеиваемой на них мощности сверх 0,25 вт. Если питающий провод подключить вместо точки b к точке b_4 , то максимальный ток, протекающий через R_{p3} , будет равен 30 ма, что позволит увеличить величины развязывающих сопротивлений при той же рассеиваемой мощности.

Схемы с последовательным соединением развязывающих сопротивлений, показанные на рис. 3-27, упрощают монтаж усилителя и, следовательно, делают его более надежным.

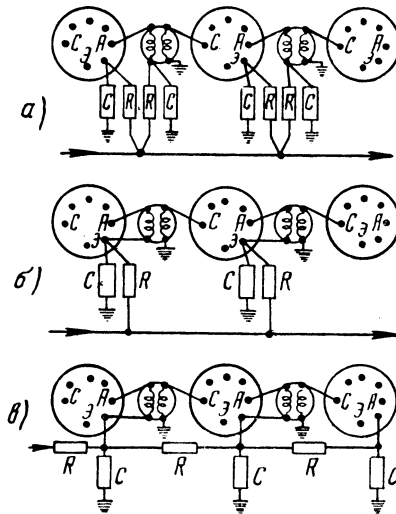


Рис. 3-28. Монтаж цепей анода и экранирующих сеток трех ламп широкополосного усилителя: а — раздельная фильтрация анода и экранирующей сетки; б — объединение фильтрации при параллельном включении развязывающих сопротивлений; в — объединение фильтрации при последовательном включении развязывающих сопротивлений.

На рис. 3-28 даны для сравнения варианты монтажа цепей анода и экранирующих сеток для трех каскадов усилителя на пальчиковых лампах. Таким же простым получается монтаж усилителя на сверхминиатюрных лампах.

3-10. ПАЗАИТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО ЦЕПЯМ ПИТАНИЯ АНОДОВ И ЭКРАНИРУЮЩИХ СЕТОК В УСИЛИТЕЛЯХ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ И В ВИДЕОУСИЛИТЕЛЯХ

В усилителях низкой частоты и видеоусилителях возможны два вида паразитной обратной связи по цепям питания анодов и экранирующих сеток. Первый вид обратной связи получается за счет индуктивного сопротивления общего участка провода питания ab , как это показано на схеме

рис. 3-23, в которой резонансные контуры можно заменить сопротивлениями или трансформаторами низкой частоты. Влияние этого вида паразитной обратной связи увеличивается с повышением частоты. Поэтому она опасна только для усилителей с весьма высокой верхней граничной частотой f_v . Борьба с паразитной обратной связью на высоких частотах ведется тем же методом, который был изложен выше для резонансных усилителей.

Второй вид паразитной обратной связи получается в низкочастотной части пропускаемого усилителем спектра частот. С понижением частоты растет емкостное сопротивление выходного конденсатора $C_{фп}$ фильтра питания. На частотах, близких к нулю, сопротивление участка ab достигает величины суммарного сопротивления постоянному току дросселей фильтра питания и внутреннего сопротивления выпрямителя $R_{фп}$. На рис. 3-29 показано, как изменяется сопротивление участка ab при изменении частоты от 10 до 10^8 гц, если он имеет следующие данные: $L_{ab}=0,1$ мкГн; $C_{фп}=10$ мкФ; $R_{фп}=300$ ом.

Увеличение емкости фильтра питания $C_{фп}$ почти не влияет на этот вид обратной связи, так как независимо от этой емкости сопротивление участка ab при снижении частоты всегда стремится к величине $R_{фп}$. Также почти не влияют дополнительные развязывающие сопротивления R_p и конденсаторы C_p , включаемые по схеме рис. 3-25, так как их фильтрующие свойства уменьшаются при понижении частоты.

Вредное действие паразитной обратной связи на низких частотах проявляется в виде ненормального искажения частотной характеристики усилителя или его самовозбуждения на частотах порядка нескольких герц. Очевидно, что вредное действие будет тем больше, чем больше коэффициент усиления на низких частотах. Поэтому основным методом борьбы с самовозбуждением усилителя на низких частотах является максимально возможное снижение усиления на этих частотах. При расчете усилителя никогда не следует задаваться излишне малым значением нижней граничной частоты f_n и не считать достижением получение f_n ниже требуемого. Наоборот, данные схемы следует выбирать так, чтобы усиление на частотах ниже f_n падало как можно круче.

Паразитная обратная связь получается через сопротивление общего уча-

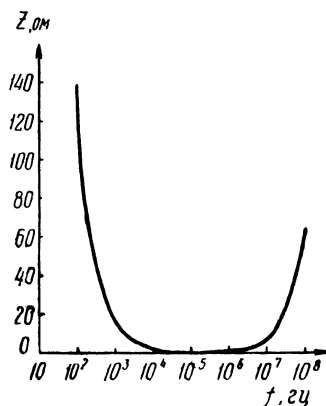


Рис. 3-29. Полное выходное сопротивление источника питания.

стка провода аб, которое определяется внутренним сопротивлением источника питания постоянному току $R_{\text{фп}}$.

Поэтому любые меры снижения сопротивления $R_{\text{фп}}$ — уменьшение сопротивления дросселя фильтра, применение кенотронов с малым внутренним сопротивлением, электронная стабилизация выходного напряжения — ведут к ослаблению обратной связи.

Из этой группы способов подавления обратной связи наиболее эффективным является питание усилителя от двух отдельных источников с подключением к одному из них первых каскадов, а к другому — последних каскадов. К этому способу приходится прибегать в многокаскадных усилителях с очень большим усилением и с очень низкой граничной частотой f_n [28].

Уменьшение обратной связи на низких частотах можно получить, применяя специальные схемы усилительных каскадов — двутактные и компенсационные. В двухтактных схемах изменение тока нагрузки выпрямителя, вызываемое одной из ламп, компенсируется обратным изменением, вызываемым другой лампой. Компенсационные схемы работают по принципу компенсации влияния напряжения паразитной обратной связи противоположным ему по фазе напряжением, подаваемым на катоды или экранирующие сетки ламп первых каскадов усилителя. Наладка и регулировка таких схем очень сложна. Поэтому к ним следует прибегать, если нет других путей для нейтрализации паразитных обратных связей. Краткое описание компенсационных схем дано в справочнике [2]. Там же имеются подробные ссылки на литературу.

3-11. ПАЗАРИТНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ПО ЦЕПЯМ ПОДАЧИ НАПРЯЖЕНИЙ НА УПРАВЛЯЮЩИЕ И АНТИДИНАТРОННЫЕ СЕТКИ

В многокаскадном усилителе на управляющие и антидинатронные сетки ламп некоторых каскадов подаются напряжения для регулирования усиления или другого управления. По цепям подачи этих напряжений могут получаться паразитные обратные связи за счет емкостной составляющей тока в цепи сетки последнего управляемого каскада. Этот ток на общем сопротивлении источника управляющего сигнала создает напряжение, которое поступает на все предыдущие управляемые каскады. Таким образом, характер возникновения паразитных обратных связей через цепи управления совершенно такой же, как при общем питании анодных и экранированных цепей.

Если управляющие напряжения изменяются медленно, как это большей

частью бывает в системах ручного и автоматического регулирования усиления, то для подавления обратных связей по цепям управления пользуются методом, разобранным в предыдущем параграфе для низкочастотных связей через цепи питания анодов. Некоторая дополнительная трудность заключается в том, что выходное сопротивление источника управляющего напряжения обычно значительно больше выходного сопротивления источника питания усилителя. С другой стороны, задача несколько упрощается тем, что управлением обычно охватываются не все лампы усилителя.

В некоторых типах многокаскадных усилителей на управляющие или антидинактронные сетки подаются быстро изменяющиеся напряжения для кратковременного запирания ламп, отпираания их или изменения усиления. В этом случае к развязывающим цепям предъявляются два противоречивых требования. Они должны, с одной стороны, хорошо подавлять обратную связь и, с другой, — мало замедлять и искажать управляющие напряжения.

С точки зрения подавления обратной связи простейшим и наилучшим вариантом явилось бы применение развязывающей цепи из последовательно включенных сопротивлений и параллельных конденсаторов (рис. 3-30), аналогичной цепи, примененной для развязки анодов и экранирующих сеток. Недостатком такого варианта является то, что в каждой фильтрующей ячейке RC происходит задержка управляющего импульса, из-за чего

лампы отпираются и запираются не одновременно. Приходится прибегать к параллельной схеме рис. 3-31, которая, несмотря на большее число деталей, дает меньшее ослабление паразитной наводки.

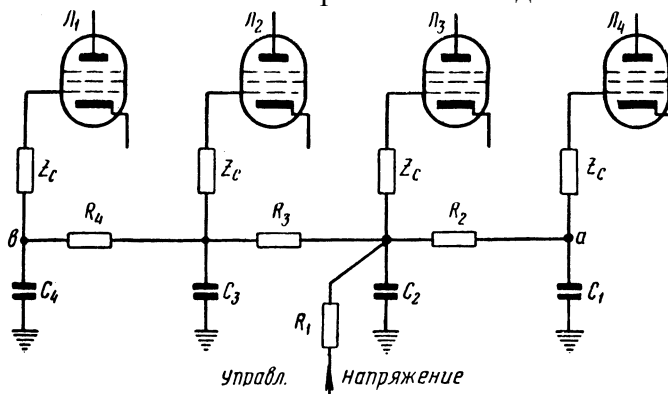


Рис. 3-30. Последовательная цепь развязки управляющих сеток с неодновременным запираением и отпираением ламп.

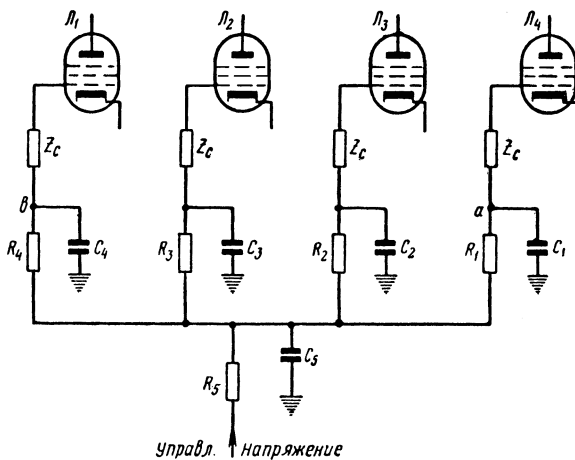


Рис. 3-31. Параллельная цепь развязки управляющих сеток с одновременным запирающим и отпирающим ламп.

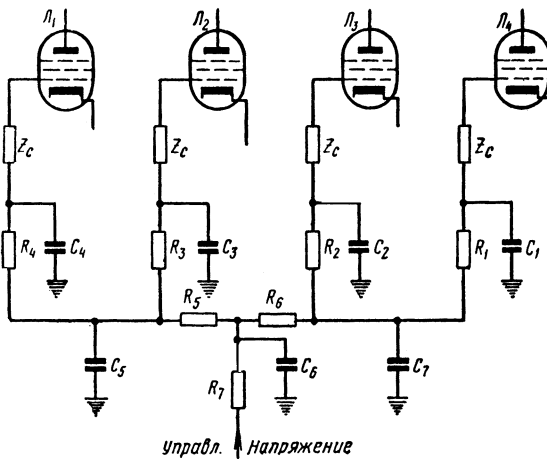


Рис. 3-32. Параллельно-последовательная цепь развязки управляющих сеток с одновременным запирающим и отпирающим ламп.

Действительно, считая источником наводки конденсатор C_1 на котором получается максимальное напряжение от емкостного тока сетки лампы $Л_4$, получаем, что в схеме рис. 3-30 между точками а и в имеется три развязывающие ячейки R_2C_2 , R_3C_3 и R_4C_4 , а в схеме рис. 3-31 — две ячейки R_1C_5 и R_4C_4 .

Величины R и C нужно выбирать небольшими, чтобы меньше искажались управляющие импульсы. Если двух ячеек окажется недостаточно для развязывания точек а и в, то можно применить еще более неэкономичную схему рис. 3-32, дающую излишнюю развязку, но обеспечивающую одновременное управление всеми лампами.

При проектировании развязки цепи управления с помощью элементов RC необходимо прежде всего определить степень влияния их на управляющий импульс. Теоретический анализ переходных характеристик многозвенных цепей RC весьма сложен и для практического использования затруднителен [16, 17]. Поэтому рекомендуется производить подбор R и C в ячейках экспериментально. При этом необходимо учитывать, что емкости C_1, C_2, C_3 и C_4 входят в резонансные контуры усилителя последовательно с входными емкостями ламп $C_{вх}$. Величины этих емкостей желательно выбирать (как можно большими, во всяком случае так, чтобы выполнялось условие $C > (10—20)C_{вх}$).

Рассмотренную развязывающую цепь RC можно применять в схеме управления, если требуемое время установления нормального усиления составляет не менее 1 — 2 мксек. При необходимости иметь меньшее

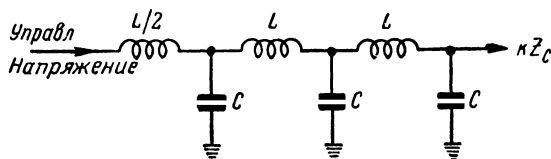


Рис. 3-33. Фильтр LC в цепи управления.

время установления цепь RC оказывается непригодной и приходится прибегать к цепи LC. Такая цепь (рис. 3-33) представляет собой П-образный фильтр нижних частот, имеющий граничную частоту

$$f_в = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$$

Переходная характеристика такого фильтра характеризуется временем установления

$$t_{y1} = \frac{0.35}{f_в} = 0.35\pi\sqrt{LC} = 1.1\sqrt{LC}$$

которое для одной ячейки почти точно совпадает с экспериментальными результатами. С увеличением числа ячеек время установления растет медленно и для 3—5 ячеек достигает величины

$$t_{y3-5} = 1.9\sqrt{LC}$$

Цепь LC может быть применена в схемах рис. 3-31 и 3-32 с заменой в них сопротивлений на индуктивности.

Преимуществом цепи LC по сравнению с цепью RC является возможность применения больших емкостей ($C_1—C_4$), что улучшает качество резонансных контуров усилителя и дает большую развязку.

Недостатком развязывающей цепи LC являются значительные выбросы в

конце времени установления амплитуды, достигающие величин $\pm 10\%$ от установившегося значения (рис. 3-34). Другим недостатком цепи LC является ударное возбуждение, возникающее при импульсной работе усилителя и перегрузке его сеточными токами. В этом случае по дросселям протекает резко изменяющийся ток и на них индуктируется напряжение, заряжающее их собственную паразитную емкость. В результате возникшего ударного возбуждения высокочастотный импульс, проходящий через усилитель, растягивается и его форма искажается.

Для уменьшения выбросов и устранения ударного возбуждения дроссели шунтируют сопротивлениями, как показано на рис. 3-35. Шунтирующее сопротивление следует выбирать из соотношения

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C_{\text{пар}}}}$$

для того чтобы контур, составленный из дросселя L и его собственной распределенной паразитной емкости, стал апериодическим. При этом амплитуда выбросов на управляющем импульсе падает в 1,5—2 раза, а время установления управляющего импульса возрастает в 1,5 раза.

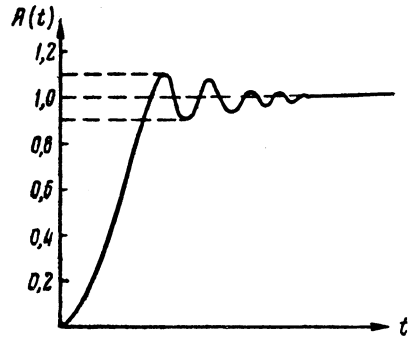


Рис. 3-34. Установление напряжения на выходе фильтра LC.

Развязывающая цепь рис. 3-33 и 3-35 является несогласованной линией задержки, в которой возможны отражения управляющих импульсов от обоих концов. Эти отражения не могут повлиять на передний фронт управляющего импульса, так как первый отраженный импульс может прийти к точкам Z_c только после того, как он, отразившись от этих точек, дойдет до источника управляющего напряжения, снова отразится и вернется обратно.

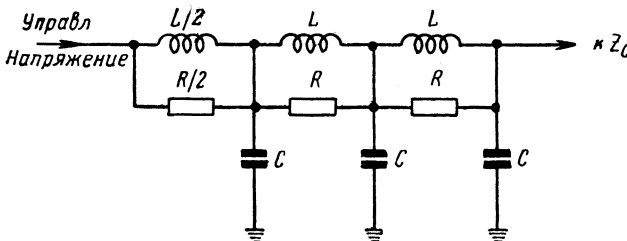


Рис. 3-35. Фильтр LCR в цепи управления.

Первый отраженный импульс в точках Z_c оказывается задержанным на

время

$$2t_3 = 2n\sqrt{LC}$$

где t_3 —время задержки линии и n — число ячеек.

Амплитуда отраженного импульса определяется затуханием линии и соотношением между выходным сопротивлением источника управляющего напряжения и волновым сопротивлением линии

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Если длительность управляющего импульса $\tau > 2t_3$, то к моменту прихода отраженного импульса он еще не успеет закончиться. Это приведет к растягиванию управляющего импульса в точках Z_c и к искажению его заднего среза, что можно легко скорректировать уменьшением длительности импульса на выходе источника управляющего напряжения.

Очевидно, что простейшим способом ликвидации отраженных импульсов является согласование линии, т. е. замыкание ее на сопротивление $R=\rho$ на любом из концов. Этот метод большей частью неприемлем, так как волновое сопротивление линии ρ не велико и согласующее сопротивление сильно нагружает источник управляющего напряжения.

Поэтому приходится прибегать к несогласованной развязывающей цепи, выбирая число ячеек n и параметры L и C на основании приведенных соображений.

3-12. ФИЛЬТРАЦИЯ НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПЯХ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА СМЕСИТЕЛЯ В ПРИЕМНИКАХ САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛН

В приемниках сантиметровых волн применяются полупроводниковые смесители, в цепь которых необходимо включать измерительный прибор постоянного тока для контроля работы смесителя и проверки уровня мощности, подаваемой от гетеродина. Цепь измерительного прибора может быть длинной и разветвленной, так как он часто размещается далеко от смесителя. Иногда эта цепь используется также для подачи смещения на полупроводниковый диод. Цепь измерительного прибора через входной трансформатор оказывается подключенной к самой чувствительной точке приемника — входу усилителя промежуточной частоты. При отсутствии развязывающих фильтров достаточно незначительной наводки в цепи измерительного прибора от источников, работающих на частотах, близких к промежуточной, чтобы на приемнике получился повышенный уровень шума. Еще хуже получается при недостаточном экрани-

ровании и фильтрации в цепях последних каскадов того же усилителя и его детектора. В этом случае через цепи измерительного прибора получается паразитная обратная связь выхода усилителя с его входом, что приводит к самовозбуждению усилителя или к изменению его частотных характеристик.

Таким образом (рис. 3-36 и 3-37), обязательными составными элементами входных цепей усилителя промежуточной частоты приемников сантиметровых волн являются фильтры, не пропускающие на вход усилителя напряжений, наведенных в цепи измерительного прибора. Конструктивное выполнение этих фильтров не сложно, так как через них проходят только постоянные составляющие тока смесителя. Поэтому максимальная степень фильтрации со стороны низких частот в них ничем не ограничивается. Фильтры должны иметь малое омическое сопротивление, чтобы не создавать дополнительного смещения на смесительный диод. В зависимости от схемы смесителя применяется один из четырех вариантов схемы фильтра, показанных на рисунках.

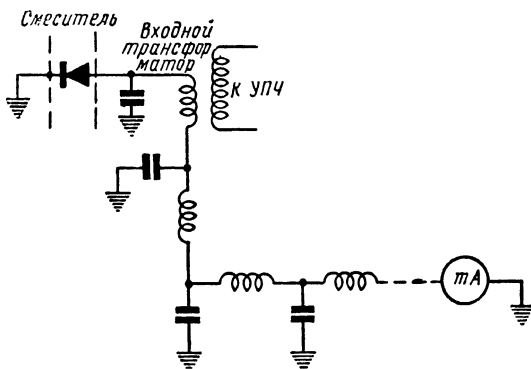


Рис. 3-36. Фильтрация цепи измерительного прибора в одноканальном смесителе. Число ячеек фильтра и его данные рассчитываются с учетом необходимого ослабления, даваемого фильтром, которое определяется по формуле (3-15)

$$M > 120K$$

где K — полный коэффициент усиления по промежуточной частоте.

В этом расчете имеется запас за счет невозможности учета коэффициента связи между измерительным прибором и выходным каскадом УПЧ, который всегда значительно меньше единицы.

При изготовлении фильтров используются малогабаритные детали. Величины индуктивностей и емкостей выбираются максимально большими. При этом собственная резонансная частота дросселя получается близкой к номинальной промежуточной частоте усилителя.

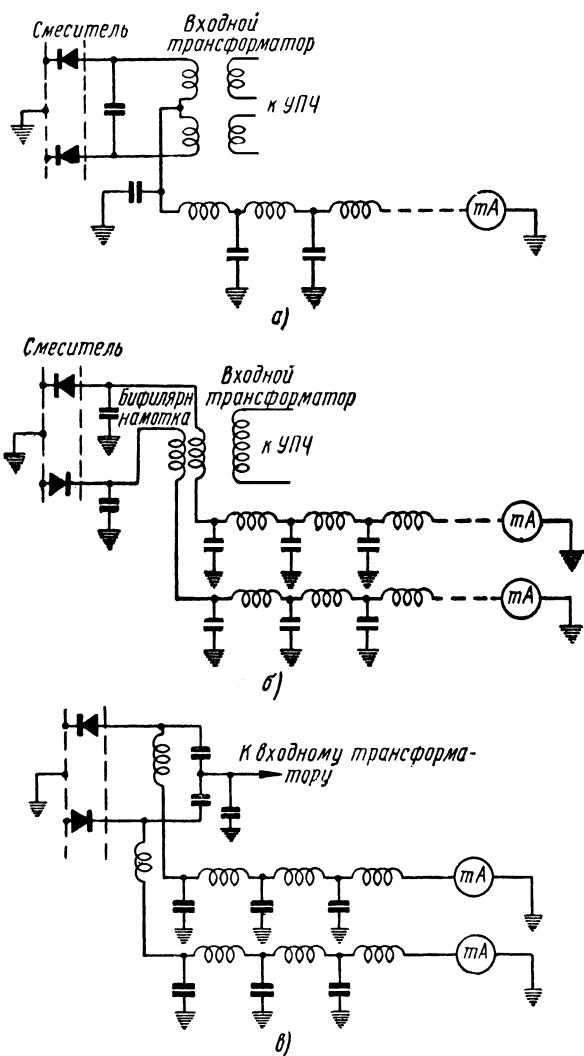


Рис. 3-37. Фильтрация цепи измерительного прибора в балансном смесителе:
 а — схема с детекторами одного направления; б — схема с детекторами двух направлений и с последовательным включением элементов; в — схема с детекторами двух направлений и с параллельным включением элементов.

3-13. РАЗДЕЛЕНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ ПРИЕМНИКОВ САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛН НА ПУПЧ И ГУПЧ

Широкополосные усилители промежуточной частоты, применяемые в радиоприемниках сантиметрового диапазона волн, имеют обычно большое усиление порядка 110 дБ или $3 \cdot 10^5$ раз по напряжению. Число каскадов усилителя, определяемое часто не из необходимости получения заданного усиления, а из потребности в большом числе элементов, на которые можно подавать напряжения для регулирования и управления усилением, достигает обычно 8—10. Такой усилитель, как правило, разбивают на два: предварительный усилитель промежуточной частоты ПУПЧ и главный усилитель промежуточной частоты ГУПЧ. На выходе последнего включается детектор с видеоусилителем или выходным катодным повторителем.

Входную часть усилителя необходимо располагать вблизи смесителя, чтобы передавать сигналы по коротким отрезкам проводов или кабелей, не требующим согласования. Передача сигналов на вход по согласованному кабелю приводит к потере мощности в согласующем сопротивлении и возрастанию коэффициента шума усилителя. Если отказаться от деления усилителя на два — ПУПЧ и ГУПЧ, то тогда весь усилитель придется устанавливать около смесителя. Недостаток места в блоке, содержащем волноводно-смесительную часть, является основным аргументом в пользу деления усилителя на две части.

В качестве второго аргумента выдвигается предположение, что такое деление усилителя облегчает борьбу с паразитными обратными связями благодаря наличию двух отдельных экранированных блоков, питаемых от различных источников питания (рис. 3-38). Разберем это предположение более подробно.

Как показано в § 3-7, для полностью устойчивой работы усилителя необходимо, чтобы ослабление в любой цепи паразитной обратной связи было не менее 120/К. Для рассматриваемого случая (при $K=3 \cdot 10^5$) это означает, что ослабление паразитных обратных связей, возникающих по цепям питания анода и накала, должно быть порядка $3,6 \cdot 10^7$ раз. Такого ослабления не могут дать отдельные источники питания, подключенные к общей сети, так как между ними имеется связь через первичные обмотки силовых трансформаторов. Кроме того, выходные провода обоих источников питания могут быть на некоторых участках заключены в общие шланги или проходить вблизи других проводов. Достаточно небольшой емкости между ними, измеряемой долями пикофарды, чтобы ослабление пара-

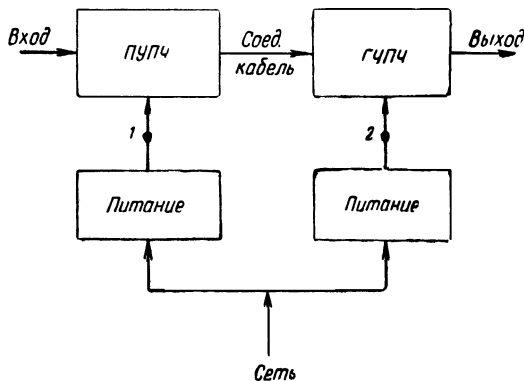


Рис. 3-38. Питание предварительного и главных усилителей промежуточной частоты от отдельных источников.

зитных связей получилось значительно меньше необходимого. По этим двум причинам на высоких частотах при большом усилении лучше всего считать отдельные источники питания общими, полагая, что ослабления обратной связи от точки 2 к точке 1 (рис. 3-38) не происходит.

Для получения требуемого ослабления паразитных связей между (выходными каскадами ГУПЧ и входом ПУПЧ, при замкнутых накоротко по высокой частоте точках 1 и 2 (рис. 3-38), следует соответствующим образом рассчитать систему развязок. Если собственные развязывающие цепи ПУПЧ и ГУПЧ рассчитаны в соответствии с их коэффициентами усиления, то между точками 1 и 2 приходится включать дополнительные фильтрующие цепи.

Таким образом, разделение усилителя на два не только не облегчает борьбу с паразитными связями, а, наоборот, требует дополнительных развязок. Поэтому к разделению усилителя на ПУПЧ и ГУПЧ следует прибегать только в случае невозможности размещения всего усилителя в непосред-

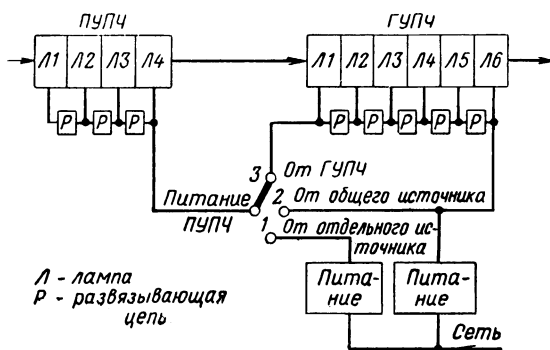


Рис. 3-39. Схема эксперимента с отдельными и общим питанием ПУПЧ.

ственной близости от смесителя. При этом нужно учитывать, что такое разделение связано с введением дополнительных деталей и разъемов и, следовательно, с понижением надежности системы.

Для проверки изложенного был проведен следующий эксперимент. Настроенные и налаженные ПУПЧ и ГУПЧ питались сначала от двух отдельных выпрямителей и трансформаторов накала (положение 1 переключателя на рис. 3-39). При этом получалась резко искаженная частотная характеристика, несмотря на то, что при отдельной проверке ПУПЧ и ГУПЧ паразитные связи в них отсутствовали. Перевод питания на общие источники (положение 2 переключателя) ничего не изменил. Когда же ПУПЧ питался от общих источников питания, но через всю систему развязок ГУПЧ (положение 3 переключателя), явления паразитной обратной связи исчезала и усилитель имел нормальную частотную характеристику. Тот же эффект получался при питании ПУПЧ от точек 1 и 2, если в проводе питания ПУПЧ вводились до дополнительные развязки.

Оба усилителя — предварительный и главный соединяются согласованным коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 75—100 ом. В согласующем противлении теряется изрядная энергия, и выходной каскад ПУПЧ является усилителем мощности с трансформацией на понижение. Амплитудная характеристика ПУПЧ, снимаемая на конце согласованного кабеля, ограничивается работой этого каскада. Она может быть причиной недостаточного динамического диапазона всего усилителя, что особенно проявляется, когда ГУПЧ имеет логарифмическую амплитудную характеристику и, следовательно, динамический диапазон не ограничивает. Сказанное служит еще одним аргументом против разделения усилителя на два — ПУПЧ и ГУПЧ.

3-14. КОНСТРУКЦИИ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ПАЛЬЧИКОВЫХ ЛАМПАХ

Шасси усилителя гальванически соединяет различные точки его схемы. Каждая деталь и провод усилителя имеют некоторую емкость относительно шасси. Под влиянием переменного напряжения на аноде лампы по поверхностному слою шасси протекает множество токов, направления которых ориентировочно показаны на рис. 3-48. Кроме того, по поверхностному слою шасси протекают вихревые токи, вызванные переменным магнитным полем катушек и проводов. В зависимости от величины активного и реактивного сопротивлений поверхностного слоя шасси между различными его точками возникают разности потенциалов, которые, в свою очередь, могут передаваться в любые точки схемы усилителя,

имеющие гальваническую, емкостную или индуктивную связь с шасси, вызывая этим паразитную связь различных элементов усилителя друг с другом.

Если к металлическому листу в точках *a* и *b* подвести ток высокой частоты, то через лист он будет проходить по самым разнообразным путям, показанным на рис. 3-40. При этом величина тока, проходящего через поперечное сечение любой полоски, взятой в поверхностном

слое листа, будет тем меньше, чем дальше отстоит полоска от прямой, соединяющей точки *a* и *b*. Независимо от размеров листа в прохождении тока будет участвовать весь его поверхностный слой.

Обратная связь по шасси прибора проявляется тем сильнее, чем выше рабочая частота усилителя, так как с повышением частоты возрастают токи в шасси, протекающие через емкости монтажа и деталей, и увеличиваются его активное и реактивное сопротивление.

На частотах, измеряемых килогерцами и единицами мегагерц, разности потенциалов между различными точками поверхности шасси настолько малы, что ее можно считать эквипотенциальной и, следовательно, не создающей обратной связи. В усилителях высокой и промежуточной частоты, работающих в указанном диапазоне частот, меры предосторожности в отношении паразитной обратной связи по шасси не принимаются. В таких усилителях контурные катушки индуктивности обычно имеют относительно большие размеры, а контуры, в которые они входят, — малое затухание d . Возможность паразитной индуктивной связи между катушками, входящими в различные каскады усилителя, велика из-за относительно большой величины внешнего магнитного поля. Все это определяет общую конструкцию усилителя, который монтируется обычно на общем шасси с другими частями радиоприемника. Контуры целиком экранируются друг от друга специальными металлическими экранами. В простейших радиоприемниках нередко применяются неэкранированные открытые катушки, прикрепляемые к разным сторонам шасси, служащего одновременно экраном.

В усилителях низкой частоты и в видеоусилителях, работающих на тех же частотах, паразитная обратная связь через шасси также маловероятна. При наличии в усилителе трансформаторов и дросселей между ними

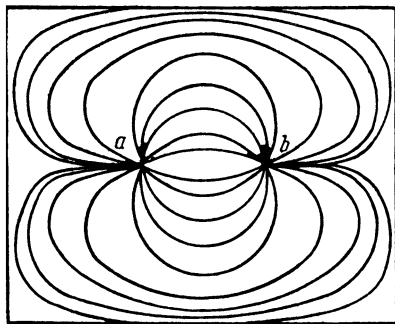


Рис. 3-40. Пути токов высокой частоты в поверхностном слое металлического листа.

возможна емкостная и индуктивная связь, во избежание которой их удаляют друг от друга и экранируют. Особое внимание обращают на разделение входных и выходных деталей и трансформаторов в многокаскадных усилителях с большим усилением.

В широкополосных усилителях высокой и промежуточной частоты, которые обычно работают на более высоких частотах, измеряемых десятками мегагерц, токи, протекающие в поверхностном слое шасси, могут быть причиной значительного ухудшения устойчивости усилителя. Для устранения обратных связей по шасси усилителя необходимо все детали, провода и точки присоединения к шасси, относящиеся к аноду и управляющей сетке двух соседних по принципиальной схеме электронных ламп, размещать только в промежутке между ними, по возможности

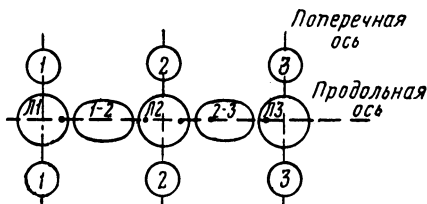


Рис. 3-41. Схема размещения деталей в широкополосном резонансном усилителе:

Л₁, Л₂, Л₃ — электронные лампы; 1 — район размещения деталей экранирующей сетки и катода Л₁ и присоединения их к корпусу; 2 — то же для Л₂; 3 — то же для Л₃; 1—2 — район размещения деталей, относящихся к аноду Л₁ и управляющей сетке Л₂ и присое-

ближе к продольной осевой линии (рис. 3-41). Детали, провода и точки присоединения к шасси, относящиеся к катоду и экранирующей сетке одной лампы, следует размещать как можно ближе к поперечной оси лампы. В промежутке между лампами, даже на довольно большом расстоянии от продольной оси, совершенно недопустимо размещать детали, провода и точки присоединения к шасси, относящиеся к другим каскадам данного усилителя. Все эти условия наилучшим образом удастся выполнить, если расположить лампы одну за другой по прямой линии в отдельном блоке, устанавливаемом на общем шасси приемника. Такую конструкцию принято называть линейкой промежуточной частоты (рис. 3-42). Здесь токи в поверхностном слое шасси, относящиеся к любому каскаду усилителя, замыкаются в пределах данного каскада, не захватывая мест установки и соединения с шасси деталей, относящихся к другим каскадам. Дополнительным преимуществом размещения в линейку является максимальное снижение емкостных и индуктивных связей между входными и выходными цепями по сравнению с любым другим конструктивным оформлением усилителя. Действительно, здесь входной и выходной каска-

NextTube

ды расположены на максимально возможном расстоянии друг от друга, а наличие общего экрана изолирует усилитель

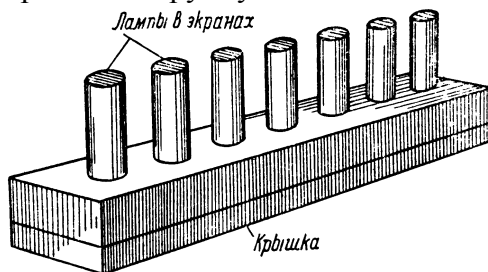


Рис. 3-42. Линейка промежуточной частоты на Пальчиковых лампах.

от остальных деталей и монтажных проводов приемника, которые могут служить причиной случайной связи между входными и выходными цепями.

К конструированию общего экрана нужно подходить с особой осторожностью. Неудачный вариант, освободив линейку от паразитных связей через случайные детали и цепи, не входящие в нее, может привести к дополнительной связи выхода с входом через крышку общего экрана, как это подробно разобрано в § 2-4. Наиболее безопасным является закрывание первых одного-двух каскадов и последних одного-двух каскадов с детектором двумя отдельными крышками. Промежуточные каскады можно закрывать любым образом.

Нельзя рекомендовать размещение широкополосного усилителя промежуточной частоты на общем шасси приемника, располагая лампы по прямой линии или под прямым углом друг к другу в виде буквы Г. В этих случаях, даже при расположении ламп в линию, обратные связи в усилителе возрастают главным образом за счет токов в поверхностном слое шасси, которые, распространяясь по большой поверхности, могут связывать входные и выходные цепи. Здесь емкостные связи тоже увеличиваются из-за наличия вблизи от усилителя посторонних деталей и проводов и вследствие сближения первого каскада с последним. При размещении усилителя на общем шасси приемника экранирование его в целом или частями обычно дает малый эффект, так как большая часть указанных причин повышения уровня обратных связей остается и после надевания экранов.

Очевидно, что совершенно недопустимо располагать лампы усилителя в два ряда.

В линейке промежуточной частоты благодаря малым размерам деталей и выгодному их размещению емкостные и индуктивные связи между каскадами настолько малы, что дополнительного экранирования от-

дельных каскадов и катушек индуктивности друг от друга большей частью не требуется. Наоборот, промежуточные экраны при неудачной их конструкции могут быть причиной даже увеличения обратной связи. Так, например, иногда устанавливают дополнительные экраны в середине ламповых панелей, прикрепляемые к шасси двумя винтами или заклепками без замыкания с боковыми стенками шасси. Такие экраны имеют между собой высокочастотную разность потенциалов, появляющуюся по следующим причинам: емкостная связь дополнительных экранов с другими деталями, присоединение к экранам блокировочных конденсаторов, установка экранов в различных точках шасси, по которому протекают токи высокой частоты. В этих условиях емкость между промежуточными экранами может дополнительно связывать входные и выходные цепи усилителя.

Продолжая приведенные рассуждения, легко прийти к выводу, что каждая дополнительная деталь, устанавливаемая в усилителе, может создать дополнительную обратную связь. Поэтому чем меньше деталей в усилителе, тем он лучше не только с технико-экономической точки зрения, но и с точки зрения качества его работы и надежности.

Число деталей в усилителе и длину соединительных проводов можно значительно сократить применением специальной ламповой панели со встроенными конденсаторами, предназначенной для Пальчиковых ламп.

При очень близком размещении контурных катушек полезно устанавливать между ними небольшую перегородку, приваривая или припаивая ее не менее чем к двум стенкам шасси. Это может уберечь от паразитной

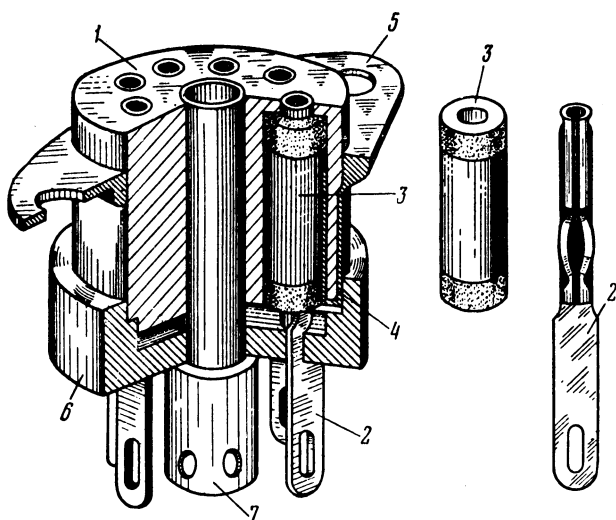


Рис. 3-43. Панель для Пальчиковых ламп со встроенными конденсаторами.

связи в пределах одного-двух каскадов. На рис. 3-43 показана конструкция такой панели. Она состоит из пластмассового корпуса 1, в который вставляется семь гнезд 2. На четыре гнезда, к которым подключаются два вывода катода, экранирующая сетка и один полюю накала, надеваются цилиндрические керамические конденсаторы 3 емкостью 800—1000 пф. Внутренняя обкладка этих конденсаторов соединена с гнездом, к внешней обкладке прижимается пружина 4, которая припаивается или приваривается к металлической обойме 5, служащей для крепления всей панели к шасси. Гнезда и конденсаторы поддерживаются пластмассовой крышкой 6, которая пистоном 7 прикрепляется к корпусу 1. Этот пистон служит не только для крепления, но и для экранирования друг от друга выводов анода и управляющей сетки при условии соединения его с шасси коротким проводом.

Минимальное количество деталей в широкополосном усилителе на пальчиковых лампах получается при использовании этой ламповой панели, схем питания цепей накала и анода с последовательным включением развязывающих дросселей и сопротивлений (рис. 3-20 и 3-27) и схемы с двуконтурными фильтрами или с бифилярной намокай катушки контура и объединением развязывающих деталей анода и экранирующей сетки. На рис. 3-44 изображены принципиальная схема и монтаж трех ламп

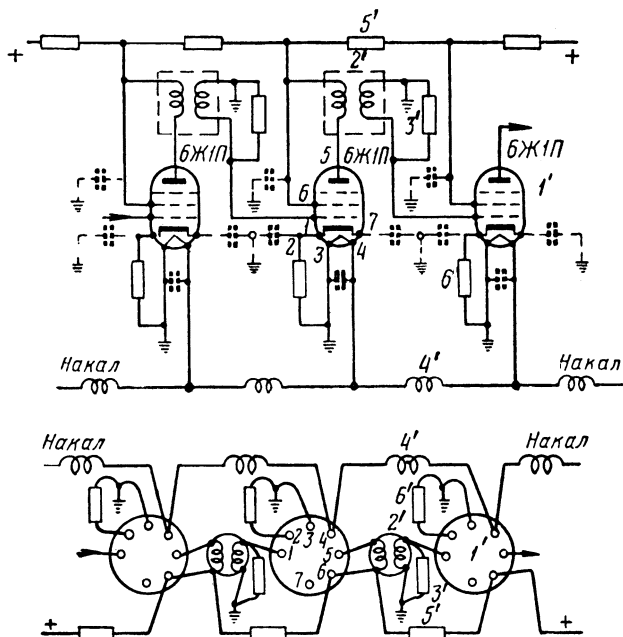


Рис. 3-44. Принципиальная схема и монтаж широкополосного усилителя при использовании ламповой панели со встроенными конденсаторами.

такого усилителя. Показанные на принципиальной схеме пунктиром конденсаторы встроены в ламповую панель и отдельного места не занимают. В результате каждый каскад состоит всего из шести деталей: 1) ламповой панели, 2) катушки контура, 3) сопротивления, шунтирующего контур, 4) дросселя накала, 5) развязывающего сопротивления в цепи питания анодов и экранирующих сеток и 6) сопротивления в катоде для автоматического смещения. Как видно из рисунка, в блоке совершенно отсутствуют монтажные провода и специальные планки с лепестками для припайки деталей.

Хорошо сконструированная линейка промежуточной частоты благодаря малой величине обратных связей работает вполне устойчиво. В серийном производстве при идентичном монтаже линейки дают высокую повторяемость параметров.

3-15. МАЛОГАБАРИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА СВЕРХМИНИАТЮРНЫХ ЛАМПАХ

При конструировании малогабаритного широкополосного усилителя на бесцокольных сверхминиатюрных лампах серии «Б» приходится сталкиваться с рядом трудностей. Основной из них является получение устойчивой работы усилителя при большом усилении по напряжению порядка $0,3-10^6$, что приводит к необходимости иметь ослабление по любому возможному каналу паразитной обратной связи порядка $3,6 \cdot 10^7$. Другие трудности состоят в обеспечении необходимого охлаждения деталей и ламп усилителя, удобного доступа к монтажу, идентичности характеристик в производстве.

Известен ряд конструктивных вариантов малогабаритных усилителей. Один из них показан на схематическом чертеже рис. 3-45. Усилитель собирается на шасси-плате 1 из посеребренной или луженой латуни, меди или металлизированного изоляционного материала. К плате приклепывается или на ней отгибается уголок 2, к которому прикрепляются контурные катушки 3. На этой же стороне платы, которую будем называть верхней, помещаются все остальные части схемы, находящиеся под большим высокочастотным потенциалом относительно платы: лампы 4, обернутые в медную фольгу, припаяваемую к плате, и сопротивления, шунтирующие контурные катушки. Последние припаяваются непосредственно к выводам контурных катушек так же, как и небольшие контурные конденсаторы, включаемые в схему для повышения стабильности настройки. Часто контур 3 составляется из двух или даже трех отдельных катушек. Тогда

они крепятся непосредственно к плате 1, а уголок 2 остается для придания ей жесткости. На нижней стороне платы помещаются все детали, находя-

щиеся под малым высокочастотным потенциалом: сопротивления и конденсаторы цепи катода, развязывающие дроссели, сопротивления и конденсаторы цепей накала, анода и сеток.

Достоинством этой конструкции является то, что в ней отсутствуют соединительные проводники, за исключением проводов питания, управления и выхода, идущих к разъемам.

Элементы схемы припаиваются друг другу на опорных точках или присоединяются к шасси.

Разметка опорных точек и мест присоединения шасси путем сверления отверстий под них по специальному шаблону обуславливает строгую идентичность монтажа и повторяемость параметров усилителя в производстве.

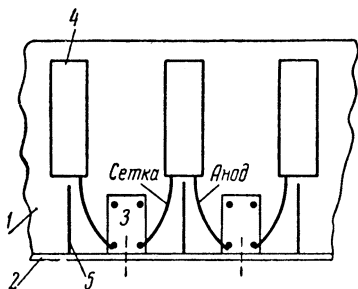


Рис. 3-45. Схематический чертеж установки основных деталей в малогабаритном резонансном усилителе.

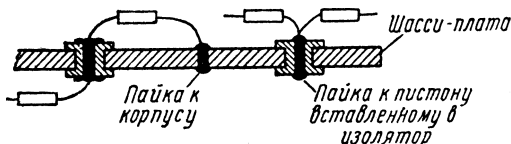


Рис. 3-46. Монтаж на шасси-плате из латуни или меди.

Если шасси-плата сделано из латуни или меди, то опорные точки удобно выполнять в виде небольших проходных изоляторов, допускающих монтаж ,по обе стороны шасси (рис. 3-46). Также применяются пластмассовые проходные изоляторы различной конфигурации, объединяющие несколько опорных точек, как показано на рис. 3-47. Высокочастотные свойства диэлектрика в опорных изоляторах или в изоляционной части платы значения не имеют, так как они связаны с точками, высокочастотный потенциал которых близок к нулю. Важны только их механические свойства и влагостойкость.

При экранировании такого усилителя нужно учесть, что надевание общего кожуха может создать паразитную связь между входом и выходом даже при хорошем контакте между кожухом и платой по всему периметру (см. § 2-4). Поэтому для обеспечения устойчивости усилителя необходимо, прежде всего, обеспечить закрывание первых и последних каскадов усилителя с верхней стороны отдельными крышками, хорошо присоединяемыми к плате. Средняя часть усилителя с верхней стороны мо-

жет быть закрыта только частично. Наконец, нижняя сторона может не закрываться вовсе, если на ней отсутствуют детали с большим высокочастотным потенциалом. Что касается общего кожуха, то его лучше рассматривать как средство защиты от механических повреждений, не полагаясь на его экранирующее действие в отношении внутренних паразитных связей. Как экран общий кожух действует только при наличии внешних наводок, при условии тщательной фильтрации всех выходящих из него проводов.

Если монтаж усилителя не очень тесен и между катушками остается расстояние больше 2—3 диаметров катушки, то перегородки между всеми или некоторыми из них могут оказаться ненужными. Если же конструкция выполняется минимальной длины, так что катушки располагаются почти вплотную, то для предохранения от паразитной связи в пределах каскада устанавливают перегородки между катушками 5 (рис. 3-45). Основным достоинством описанной конструкции усилителя являются удобство монтажа и полная доступность деталей для проверки и ремонта. Возможность тщательной проверки всех деталей и паяк, а также минимальное их количество повышают надежность конструкции в целом.

В другом варианте конструкции малогабаритного усилителя он размещается в коробке, разделенной на небольшие отсеки, вмещающие по одному каскаду. Недостатком этой конструкции является крайняя сложность монтажа и недоступность отдельных деталей и паяк при проверке и ремонте. В то же время излишнее экранирование никаких преимуществ не дает. В

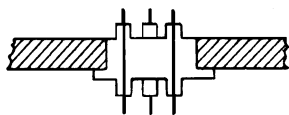


Рис. 3-47. Пластмассовый изолятор для подключения нескольких точек.

целом конструкция менее надежна, чем предыдущая.

Известны конструкции наборных усилителей, собираемых из отдельных законченных каскадов, закрепленных на металлических или пластмассовых основаниях. Такие конструкции, выполняемые исключительно для облегчения сборки и монтажа, содержат увеличенное количество деталей для

крепления и для соединения каскадов друг с другом. В этих конструкциях невозможно применить схемы с последовательной фильтрацией питания в чистом виде (рис. 3-20 и 3-27), из-за чего вырастает число фильтрующих деталей. Ремонт и проверка деталей и паяк в собранном усилителе предоставляют большие трудности. В целом эти конструкции также менее надежны, чем первая.

Усилители, собранные на платах с печатным монтажом, предназначены для массового автоматического производства, и обсуждение их

выходит за пределы темы настоящей книги.

Шасси линейки можно выполнять из меди, латуни и алюминия. Применение алюминия нежелательно ввиду трудности его пайки. К шасси приходится приклепывать лепестки для припайки проводов. В местах приклепки лепестков на алюминии появляется пленка окиси, увеличивающая переходное сопротивление контакта. Наилучшим материалом шасси линейки является медь или латунь, особенно если в качестве антикоррозийного покрытия применено серебро или олово. Медное посеребренное или луженое шасси имеет весьма низкое сопротивление поверхностного слоя и удобно при монтаже благодаря легкости пайки. Несколько большая стоимость такого шасси вполне оправдывается отсутствием лепестков и заклепок и упрощением монтажа. Преимуществом меди перед латунью является ее большая теплопроводность, что особенно важно для охлаждения малогабаритных устройств.

3-16. ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Размеры линейки промежуточной частоты можно выбирать с учетом того, что чем она уже и длиннее, тем меньше уровень обратных связей. С другой стороны, увеличение длины линейки приводит к увеличению расстояния между двумя соседними лампами и, следовательно, к удлинению цепей анода и управляющей сетки, что невыгодно. Поэтому лучше все размеры линейки выбрать минимальными, исходя только из условия размещения деталей, которые также лучше брать малогабаритными. Если при экспериментальной проверке окажется, что усилитель недостаточно устойчив из-за малой длины линейки (случай маловероятный), то устойчивость может быть повышена путем установки экранирующей перегородки в середине линейки. Перегородка должна иметь хороший контакт со всеми стенками шасси и кожуха линейки. Перегородку не следует использовать для соединения с шасси токонесущих деталей. В работах [10, 18] имеется попытка теоретически обосновать размеры широкополосного усилителя промежуточной частоты путем введения понятия «волноводной обратной связи», сущность которого заключается в следующем.

Шасси линейки промежуточной частоты представляет собой металлическую прямоугольную коробку. В пределах этой коробки имеются детали, подключенные к различным точкам схемы усилителя и способные излучать и принимать электромагнитную энергию. Такая коробка усилителя рассматривается как прямоугольный волновод, а детали его схемы —

как возбудители и приемники электромагнитной энергии, распространяющейся в пределах этого волновода.

Как уже указывалось в § 1-5, в волноводе могут распространяться волны различных типов. Из них волна H_{01} имеет наиболее низкую критическую частоту и поэтому является наиболее опасной с точки зрения рассматриваемых здесь паразитных связей в усилителе. Длина критической волны для типа H_{01} равна $\lambda_{кр} = 2b$, где b — размер большей стороны поперечного сечения прямоугольного волновода. Волны короче критической свободно распространяются в волноводе с весьма малым затуханием (менее 1% на метр). Волны длиннее критической в волноводе распространяться не могут, и в нем остается только электромагнитное поле, существующее в непосредственной близости от источника и быстро затухающее по мере удаления от него. Если рабочая длина волны λ значительно больше критической $\lambda_{кр}$, то затухание на единицу длины приблизительно определяется из соотношения

$$\beta = \frac{27.3}{b} db$$

откуда следует, что на участке волновода, длина которого равна ширине, поле затухает на 27 дБ.

Ширина линейки широкополосного усилителя промежуточной частоты, если он даже собран на металлических лампах типа 6Ж4, не превышает 100 мм. Критическая длина волны для волновода, образованного коробкой усилителя, не превышает $\lambda_{кр} = 2b = 200$ мм. Поэтому на всех промежуточных частотах, вплоть до частоты $f_0 = 200$ МГц, сохраняется условие $\lambda > \lambda_{кр}$ и можно считать, что в пустой коробке усилителя поле затухает на 27 дБ на участке, длина которого равна ширине коробки b .

На основании этих совершенно правильных соображений в указанных работах делается неверный вывод, что для устранения нежелательных обратных связей в усилителе допустимо иметь усиление не более 27 дБ или в 22,4 раза по напряжению на участке, длина которого равна b . Если полное усиление, даваемое усилителем, равно K_0 , то длина коробки l должна быть не менее чем в m раз больше ширины b , где m можно найти из соотношения $20 \lg K_0 = 27m$. Отсюда следует, что коробка должна иметь длину

$$l = mb = b \frac{\lg K_0}{1.35}$$

С выводом, приведенным в последнем абзаце, можно было бы согласиться при условии, что возбуждающие и принимающие элементы внутри ко-

робки-волновода специально настроены так, что в коробку излучается достаточно большая часть выходной мощности усилителя и что входные цепи усилителя способны воспринимать из коробки большую часть поступающей к ним мощности.

Но известно, что для получения такого эффекта в волноводе необходим тщательный подбор размеров и места установки в нем излучающих и принимающих элементов. В результате такого подбора всегда получаются размеры, сравнимые с рабочей длиной волны.

В рассматриваемых же здесь случаях излучателем и приемником условно являются катушки и соединительные провода последнего и первого контуров усилителя, размеры которых значительно меньше рабочей длины волны. Места установки этих элементов в коробке выбираются совсем не из условий наилучшего излучения, и расстояния их от стенок коробки всегда также значительно меньше рабочей длины волны.

Известно также, что при работе на волне, длиннее критической, задача передачи энергии в волновод является весьма трудной даже при специальных согласующих устройствах. Так, например, в измерительной аппаратуре в качестве предельного аттенюатора используется участок волновода на волнах, длиннее критической. При разработке конструкции такого аттенюатора стремятся к получению малой величины его начального затухания. Несмотря на все принимаемые меры, не удается сконструировать аттенюатор без начального затухания порядка 25—30 дБ.

Введение в волновод любых посторонних предметов резко увеличивает его затухание. Коробка усилителя промежуточной частоты на 30—50% своего объема заполнена деталями, причем с уменьшением габаритов усилителя коэффициент заполнения его объема увеличивается. Очевидно, что детали вносят значительное дополнительное затухание сверх величины 27 дБ, характеризующей пустую коробку.

Все эти соображения показывают, что для приравнивания коэффициента усиления затуханию цепи обратной связи нужно к этому затуханию сверх величины 27 дБ добавить еще значительно больше 30 дБ. Это добавление составит из начального затухания совершенно не согласованных излучателя и приемника и из большого затухания, вносимого промежуточными деталями усилителя. Указанные добавления сводят на нет рассматриваемый расчет предельной длины усилителя.

Вообще терминам «волноводная обратная связь» лучше не пользоваться, так как волноводом называется ограниченное металлам пространство, способное проводить электромагнитные волны с малым затуханием, т. е. работающее на волне, короче критической, а в данном случае никаких

волн в цепи обратной связи нет, и имеются только непосредственные индуктивная и емкостная связи.

Использование при разработке предельных аттенюаторов формул, выведенных в теории волноводов, не означает, что предельный аттенюатор является волноводом. Эти формулы применяются только потому, что они позволяют просто рассчитать имеющиеся в аттенюаторе индуктивную и ёмкостную связи.

Необходимо еще отметить, что вообще расчет предельной длины усилителя, даже если бы он был правильным, вреден тем, что ограничивает сокращение габаритов усилителя и препятствует развитию техники конструирования малогабаритных радиоустройств, в то время как рассматриваемый вид нежелательной обратной связи весьма просто устраняется путем установки в усилителе промежуточных перегородок.

3-17. ПРАВИЛА МОНТАЖА УСИЛИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Чем выше частоты, на которых работает усилитель, тем большая часть токов, протекающих в цепях усилителя, ответвляется в шасси. Одновременно с повышением частоты увеличивается индуктивное сопротивление соединительных проводов. Оба эти фактора являются причиной того, что чем выше частота, тем сильнее отражаются на работе усилителя паразитные связи, вызванные неудачным монтажом. Поэтому в первую очередь здесь рассматривается монтаж широкополосного резонансного усилителя, работающего на высокой частоте в диапазоне метровых волн.

Для выяснения влияния монтажа широкополосного усилителя на его работу вспомним, что емкость контура составляется из входной и выходной емкостей ламп и емкости монтажа (рис. 3-48).

Входная емкость лампы состоит из емкости вывода управляющей сетки относительно корпуса, емкости управляющей сетки относительно катода и емкости управляющей сетки относительно экранирующей сетки *. Токи, протекающие через последние две емкости, достигают шасси через блокировочные конденсаторы катода и экранирующей сетки. Выходная емкость лампы состоит из емкости вывода анода относительно корпуса и емкости анода относительно антидинаatronной и экранирующей сеток. Токи, протекающие через последнюю емкость, достигают шасси также через блокировочный конденсатор экранирующей сетки. Емкость монтажа состоит из емкостей лепестков ламповых панелей или выводов,

** Влияние обратной связи через емкость между управляющей сеткой и анодом здесь не учитывается вследствие ее малой величины.*

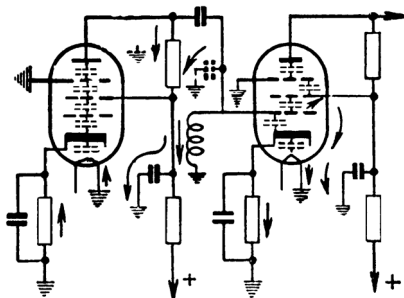


Рис. 3-48. Направление токов высокой частоты в усилительном каскаде.

распределенных емкостей соединительных проводов, распределенных емкостей контурных катушек и емкости разделительного конденсатора относительно корпуса.

Токи, протекающие по шасси, входят в него через все эти емкости, распределенные на участках от анода одной лампы до сетки следующей лампы, включая междуэлектродные емкости лампы. Распределение токов по шасси определяется в основном размещением деталей и проводов и только в незначительной степени зависит от присоединения этих деталей и проводов к шасси.

При монтаже усилителя нужно стремиться к уменьшению емкости монтажа, индуктивности соединительных проводов и взаимосвязи между деталями. Эти соображения приводят к следующим правилам монтажа, строгое выполнение которых особенно существенно для широкополосных усилителей.

а) Все соединительные провода должны иметь минимальную длину.

б) Провода и детали, соединяемые с управляющими сетками и анодами ламп, должны располагаться на максимальных расстояниях от шасси, стенок и кожухов.

в) Провода, входящие в цепи управляющих сеток и анодов, должны иметь минимальный диаметр, допустимый по соображениям механической прочности. В этих цепях лучше применять жесткие, голые провода, не позволяющие выполнять произвольную укладку монтажа.

г) Для проводов, служащих для подключения контурных катушек к аноду и сетке лампы, не следует применять дополнительных подпорок, изоляторов или других крепящих конструкций.

д) Присоединение деталей к корпусу должно производиться проводами минимальной длины в точках, ближайших к присоединяемой детали, за исключением контурного конденсатора (если он имеется), который следует присоединять непосредственно к катушке.

е) Каждая деталь должна соединяться с корпусом отдельным лепестком. Если материал шасси допускает лайку, то лучше лепестками не пользоваться, а производить припайку к наружной стороне шасси, как показано на рис. 3-49. Такой способ не только упрощает сборку усилителя, но и позволяет укоротить длину соединительных проводов. Совершенно недопустимо использование общих проводов и шин для присоединения нескольких деталей к корпусу.

ж) Провода питания и управления, проходящие вдоль всего усилителя, должны быть тщательно экранированы от основных цепей усилителя или разделены на участки фильтрующими ячейками.

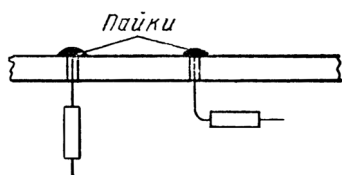


Рис. 3-49. Соединение деталей с корпусом путем припайки к наружной стороне шасси.

Рекомендации, изложенные в п. д) и е), противоречат рекомендациям, даваемым в литературе. Некоторые авторы [10, 18] предлагают такое соединение производить в одной или двух точках, объединяя в этих точках цепи так, чтобы получить минимальные токи в поверхностном слое шасси. При этом не учитывается, что, как показано выше, в широкополосном усилителе токи в шасси зависят прежде всего от распределенных емкостей, а не от точек присоединения

проводов к корпусу, поэтому практически невозможно представить действительную картину прохождения токов в шасси. Небольшие преимущества, которые можно получить при правильном выборе и объединении точек соединения с корпусом, теряются при ошибочном соединении, особенно если для такого соединения приходится удлинять монтаж. В то же время, рекомендуемое здесь присоединение к корпусу непосредственно у деталей, является наиболее безошибочным, так как оно объединяет все токи в шасси, вызываемые данной деталью.

При монтаже узкополосных усилителей, работающих на значительно более низких частотах и имеющих в контуре большую сосредоточенную емкость, усилителей низкой частоты, видеоусилителей и других радиотехнических схем приведенные правила монтажа желательно также соблюдать, хотя здесь они необязательны. Объем допустимых отклонений определяется исключительно чутьем конструктора и при отсутствии такового может привести к крупным ошибкам в монтаже, опасным и для низкочастотных схем.