

М. Г. МАРК

Усилители низкой частоты

ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ

1936

СВЯЗЬТЕХИЗДАТ

М. Г. МАРК

УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ТЕХНИКУМОВ

Издание второе

МОСКВА

1936

СВЯЗЬТЕХИЗДАТ

Редактор СТИ *В. И. Шамиур*

Тех. ред. *К. М. Кованов*

Сдано в набор 29/X 1935 г.

Подписано к печати 31/V 1936 г.

Уполном. Главлита № В—34074.

Тираж 10 000 экз.

Формат бумаги $62 \times 94\frac{1}{16}$. Печ. лист. $10\frac{1}{4}$. Знак. в 1 печ. л. 48 000. Заказ № 1641.

Типография „Шестой Октябрь“ треста „Мособлполиграф“, г. Загорск, Моск. обл.

ГЛАВА I.

СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЕЙ И ВОПРОСЫ ПИТАНИЯ УСИЛИТЕЛЯ.

1. Усилитель напряжения и усилитель мощности. Коэффициент усиления.

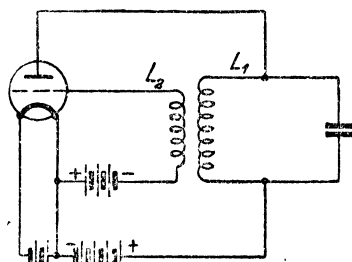
Нет почти ни одного радиотехнического устройства, где бы в том или ином виде не применялся усилитель низкой частоты. Каждый приемник телеграфного, телефонного или радиовещательного типа содержит обязательно усилитель низкой частоты, который усиливает электрические колебания звуковой частоты, получаемые после детектирования. В радиотелефонных устройствах переменное напряжение, развиваемое в микрофоне, должно подвергнуться сперва значительному усилению (в несколько тысяч раз) перед тем, как оно может быть подано на передатчик. В системе передачи изображений и дальновидения усилитель низкой частоты является одним из важнейших элементов; его назначение—усиливать в сотни тысяч раз переменные токи, протекающие в цепи фотоэлемента и равные тысячным долям микроампера. В технике звукового кино усилитель низкой частоты играет важнейшую роль; при записи звука, при его воспроизведении необходим усилитель. Дальняя телефония по проводам основана на использовании усилителей низкой частоты, которые включаются в линию на определенных расстояниях. Наконец, в системе проволочной радиофикации мощный усилитель низкой частоты является основным прибором.

Развитие усилительной техники связано непосредственно с развитием техники электронных ламп. Только применение электронной лампы дало возможность разрешить основные проблемы усилительной техники. Электронная лампа применяется не только в усилителе низкой частоты—она, как известно, имеет более широкое применение.

Электронная лампа является прибором, при помощи которого мы энергию постоянного тока (анодная батарея, выпрямитель) преобразуем в энергию переменного тока любой частоты. При этом возможны два случая.

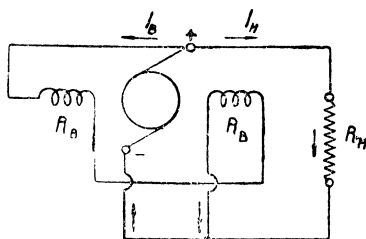
Первый случай. К лампе подводится только постоянный ток от анодной батареи или выпрямителя, лампа генерирует в цепи

анода переменный ток желательной для нас частоты. Такое устройство мы называем ламповым генератором с самовозбуждением. Одна из возможных схем такого генератора дана на рис. 1, 1. Цепь анода связывается при помощи катушек самоиндукции L_1 и L_2 с цепью сетки; часть энергии переменного тока перекачивается из анодной цепи в цепь сетки; благодаря этому под-



ГЕНЕРАТОР С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Рис. 1,1.



ДИНАМОМАШИНА

Рис. 1,2.

держиваются колебания в анодной цепи. Мы в данном случае имеем некоторое сходство с динамомашинной постоянного тока. В динамомашине (рис. 1, 2) часть энергии, получаемой в цепи якоря и отдаваемой во внешнюю цепь (R_N), отвлекается в цепь обмоток возбуждения (R_B), т. е. обмоток электромагнитов, создающих магнитный поток, в поле которого вращается якорь. В ламповом генераторе внешней цепью является цепь анода, цепью возбуждения является цепь сетки. Разница между динамомашинной и ламповым генератором заключается в том, что динамомашина преобразует механическую энергию в электрическую энергию постоянного тока, а ламповый генератор преобразует электрическую энергию постоянного тока в электрическую же энергию переменного тока.

Второй случай. К лампе подводится так же, как и в первом случае, энергия постоянного тока от анодной батареи, но, кроме того, к цепи сетки лампы подводится энергия переменного тока. В цепи анода возникает переменный ток, значительно большей мощности, чем та мощность, которая поглощается в цепи сетки. Такое устройство мы называем усилителем.

Если к цепи сетки усилителя подводится переменное напряжение с частотой выше 10 000—15 000 Hz, то мы этот усилитель называем усилителем высокой частоты. Усилитель, к цепи сетки которого подводится переменное напряжение звуковой частоты, т. е. частоты от 30 до 10 000—15 000 Hz, называется усилителем низкой частоты.

Обычно усилитель низкой частоты состоит из ряда отдельных ступеней, соединенных каскадно. Поясним это на примере. Поставлена задача—усилить переменное напряжение, даваемое адаптером и равное 0,1 V, до такой степени, чтобы питать электро-

магнитный громкоговоритель. Для того чтобы питать такой громкоговоритель, требуется мощность в 0,05—0,1 W. При помощи одной лампы такого усиления достигнуть нельзя. Поэтому поступаем следующим образом: повышаем напряжение при помощи первой лампы, включая ее хотя бы так, как указано на рис. 1,3.

U_{mg} —это напряжение, развиваемое адаптером ($U_{mg} = 0,1$ V), оно подается на сетку лампы.

R_a —это нагрузка в аноде лампы; напряжение на клеммах R_a , равное U_{ma} , значительно больше, чем напряжение U_{mg} , допустим, что оно (т. е. U_{ma}) равно в нашем случае 1,7 V; это значит, что мы повысили напряжение при по-

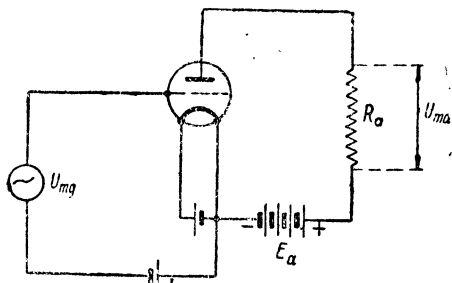


Рис. 1,3.

мощи первой лампы в $\frac{1,7}{0,1} = 17$ раз. Величина, равная отношению напряжения на концах анодной нагрузки к напряжению, подаваемому на сетку лампы, называется коэффициентом усиления и обозначается буквой K

$$K = \frac{U_{ma}}{U_{mg}}.$$

Величина K , равная в нашем случае 17, показывает, во сколько раз мы при помощи усилителя повышаем напряжение источника.

Напряжение $U_{ma} = 1,7$ V, получаемое в аноде первой лампы, мы подаем на сетку второй лампы, которая в свою очередь повышает напряжение, скажем, в 12 раз. Тогда на клеммах анодной нагрузки второй лампы мы будем иметь напряжение, равное $1,7 \cdot 12 \approx 20$ V. Такое соединение ламп называется каскадным соединением. Общий коэффициент усиления двух каскадов равен произведению коэффициентов усиления каждого каскада

$$K = K_1 \cdot K_2.$$

В нашем случае

$$K = 17 \cdot 12 \approx 200.$$

Для того чтобы питать громкоговоритель, мы подаем напряжение в 20 V на сетку третьей мощной лампы, в анодную цепь которой включен репродуктор (непосредственно или через трансформатор). Итак мы получили трехкаскадный усилитель, схематически изображенный на рис. 1,4.

В нашем усилителе последний каскад имеет несколько иное назначение, чем два первых каскада. Первые каскады имеют

назначение поднять напряжение, развиваемое источником энергии (адаптером). Последний каскад почти не увеличивает напряже-

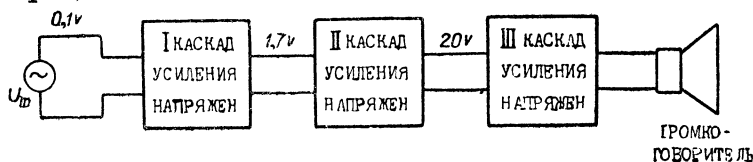


Рис. 1,4.

ния, ибо для питания репродуктора вполне достаточно напряжение в 20 V; назначение последнего каскада отдать репродуктору мощность в 0,1 W.

Мощность в вольт-амперах, поглощаемая репродуктором, равна $\frac{U_p^2}{2R_p}$. Здесь U_p — напряжение на клеммах репродуктора, R_p — сопротивление репродуктора переменному току.

Усилители, имеющие назначение поднять напряжение источника энергии, называются усилителями напряжения. Усилителем мощности называется усилитель, назначение которого отдать определенную мощность во внешнюю цепь. В большинстве усилительных устройств последний каскад является усилителем мощности, а предварительные каскады — усилителями напряжения. Один каскад усилителя напряжения дает коэффициент усиления порядка 15—20. Величина напряжения, подаваемого к усилителю, определяет число каскадов усилителя напряжения. Например, в радиовещательном приемнике после детектора мы имеем обычно напряжение порядка 0,5—1 V, поэтому достаточно одного каскада усилителя напряжения низкой частоты; следующий каскад является уже усилителем мощности. В микрофонных усилителях требуется значительно большее число каскадов усилителя напряжения. Радиовещательный угольный микрофон дает напряжение порядка 3—5 mV, поэтому надо минимум 3 каскада усиления напряжения. В усилителях для дальновидения требуется еще большее число каскадов, ибо напряжение, развиваемое фотоэлементом, очень мало.

Суммируем сказанное:

1. Усилителем называется такое устройство, назначение которого повысить мощность источника электрической энергии. Если основная задача усилителя заключается в повышении напряжения, то он называется усилителем напряжения. Если основная задача усилителя — отдача определенной мощности, то он называется усилителем мощности.

2. Обычно усилитель состоит из ряда ступеней усиления, включенных каскадно. Первые каскады обычно являются усилителями напряжения; последний каскад является усилителем мощности.

2. Схема междупламповых связей; схемы входа и выхода.

Усилители разделяют на типы в зависимости от характера нагрузки в анодной цепи и связи со следующим каскадом.

Различают три основных типа:

1. Усилитель на сопротивлениях (рис. 1,3).
2. Усилитель на дросселях (рис. 1,5).

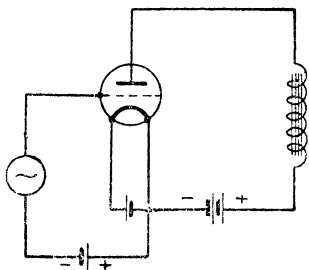


Рис. 1,5.

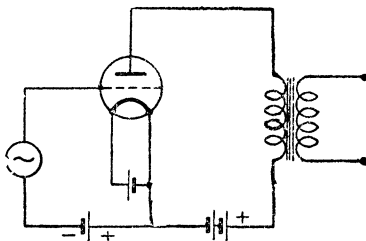


Рис. 1,6.

3. Усилитель на трансформаторах (рис. 1,6).

Встречаются иногда комбинации указанных типов; так например, на рис. 1,7 дана схема усилителя с сопротивлением и с трансформатором в анодной цепи. Такая схема применяется довольно часто и, как мы увидим ниже, имеет ряд крупных преимуществ. Встречаются также комбинации дросселя с трансформатором, сопротивления с дросселем и др.

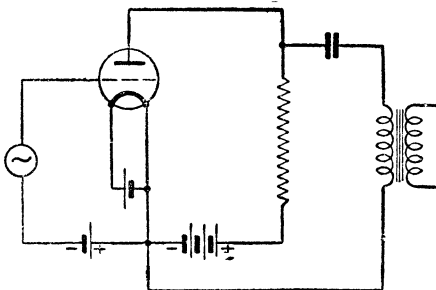


Рис. 1,7.

При соединении нескольких усилительных блоков каскадно встает прежде всего вопрос об источниках питания. Каждый каскад усилителя требует питания накала, питания анода и батареи для подачи постоянного напряжения на сетку (смещение на сетку). Было бы весьма неэкономично питать каждый каскад от отдельных батарей, поэтому выбирают такие схемы связи между каскадами, которые позволяют питать все каскады или ряд каскадов от общей батареи накала, общей батареи анода и батареи сеточного смещения. Далеко не все схемы включения пригодны для этого. Так например, на рис. 1,8 анодная батарея B_a включена между анодом лампы и сопротивлением нагрузки R_n ; для одного каскада усиления такая схема вполне приемлема. Однако при двух каскадах она негодна, ибо, как видно из рис. 1,8, обе лампы включены не каскадно, а впараллель; оба

аноды соединены вместе в точке a ; сопротивления R_{a1} и R_{a2} включены параллельно. Ясно, что при такой схеме нет возможности подать напряжение, развиваемое в анодной цепи первой лампы, на сетку второй лампы, ибо анодные цепи у обеих ламп общие. Если бы мы попытались это все же сделать так, как указано на рис. 1,8 пунктирной линией, то мы попросту соединили бы накоротко через батарею B_a анод и сетку второй лампы.

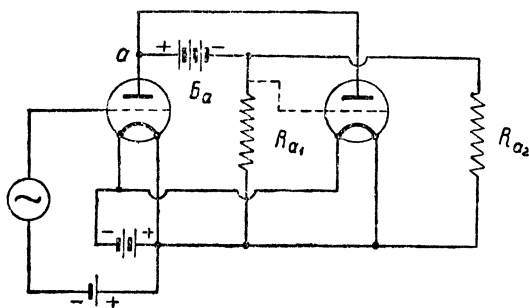


Рис. 1,8.

При многокаскадных схемах надо анодную батарею обязательно включать между нитью и анодной нагрузкой, как указано на рис. 1,9. В этом случае анодные цепи обеих ламп связаны только через анодную батарею B_a . Так как анодная батарея имеет очень малое сопротивление переменному току — во всяком случае значительно меньшее, чем сопротивления R_{a1} и R_{a2} , — то связь между анодными цепями обеих ламп мала.

Две цепи тогда связаны между собой, если у них есть некоторое общее для обеих цепей сопротивление. Например, в схеме, изображенной на рис. 1,10а, связующим звеном является сопротивление R .

Ток, идущий в I цепи, в точке n разветвляется и идет частью через сопротивление R , а частью через II цепь; таким образом ток, текущий в первой цепи, будет частично заходить во вторую цепь и, наоборот, ток второй цепи будет заходить в первую цепь. Если сопротивление, связующее обе цепи, равно нулю, как это изображено на рис. 1,10б, то никакой связи между цепями не будет, ибо ток, идущий в первой цепи, в точке n не разветвится, а согласно законам Кирхгофа целиком пройдет по проводу nn' ; таким образом во II цепи не будет тока I цепи; если бы мы от точек nn' отключили II цепь, то ничего в I цепи не изменилось бы, а это и значит, что никакой связи между цепями нет.

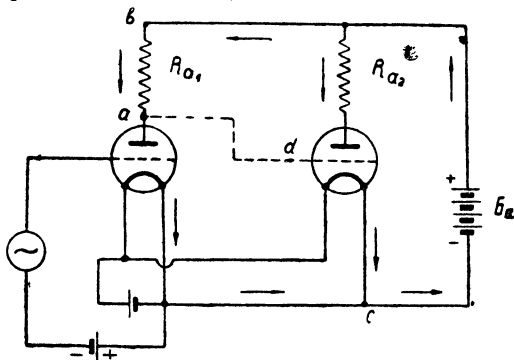


Рис. 1,9.

В многокаскадном усилителе мы имеем аналогичную картину.

На рис. I,10а изображена в упрощенном виде схема двухкаскадного усилителя (рис. I,9). Мы видим, что связующим звеном цепи первой лампы и второй лампы является анодная батарея. Благодаря этой связи усиленные переменные токи во второй цепи могут заходить в цепь первой лампы и этим создавать неустойчивость в работе усилителя—связь будет тем меньше, чем меньше сопротивление батареи переменному току.

Ниже будет показано, как при помощи специальных развязывающих фильтров эта связь сводится до минимальных размеров.

Итак мы выяснили, как питать аноды каскадно соединенных ламп от общей батареи. Теперь встает вопрос о подаче напряжения, развиваемого в анодном сопротивлении первого каскада, на сетку второго каскада. Надо, очевидно, переменное напряжение между точками a , b (рис. I,9) подвести к точкам c , d (сетка-

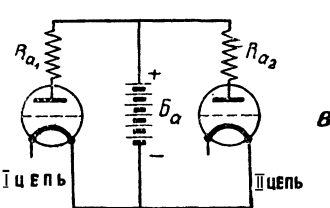
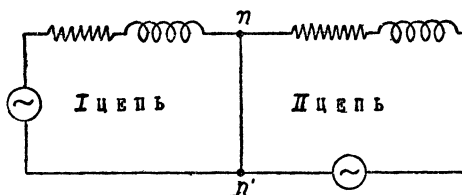
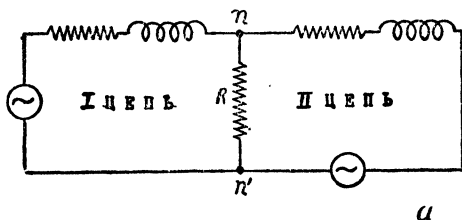


Рис. I,10.

нить второй лампы): точка c соединена с точкой b через батарею B_a ; выше мы указали, что сопротивление батареи переменному току очень мало, поэтому мы можем считать, что точка b и точка c соединены между собой накоротко. Остается соединить точку d с точкой a , как это указано пунктиром на рис. I,9. Однако такое соединение ставит в совершенно недопустимый режим лампу второго каскада; на сетку второй лампы подается постоянное напряжение, равное анодному напряжению первой лампы.

В дальнейшем мы увидим, что усилитель работает без искажений, когда постоянное напряжение на сетке по отношению к нити отрицательно, в данном же случае оно велико и положительно. Поэтому надо каким-то образом отрезать путь постоянному току от анода первой лампы к сетке второй лампы, дав в то же время возможность переменному току проходить этот путь беспрепятственно. Это достигается включением большой емкости (C_g) между точками a и d , как это изображено на рис. I,11. Емкость C_g мы будем называть переходной емкостью,

Для того чтобы подать на сетку второй лампы отрицательное смещение, между сеткой и нитью включается специальная батарея B_g последовательно с большим сопротивлением R_g ; это сопротивление будем называть сопротивлением утечки.

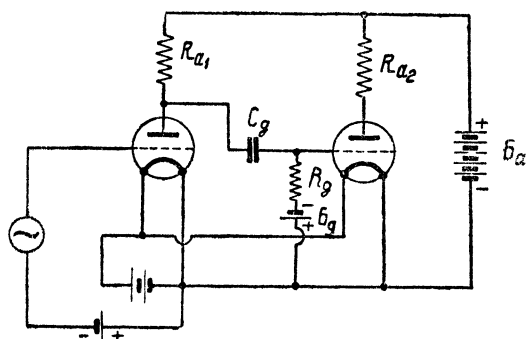


Рис. I, 11.

сопротивлениях, имеющий общую батарею накала, батарею анода и батарею сетки.

Возникает еще вопрос, к какому полюсу батареи накала целесообразнее приключать минус батареи анодного напряжения и плюс батареи сетки. При наличии специальной батареи сетки можно производить соединения так, как указано на рис. I, 13а, или как указано на рис. I, 13б. Если нет батареи сетки, то выгод-

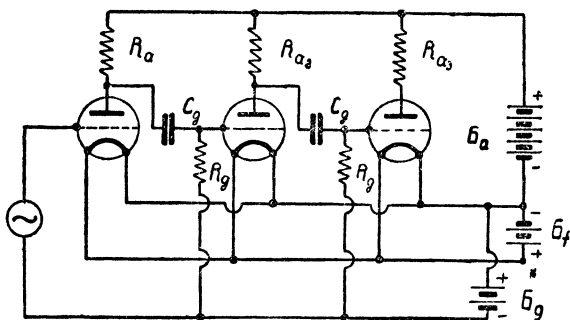


Рис. I, 12.

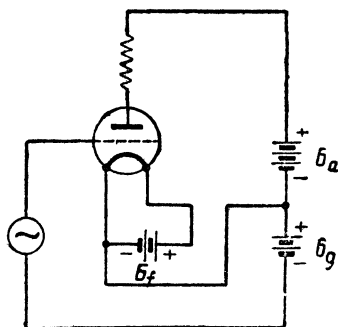
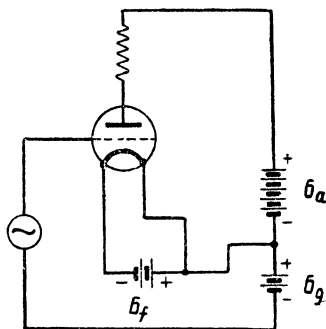


Рис. I, 13.

нее сетку присоединять к минусу накала, ибо при этом нить будет находиться под напряжением большим, чем напряжение сетки,

Во всех разобранных нами схемах мы предполагали, что анодной нагрузкой является омическое сопротивление. Все сказанное целиком относится также к усилителю на дросселях; схема многокаскадного усилителя на дросселях отличается от схемы усилителя на сопротивлениях лишь тем, что в анодной цепи поставлены дроссельные катушки; в остальном отличий нет.

Немного иначе обстоит дело при трансформаторной связи. Здесь нет необходимости ставить переходные конденсаторы. Это видно непосредственно из рис. 1,14, где дана схема двухкаскадного усилителя на трансформаторах. Первичная обмотка трансформатора включена в анод первой лампы, концы вторичной обмотки подаются на сетку-нить следующей лампы; таким образом цепь

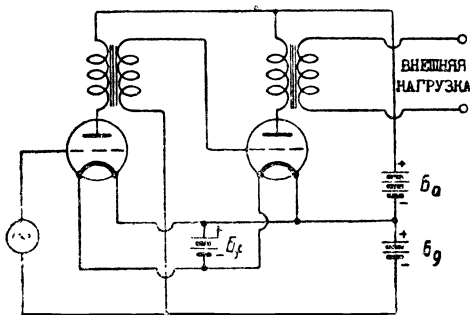


Рис. 1,14.

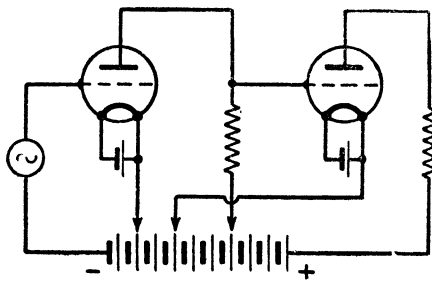


Рис 1,15.

сетки второй лампы отрезана для постоянного тока от анода первой лампы.

Иногда перед усилителем ставится задача усиливать напряжения весьма малой частоты, скажем, два-три колебания в секунду. Для такой цели усилитель на дросселях или на трансформаторах непригоден, ибо дроссель и трансформатор представляют для таких токов ничтожно малое сопротивление, поэтому и напряжение на их клеммах будет ничтожно мало. В таком случае можно применить только усилитель на сопротивлениях. Однако переходная емкость между отдельными каскадами будет портить дело, ибо для токов малой частоты эта емкость имеет очень большое сопротивление. Поэтому в усилителях, предназначенных для целей усиления напряжений весьма малой частоты, применяется иногда усилитель на сопротивлениях без переходных емкостей; в этом случае одной батареей накала и анодного питания обойтись нельзя. На рис. 1,15 дана такая схема; из рисунка видно, что каждый каскад имеет свое собственное питание. Такой усилитель называется усилителем постоянного тока; называется он так потому, что может усиливать колебания самой низкой частоты и импульсы (толчки) постоянного тока.

В отличие от него усилитель с переходной емкостью, а также усилитель с дроссельной или трансформаторной связью называется усилителем переменного тока.

На входе усилителя переменного тока чаще всего ставят трансформатор. Так почти всегда поступают в микрофонных усилителях; ибо при помощи входного повышающего трансформатора можно поднять в несколько раз напряжение, подаваемое на сетку первой лампы.

В усилителях, работающих от фотоэлемента, применяют на входе не трансформатор, а сопротивление в несколько десятков тысяч ом; трансформаторный вход в данном случае непригоден благодаря большому внутреннему сопротивлению фотоэлемента (несколько сот тысяч ом); подробно это объяснено в главе VI.

На выходе усилителя также чаще всего ставят трансформатор; такой выход дает, как мы увидим в главе VI, ряд преимуществ, он позволяет лампу мощного каскада поставить в наивыгоднейший режим и получить от нее наибольшую полезную мощность. Иногда применяют дроссельный выход. В менее ответственных установках, например в дешевых радиовещательных приемниках массового типа, применяют так называемый открытый выход, т. е. выводят клемму анода лампы и плюса анодной батареи; к этим клеммам присоединяют внешнюю нагрузку (репродуктор). Неудобства открытого выхода очевидны: выводится наружу высокое напряжение, что крайне неприятно для потребителя; далее через репродуктор проходит постоянная слагающая анодного тока лампы, что ухудшает качество работы репродуктора. Если усилитель питает трансляционную сеть или динамический громкоговоритель, то обязателен трансформаторный выход.

Суммируем все сказанное в этом параграфе:

1. При соединении отдельных ступеней усиления каскадно необходимо батарею анода включать между нитью и анодной нагрузкой, в этом случае возможно общее питание всех каскадов.

2. В усилителе на сопротивлениях и в усилителе на дросселях между анодом предыдущего каскада и сеткой последующего каскада надо ставить переходную емкость, в противном случае постоянное напряжение анода будет попадать на сетку. В усилителе на трансформаторе переходная емкость не нужна.

3. Усилитель на сопротивлениях, не имеющий переходных емкостей, называется усилителем постоянного тока; он служит для усиления напряжений весьма малой частоты.

Недостатком усилителя постоянного тока является необходимость большого количества батарей для его питания.

4. На входе усилителя применяют трансформатор или сопротивление. На выходе усилителя применяют в ответственных установках трансформатор. В более дешевых устройствах применяют открытый выход, т. е. нагрузку включают непосредственно в анод лампы.

3. Питание цепи накала.

В многокаскадном усилителе можно, как мы видели, питать нити ламп от одной батареи; при этом возможны два способа питания нитей: параллельное и последовательное. При последовательном питании сила тока накала всех ламп должна быть одинакова. Весь расчет нити должен быть произведен на определенный ток, а не напряжение. Большинство наших ламп рассчитано на напряжение накала, а не на ток: так например, лампа УБ-107 рассчитана на напряжение накала в 4 В; при этом напряжении завод гарантирует определенный срок жизни и параметры лампы. Ток накала у различных экземпляров лампы УБ-107 различен, он колеблется в пределах от 65 до 85 мА. Ясно, что такая лампа не приспособлена для последовательного питания нитей. Исключением являются только лампы ТО-141, ТО-142, ТО-143; они имеют нить, рассчитанную по току накала (ток 1 А); поэтому только эти лампы могут применяться в схеме с последовательным питанием нитей.

При последовательном питании нитей очень удобно поддерживать силу тока постоянного накала при помощи так называемого баретера. Баретер представляет собой небольшое сопротивление, сделанное из железной проволоки и помещенное в баллон, наполненный водородом. Баретер обладает весьма ценным

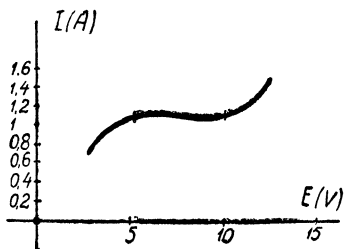


Рис. I,16.

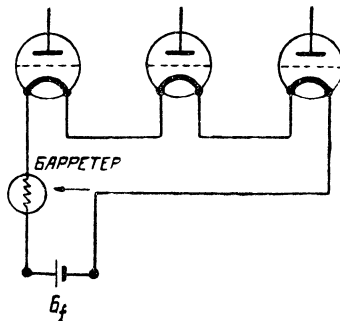


Рис. I,17.

свойством: можно в значительных пределах менять напряжение на клеммах баретера, однако, сила тока, проходящая через баретер, изменяться не будет, иными словами, сопротивление баретера не есть величина постоянная, а меняется в зависимости подводимого напряжения. На рис. I,16 дана характеристика баретера, из рисунка видно, что в пределах от 4 до 9 В сила тока в баретере не меняется. Схема последовательного включения нитей накала с баретером дана на рис. I,17. Баретер заменяет собою реостат накала в цепи накала, но он поглощает довольно много энергии. Из характеристики баретера на рис. I,16 видно, что на баретере должно падать напряжение в 7—8 В, тогда он будет поддерживать силу

тока накала постоянной при „посадке“ батареи накала. Следовательно, мощность, поглощаемая баретером, равна $7 \times 1,1 = 8 \text{ W}$.

Баретеры незаменимы в таких установках, где нет постоянного обслуживающего персонала, или там, где в одном месте сосредоточено большое количество усилителей.

Кроме ламп ТО-141, ТО-142, ТО-143 все наши лампы можно применять лишь в схеме с параллельным включением нитей. Для того чтобы можно было питать от одной батареи раз-

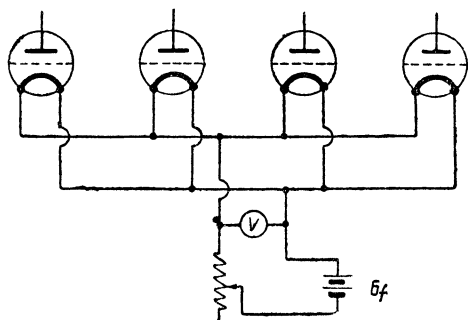


Рис. 1,18.

личные типы малых и средних усилительных ламп, все они имеют стандартное напряжение накала в 4 или 2 вольта.

Для правильной эксплуатации ламп необходимо поддерживать напряжение накала на определенном уровне; для этого необходим реостат накала и вольтметр в цепи накала. Схема параллельного питания нитей дана на рис. 1,18. Тщательное наблюдение за режимом накала ламп имеет решающее значение в эксплуатации. Малейший перекал ведет к резкому сокращению срока жизни лампы, перекал на 5—10% может сократить срок жизни в 2—3 и больше раз. В лампах с вольфрамовой нитью [М-39, (б. Г-5), М-250, М-800

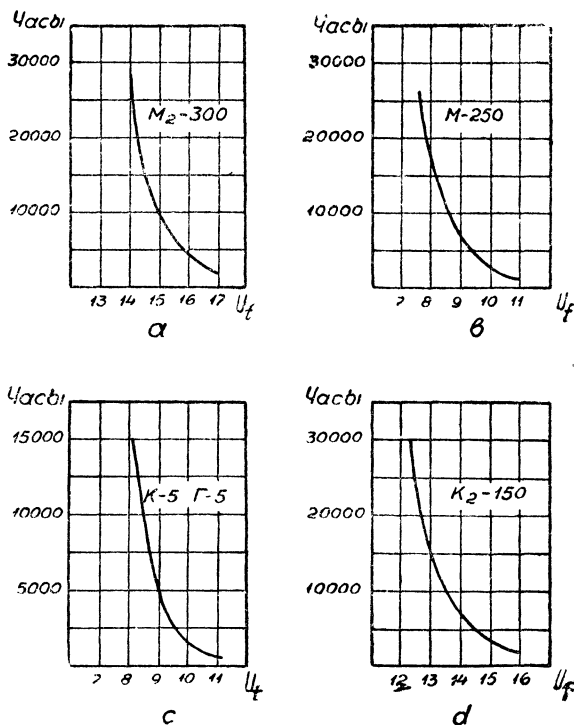


Рис. 1,19.

(б. М₂-300) и др.] при перекале лампа быстро выходит из строя из-за перегорания нити. На рис. 1,19 даны четыре кривые, иллюстрирующие зависимость срока жизни ламп от напряжения накала; из

этих кривых видно, какую экономию на эксплуатационных расходах можно получить, если правильно поддерживать напряжение накала.

Лампы с оксидной или бариевой нитью (к первым относятся лампы УО-104, ко вторым—УБ-107, УБ-110 и др.) при длительном перекале быстро теряют эмиссию и поэтому выходят из строя; таким образом и здесь перекал весьма вреден.

Иногда недокал может так же, как и перекал, привести к преждевременной потере эмиссии.

Кроме того при недокале лампа имеет худшие параметры, уменьшается крутизна лампы, возрастает внутреннее сопротивление, резко снижается ток насыщения. На рис. I,20 даны две характеристики лампы—первая соответствует нормальному напряжению накала, вторая напряжению накала, меньшему нормального. Резкое ухудшение качества лампы наступает обычно при напряжении накала ниже некоторой предельной величины. Так например, для ламп типа УБ-107, УБ-110, УО-104 можно напряжение накала снижать до 3,6—3,5 В, но не ниже, ибо при дальнейшем снижении резко ухудшаются параметры лампы.

Итак еще раз подчеркиваем, что для правильной культурной эксплуатации усилителя необходимо в первую голову следить за режимом накала ламп и поддерживать его на определенном уровне.

Перейдем к вопросу о питании нитей накала переменным током. Если мы в многокаскадном усилителе, работающем на лампах УБ-107, УБ-110 или др. им подобных, будем питать нити

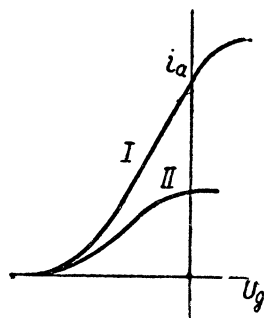


Рис. I,20.

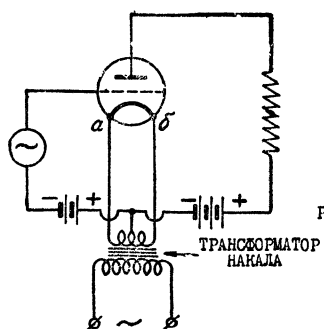


Рис. I,21.

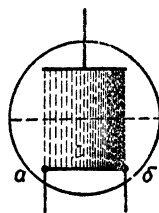


Рис. I,22.

ламп переменным током, то на выходе усилителя—в репродукторе или телефоне—появится сильный фон. Причины фона следующие. Нить лампы, питаемая переменным пятидесятипериодным

током, периодически то нагревается, то охлаждается; когда ток накала достигает наибольшей величины, температура нити повышается; когда ток накала уменьшается до нуля, чтобы потом изменить свое направление, температура нити понижается. Колебания температуры нити, происходящие 2 раза за период колебания тока, вызывают колебания тока эмиссии; эти колебания усиливаются последующими каскадами наряду с полезными сигналами; в конце концов, при большом коэффициенте усиления, на выходе получается значительный фон. Помимо указанной причины, есть еще ряд причин, обуславливающих появление фона. Если питать нить так, как указано на рис. 1,21, то концы нити *a* и *б* будут периодически находиться под различным напряжением по отношению к сетке лампы. В тот момент времени, когда ток накала достигает максимума и течет от точки *a* к точке *б*, точка *a* находится под большим положительным напряжением, чем точка *б*; поток электронов, образующий ток эмиссии лампы, сгущен в сторону точки *б* (рис. 1,22). Через полпериода, когда ток накала меняет свое направление и течет от точки *б* к точке *a*, картина меняется, наиболее густым поток электронов будет у конца *a*. Эти периодические изменения вызывают также некоторое колебание тока эмиссии и, следовательно, появление фона на выходе усилителя. Если плюс батареи сетки и минус батареи анода присоединить не к середине обмотки трансформатора накала, а к одному из концов, то колебания тока эмиссии будут больше и фон увеличится.

Исходя из приведенных соображений, можно сделать следующие выводы:

1. Фон получается большим, если питать переменным током первые каскады усилителя, ибо небольшие колебания усиливаются последующими каскадами. Накал последнего каскада—усилителя мощности—можно, как правило, питать переменным током, ибо напряжение фона на выходе получается значительно меньшим напряжения полезных усиливаемых сигналов.

2. Лампы, имеющие тонкую и длинную нить, дают больший фон при питании накала переменным током, чем лампы с толстой нитью. Происходит это потому, что толстая нить медленнее нагревается и медленнее охлаждается, поэтому она обычно не успе-

вает охладиться за время в $\frac{1}{200}$ секунды, пока ток накала спадает от максимума до нуля.

Поэтому, например, лампы типа ТО лучше приспособлены для питания нити переменным током, чем лампы УБ-107, УБ-110 и др.

Для питания накала переменным током изготавливают специальный тип катода—катод с косвенным подогревом. Катод состоит из тонкого слоя оксида, нанесенного на трубку из специального изоляционного материала; внутри трубки проложен провод, по которому

течет переменный ток накала; слой оксида разогревается до определенной температуры и начинает излучать. У нас имеется ряд ламп с косвенным накалом (с подогревом), например, ПО-119, СО-118, СО-124 и др.

Подведем итоги всему сказанному:

1. Существует схема последовательного и схема параллельного питания нитей ламп. При схеме последовательного питания нить должна быть рассчитана на определенный ток, а не на напряжение. При схеме последовательного питания бывает выгодно применять баретер для поддержания постоянства тока накала.

2. Основное требование эксплуатации — это поддержание напряжения накала ламп на определенном уровне. Для этого служит реостат накала и вольтметр накала. Перекал ведет к скорой гибели ламп. При большом недокале усилитель плохо усиливает и искажает.

3. При питании накала предварительных каскадов переменным током появляется фон. Как правило, накал последнего каскада усиления можно питать переменным током. Для питания накала переменным током в предварительных каскадах надо применять лампы с подогревным катодом.

4. Способы подачи смещения на сетку и питание анода.

Выше мы указывали, что усилитель лишь тогда работает без искажений, когда постоянное напряжение на сетке по отношению к нити отрицательно. Для этой цели ставят специальную батарею сетки. Однако во многих случаях можно подать смещение на сетку без специальной батареи. Рассмотрим эти методы. Если требуется небольшое смещение порядка 2—3 В, то для этой цели можно использовать батарею накала. На рис. 1, 23 дана схема подачи смещения на сетку от цепи накала. Предположим, что напряжение накала лампы равно 4 В, ток накала равен 0,08 А, а на сетку надо подать смещение в 2,5 В. Очевидно, что надо взять батарею накала больше 4 В, например 8 В; из них 4 В пойдут на накал лампы, 2,5 В на смещение, а оставшиеся в запасе 1,5 В можно погасить реостатом накала. Смещение на сетке задается падением напряжения на сопротивлении R ; так как необходимо иметь смещение в 2,5 В, а ток накала равен 0,08 А, то очевидно в данном случае сопротивление R должно быть равно

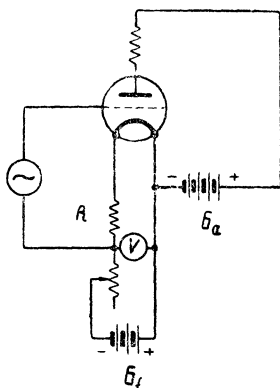


Рис. 1, 23.

$$R = \frac{2,5}{0,08} = 31 \text{ } \Omega.$$

Описанный метод подачи смещения особенно удобен при применении ламп типа ТО, рассчитанных на определенный ток накала.

Если требуется подать на сетку большее смещение порядка 10—15 вольт и выше, то указанный выше способ делается не-

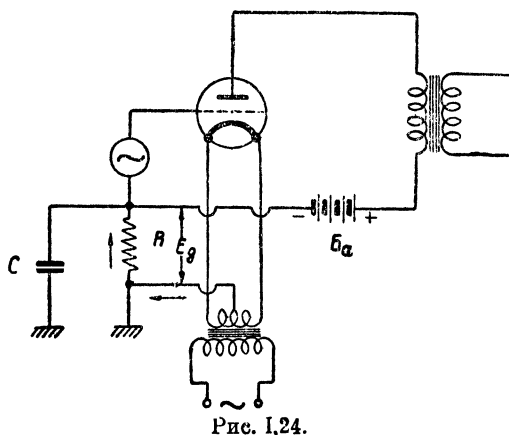


Рис. 1.24.

выгодным, ибо он связан с большими потерями мощности в сопротивлении R . Этот способ также неприменим, когда нить накала питается переменным током. Для усилителя мощности, особенно если анод лампы питается от выпрямителя, можно рекомендовать способ подачи смещения на сетку от анодного напряжения. Этот способ указан на рис. 1.24. В анодную цепь между

минусом батареи и нитью накала включается сопротивление R , сетка присоединяется к минусу анодной батареи. Напряжение

нити выше напряжения сетки на величину, равную падению напряжения на сопротивлении R ; анодное напряжение (между плюсом батареи и нитью) меньше напряжения батареи на эту же величину. Если анодный ток (постоянная слагающая) равен I_a , то падение напряжения на сопротивлении R равно

$$E_R = I_a R.$$

Этот же способ подачи смещения применяется обычно при лампах с косвенным накалом (подогревая). Схема дана на рис. 1.25.

В обеих схемах (рис. 1.24, 1.25) сопротивление R надо обязательно шунтировать большим конденсатором; сопротивление этого конденсатора переменному току самой низкой из усиливаемых частот должно быть по крайней мере раза в 4—5 меньше сопротивления R ; иначе вместе с колебанием анодного тока будет ме-

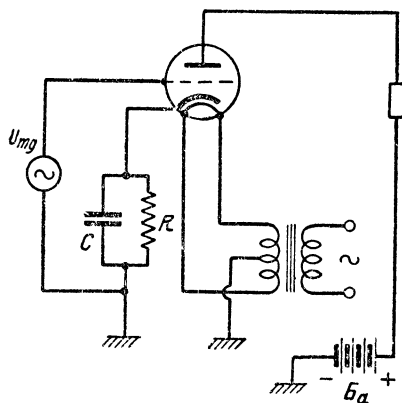


Рис. 1.25.

няться смещение на сетку и лампа будет работать в неправильном режиме, коэффициент усиления будет снижаться.

Пусть, например, надо подать смещение, равное 100 В, анодный ток равен 0,1 А; сопротивление R будет равно

$$R = \frac{100}{0,1} = 1000 \text{ } \Omega.$$

Пусть низший предел частоты переменного напряжения, которое мы усиливаем, равен 100 Hz, тогда угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 100 = 628$; согласно нашему условию сопротивление емкости при этой частоте должно быть в 4—5 раз меньше величины R , поэтому мы можем написать такое равенство

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{R}{5}.$$

Подставляя ω и R , имеем

$$\frac{1}{628 \cdot C} = \frac{1000}{5}.$$

Отсюда $C \cong 8 \cdot 10^{-6} \text{ F}$, или 8 μF .

Скажем еще несколько слов о питании анода. В усилителях аноды ламп часто питаются от выпрямительных установок. Выпрямитель дает пульсирующий ток, поэтому его сглаживают специальными фильтрами. В многокаскадном усилителе надо обычно на аноды ламп первых каскадов подавать меньшее на-

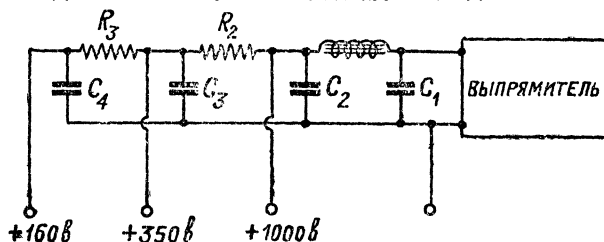


Рис. 1,26.

пряжение, чем на аноды ламп последнего каскада. Далее, анодное напряжение первых каскадов допускает значительно меньшую пульсацию, чем анодное напряжение последнего каскада; процент пульсации для питания первых каскадов допускается не больше 0,05; для питания же последнего каскада он может быть порядка 0,5—1%. Исходя из этих соображений, целесообразно применять схему питания анодов, изображенную на рис. 1,26. Допустим, что для питания последнего каскада требуется напряжение в 1000 В, для питания промежуточного каскада

требуется напряжение в 350 В и, наконец, для первых двух каскадов необходимо напряжение в 160 В. Выпрямитель имеет 3 ячейки фильтра. После первой ячейки напряжение подается на последний каскад; вторая ячейка состоит из емкости и сопротивления R_2 ; она понижает напряжение и одновременно дополнительно фильтрует, после нее подается напряжение на промежуточный каскад, после 3-й ячейки, состоящей также из сопротивления R_3 и емкости, напряжение подается на первый каскад.

Если имеется многокаскадный усилитель и на аноды всех каскадов надо подавать одинаковое напряжение, целесообразно аноды питать через отдельные фильтры, как это указано на рис.

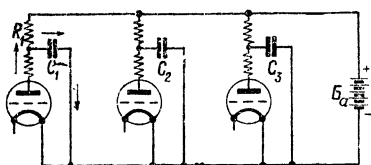


Рис. 1,27.

1,27. Сопротивление R_1 и емкость C_1 служат фильтром для первого каскада. Сопротивление R_1 порядка нескольких десятков тысяч ом; конденсатор C_1 имеет емкость в несколько микрофард; благодаря этому почти весь переменный ток в цепи первой лампы замыкается через емкость C_1 и нить и не проходит через бата-

рею B_a . Это, как мы видели, уменьшает связь между каскадами и значительно повышает устойчивость работы всей установки.

В заключение этого параграфа укажем на одно весьма существенное обстоятельство. В многокаскадном усилителе надо одну какую-либо точку, общую для всех каскадов, обязательно заземлять, чаще всего заземляют плюс накала. Контакты заземления должны быть хорошими (они должны быть пропапаны). Далее необходимо многокаскадные усилители покрывать железным кожухом и заземлять его. Если этих условий не выполнить, особенно первое, то на выходе усилителя в телефон можно прослушать фон, шумы, хрипы; иногда можно слушать передачу близлежащей радиостанции. Происходит это потому, что усилитель, имеющий большой коэффициент усиления, весьма чувствителен ко всяким паразитным электромагнитным и электростатическим полям; поэтому его надо тщательно защитить от этих полей; наилучшая защита—это толстый железный заземленный экран.

Суммируем все сказанное в данном параграфе:

1. Смещение на сетку можно подавать или от специальной батареи, или от батареи накала, или от батареи анода (фиг. 1, 23, 24, 25).

2. При питании анода от выпрямителя надо сглаживать пульсацию специальными фильтрами. Если требуется подавать разные напряжения на анод отдельных каскадов усиления, то наиболее целесообразно применять схему, указанную на рис. 1,24.

Контрольные вопросы.

1. В чем различие между усилителем напряжения и усилителем мощности?
2. Что мы называем коэффициентом усиления усилителя?
3. Чем ошибочна схема, приведенная на рис. 1, 28?
4. Почему схема, изображенная на рис. 1, 29, не будет работать?

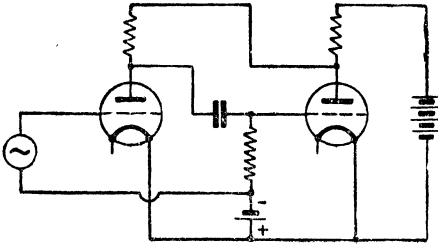


Рис. 1, 28.

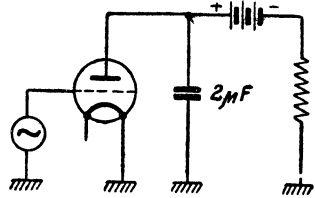


Рис. 1, 29.

5. Каковы преимущества и недостатки баретера?
6. Почему имеет большее значение поддержание нормального режима накала в лампах?
7. Почему надо экранировать усилитель и заземлять один из полюсов батареи?
8. Каковы причины фона при питании нитей ламп переменным током?

Задания.

1. Усилитель должен иметь коэффициент усиления равный 10 000; последний каскад (усилитель мощности) дает коэффициент усиления, равный 2. Сколько каскадов надо поставить, если каждый каскад может дать коэффициент усиления порядка 15—18?
 2. Надо дать смещение на сетку ламп от анодной батареи; напряжение смещения должно быть равно 40 В, ток анода равен 30 мА. Подсчитать сопротивление смещения и емкость, его шунтирующую.
 3. Имеется усилитель на 2 лампах 6Х41, требующих на накал—2,5 В, 1А; подсчитать напряжение, ток и мощность накала при последовательном питании нитей и при наличии баретера.
-

РАБОТА ЛАМПЫ В УСИЛИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ.

1. Усилитель как генератор с электродвижущей силой μU_{mg} и с внутренним сопротивлением R_i .

Возьмем усилитель с любой нагрузкой в анодной цепи, скажем с дросселем, параллельно которому приключено омическое

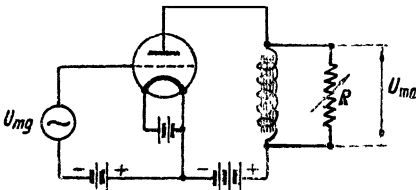


Рис. II,1.

сопротивление R (рис. II,1), и проделаем следующий опыт: будем уменьшать сопротивление нагрузки R , поддерживая амплитуду переменного напряжения на сетке лампы U_{mg} постоянной; тогда напряжение на клеммах анодной нагрузки U_{ma} будет падать. Если графически построить зависимость

напряжения U_{ma} от величины сопротивления R , то мы получим кривую, изображенную на рис. II,2. Не трудно сообразить, что эта же кривая является и кривой коэффициента усиления K , ибо, как мы знаем из предыдущего,

$$K = \frac{U_{ma}}{U_{mg}},$$

а величина U_{mg} остается по условию все время постоянной.

Сперва коэффициент усиления медленно падает с уменьшением R , затем он начинает резко спадать и при значении $R=0$ становится также равным нулю.

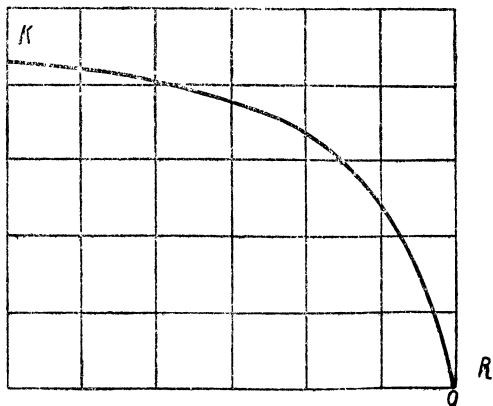


Рис. II,2.

Если мы возьмем любой генератор переменного или постоянного тока—аккумулятор, первичный элемент, динамомашину, генератор переменного тока и сделаем с ним аналогичный опыт, т. е. будем уменьшать сопротивление нагрузки и одновременно измерять напряжение на клеммах этой нагрузки, то мы получим такую же примерно зависимость между этими величинами, как и в усилителе. Разберемся в вопросе, почему напряжение на клеммах генератора (или усилителя) падает с уменьшением сопротивления нагрузки, или, как говорят, генератор или усилитель „садятся“.

Всякий генератор имеет внутреннее сопротивление. Электрический ток, идущий в цепи внешней нагрузки, проходит также внутри генератора через его внутреннее сопротивление, благодаря этому внутри генератора теряется известная доля напряжения, развиваемого генератором. Падение напряжения внутри генератора по закону Ома будет равно $I \cdot R_i$; здесь I —сила тока во внешней цепи, а R_i —внутреннее сопротивление генератора. Схему генератора можно представить себе так, как это изображено на рис. II, 3. E_m —это электродвижущая сила, развиваемая генератором; R_i —внутреннее сопротивление генератора, R —внешняя нагрузка, U_{ma} —напряжение на клеммах внешней нагрузки.

При холостом ходе, т. е. когда сопротивление R равно бесконечности, ток в цепи не течет, падение напряжения на внутреннем сопротивлении R_i равно нулю и напряжение на клеммах генератора U_{ma} равно электродвижущей силе E_m . При $R = R_i$ половина величины электродвижущей силы теряется внутри генератора и $U_{ma} = \frac{E_m}{2}$. Не трудно сообразить, что при $R = 0$, т. е.

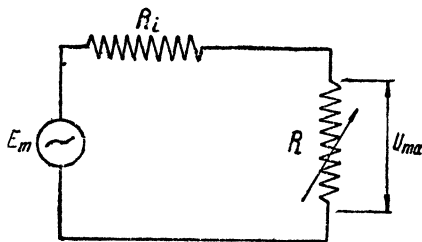


Рис. II, 3.

при коротком замыкании, вся электродвижущая сила будет теряться внутри генератора и напряжение U_{ma} будет равно нулю.

Наличием внутреннего сопротивления в генераторе (или усилителе) и объясняется кривая рис. II, 2.

Мощность, которую генератор может отдать во внешнюю цепь, определяется двумя величинами: величиной электродвижущей силы, им развиваемой, и величиной его внутреннего сопротивления. Чем мощнее генератор, тем меньше его внутреннее сопротивление. Если генератор достаточно мощный, то развиваемое им переменное напряжение можно всегда повысить до любой величины при помощи трансформатора. Однако этого не удастся сделать при маломощном генераторе. Иллюстрируем это примером. В качестве генератора электрической энергии мы имеем микро-

фон. Допустим, что он развивает электродвижущую силу в $0,05\text{ В}$ и имеет внутреннее сопротивление $R_i = 200\ \Omega$; микрофон работает на внешнюю нагрузку $R_a = 10\,000\ \Omega$. Поставим себе задачу повысить напряжение микрофона до 5 В , т. е. поднять напряжение в 100 раз; с этой целью включим на выходе микрофона трансформатор с коэффициентом трансформации $1:100$ и нагрузим вторичную обмотку трансформатора тем же сопротивлением, как и раньше, т. е. $R_a = 10\,000\ \Omega$. Схема всего устройства дана на рис. II,4. Спрашивается, получим ли мы требуемый результат, т. е. будет ли величина U_{a2} равна 5 В ?

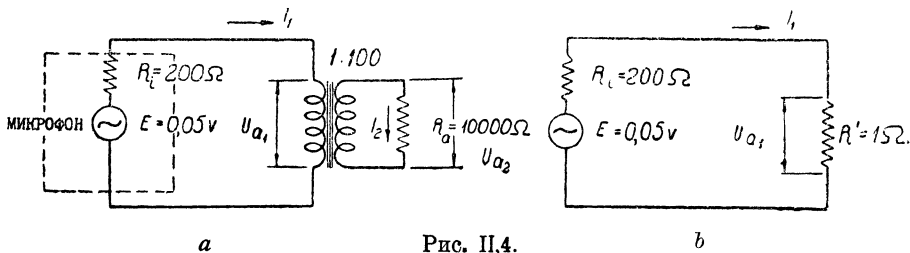


Рис. II,4.

Ток I_2 , идущий в сопротивлении R_a , должен по закону Ома быть равен

$$I_2 = \frac{U_{a2}}{R_a}.$$

Из теории трансформаторов известно, что напряжение на клеммах первичной обмотки (U_{a1}) в $\frac{1}{n}$ раз меньше, чем напряжение U_{a2} . Величина n называется коэффициентом трансформации и равна отношению числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки; в нашем случае $\frac{1}{n} = 100$. Сила тока в первичной цепи (I_1) в $\frac{1}{n}$ раз больше, чем сила тока I_2 . На основании этого мы можем написать следующее:¹⁾

$$U_{a1} = n \cdot U_{a2}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{n} = \frac{U_{a2}}{n \cdot R_a}.$$

Определим величину входного сопротивления нашего трансформатора, на которое нагружен микрофон. Из закона Ома мы

¹⁾ Эти равенства справедливы лишь в случае отсутствия тока холостого хода, потерь в трансформаторе и рассеяния. Однако при ориентировочных, приближенных подсчетах можно ими пользоваться для любого трансформатора.

знаем, что сопротивление нагрузки R' равно отношению напряжения на его клеммах к силе тока, проходящего через него. Значит величина R' равна

$$R' = \frac{U_{a1}}{I_1}.$$

Подставим сюда выражения для U_{a1} и I_1

$$R' = U_{a2} \cdot n \cdot \frac{nR_a}{U_{a2}} = n^2 \cdot R_a.$$

Из этой формулы видно, что микрофон нагружен на сопротивление в $\frac{1}{n^2}$ меньшее, чем сопротивление внешней нагрузки R_a .

Для нашего примера

$$R' = R_a n^2 = \frac{10\,000}{100^2} = 1\Omega.$$

Схему рис. II,4а мы можем упростить и изобразить ее в виде схемы рис. II,4б. Исходя из этой схемы, не трудно определить величину напряжения U_a .

Сила тока I_1 по закону Ома равна $I_1 = \frac{E}{R_i + R'}$;

напряжение U_{a1} равно

$$U_{a1} = I_1 \cdot R' = U \frac{R'}{R_i + R'}. \quad (2,1)$$

Подставляя числовые значения в формулу (2,1), мы получим

$$U_{a1} = 0,05 \frac{1}{200 + 1} = 0,00025 \text{ V}.$$

Искомое нами напряжение U_{a2} должно быть, как мы видели, в $\frac{1}{n} = 100$ раз больше, чем U_{a1} . Следовательно,

$$U_{a2} = U_{a1} \cdot 100 = 0,025 \text{ в}.$$

Хотели мы получить 5 V, а получили напряжение почти вдвое меньшее, чем без трансформатора. Произошло это потому, что микрофон имеет сравнительно большое внутреннее сопротивление и является поэтому маломощным источником энергии. Включив в его цепь нагруженный трансформатор с очень малым коэффициентом трансформации, мы почти накоротко замкнули внешнюю цепь ($R' = 1\Omega$ при $R_i = 200\Omega$); вследствие этого почти вся электродвижущая сила потерялась внутри микрофона на его внутреннем сопротивлении.

Все вышесказанное применимо и к усилителю. Усилитель также можно рассматривать как генератор переменной электродвижущей силы, имеющий некоторое внутреннее сопротивление.

Выясним, какова же величина электродвижущей силы генератора, эквивалентного усилителю?

Основной параметр лампы, который характеризует ее способность усиливать,—это коэффициент усиления лампы μ (не следует смешивать с коэффициентом усиления усилителя K). Коэффициентом усиления лампы называется отношение изменения напряжения на аноде к изменению напряжения на сетке при неизменной силе анодного тока. На рис. II,5 мы имеем характеристику какой-то лампы, соответствующую анодному напряжению E_{a1} ; смещение на сетке равно E_{g1} , и анодный ток равен I_{a1} . Если мы увеличим смещение на сетку до величины E_{g2} , то анодный ток уменьшится и будет равен I_{a2} ; для того чтобы анодный ток поднять до прежней величины, нам надо увеличить анодное напряжение до величины E_{a2} . Отношение

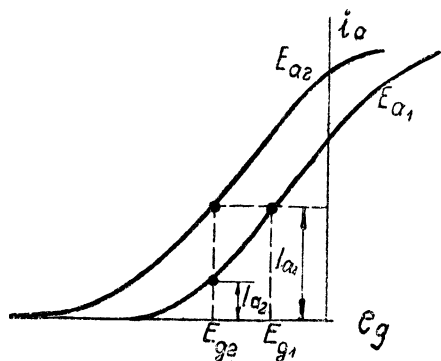


Рис. II,5.

$\frac{E_{a2} - E_{a1}}{E_{g2} - E_{g1}} = \mu$ будет коэффициентом усиления лампы (μ).

Если μ большое, то малые изменения напряжения в цепи сетки влекут за собой большие изменения напряжения в цепи анода. Величина μ показывает нам, насколько масштаб всех явлений в цепи анода больше, чем в цепи сетки.

В усилителе мы подводим переменное напряжение к сетке, снимаем же напряжение с нагрузки, стоящей в цепи анода. Подводимое к сетке переменное напряжение U_{mg} должно в цепи анода действовать, как напряжение в μ раз большее. Следовательно, мы можем считать, что электродвижущая сила генератора, эквивалентного усилителю, равна μU_{mg} .

Теперь выясним величину внутреннего сопротивления этого генератора. Два других параметра лампы—это крутизна S и внутреннее сопротивление R_i . Если коэффициент усиления μ является постоянным, неизменным параметром лампы, то крутизна и внутреннее сопротивление лампы непостоянны; все зависит от того участка характеристики, на котором выбрана рабочая точка. На рис. II,6 дана характеристика лампы. В точке a крутизна (или подъем) характеристики меньше, чем в точке b , в точке b и точке $в$ крутизна одинакова; вообще там, где характеристика прямолинейна, крутизна постоянна.

2. Как вычислить коэффициент усиления и мощность, отдаваемую усилителем?

Исходя из установленной в предыдущем параграфе эквивалентной схемы усилителя, очень не трудно вычислить все интересующие нас в усилителе величины.

На рис. II,7 изображен усилитель и его эквивалентная схема.

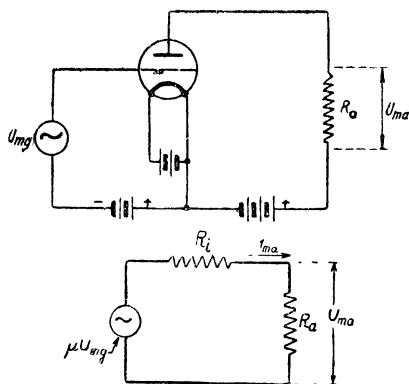


Рис. II,7.

Требуется определить переменную слагающую силы тока в аноде I_{ma} , напряжение на клеммах внешней нагрузки U_{ma} , коэффициент усиления усилителя K и отдаваемую им мощность P_{ma} . Даны следующие величины: амплитуда переменного напряжения на сетке U_{mg} , сопротивление нагрузки R_a и параметры лампы μ и R_i .

Согласно закону Ома сила тока I_{ma} равна

$$I_{ma} = \frac{\mu U_{mg}}{R_i + R_a}. \quad (2,2)$$

Амплитуда переменного напряжения на внешней нагрузке равна

$$U_{ma} = I_{ma} R_a = \mu U_{mg} \cdot \frac{R_a}{R_i + R_a}. \quad (2,3)$$

Коэффициент усиления по предыдущему равен

$$K = \frac{U_{ma}}{U_{mg}} = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a}. \quad (2,4)$$

Обозначим отношение внешнего сопротивления к внутреннему значком α ; $\alpha = \frac{R_a}{R_i}$. Делим числителя и знаменателя в выражении (2,4) на R_i ; тогда имеем

$$K = \mu \frac{\frac{R_a}{R_i}}{\frac{R_i}{R_a} + \frac{R_a}{R_i}};$$

$$\boxed{K = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1}} \quad (2,5)$$

Формулу (2,5) для коэффициента усиления надо запомнить, ибо она часто будет встречаться в дальнейшем. Из формулы мы видим, что коэффициент усиления усилителя всегда меньше, чем μ . При холостом ходе, когда сопротивление внешней нагрузки бесконечно велико, величина α тоже бесконечно велика; величина K при этом становится равной μ . При коротком замыкании, т. е. при $R_a = 0$, величина α равна нулю и коэффициент усиления K также равен нулю. При $R_a = R_i$ $\alpha = 1$ и $K = \frac{\mu}{2}$. На рис. II, 8

дана кривая зависимости $\frac{K}{\mu} = \frac{\alpha}{\alpha + 1}$ от α : это та же кри-

вая, что и на рис. II, 2, только перевернутая. Из кривой рис. II, 8 видно, что при малых значениях α коэффициент усиления очень резко меняется с изменением величины α ; при величинах α больших, чем 3—4, коэффициент усиления почти не изменяется с ростом α . В усилителе напряжения, который должен давать как можно больший коэффициент усиления, всегда величину α следует брать порядка 3—4, т. е. внешнее сопротивление должно быть в 3—4 раза больше внутреннего.

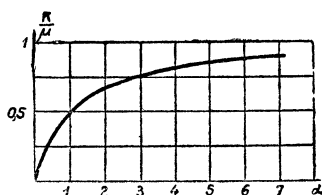


Рис. II, 8.

Перейдем к определению величины мощности P_{ma} , отдаваемой усилителем,

$$P_{ma} = \frac{I_{ma}^2 \cdot R_a}{2}, \quad (2,6)$$

подставляем вместо I_{ma} его выражение (2,2)

$$P_{ma} = \frac{\mu^2 U_{mg}^2 \cdot R_a}{(R_i + R_a)^2 \cdot 2}.$$

Делим числителя и знаменателя на величину R_i^2

$$P_{ma} = \frac{\mu^2 \cdot U_{mg}^2 \cdot R_a}{\left(\frac{R_i}{R_i} + \frac{R_a}{R_i} \right)^2 \cdot 2}.$$

Заменяем $\frac{R_a}{R_i}$ через α

$$P_{ma} = \frac{\mu^2}{R_i} \cdot \frac{U_{mg}^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{(1 + \alpha)^2}. \quad (2,7)$$

Наконец, заменяем $\frac{\mu^2}{R_i} = \mu \cdot \frac{\mu}{R_i} = \mu \cdot S$. Окончательно имеем следующую формулу для мощности, отдаваемой усилителем,

$$P_{ma} = \mu S \frac{U_{mg}^2}{2} \frac{\alpha}{(1 + \alpha)^2}. \quad (2,8)$$

Эта формула показывает, что мощность, отдаваемая усилителем, пропорциональна квадрату напряжения на сетке, пропорциональна коэффициенту усиления и крутизне лампы.

Все наши рассуждения и выкладки относятся к усилителю на сопротивлениях, ибо мы исходили из схемы рис. II, 7. Однако не трудно показать, что они также справедливы для усилителя с трансформаторным выходом, если вторичная обмотка трансформатора нагружена омическим сопротивлением. В предыдущем параграфе мы видели, что трансформатор, нагруженный сопротивлением R , может быть в первом приближении заменен некоторым сопротивлением, величина которого R' равна

$$R' = Rn^2.$$

Здесь n —коэффициент трансформации трансформатора (отношение числа витков). Таким образом все наши выводы справедливы и для этого случая, надо лишь положить, что $R_a = R' = Rn^2$.

Суммируем полученные результаты:

1. Амплитуда силы анодного тока (I_{ma}) и напряжения на анодной нагрузке имеют следующие выражения:

$$I_{ma} = \mu U_{mg} \frac{1}{R_i + R_a};$$

$$U_{ma} = \mu U_{mg} \frac{R_a}{R_i + R_a}.$$

2. Коэффициент усиления равен

$$K = \frac{U_{ma}}{U_{mg}} = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1}.$$

3. Мощность, отдаваемая усилителем, равна

$$P_{ma} = \mu S \frac{U_{mg}^2}{2} \frac{\alpha}{(\alpha + 1)^2}$$

здесь

$$\alpha = \frac{R_a}{R_i}.$$

3. Динамическая характеристика лампы и ее крутизна.

Мы вывели основные формулы для подсчета мощности, коэффициента усиления и других величин, исходя из эквивалентной схемы усилителя; теперь попробуем более подробно разобраться, что происходит в лампе во время ее работы.

На рис. II,9 дана характеристика лампы, соответствующая анодному напряжению E_a . Дадим отрицательное смещение на сетку, равное E_g ; если на аноде лампы напряжение равно E_a , то постоянный анодный ток (ток покоя) будет равен $I_{a=}$; точку p мы называем рабочей точкой характеристики. Допустим далее, что в анодной цепи имеется омическая нагрузка, равная R_a , на сетку дается переменное напряжение, амплитуда которого равна U_{mg} (рис. II,9).

Посмотрим, как будет меняться анодный ток с изменением напряжения на сетке.

При уменьшении отрицательного смещения на сетку (движение вправо) анодный ток будет увеличиваться; вместе с ростом анодного тока будет расти падение напряжения на внешней нагрузке; оно равно $i_a \cdot R_a$. Напряжение на аноде лампы E_a равно напряжению батареи E_c минус падение напряжения на внешней нагрузке

$$E_a = E_c - i_a R_a. \quad (2,9)$$

Напряжение батареи E_c — величина постоянная, поэтому E_a будет уменьшаться с ростом i_a , т. е. напряжение на аноде будет падать с ростом анодного тока. Отсюда ясно, что ток анода будет возрастать не по характеристике лампы, соответствующей анодному напряжению E_a , а более полого. В крайней точке a ток анода достигнет своего наибольшего значения, он будет равен току покоя $I_{a=}$ плюс амплитуда переменного тока I_{ma} ; напряжение же на аноде будет наименьшим, оно будет равно какой-то величине $E_{a \min}$; эту величину можно вычислить из равенства

$$E_{a \min} = E_c - (I_{a=} + I_{ma}) R_a. \quad (2,10)$$

Точка a будет лежать на характеристике лампы, соответствующей анодному напряжению $E_{a \min}$ (рис. II,9).

Когда отрицательное напряжение на сетке начнет возрастать, т. е. мы будем двигаться влево, то картина изменится; ток анода будет падать, напряжение на внешней нагрузке ($i_a R_a$) будет уменьшаться, а напряжение на аноде будет возрастать. В крайней точке b мы будем иметь минимум тока $I_{a=} - I_{ma=}$ и максимум напряжения на аноде $E_{a \max}$.

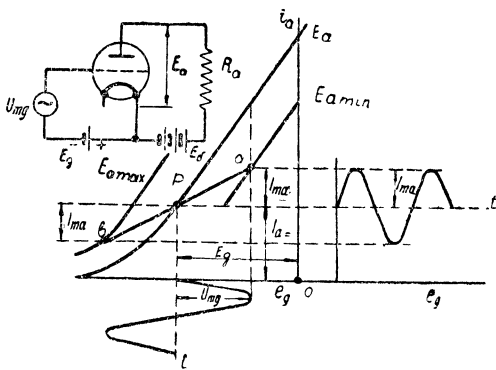


Рис. II,9.

Величина $E_{a \max}$ определяется из следующего равенства

$$E_{a \max} = E_{\delta} - (I_{a \max} - I_{ma}) R_a. \quad (2,11)$$

Точка b лежит на характеристике лампы, соответствующей анодному напряжению $E_{a \max}$.

Итак ток анода будет изменяться не по характеристике лампы, а по некоторой более наклонной линии bra ; эту линию мы называем динамической характеристикой лампы. Динамическая характеристика пересекает на своем пути ряд статических ¹⁾ характеристик ламп, соответствующих различным анодным напряжениям.

Чему же равна крутизна динамической характеристики (S_d)? Из рис. II, 9 видно, что она равна отношению амплитуды анодного тока I_{ma} к напряжению U_{mg}

$$S_d = \frac{I_{ma}}{U_{mg}}. \quad (2,12)$$

Подставим вместо I_{ma} , выведенное в § 2 выражение (2,2)

$$I_{ma} = \mu U_{mg} \frac{1}{R_i + R_a}.$$

Вместо μ подставим $\mu = R_i \cdot S$ и сократим выражение на U_{mg} ,

тогда
$$S_d = S \frac{R_i}{R_i + R_a}. \quad (2,13)$$

Деля числителя и знаменателя на R_i и подставляя вместо $\frac{R_a}{R_i}$ величину α , мы получим

$$S_d = S \frac{1}{1 + \alpha}. \quad (2,14)$$

Отсюда видно, что наклон или крутизна динамической характеристики, во-первых, всегда меньше статической характеристики и, во-вторых, зависит от α , т. е. от величины внешней нагрузки (R_a). При холостом ходе (R_a и α равны бесконечности) S_d равно нулю; это значит, что динамическая характеристика—горизонтальная линия, как это указано на рис. II, 9.

При коротком замыкании, т. е. при $R_a = 0$ и $\alpha = 0$, величина $S_d = S$; это значит, что динамическая характеристика совпадает со статической характеристикой лампы. Чем больше сопротивление внешней нагрузки, тем более полого идет динамическая характеристика.

¹⁾ В отличие от динамической характеристики, характеристики, соответствующие постоянному анодному напряжению, будем называть статическими.

Обратимся к рис. II, 11. На нем изображены изменения напряжения на сетке, тока анода, напряжения на аноде и напряжения на внешней нагрузке в зависимости от времени. Рис. II, 11 рекомендуем читателю сопоставить с рис. II, 9. Кривая I на рис. II, 11 дает нам картину изменения напряжения на сетке; E_g —это постоянное смещение на сетку; U_{mg} —это амплитуда переменного напряжения на сетку. Кривая II дает ту же картину для анодного тока; при отсутствии колебаний в аноде течет ток покоя $I_{a=}$; во время колебаний на этот ток накладывается еще переменный ток с амплитудой I_{ma} . Из кривых I и II видно, что с возрастанием сеточного напряжения растет одновременно и ток анода. На кривой III изображено напряжение на аноде лампы в зависимости от времени; E_a —напряжение на аноде во время покоя; эта величина меньше, чем напря-

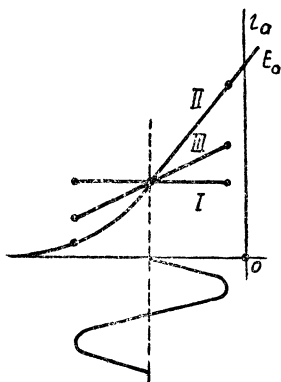


Рис. II, 10.

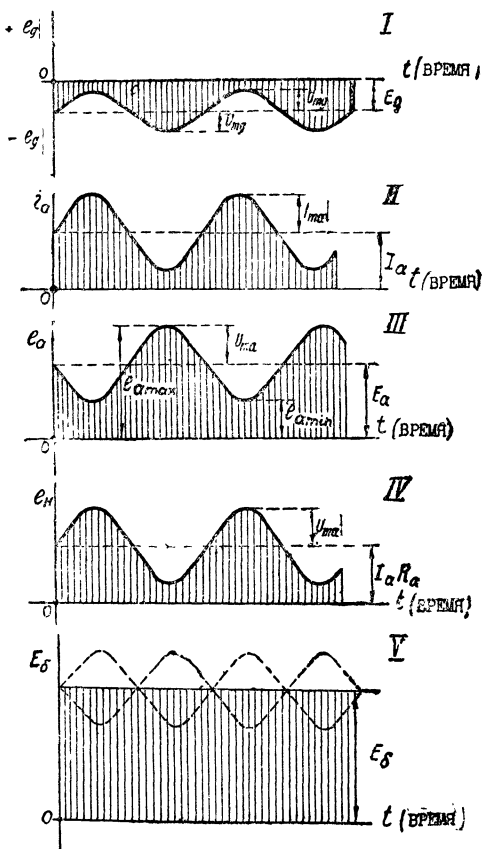


Рис. II, 11.

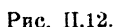
жение батареи E_g , ибо часть напряжения теряется на внешнем сопротивлении; не трудно сообразить, что $E_a = E_g - I_a R_a$.

U_{ma} — это амплитуда переменного напряжения на аноде.

Кривая IV дает изменение напряжения на внешней нагрузке в зависимости от времени. При отсутствии колебаний падение напряжения на внешней нагрузке равно $I_a R_a$. Лампа и сопротивление R_a включены последовательно в цепь анодной батареи (рис. II, 9), поэтому сумма падения напряжения на аноде лампы и на сопротивлении R_a должна всегда равняться напряжению

Это происходит по следующим причинам: во-первых, их амплитуда равна U_m ; во-вторых, нарастание напряжения на аноде соответствует уменьшению напряжения на внешней нагрузке и наоборот, что видно из кривых *III* и *IV*. Поэтому сумма кривых *III* и *IV* всегда постоянна и равна E_g .

менно, и только кривая *III* (кривая анодного напряжения) имеет противоположный характер, т. е. нарастание в кривых *I*, *II*, *IV* соответствует спадаанию кривой *III* и наоборот. Кривая *III* как бы отстает или опережает на полпериода все другие кривые. Отставание или опережение одной кривой по отношению к другой мы называем сдвигом фаз. Значит кривая *III* сдвинута по фазе по



Выясним еще следующий чрезвычайно важный для работы лампы вопрос: каково переменное напряжение между сеткой и анодом лампы? Для этого сравним кривую I и III и возьмем их разность, ибо ясно, что напряжение сетка-анод равно разности между напряжением анод-нить и сетка-нить. На рис. II, 12 дана кривая, соответствующая разности кривых I и III .

Суммируем все наши выводы:

2. Наклон или крутизна динамической характеристики определяется из формулы $S_d = S \frac{1}{1 + \alpha}$; при холостом ходе

3. Нарастание и спадание напряжения на сетке, тока анода и напряжения на внешней нагрузке происходят одно-

временно; это можно выразить и так: переменные составляющие напряжения на сетке, анодного тока и напряжения на внешней нагрузке совпадают по фазе.

4. Амплитуды переменного напряжения на аноде и переменного напряжения на внешней нагрузке равны между собой и обозначаются U_{ma} . Переменное напряжение на аноде по фазе сдвинуто на полпериода по отношению к напряжению на сетке, к анодному току и напряжению на внешней нагрузке. Нарастанию напряжения на сетке и нарастанию анодного тока соответствует спадание напряжения на аноде лампы.

5. Амплитуда переменного напряжения между анодом и сеткой равна сумме

$$U_{ma} + U_{mg}.$$

4. Как построить динамическую характеристику в усилителе на сопротивлении и в усилителе на трансформаторе?

Мы рассматривали усилитель, в анодной цепи которого стоит омическое сопротивление. Если мы имеем усилитель с трансформатором, нагруженным на сопротивление R , то мы можем считать, как это было выяснено выше (§ 1), что в анодной цепи стоит омическое сопротивление величиной $R' = R_a n^2$ (n — коэффициент трансформации). Отсюда можно сделать вывод, что все результаты, полученные нами в § 3, целиком применимы и для усилителя на трансформаторах. Однако здесь надо оговорить, что в отношении постоянной слагаемой анодного тока $I_a =$ и анодного напряжения E_a между усилителем на сопротивлениях и усилителем на трансформаторах существенная разница. В усилителе на сопротивлениях постоянное напряжение на аноде E_a всегда меньше напряжения батареи на величину падения напряжения на внешней нагрузке

$$E_a = E_c - I_a R_a.$$

В усилителе на трансформаторах постоянный ток проходит через первичную обмотку трансформатора, сопротивление которой постоянному току ничтожно; поэтому можно считать, что в усилителе на трансформаторах постоянная слагающая анодного напряжения E_a равна напряжению батареи $E_a = E_c$.

Предположим, что в анод лампы поставлен трансформатор с коэффициентом трансформации $n = 1$, нагруженный на сопротивление R_a . На сетку лампы дано смещение E_g (рис. II, 13). Рабочая точка P_1 находится на характеристике лампы, соответствующей анодному напряжению, равному напряжению батареи E_c ; ток покоя равен I_{a1} . Если мы дадим „раскачку“ на сетку (переменное напряжение) с амплитудой U_g , то динамическая ха-

рактеристика будет иметь вид, указанный на рис. II,13; наклон ее определится согласно выведенной нами выше формуле

$$S'_a = S \frac{1}{1 + \alpha}; \quad \text{здесь } \alpha = \frac{R_{\text{т}}}{R_i}.$$

Выкинем из анодной цепи

трансформатор и поставим сопротивление R_a непосредственно в анод лампы (рис. II,13). Тогда напряжение на аноде упадет до величины E_a ; рабочая точка спустится ниже и попадет в точку P_2 , лежащую на характеристике, соответствующей анодному напряжению E_a ; ток покоя уменьшится и будет равен I_{a2} . Величина E_a определится из следующего выражения

$$E_a = E_\delta - I_{a2} R_a.$$

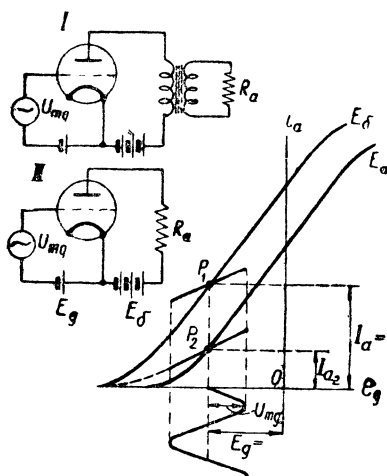


Рис II,13.

Динамическая характеристика будет иметь тот же наклон, что при трансформаторе в аноде, ибо для переменного тока нагрузка не изменилась; она осталась равной R_a . Разница только в том, что в первом случае динамическая характеристика про-

ходила через точку P_1 , а во втором случае, при омическом сопротивлении в аноде она проходит ниже через точку P_2 .

Продолжим динамическую характеристику, проходящую через точку P_2 , влево. Не трудно сообразить, что она пойдет так, как указано на рис. II,13 пунктирной линией, и обязательно при анодном токе, равном нулю, совпадет с характеристикой E_δ . В самом деле, динамическая характеристика пересекает ряд статических характеристик лампы, соответствующих анодным напряжениям меньшим, чем напряжение батареи E_δ ; чем меньше анодный ток, тем меньше падение напряжения на внешней нагрузке и тем ближе напряжение на аноде лампы к напряжению батареи; при анодном токе, равном нулю, падение напряжения на внешней нагрузке также равно нулю и напряжение на аноде равно напряжению батареи E_δ . Поэтому динамическая характеристика при токе, равном нулю, совпадет со статической характеристикой E_δ .

Итак мы выяснили различие в работе лампы при нагрузке на сопротивление и при нагрузке на трансформатор.

Решим теперь задачу, которая очень часто встречается при практических расчетах усилителей. Нам дана характеристика

лампы (рис. II, 14); дано напряжение анодной батареи E_a , дано сопротивление в анодной цепи лампы R_a . Требуется построить динамическую характеристику лампы, начиная от тока, равного нулю. Построение ведем следующим образом: задаемся различными значениями анодного тока i_{a_1} ; i_{a_2} ; i_{a_3} ; i_{a_4} . Падение напряжения на анодной нагрузке будет для каждого из этих токов равно: $i_{a_1} \cdot R_a$; $i_{a_2} \cdot R_a$ и т. д. Напряжение на аноде для тока i_{a_1} будет равно

$$e_{a_1} = E_a - i_{a_1} R_a;$$

для тока i_{a_2}

$$e_{a_2} = E_a - i_{a_2} R_a \text{ и т. д.}$$

Для того чтобы по заданной характеристике лампы, соответствующей анодному напряжению E_a , построить характеристику, соответствующую напряжению e_a , надо первую (т. е. характеристику E_a) сдвинуть вправо на отрезок $\frac{E_a - e_{a_1}}{\mu} = \frac{i_{a_1} R_a}{\mu}$; это вытекает

непосредственно из определения величины μ (см. § 1 этой главы). Значит точка 1 (рис. II, 14) лежит на статической характеристике, соответствующей анодному напряжению e_{a_1} ; эта точка 1 является одной из точек искомой нами динамической характеристики, ибо при анодном токе i_{a_1} анодное напряжение должно равняться e_{a_1} . Отсюда вытекает метод построения. Задаемся то-

ками (i_{a_1} , i_{a_2} , i_{a_3} и т. д.); вычисляем $\frac{i_{a_1} R_a}{\mu}$; $\frac{i_{a_2} R_a}{\mu}$; $\frac{i_{a_3} R_a}{\mu}$ и т. д.;

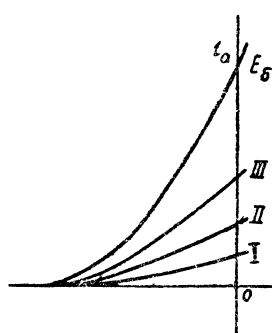


Рис. II, 15.

откладываем от статической характеристики E_a вправо (на высоте соответствующего тока) вычисленные величины и получаем ряд точек искомой нами динамической характеристики.

Чем больше сопротивление R_a , тем полнее идет динамическая характеристика; при очень больших величинах R_a динамическая характеристика почти совпадает с осью абсцисс, т. е. ток анода становится исчезающе малым. На рис. II, 15 проведены динамические характеристики, соответствующие различным сопротивлениям в аноде. Интересно отметить, что более пологие характеристики, соответствующие большим величинам R_a (характеристика I), более прямолинейны, чем другие.

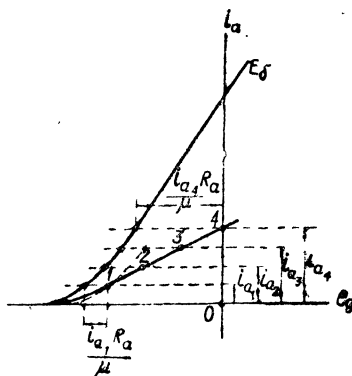


Рис. II, 14.

Суммируем сказанное в этом параграфе:

1. Для переменных слагающих тока и напряжения усилитель на сопротивлении и усилитель на трансформаторе, нагруженном на омическое сопротивление, не представляют различий.

2. Постоянная слагающая анодного напряжения и анодного тока в усилителе на сопротивлении всегда меньше, чем в усилителе на трансформаторе при одинаковом напряжении анодной батареи E_a и при одинаковом смещении на сетке E_g .

3. Динамические характеристики, соответствующие разным нагрузкам в усилителе на сопротивлении, сходятся в точке, где статическая характеристика E_a касается оси абсцисс (анодный ток равен нулю).

4. Чем больше сопротивление внешней нагрузки, тем полнее идет динамическая характеристика и тем она более прямолинейна.

Контрольные вопросы.

1. Почему при наличии маломощного источника энергии напряжение нельзя повысить при помощи трансформатора, а нужен усилитель?

2. Почему напряжение на аноде падает с ростом анодного тока и наоборот?

3. Почему крутизна динамической характеристики всегда меньше крутизны статической характеристики?

4. Чем отличаются динамические характеристики в усилителе на трансформаторе и в усилителе на сопротивлении?

Задание.

Задача № 1.

Имеется усилитель на трансформаторе (схема на рис. II,16); трансформатор имеет коэффициент трансформации $n = 0,5$; нагружен на сопротивление R .

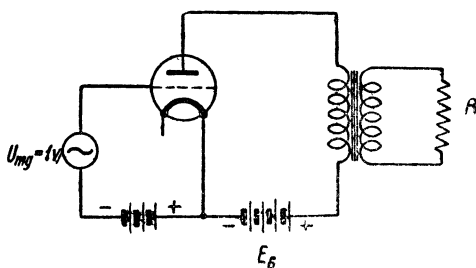


Рис. II,16.

Параметры лампы следующие: $R_i = 5000$; $\mu = 12$. Построить кривую коэффициента усиления в зависимости от R (в пределах от $R = 0$ до $R = 100\,000\ \Omega$). Построить кривую полезной мощности P_{\sim} в зависимости от R (в тех же пределах), предполагая, что $U_{mg} = 1\text{ V}$. Выяснить, при какой величине α мы получаем наибольшую мощность во внешней цепи и чему при этом равен коэффициент усиления.

Задача № 2.

Дана лампа УО-104 (рис. II,17). Коэффициент усиления лампы равен $\mu = 4,5$. Напряжение батареи равно $E_b = 300 \text{ V}$. Построить динамическую ха-

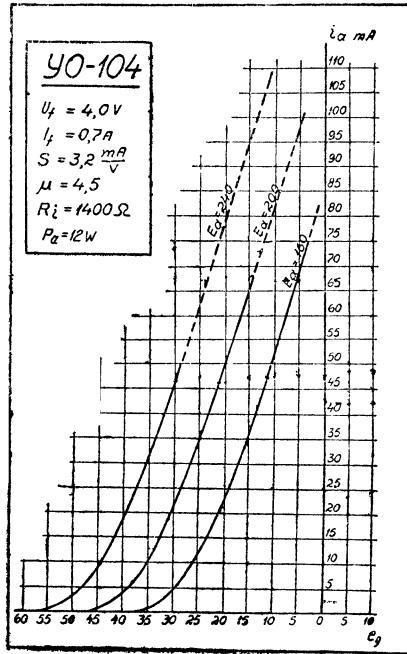


Рис. II,17.

рактеристику, для омического сопротивления в анодной цепи, равного $R_a = 3000 \Omega$.

Определить на рисунке рабочую точку P , при смещении на сетке, равном $E_g = -35 \text{ V}$, и определить внутреннее сопротивление лампы в этой точке.

ГЛАВА III.

ИСКАЖЕНИЯ В УСИЛИТЕЛЯХ.

I. Неперы и децибеллы.

Часто коэффициент усиления бывает удобнее выразить не как отношение напряжения на выходе к напряжению на входе, а как логарифм этого отношения.

Это особенно удобно при подсчете отдельных элементов сложного устройства, содержащего ряд усилителей.

Например, радиовещательный тракт от микрофона до передатчика имеет не один усилитель, а ряд усилителей, включенных каскадно в различных звеньях цепи: усилитель микрофонный, усилитель, работающий на линию, связывающую студию с передатчиком, усилитель на передатчике (подмодулятор). Между усилителями включены элементы, вносящие затухания, т. е. устройства, поглощающие мощность и уменьшающие напряжение; к таким устройствам относится линия, регулятор усиления, коммутационное устройство и т. д. Очевидно, что общее усиление всего тракта будет равно

$$K = \frac{K_1 K_2 K_3}{p_1 p_2 p_3}. \quad (3,1)$$

Здесь буквой K с соответствующим индексом обозначен коэффициент усиления каждого усилительного элемента; буквой p обозначены коэффициенты затухания отдельных элементов; величина K больше единицы; величина p — также больше единицы и равна отношению напряжения на входе к напряжению на выходе устройства. Так как все коэффициенты усиления множатся друг на друга, то подсчет необходимого усиления каждого элемента в отдельности, исходя из данного общего усиления K и заданных p , весьма затруднителен. Значительно проще решается задача, если мы будем оперировать не с коэффициентами усиления, а с их логарифмами. Возьмем натуральный логарифм выражения (3,1)

$$\ln K = \ln K_1 + \ln K_2 + \dots - \ln p_1 - \ln p_2 - \dots$$

Мы видим, что общее усиление, выраженное в виде логарифма, равно сумме отдельных усиления и отдельных затуханий.

Натуральный логарифм коэффициента усиления измеряется в единицах, называемых „неперами“.

Например, коэффициент усиления усилителя равен $K=100$. В неперах он будет равен

$$N = \ln K = \ln 100 = 4,6 \text{ непер.} \quad (3,2)$$

Благодаря такому методу обозначения коэффициента усиления и затухания, мы значительно упрощаем расчет сложной цепи, содержащей ряд усилительных участков. Например, требуется подсчитать усиление усилителей радиовещательного тракта, схема которого дана на рис. III.1.

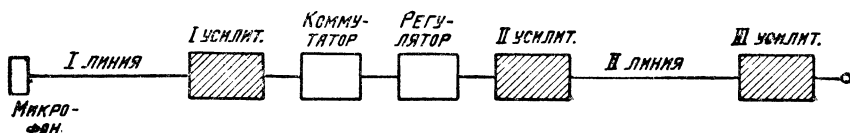


Рис. III.1.

Дано: общее усиление должно быть 11 непер (около 50 000). Затухание первой линии равно 0,5 непер; затухание коммутатора 0,5 непер, затухание регулятора 2 непера. Общее затухание на всем тракте равно $+0,5 + 0,5 + 2 + 1,5 = 4,5$ непер.

Усиление всех усилителей должно быть $11 + 4,5 = 15,5$ непер. Можно, например, положить:

Усиление I усилителя равным 5 непер.

Усиление II усилителя равным 6 непер.

Усиление III усилителя равным 4,5 непер.

Можно, разумеется, и несколько иначе распределить усиление между отдельными усилителями; наилучший вариант распределения зависит от ряда дополнительных требований, возникающих в процессе проектирования.

В Америке и в Англии принято усиление и затухание выражать не в неперах, а в децибеллах. При этом усиление определяется из следующей формулы

$$S = 20 \lg K \text{ (dB)}. \quad (3,3)$$

Здесь берется не натуральный, а десятичный логарифм. Один непер равен 8,7 децибеллам (dB), 1 децибелл соответствует 0,115 непер.

Суммируем сказанное в этом параграфе:

1) Коэффициент усиления усилителя часто выражают в неперах или децибеллах.

2) Коэффициент усиления в неперах равен натуральному логарифму отношения напряжения на выходе к напряжению на входе усилителя

$$N = \ln \frac{U_2}{U_1} \text{ (непер).}$$

3) Коэффициент усиления в децибеллах равен двадцати десятичным логарифмам отношения тех же напряжений

$$S = 20 \lg \frac{U_2}{U_1} (\text{dB}).$$

2. Частотные искажения в усилителе.

К усилителю, предназначенному для усиления речи или художественной передачи, предъявляется ряд требований, гарантирующих определенное качество воспроизведения. Часто усилитель имеет достаточный коэффициент усиления, работает громко, отдает требуемую от него мощность, но в то же время вносит большие искажения в передачу; звук после усиления теряет свою окраску (или тембр), иногда появляются дребезжания, хрипы и т. д.

Имеются две группы искажений, вносимых усилителем. К первой группе относятся так называемые частотные искажения. Музыкальный звук, звук нашей речи, состоит из суммы большого количества синусоидальных колебаний различной частоты. Усилитель должен каждое такое колебание усилить. Если усилитель не одинаково хорошо усиливает переменные напряжения разной

частоты, то, очевидно, он исказит звук, ибо отдельные составляющие звука будут неодинаково слышны, одни слабее, другие сильнее. Наше ухо это ощущает, как изменение окраски или тембра звука.

Значит, к усилителю предъявляется требование, чтобы он имел одинаковый коэффициент усиления в известных преде-

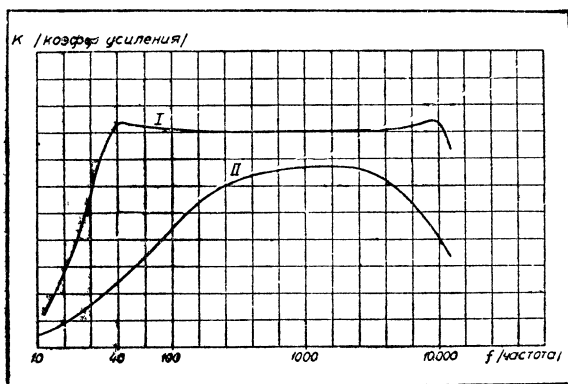


Рис. III,2.

лах частот. От усилителя речи требуется, чтобы он имел постоянный коэффициент усиления в пределах от 250 до 3000 Hz; к усилителю художественных передач предъявляется более жесткое требование — постоянство усиления в пределах от 60 до 8000 Hz.

Если усилитель не удовлетворяет этим требованиям, то он вносит частотные искажения. Кривая, показывающая изменение коэффициента усиления от частоты, называется частотной характеристикой усилителя. На рис. III,2 приведены две частотные характеристики; характеристика I соответствует хорошему кон-

цертному усилителю, характеристика *II* соответствует плохому усилителю; этот усилитель вносит в передачу частотные искажения. При очень сильных частотных искажениях речь становится непонятной; например, если усилитель усиливает только полосу от 900 до 1500 Hz, то речь нельзя будет разобрать, музыкальная передача будет звучать крайне неприятно для уха. Если плохо усиливаются низкие частоты (от 80 до 400 Hz), то передача становится чересчур резкой, голос — шепелявящим, визгливым. Если плохо усиливаются более высокие частоты (от 2000 и выше Hz), то передача становится приглушенной; усиленные речи производят впечатление, будто оратор говорит перед большой пустой бочкой.

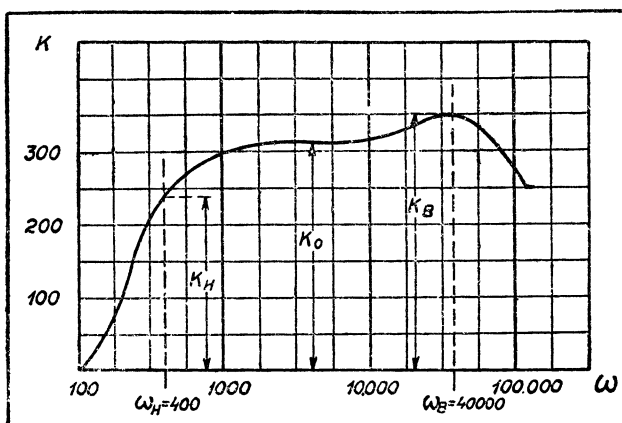


Рис. III,3.

Количественная оценка вносимых усилителем частотных искажений производится следующим образом. На рис. III,3 изображена частотная характеристика какого-то усилителя; по заданию нижний предел полосы частот, на которую рассчитывался этот усилитель, равен $\omega_n=400$ ($f_n=65$ Hz); верхний предел частот равен $\omega_v=40\,000$ ($f_v=6500$). Нас интересует частотная характеристика лишь в этих пределах. Из рис. III,3 мы видим, что на средних частотах (в пределах от $\omega=1000$ до $\omega=10\,000$) коэффициент усиления почти не меняется. Обозначим коэффициент усиления на средних частотах через K_o . Наименьшее значение коэффициента усиления имеет при самой низкой частоте ($\omega_n=400$). Величина частотных искажений на низких частотах характеризуется отношением коэффициента усиления при средних частотах K_o к коэффициенту усиления при $\omega_n=400$, т. е. K_n . Обозначим эту величину через M_n , тогда

$$M_n = \frac{K_o}{K_n}. \quad (3,4)$$

Если величина M_n больше единицы, то мы имеем завал частотной характеристики, если M_n меньше единицы, — мы имеем подъем характеристики. Чем больше M_n отличается от единицы, тем больше частотные искажения. Величину частотных искажений при высших частотах определяем таким же образом

$$M_o = \frac{K_o}{K_o}. \quad (3,5)$$

В нашем примере M_o меньше единицы, ибо мы имеем подъем частотной характеристики в сторону высоких частот.

Величину M , равную отношению коэффициента усиления при средней частоте к коэффициенту усиления при рассматриваемой частоте, мы будем называть коэффициентом частотных искажений. Если величина M для всех усиливаемых частот лежит в пределах от 1 до 1,25, то наше ухо не замечает частотных искажений. Величину M можно так же, как и коэффициент усиления, выражать в неперах или в децибеллах. Если величина M выражена просто как отношение коэффициентов усиления, то коэффициент частотных искажений, соответствующий какой-либо частоте для всего усилителя, равен произведению коэффициентов частотных искажений каждого каскада

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3.$$

Если коэффициент частотных искажений выражен в неперах или децибеллах, то искажения каждого каскада суммируются.

Например: усилитель имеет три каскада; низшая частота равна $\omega_n = 600$. При этой частоте коэффициент частотных искажений

первого каскада равен $M_{n_1} = 1,1$;
 второго каскада равен $M_{n_2} = 1,05$;
 третьего каскада равен $M_{n_3} = 1,2$.

Подсчитываем коэффициент M_n для всего усилителя

$$M_n = M_{n_1} \cdot M_{n_2} \cdot M_{n_3} = 1,1 \cdot 1,05 \cdot 1,2 = 1,39.$$

Прделаем тот же подсчет, выразив коэффициенты частотных выражений в децибеллах.

Имеем для первого каскада $S_n = 20 \lg M_{n_1} = 0,8 \text{ dB}$.
 „ „ второго „ $S_{n_2} = 20 \lg M_{n_2} = 0,4 \text{ dB}$.
 „ „ третьего „ $S_{n_3} = 20 \lg M_{n_3} = 1,6 \text{ dB}$.

Коэффициент частотных искажений всего усилителя равен

$$S_n = S_{n_1} + S_{n_2} + S_{n_3} = 0,8 + 0,4 + 1,6 = 2,8 \text{ dB}.$$

Суммируем сказанное в этом параграфе:

1) Частотные искажения в усилителе имеют место, тогда, когда усилитель имеет коэффициент усиления, меняющийся с частотой.

2) Для передачи речи необходимо иметь постоянный коэффициент усиления в пределах от 250 до 3000 Hz; при художественной передаче полоса частот, подлежащая усилению, находится в пределах от 60 до 8000 Hz.

3) Количественно частотные искажения измеряются коэффициентом частотных искажений, равным отношению коэффициента усиления при средней частоте (800—1000 Hz) к коэффициенту усиления при рассматриваемой частоте.

4) Коэффициент частотных искажений может быть выражен в неперах или в децибеллах.

5) Допустимая величина коэффициента частотных искажений, еще не воспринимаемая ухом, равна 2 dB.

3. Нелинейные искажения в усилителе.

Ко второй группе искажений относятся так называемые нелинейные искажения. Поясним на примере сущность этих искажений. На рис. III, 4 дана динамическая характеристика какой-то лампы; на сетку лампы дано постоянное смещение E_g , рабочая точка находится в точке P ; на сетку подается переменное напряжение с амплитудой U_{mg} .

Ток, который потечет в анодной цепи, изображен на том же рисунке. Форма кривой

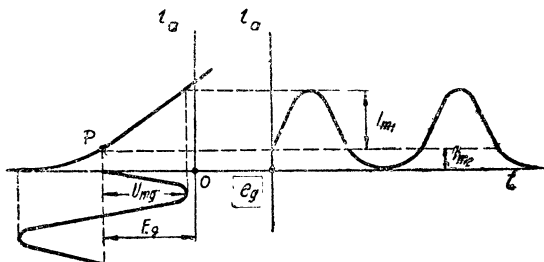


Рис. III, 4.

тока не будет похожа на синусоиду. Это произошло потому, что зависимость между напряжением на сетке и током анода, т. е. наша динамическая характеристика, не прямолинейна, а криволинейна. Эта криволинейность или кривизна особенно резко сказывается влево от рабочей точки; поэтому верхняя половина анодного тока почти синусоида, а нижняя сильно искажена.

Такого рода искажения называются нелинейными искажениями; их причина заключается в том, что ток и напряжение в аноде меняются нелинейно (не по прямой линии) в зависимости от величины напряжения на сетку. Эти искажения меняют форму кривой усиливаемого напряжения. Если искажения очень сильны, то звук становится неприятным, появляются дребезжания, хрипы.

Как оценить количественно эти искажения? Из рис. 3, 4 можно заключить, что нелинейные искажения тем больше, чем

больше срезана нижняя половинка переменного тока в аноде, т. е. чем больше разность между отрезком I_1 и I_2 . Коэффициент нелинейных искажений γ является некоторой отвлеченной дробной величиной, характеризующей количественно эти искажения.

Несинусоидальный ток на рис. III, 4 можно представить в виде суммы синусоидальных токов разной частоты: ток первой гармоники, имеющий ту же частоту ω , что и подаваемое на сетку напряжение U_{m0} ; ток второй гармоники, имеющий частоту 2ω ; ток третьей гармоники с частотой 3ω и т. д.

В нашем случае из всех высших гармоник будет преобладать вторая гармоника.

Под коэффициентом нелинейных искажений будем понимать следующее отношение

$$\gamma = \frac{\sqrt{I_m''^2 + I_m'''^2 + \dots}}{I_m'} \quad (3,6)$$

Здесь I_m' ; I_m'' ; I_m''' — амплитуды соответствующих гармоник тока.

Подсчитать величину коэффициента нелинейных искажений для кривой тока, изображенной на рис. III, 4, можно при помощи следующей приближенной формулы

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{I_{m1} - I_{m2}}{I_{m1} + I_{m2}} \quad (3,7)$$

Здесь I_{m1} и I_{m2} — амплитуда верхней и амплитуда нижней половины тока.

Если $I_{m1} = I_{m2}$, то коэффициент нелинейных искажений равен нулю, т. е. никаких искажений нет ¹⁾. В нашем примере (рис. III, 4) величина $I_{m1} = 3I_{m2}$, поэтому коэффициент нелинейных искажений равен

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{3I_{m1} - I_{m1}}{3I_{m2} + I_{m2}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{4} = \frac{1}{4}.$$

Это недопустимо большая величина. В хороших усилителях коэффициент нелинейных искажений не должен превышать величины 0,05.

Для того чтобы в усилителе свести до минимума коэффициент нелинейных искажений, надо лампу ставить в такой режим, при котором используется лишь наиболее прямолинейная часть динамической характеристики. Далее, усилитель никогда нельзя перегружать, ибо всякая перегрузка ведет к большим нелинейным

¹⁾ Вместо токов I_{m1} и I_{m2} можно в ф-лу (3,5) подставлять амплитуды напряжений на внешней нагрузке, ибо форма кривой тока и напряжения при активной нагрузке одинакова.

искажениям. Перегрузить усилитель можно со стороны входа и со стороны выхода.

Рассмотрим сперва более подробно, к каким последствиям ведет перегрузка со стороны входа. На рис. III, 5 мы имеем ди-

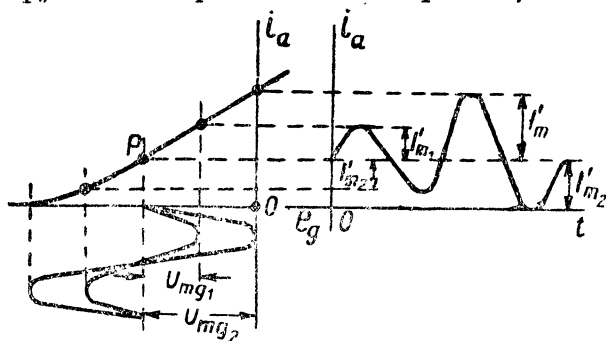


Рис. III.5.

намическую характеристику лампы. Рабочая точка находится в точке P . Если мы даем на сетку лампы переменное напряжение с амплитудой U_{mg1} , то вся работа протекает в пределах прямолинейной части динамической характеристики, усилитель не вносит нелинейных искажений, кривая тока не искажена $I'_m = I_m$, и $\gamma = 0$. Но стоит нам увеличить „раскачку“ на лампу до величины U_{mg2} , как наступят значительные нелинейные искажения; кривая тока искажена; величина I''_m значительно больше, чем I'_m , и γ больше нуля. Если мы еще больше увеличим амплитуду переменного напряжения на сетку, то мы будем заходить на некоторую долю периода в положительную область характеристик. Напряжение на сетке будет больше нуля; благодаря этому появятся токи сетки. А токи сетки, как мы увидим ниже, могут обусловить очень большие нелинейные искажения.

Итак, мы видим, что в усилителе на лампу нельзя давать „раскачку“, большую определенной величины. При перегрузке, т. е. при раскачке, больше допустимой, появляются нелинейные искажения.

Рассмотрим теперь перегрузку со стороны выхода или со стороны анода. Имеем усилитель с трансформаторным выходом, нагруженным на сопротивление R . Схема усилителя дана на рис. III, 6, а динамическая характеристика этого усилителя изображена на рис. III, 7 в виде наклонной прямой I . Динамическая характеристика прямолинейна, поэтому усилитель не вносит нелинейных искажений. Теперь уменьшим сопротивление нагрузки R на выходе усилителя раза в два, в три. Как тогда будет выглядеть динамическая характеристика? Она, очевидно, пойдет гораздо круче и будет иметь вид кривой II на рис. III, 7. Эта кривая не прямолинейна, поэтому появятся значительные нелинейные искажения.

Если бы мы замкнули накоротко вторичную обмотку трансформатора ($R=0$), то динамическая характеристика совпала бы со

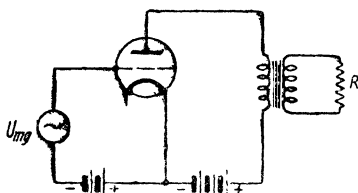


Рис. III, 6.

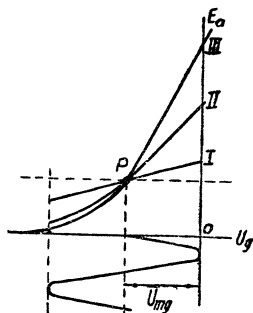


Рис. III, 7.

статической (кривая III) и нелинейные искажения достигли бы наибольшей величины.

Итак мы видим, что в аноде лампы сопротивление нагрузки не должно быть меньше определенной величины. Если мы перегрузим усилитель, т. е. дадим нагрузку в аноде большую нормальной (уменьшим сопротивление R), то появятся нелинейные искажения. В эксплуатации обычно анодная перегрузка влечет за собой и перегрузку со стороны входа. В самом деле, из ф-лы (2,5) главы II мы знаем, что коэффициент усиления усилителя равен

$$K = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a}.$$

При уменьшении R_a падает и K , иными словами, при перегрузке уменьшается коэффициент усиления. Если мощный усилитель, питающий ряд репродукторов, перегрузить, то его коэффициент усиления, а следовательно, и напряжение на выходе уменьшается. Чтобы сохранить прежнюю громкость, начинают прибавлять „раскачку“ на вход усилителя, а это ведет к перегрузке со стороны входа. Усилитель начинает сильно искажать благодаря перегрузке и со стороны выхода и со стороны входа.

Наличие нелинейных искажений в лампе можно сразу определить по показанию амперметра в анодной цепи лампы. Если амперметр во время колебаний не изменяет своих показаний, стрелка стоит на месте и показывает ту же силу тока, что и при отсутствии колебаний, то лампа не вносит искажений. Если стрелка прибора во время работы колеблется, то лампа перегружается и вносит искажения. Указанное правило, как мы увидим ниже, не применимо к пушпульным схемам.

Выясним, почему при перегрузке меняется величина анодного тока. Прибор постоянного тока, стоящий в аноде, регистрирует некоторый средний ток, который через него протекает. Если бы

мы через прибор постоянного тока пропустили неискаженный (синусоидальный) переменный ток, то стрелка его не отклонилась бы, а осталась на нуле, ибо ток, проходящий за первый полупериод в одном направлении, в точности равен току, проходящему за второй полупериод в другом направлении. Следовательно, средний ток за целый период равен нулю.

Если усилитель работает без искажений, то через анод лампы течет постоянный ток $I_{a=}$ и переменный ток с амплитудой I_{ma} ; средняя величина переменного тока за один период равна нулю. Поэтому прибор в аноде показывает и в состоянии покоя и при колебаниях один и тот же ток, равный току покоя $I_{a=}$.

При наличии нелинейных искажений, как это видно из рис. III, 4 и III, 5, переменный анодный ток за первый полупериод больше, чем обратный ток, идущий во второй полупериод. Поэтому амперметр показывает при колебаниях больший ток, чем в состоянии покоя.

Пользуясь этим методом, легко обнаружить неисправность в выходном трансформаторе последнего каскада усилителя (усилителя мощности). Если, например, трансформатор пробит и имеет ряд замкнутых витков, то это равносильно тому, что сопротивление внешней нагрузки очень мало (почти короткое замыкание). Мы имеем перегрузку со стороны выхода; динамическая характеристика приближается к статической, появляются большие нелинейные искажения и стрелка амперметра в анодной цепи начинает резко колебаться.

Суммируем все сказанное в этом параграфе.

1. Нелинейные искажения в усилителе обусловлены нелинейной зависимостью между напряжением на сетке и током анода.

2. Перегрузкой со стороны входа мы называем увеличение амплитуды переменного напряжения на сетку выше определенной величины. Перегрузкой со стороны выхода мы называем уменьшение сопротивления внешней нагрузки выше нормальной величины. И та и другая перегрузка ведут к нелинейным искажениям в усилителе.

3. Колебания стрелки прибора (амперметра) в анодной цепи свидетельствуют о наличии нелинейных искажений.

Задание.

- 1) Усилитель имеет 3 каскада;
коэффициент усиления первого каскада $K_1 = 15$; "
" " " второго каскада $K_2 = 10$;
" " " третьего каскада $K_3 = 4,5$.

Выразить усиление каждого каскада и всего усилителя в неперах и децибеллах.

2) Построить динамические характеристики для УО-104 при $E_g = 300V$; $E_g = -35V$; $U_g = 35V$ и при $R_a = 2000 \Omega$; 1000Ω ; 500Ω . Определить для каждого из этих трех режимов коэффициент нелинейных искажений, вносимых лампой.

ГЛАВА IV.

ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛАМПЫ.

Входным сопротивлением лампы мы называем сопротивление между сеткой и нитью лампы. Как видно из рис. IV, 1, входное

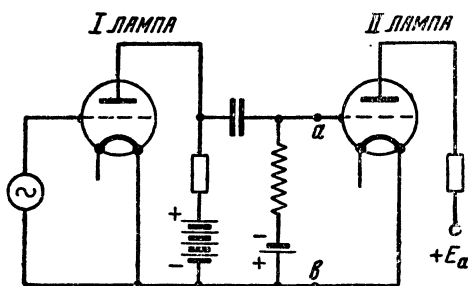


Рис. IV, 1.

сопротивление лампы последующего каскада (лампа II) лежит параллельно анодной нагрузке лампы предыдущего каскада (лампа I).

Мы видели выше, что коэффициент усиления зависит от величины нагрузки; отсюда ясно, что входное сопротивление лампы II может влиять на коэффициент

усиления первого каскада (лампа I).

Чем же определяется сопротивление лампы между сеткой и нитью?

Оно, во-первых, зависит от того, есть ли ток сетки или нет, т. е. от величины смещения, которое дано на сетку; во-вторых, оно определяется внутренними емкостями лампы, — емкостью между сеткой и нитью и между сеткой и анодом.

Сперва мы рассмотрим вопрос о токах сетки и о влиянии их на работу усилителя. Затем будет рассмотрен вопрос о влиянии внутренних емкостей лампы на работу усилителя.

1. Почему токи сетки вносят нелинейные искажения?

Для того чтобы разобраться в поставленном вопросе, посмотрим, каково сопротивление между сеткой и нитью лампы. На рис. IV, 2а дана схема усилителя; мы ищем величину сопротивления между точками *a* и *b*. Из кривой тока сетки, приведенной на рис. IV, 2б, видно, что при амплитуде переменного напряжения на сетку $U_{m\Omega}$ меньшей, чем абсолютная величина отрицательного смещения на сетку E_g , никакого тока в цепи сетки нет. Это значит, что сопротивление сетка-нить (между точками *a* и *b*)

бесконечно велико. Генератор, подающий переменное напряжение на сетку, работает вхолостую (сопротивление нагрузки равно бесконечности); никакой мощности в цепи сетки не поглощается. В данном случае сетку лампы можно питать и весьма маломощным генератором.

Иной становится картина, когда амплитуда напряжения на сетке будет больше, чем величина E_g , например, такой, как U_{mg2} (рис. IV,2б); тогда небольшую часть периода в цепи течет сеточный ток. За этот промежуток времени сопротивление сетканиль становится конечной величиной; так например, в момент

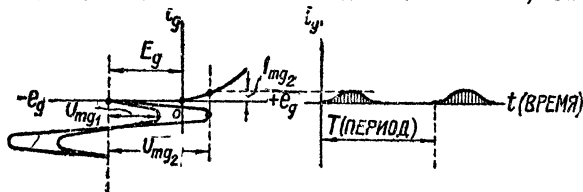


Рис. IV,2б.

Рис. IV,2а.

наибольшего положительного напряжения на сетку (т. е. в точке с) сопротивление сетканиль будет очевидно равно отношению

$$\frac{U_{mg2}}{I_{mg2}}.$$

В этот момент питающий сетку генератор нагружен и отдает в сетку мощность, равную $U_{mg2} \cdot I_{mg2}$. Если генератор маломощный, т. е. имеет большое внутреннее сопротивление, то может оказаться, что сопротивление сетканиль для него будет очень большой нагрузкой и он „сядет“, как это было выяснено в начале II главы.

Поясним это на примере. Пусть внутреннее сопротивление генератора $R_i = 30\,000 \, \Omega$; пусть далее амплитуда электродвижущей силы, развиваемая генератором, равна $U_m = 5 \, \text{V}$; максимальное значение сеточного тока $I_{mg2} = 0,1 \cdot 10^{-3} \, \text{A}$. Схематически все устройство изображено на рис. IV,3.

За отрицательный полупериод, т. е. когда отрицательное напряжение на сетке больше, чем смещение E_g , сеточного тока нет и сопротивление сетканиль равно бесконечности; мы имеем случай холостого хода, поэтому напряжение U_{mg2} на клеммах а—б равно электродвижущей силе генератора. Значительная часть другого полупе-

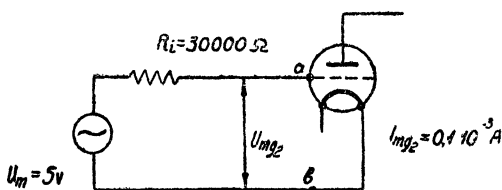


Рис. IV,3.

этому и здесь $U_{mg2} = U_m$. Известную часть периода течет ток сетки, сопротивление между сеткой и нитью становится конечной величиной и напряжение на клеммах $a-b$ будет меньше, чем электродвижущая сила генератора. Напряжение на клеммах сетки e_{g2} определится из следующего равенства

$$e_{g2} = e - i_g R_i. \quad (4,1)$$

Здесь i_g — ток сетки в амперах. Когда ток сетки равен нулю, то второй член пропадает и $e_{g2} = e$.

Наибольшим ток сетки будет в момент, когда напряжение на сетке достигает своего наибольшего значения. Амплитуда электродвижущей силы генератора равна по заданию $U_m = 5$ В; наибольшее значение сеточного тока равно $I_{mg2} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ А. На основании равенства (IV,1) амплитуда напряжения на сетке за положительный полупериод равна

$$U_{mg2}' = 5 - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 30\,000 = 2 \text{ В.}$$

За отрицательный полупериод амплитуда напряжения на сетке равна амплитуде электродвижущей силы, т. е. $U_{mg2}'' = U_m = 5$ В. В результате форма кривой напряжения на сетке будет иметь вид, изображенный на рис. IV,4. Мы видим, что кривая сильно искажена, верхняя половина синусоиды как бы при-

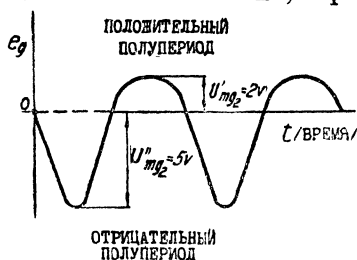


Рис. IV,4.

плюснута. Если сама лампа, на сетку которой мы подаем изображенное на рис. IV,4 напряжение, не вносит дополнительных искажений, то переменная слагающая силы тока в аноде лампы, а, следовательно, и напряжение на внешней нагрузке будет иметь ту же форму кривой. Электродвижущая сила генератора, питающего сетку лампы, синусоидальна, а на выходе усилителя (в аноде лам-

пы) мы имеем искаженную форму кривой; значит, усилитель из-за тока сетки в лампе вносит нелинейные искажения. Коэффициент нелинейных искажений в данном случае равен

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{5 - 2}{5 + 2} = \frac{1}{2} \frac{3}{7} = 0,214.$$

Он значительно больше допустимого.

Если мы еще сильнее перегрузим лампу, т. е. увеличим амплитуду электродвижущей силы (U_m) генератора, питающего сетку лампы, то, очевидно, зайдем еще глубже в положительную область ламповых характеристик, максимальное значение тока возрастет и искажения станут еще более резкими.

Например, пусть, $U_m = 12$ В, а $I_{mg2} = 0,3 \cdot 10^{-3}$ А; тогда $U_{mg2}' = U_m - I_{mg2} R_i = 12 - 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 30\,000 = 3$ В.

Форма кривой напряжения на сетке для данного случая изображена на рис. IV.5. Коэффициент нелинейного искажения равен

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{12 - 3}{12 + 3} = \frac{1}{2} \frac{9}{15} = 0,3.$$

Такие большие искажения получились потому, что генератор, питающий сетку, маломощный—его внутреннее сопротивление велико ($R_i = 30\,000\ \Omega$). Предположим, что мы заменили этот генератор более мощным, имеющим внутреннее сопротивление $R_i = 1000\ \Omega$. Подсчитаем коэффициент нелинейных искажений для этого случая; возьмем первоначальные данные, а именно, $U_m = 5\text{ В}$, $I_{mg2} = 0,1 \cdot 10^{-3}\text{ А}$.

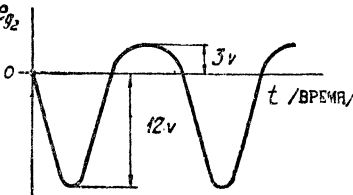


Рис. IV.5.

$$U_{mg2} = 5 - 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 5 - 0,1 = 4,9.$$

Из равенства видно, что U_{mg2} лишь на 0,1 В отличается от $U_m = 5$; очевидно, искажения, будут ничтожны. Действительно, коэффициент нелинейных искажений равен

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{5 - 4,9}{5 + 4,9} = 0,055.$$

Итак, величина нелинейных искажений, вносимых усилителем вследствие токов сетки, зависит исключительно от мощности того генератора, который питает цепь сетки.

В многокаскадном усилителе цепь сетки каждого последующего каскада питается предварительным каскадом, иными словами, питающим сетку генератором является усилительная лампа. Лампы, применяемые в усилителях напряжения, имеют большое внутреннее сопротивление порядка 5000—50 000 Ω . Поэтому ни в коем случае нельзя допускать работу в области токов сетки. Лампу в усилителе можно использовать только в левой (отрицательной) части ее характеристики. Источники электродвижущей силы, подаваемой на сетку первого каскада усиления, обычно еще более маломощны, чем лампа, поэтому лампа первого каскада усиления должна также обязательно работать в левой части, где нет токов сетки.

Обычно ток сетки в лампе возникает не при нуле, а несколько раньше—в пределах от—1 В до 0 напряжения на сетку. Характеристики тока сетки крайне неоднородны у различных экземпляров одного и того же типа лампы. Попадаются экземпляры с очень ранним током сетки, есть экземпляры, у которых ток сетки начинается даже позже нуля, в положительной области. Поэтому следует рекомендовать использовать лампу в первых

каскадах усиления только до—1 V на сетке. Если, например, амплитуда переменного напряжения на сетке равна 2 V, то надо дать на сетку постоянное смещение минимум в 3 V.

В первых каскадах усиления мы обычно в очень небольших пределах используем лампу, поэтому необходимость работать

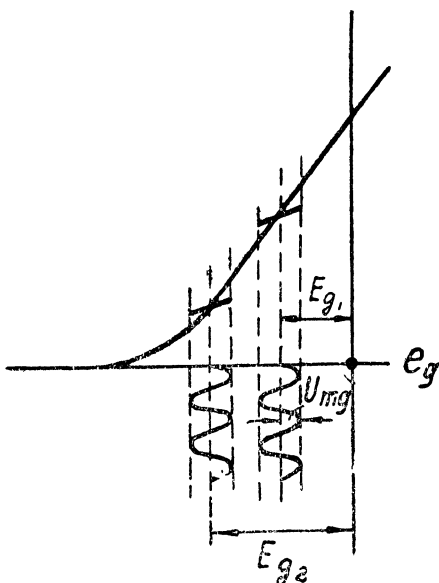


Рис. IV, 6.

только в отрицательной области не является каким-либо дополнительным ограничением, суживающим наши возможности. Если мы, например, усиливаем небольшое напряжение U_g , как это указано на рис. IV, 6, то мы лампу используем в очень небольших пределах; при этом можно выбрать ряд точек на характеристике лампы, где можно с успехом работать; можно дать например, смещение E_{g1} или большее смещение E_{g2} —и тот и другой режим вполне пригоден.

Иначе дело обстоит с усилителем мощности, а иногда и с последним каскадом усилителя напряжения; здесь перед нами стоит задача снять с лампы предельно допустимую мощность. В данном случае необходимость работать только в отрицательной области сильно суживает наши возможности.

Поэтому иногда в усилителе мощности заведомо допускают заход в положительную область (область токов сетки). Для того чтобы избежать при этом нелинейных искажений, надо предварительный усилитель, т. е. тот каскад, который раскачивает усилитель мощности, сделать достаточно мощным. Он должен быть не только усилителем напряжения, но и усилителем мощности.

В мощных усилителях подают иногда смещение на сетку последнего каскада от специального выпрямителя. Выпрямитель можно рассматривать как источник электродвижущей силы постоянного тока, имеющий некоторое внутреннее сопротивление. Если выпрямитель нагружать, то напряжение на выходе его будет падать. Выпрямитель имеет несколько отличную от усилителя нагрузочную характеристику (напряжение на выходе в зависимости от сопротивления на выходе или тока нагрузки). Типовая нагрузочная характеристика выпрямителя дана на рис. IV, 7. Из рисунка видно, что при помощи ненагруженного

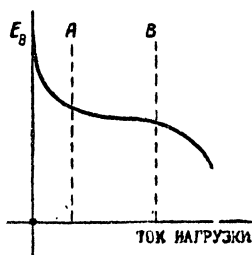


Рис. IV, 7.

выпрямителя давать смещение на сетку нельзя, ибо малейшее появление тока сетки сразу резко снизит напряжение на выходе выпрямителя и изменит смещение на сетку. Лучше всего работать в участке между A и B (рис. IV, 7), где характеристика выпрямителя полого. Для этого надо выпрямитель нагрузить искусственной нагрузкой.

Суммируем все сказанное в этом параграфе.

1. Величина нелинейных искажений, вносимых усилителем благодаря токам сетки, зависит исключительно от мощности генератора, питающего цепь сетки. Чем меньше мощность генератора, т. е. чем больше его внутреннее сопротивление, тем резче проявляются нелинейные искажения, вносимые токами сетки.

2. В усилителях напряжения, особенно в первых каскадах усиления, допускается работа только в отрицательной области ламповых характеристик до -1 В на сетку.

3. В усилителе мощности в некоторых случаях допускается заход в положительную область; при этом предварительный усилитель должен быть достаточно мощным, чтобы не перегружаться током сетки.

4. При подаче смещения на сетку лампы от выпрямителя надо обязательно нагружать выпрямитель искусственной нагрузкой.

2. Внутренняя емкость лампы.

Между сеткой, нитью и анодом лампы имеется некоторая емкость. На рис. IV, 8 изображена лампа и указаны внутренние емкости ее. Имеются три емкости: емкость сетка-нить C_{gf} ; емкость анод-сетка C_{ag} ; емкость анод-нить C_{af} . Величина этих емкостей очень мала, для маломощной усилительной лампы она порядка 3—7 см. У более мощных ламп, имеющих большие размеры анода и сетки, эти емкости больше — порядка 10—15 см.

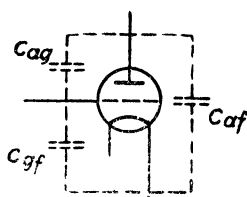


Рис. IV, 8.

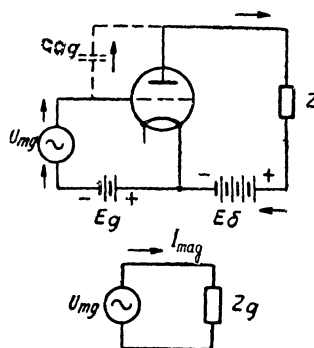


Рис. IV, 9а и б.

Вредной и опасной емкостью является емкость между анодом и сеткой C_{ag} . Через эту емкость осуществляется непосредственная связь между цепью сетки и цепью анода. На рис. IV, 9а

изображен усилитель; в аноде его находится какая-то нагрузка величиной Z ; пунктиром указана емкость анод-сетка C_{ag} . Так как на сетку дано отрицательное смещение E_g , то тока сетки нет и сопротивление между сеткой и нитью равно бесконечности. Выше мы предполагали, что генератор, питающий цепь сетки, работает в этом случае на холостом ходу. Однако на рис. IV,9а видно, что это не совсем так: переменный ток под влиянием напряжения U_{mg} проходит через емкость C_{ag} в цепь анода и, пройдя через батарею (или емкость, ее шунтирующую), возвращается к генератору, питающему сетку; значит, генератор работает не холостую, а имеет определенную нагрузку. Какова же величина этой нагрузки?

Обозначим амплитуду переменного тока, проходящего через емкость, буквой I_{mag} . Очевидно нагрузка Z_g , на которую работает наш генератор, будет равна по закону Ома (рис. IV,9б).

$$Z_g = \frac{U_{mg}}{I_{mag}}. \quad (4,2)$$

Постараемся определить величину тока I_{mag} . Она по закону Ома должна равняться падению напряжения на клеммах конденсатора C_{ag} , т. е. между анодом и сеткой лампы, деленному на сопротивление конденсатора C_{ag} . В главе II (рис. II, 12) мы выяснили, что амплитуда напряжения между анодом и сеткой равна сумме амплитуд переменного напряжения на анод U_{ma} и на сетке U_{mg}

$$U_{mag} = U_{ma} + U_{mg}.$$

Сопротивление емкости C_{ag} для данной угловой частоты ω ($\omega = 2\pi f$) равно $\frac{1}{\omega C_{ag}}$; отсюда находим ток I_{mag}

$$I_{mag} = \left(\frac{U_{mag}}{\frac{1}{\omega C_{ag}}} \right) = \omega C_{ag} (U_{ma} + U_{mg}). \quad (4,3)$$

Подставляем это выражение в формулу (4,2) для Z_g

$$Z_g = \frac{U_{mg}}{\omega C_{ag} (U_{ma} + U_{mg})}.$$

Поделим числителя и знаменателя на величину U_{mg}

$$Z_g = \frac{1}{\omega C_{ag} \left(1 + \frac{U_{ma}}{U_{mg}} \right)}. \quad (4,4)$$

Не трудно видеть, что генератор, питающий цепь сетки, нагружен на некоторую емкость C_0 . Ф-лу (4,4) мы можем представить в следующем виде

$$Z_g = \frac{1}{\omega C_0}.$$

Отсюда емкость $C_0 = C_{ag} \left(1 + \frac{U_{ma}}{U_{mg}} \right)$.

Величина $\frac{U_{ma}}{U_{mg}}$ равна коэффициенту усиления усилителя K .

Окончательно для емкости C_0 мы имеем следующее выражение

$$C_0 = C_{ag} (1 + K). \quad (4,5)$$

Итак, благодаря наличию внутренней емкости C_{ag} генератор, питающий цепь сетки, нагружен на некоторую емкость C_0 , которая может быть значительно больше, чем емкость между сеткой и анодом C_{ag} . Будем емкость C_0 в дальнейшем называть динамической емкостью.

Допустим, что емкость $C_{ag} = 7$ см; коэффициент усиления усилителя равен $K = 10$; тогда динамическая емкость C_0 будет равна

$$C_0 = 7 (1 + 10) = 77 \text{ см.}$$

Кроме того генератор нагружен на емкость сетка-нить (C_{gf}), как это видно из рис. IV,8. Если положить, что $C_{gf} = 5$ см, то общая емкость входного сопротивления лампы будет равна

$$C_0 + C_{gf} = 77 + 5 = 82 \text{ см.}$$

Такого порядка емкости могут уже причинить крупные неприятности. Нелинейных искажений подобно току сетки эта нагрузка вносить не будет, ибо сопротивление емкости C_0 для данной частоты постоянно; но если генератор, питающий цепь сетки, имеет очень большое внутреннее сопротивление, то при более высоких частотах может наступить перегрузка и он „сядет“. Покажем это на примере: пусть внутреннее сопротивление питающего сетку генератора равно

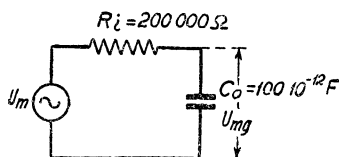


Рис. IV,10.

$$R_i = 200\,000 \text{ } \Omega,$$

его электродвижущая сила равна U_{mg} . Этот генератор, как мы выяснили, нагружен на емкость C_0 (рис. IV,10). Пусть емкость $C_0 = 90$ см или в фарадах $C_0 = 100 \cdot 10^{-12}$ F. Вычислим напряжение на клеммах сетка-нить (или, что то же, на клеммах емкости C_0) для частоты в 500 Hz и для частоты в 10 000 Hz.

При частоте $f = 500$ Hz $\omega = 2 \pi 500 = 3140$; сопротивление емкости C_0 равно

$$Z_g = \frac{1}{\omega C_0} = \frac{1}{3140 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 3\,160\,000 \text{ } \Omega.$$

Искомое напряжение на клеммах емкости C_0 , или, что то же, между сеткой и нитью лампы, определится из следующей формулы ¹⁾

$$U_{mg} = U \frac{Z_g}{\sqrt{Z_g^2 + R_i^2}}. \quad (4,6)$$

Подставляем значение для Z_g

$$U_{mg} = U_m \frac{3.160\,000}{\sqrt{(3.160\,000)^2 + 200\,000^2}} \cong U_m.$$

Итак, практически можно считать, что напряжение на участке сетка-нить лампы равно электродвижущей силе генератора U_{mg} .

Прделаем то же вычисление для $f = 10\,000$;

$$\omega = 2\pi 10\,000 = 62\,800,$$

сопротивление емкости C_0 для этой частоты равно

$$Z_g = \frac{1}{\omega C_0} = \frac{1}{62\,800 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 160\,000 \, \Omega.$$

Напряжение на сетке-нить лампы U_{mg} в этом случае будет равно

$$U_{mg} = U_m \frac{160\,000}{\sqrt{160\,000^2 + 200\,000^2}} = 0,625 \, U_m.$$

Итак, мы видим, что при частоте в $10\,000 \, \text{Hz}$, напряжение на сетке лампы будет на 35% меньше, чем при частоте в

¹⁾ Формула (4,6) выводится следующим образом: сопротивление емкости C_0 в комплексном виде равно $Z_g = \frac{1}{j\omega C_0}$; ток, текущий в цепи, равен

$$\bar{I} = \frac{\bar{U}}{\bar{Z} + R_i}.$$

Искомое напряжение U_{mg} в комплексном виде равно

$$\bar{U}_{mg} = \bar{I} \cdot \bar{Z}_g = U_m \frac{\bar{Z}_g}{R_i + \bar{Z}_g}.$$

Модуль напряжения (U_{mg}) равен

$$U_{mg} = U_m \frac{Z_g}{\sqrt{Z_g^2 + R_i^2}}$$

500 Мг, это значит, что коэффициент усиления усилителя упадет при более высокой частоте, что равносильно частотным искажениям.

Следовательно, наличие динамической емкости C_0 , обусловленной внутренней емкостью анод-сетка C_{ag} , может вызвать частотные искажения в усилителе.

Но не только в этом сказывается вредное действие емкости анод-сетка C_{ag} . Если мы в схеме, изображенной на рис. IV,9, лампу заменим эквивалентным ей генератором с внутренним сопротивлением R_i , то мы получим схему, изображенную на рис. IV,11. Эта схема весьма интересна: в ней работают два генератора, один с электродвижущей силой U_{mg} , и другой с электродвижущей силой μU_{mg} . Может быть такое положение, когда оба генератора отдадут энергию во внешнюю цепь Z , но может быть и такое положение, когда один, более мощный генератор μU_{mg} будет питать другой, менее мощный генератор U_{mg} , т. е. будет происходить перекачка части энергии переменного тока из анодной цепи в цепь сетки. Если часть колебательной энергии из анода переходит в цепь сетки, то при известных условиях колебания могут сами поддерживаться без всякого постороннего источника в цепи сетки; это значит, что усилитель будет генерировать, т. е. работать как генератор с самовозбуждением (см. гл. I, § 1).

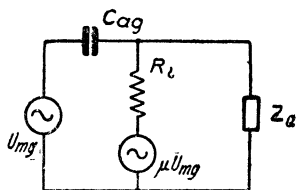


Рис. IV,11.

Из схемы рис. IV,11 непосредственно видно, что при отсутствии емкости C_{ag} (при разомкнутой в этом месте цепи) связь между обоими генераторами (μU_{mg} и U_{mg}) отсутствует, и, следовательно, никакой перекачки энергии из цепи анода в цепь сетки быть не может. Чем больше емкость C_{ag} , тем большая доля энергии может перейти в цепь сетки, тем, следовательно, больше шансов на возникновение генерации.

При помощи математического анализа можно показать, что генерация лампы возникает тогда, когда анодная нагрузка — индуктивная (дрессель или трансформатор).

Как же бороться с возникновением паразитных колебаний в усилителе вследствие емкости C_{ag} ? Прежде всего надо величину этой емкости по возможности свести до минимума. Дело в том, что емкость между анодом и сеткой увеличивается обычно за счет монтажа, особенно при неумелом монтаже. Такой пример показан на рис. IV,12; здесь провод от анода лампы и провод к сетке лампы проложены рядом; ясно, что между этими проводами будет большая емкость, она увеличит емкость C_{ag} . Опыт показывает, что такой неумелый монтаж очень часто ведет к возникновению генерации. При монтаже надо провода анода

класть как можно дальше от сеточных проводов, целесообразно сеточные провода экранировать (т. е. класть их в заземленном экране, например кабелем).

Однако не всегда продуманный монтаж спасает нас от генерации. Иногда емкость внутри лампы достаточна для возникновения самопроизвольных колебаний.

Самым действительным и наиболее простым способом уничтожения генерации является внесение поглотителя энергии в цепь сетки. Между сеткой и нитью лампы включается омическое

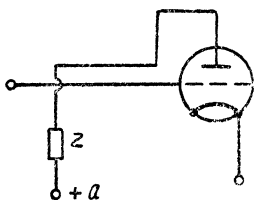


Рис. IV,12.

сопротивление, оно поглощает ту часть энергии генератора, которая перекачивается из анода лампы обратно в цепь сетки. Чем меньше это сопротивление, тем лучше оно действует.

В усилителе на дросселях этим сопротивлением является сопротивление утечки. Если усилитель генерирует, то целесообразно уменьшить сопротивление утечки. В усилителе на трансформаторах необходимо для устойчивой работы шунтировать вторичную обмотку трансформатора сопротивлением, как это показано на рис IV,13. Сопротивление R_w нельзя брать слишком малым, ибо иначе уменьшится коэффициент усиления каскада, питающего сетку.

Математический анализ показывает, что для уничтожения генерации достаточно, если омическое сопротивление в цепи сетки (между сеткой и нитью) будет удовлетворять следующему неравенству

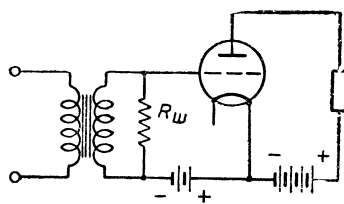


Рис. IV,13.

$$R_w \leq \frac{2}{\mu} \sqrt{\frac{L}{C_{ag}}}. \quad (4,7)$$

Из формулы (4,7) видно, что чем больше коэффициент усиления лампы μ и чем больше внутренняя емкость анод-сетка C_{ag} , тем легче возбуждается усилитель и тем, следовательно, меньшим надо брать сопротивление R_w . L —это самоиндукция дросселя в аноде, или самоиндукция первичной обмотки трансформатора в аноде.

Возьмем пример. Имеется усилитель на дросселях

$$L_a = 400 \text{ Н}, \mu = 25, C_{ag} = 10 \cdot 10^{-12} \text{ Ф (9 см)}.$$

Определим величину R_w по ф-ле (4,7)

$$R_w = \frac{2}{25} \sqrt{\frac{400}{10 \cdot 10^{-12}}} = 500\,000 \text{ }\Omega,$$

Значит сопротивление утечки в цепи сетки надо в данном случае брать меньше, чем полмегма.

Подведем итоги всему сказанному:

1. В лампе имеются три внутренних емкости: емкость сетка-нить C_{gk} ; емкость анод-нить C_{af} ; емкость анод-сетка C_{ag} . Первые две емкости в усилителях низкой частоты значения не имеют (в силу того, что они очень малы) и ими пренебрегают.

2. Емкость анод-сетка C_{ag} вредна тем, что через нее осуществляется связь между цепью сетки и цепью анода. Благодаря этой емкости в цепь генератора, питающего сетку, вносятся добавочная емкостная нагрузка C_o . Динамическая емкость C_o равна

$$C_o = C_{ag}(1 + K).$$

3. Наличие динамической емкости C_o может при большом внутреннем сопротивлении генератора, питающего сетку, вызвать значительные частотные искажения в усилителе (при более высоких частотах).

4. Через емкость C_{ag} может происходить перекачка энергии из цепи анода в цепь сетки, что влечет за собою возникновение генерации.

5. При монтаже надо стремиться свести до минимума емкость между проводами анода и проводами сетки лампы.

6. Наиболее действительный способ уничтожения генерации в усилителе—это шунтирование промежутка сетка-нить лампы омическим сопротивлением.

Контрольные вопросы.

1. От чего зависит величина нелинейных искажений, вносимых током сетки?

2. Почему нельзя давать на сетку смещение от ненагруженного выпрямителя?

3. Чем опасна и вредна емкость анод-сетка C_{ag} ?

4. Как объяснить, что небольшая емкость C_{ag} создает в цепи генератора, питающего сетку, сравнительно большую нагрузку, эквивалентную емкости в несколько раз большей, чем C_a ?

Задания.

1. Цепь сетки лампы питает генератор с электродвижущей силой $U = 14$ V. Работа идет с заходом в положительную область на $+1$ V; характеристика сеточного тока лампы

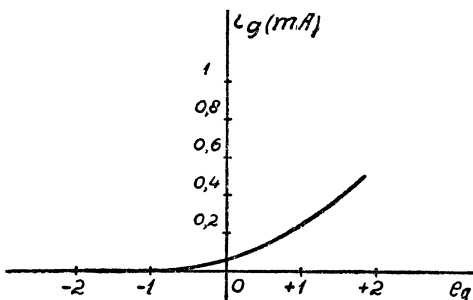


Рис. IV,14.

дана на рис. IV, 14. Требуется определить, какой величины должно быть внутреннее сопротивление генератора, питающего сетку при

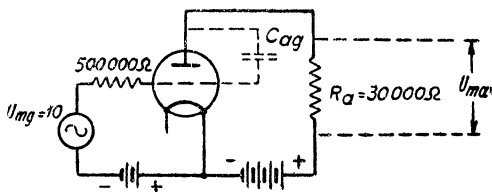


Рис. IV, 15.

условии, что коэффициент нелинейных искажений, вносимых током сетки, не больше чем 0,03.

2. Дана схема, изображенная на рис. IV, 15. Генератор, питающий сетку лампы, имеет внутреннее сопротивление, равное $500\,000\ \Omega$. Емкость $C_{ag} = 10 \cdot 10^{-12}\ \text{F}$;

внутреннее сопротивление лампы $R_i = 10\,000\ \Omega$; коэффициент усиления лампы $\mu = 10$. Внешняя нагрузка $R_a = 30\,000\ \Omega$; электродвижущая сила питающего сетку генератора $U_{mg} = 10\ \text{V}$.

Найти амплитуду переменного напряжения на клеммах внешней нагрузки U_{ma} при частотах $f_1 = 500\ \text{Hz}$; $f_2 = 2000\ \text{Hz}$; $f_3 = 5000\ \text{Hz}$; $f_4 = 8000\ \text{Hz}$.

ГЛАВА V.

УСИЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ С РЕОСТАТНОЙ И ДРОССЕЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ.

1. Причины частотных искажений в усилителях напряжения и способы их устранения.

Основное требование, предъявляемое к усилителю напряжения низкой частоты, заключается, во-первых, в том, чтобы усилитель имел как можно больший коэффициент усиления и, во-вторых, в том, чтобы в пределах заданного диапазона частот (от ω_n до ω_c) коэффициент усиления был по возможности одинаков, т. е. чтобы частотные искажения не превышали заданной нормы (величина M_n и M_c должны быть не больше заданных).

Выясним, в чем заключаются причины частотных искажений в усилителе. В усилителях на дросселях и на трансформаторах в аноде лампы стоит нагрузка, меняющаяся с частотой. Сопротивление самоиндукции, как известно, равно ωL , сопротивление емкости равно $\frac{1}{\omega C}$. Значит, индуктивное сопротивление возрастает

с частотой, а емкостное сопротивление уменьшается с частотой. В усилителе на сопротивлении в состав анодной нагрузки входят не только омические сопротивления, но и емкости (например емкость C_0). Поэтому величина анодной нагрузки в усилителе на сопротивлении также зависит от частоты.

Из предыдущего (глава II) мы знаем, что коэффициент усиления усилителя зависит от величины внешней нагрузки; согласно формуле (2,5) он равен

$$K = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1}. \quad (5,1).$$

Здесь $\alpha = \frac{R_a}{R_i}$, т. е. отношение внешнего сопротивления к внутреннему сопротивлению лампы (на рис. II, 8 была дана кривая зависимости коэффициента усиления от α).

Из сказанного ясна причина частотных искажений в усилителе: внешняя (анодная) нагрузка усилителя меняется с частотой, а следовательно, меняется и коэффициент усиления.

Какими методами можно уменьшить частотные искажения в усилителе?

Существуют два основных метода. Первый метод заключается в том, что внешнюю нагрузку делают по возможности не зависящей от частоты. Это можно достигнуть, если в анодной цепи

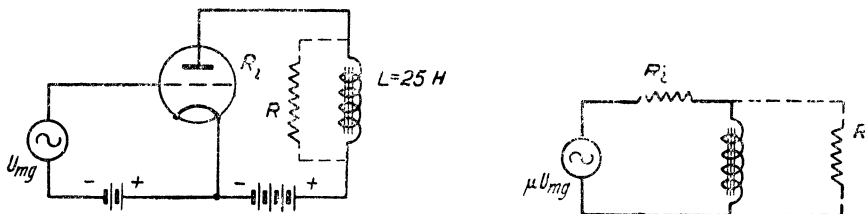


Рис. V,1.

параллельно нагрузке включить достаточно малое омическое сопротивление. Поясним это на примере: нам дан усилитель с дросселем в анодной цепи (на рис. V,1 слева дана принципиальная, справа—эквивалентная схема); самоиндукция дросселя равна $L = 25$ H, внутреннее сопротивление лампы $R_i = 20\,000\ \Omega$. Выясним, как меняется коэффициент усиления усилителя в зависимости от частоты. Для частоты $\omega_k = 400$, сопротивление дросселя равно $\omega_k L = 400 \cdot 25 = 10\,000\ \Omega$; величина

$$\alpha = \frac{\omega_k L}{R_i} = \frac{10\,000}{20\,000} = \frac{1}{2}$$

Коэффициент усиления при индуктивной нагрузке равен ¹⁾

1) Коэффициент усиления при индуктивной или емкостной нагрузке равен комплексной величине

$$\bar{K} = \mu \frac{\bar{Z}_a}{R_i + \bar{Z}_a},$$

здесь \bar{Z}_a — анодное сопротивление; при индуктивной нагрузке $\bar{Z}_a = j\omega L$; при емкостной нагрузке $\bar{Z}_a = \frac{1}{j\omega C}$.

Модуль коэффициента усиления равен

$$K = \mu \frac{Z_a}{\sqrt{R_i^2 + Z_a^2}}.$$

Здесь Z_a — модуль анодного сопротивления. Делим числителя и знаменателя на R_i и обозначаем через

тогда
$$\alpha = \frac{Z_a}{R_i},$$

$$K = \mu \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}}.$$

$$K = \mu \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 1}}, \quad (5,2)$$

подставляя, получим $K_n = \mu \frac{0,5}{\sqrt{0,5^2 + 1}} = 0,45 \mu$.

Для средней частоты $\omega = 4000$ сопротивление дросселя равно

$$\omega L = 4000 \cdot 25 = 100\,000 \text{ } \Omega; \alpha = \frac{100\,000}{20\,000} = 5,$$

и коэффициент усиления равен

$$K_o = \mu \frac{5}{\sqrt{5^2 + 1}} = 0,98 \mu.$$

Завал на низких частотах равен

$$M_n = \frac{K_o}{K_n} = \frac{\mu \cdot 0,98}{\mu \cdot 0,45} = 2,2.$$

Завал на низких частотах получился благодаря тому, что сопротивление внешней нагрузки ωL резко меняется с частотой: от 10 000 Ω до 100 000 Ω . Включим параллельно самоиндукции L сопротивление R , величина которого меньше, чем $\omega_n L$ — скажем $R = 5000 \text{ } \Omega$. Общее сопротивление внешней нагрузки будет складываться из сопротивлений двух параллельных ветвей, так как величина R при всех частотах меньше, чем ωL , то очевидно общее сопротивление будет в основном определяться ветвью R и, следовательно, нагрузка будет мало меняться с частотой.

Общее сопротивление переменному току параллельно включенных самоиндукций и омического сопротивления можно подсчитать по следующей формуле

$$Z = \frac{R \cdot \omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}.$$

Применяя эту формулу в нашем случае, получим для частоты $\omega_n = 400$

$$Z_n = \frac{5000 \cdot 10\,000}{\sqrt{5000^2 + 10\,000^2}} = 4500 \text{ } \Omega.$$

Для средней частоты $\omega_o = 4000$, получим

$$Z_o = \frac{5000 \cdot 100\,000}{\sqrt{5000^2 + 100\,000^2}} = 5000 \text{ } \Omega.$$

Сопоставляя результаты, мы видим, что величина Z почти не меняется с частотой; при $\omega_n = 400$, $Z_n = 4500$, а при $\omega_o = 4000$, $Z_o = 5000 \text{ } \Omega$.

Если мы теперь подсчитаем завал на низких частотах, то увидим, что он значительно меньше.

Определяем величину α для нижнего предела и для средних частот.

$$\alpha_n = \frac{Z_n}{R_i} = \frac{4500}{20\,000} = 0,225; \quad \alpha_o = \frac{Z_o}{R_i} = \frac{5000}{20\,000} = 0,25.$$

Соответственно коэффициенты усиления будут равны ¹⁾:

$$K_n = \mu \frac{\alpha_n}{\alpha_n + 1} = \mu \frac{0,225}{0,225 + 1} = 0,183 \mu;$$

$$K_o = \mu \frac{\alpha_o}{\alpha_o + 1} = \mu \frac{0,25}{0,25 + 1} = 0,2 \mu.$$

Завал на низких частотах будет равен

$$M_n = \frac{K_o}{K_n} = \frac{0,2 \mu}{0,183 \mu} = 1,09.$$

Итак, мы значительно уменьшили величину частотных искажений путем шунтирования внешней нагрузки небольшим омическим сопротивлением ($R = 5000 \Omega$). Это улучшение достигнуто за счет значительного уменьшения коэффициента усиления.

Без шунта $K_o = 0,98 \mu$; при наличии шунта $K_o = 0,2 \mu$, значит, коэффициент усиления уменьшился в $\frac{0,98}{0,2} = 4,9$ раза. Частотная характеристика для обоих случаев изображена на рис. V, 2.

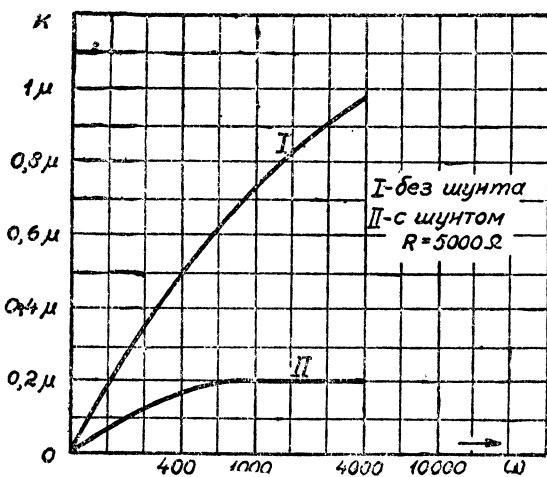


Рис. V, 2.

Таков первый метод. Второй метод борьбы с частотными искажениями основан на следующем. Кривая зависимости коэффициента усиления от величины внешней нагрузки сперва, при малых значениях α , очень круто нарастает, затем при больших значениях α , она идет почти горизонтально. При значениях $\alpha = 4$, $\alpha = 10$ и больше коэффициент усиления почти не меняется. Этим свойством кривой и можно воспользоваться, чтобы свести до минимума частотные искажения.

¹⁾ В данном случае преобладает активная составляющая внешней нагрузки $R_{ли}$, поэтому можно, допуская весьма небольшую ошибку, коэффициент усиления подсчитывать по формуле для активной нагрузки (V, 1).

Для этого надо так подобрать величины, чтобы при самых малых значениях сопротивления внешней нагрузки величина α все же была бы больше, чем 3—4. Иллюстрируем это тем же примером, который мы рассматривали выше (рис. V, 1). Наименьшее значение для сопротивления нагрузки ωL мы имеем при низшей частоте, т. е. при $\omega_n = 400$; выберем самоиндукцию такой величины, чтобы при $\omega_n = 400$, α было бы равно трем. Внутреннее сопротивление R_i попрежнему равно 20 000 Ω

$$\alpha = \frac{\omega_n L}{R_i};$$

$$3 = \frac{400 L}{20\,000}; \quad L = 150 \text{ Н.}$$

Если мы в анод нашей лампы поставим самсиндукцию в 150 Н, то завала на низких частотах почти не будет. Подсчитаем так же, как и раньше, величину $M_n = \frac{K_o}{K}$

$$\alpha_n = 3; \quad \alpha_o = \frac{4000 \cdot 150}{20\,000} = 30;$$

$$K_n = \mu \frac{\alpha_n}{\sqrt{\alpha_n^2 + 1}} = \mu \frac{3}{\sqrt{3^2 + 1}} = 0,95 \mu;$$

$$K_o = \mu \frac{\alpha_o}{\sqrt{\alpha_o^2 + 1}} = \mu \frac{30}{\sqrt{30^2 + 1}} \cong \mu;$$

$$M_n = \frac{K_o}{K_n} = \frac{\mu}{0,95\mu} = 1,05.$$

Итак мы видим, что завал на низких частотах очень мал. При этом коэффициент усиления выше, чем в первом случае.

Применяя тот или другой из указанных методов, можно в усилителе на сопротивлениях и в усилителе на дросселях уменьшать частотные искажения. В усилителе на трансформаторах дело обстоит несколько сложнее, но и там можно правильным подбором величин придать желательную форму частотной кривой—более подробно об этом будет сказано в главе VI.

Подведем итоги сказанному:

1. Причина частотных искажений в усилителе заключается в том, что сопротивление анодной нагрузки усилителя меняется с частотой, а коэффициент усиления зависит от величины анодной нагрузки.

2. Существует два метода борьбы с частотными искажениями: первый метод заключается в шунтировании анодной нагрузки малым омическим сопротивлением; при этом значительно снижается величина коэффициента усиления усилителя. Второй

метод заключается в таком подборе величин, чтобы при всех частотах величина α была больше 3—4.

2. Усилитель на сопротивлениях и его расчет.

На рис. V,3 изображен двухкаскадный усилитель на сопротивлениях. На рис. V,4 дана эквивалентная схема первого каскада.

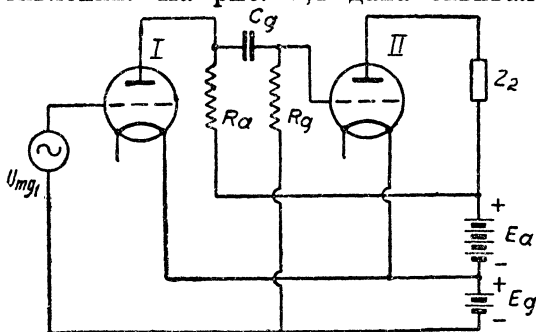


Рис. V,3.

Анодная нагрузка первого каскада состоит из следующих элементов: 1) анодное сопротивление R_a , переходная емкость C_g и сопротивление утечки R_g , 3) динамическая емкость лампы второго каскада C_o ; если коэффициент усиления второго каскада равен K_2 , а емкость анод-сетки равна C_{ag} , то $C_o = C_{ag} (1 + K_2)$.

Сопротивления батарей (E_a и E_g) переменному току настолько малы по сравнению с сопротивлениями R_a и R_g , что в эквивалентной схеме мы ими пренебрегаем.

Переменное напряжение U_{g2} на сетку второй лампы мы снимаем с сопротивления R_g , это напряжение меньше, чем переменное напряжение на концах анодного сопротивления R_a , ибо часть напряжения падает на переходной емкости C_g . Чем меньше сопротивление емкости C_g по сравнению с сопротивлением R_g , тем меньшая доля напряжения теряется на емкости C_g . Сопротивле-

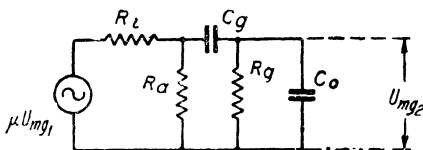


Рис. V,4.

ние емкости C_g равно $\frac{1}{\omega C_g}$; оно тем меньше, чем больше частота, поэтому наибольшее падение напряжения на емкости C_g будет при самой низкой частоте ω_k . При более высоких частотах падением напряжения на емкости C_g можно пренебречь.

Емкость C_o , находящаяся также в цепи анодной нагрузки, оказывает в противоположность емкости C_g наибольшее влияние при высших частотах. Емкость C_o , как мы видели в предыдущей главе, порядка 90 см (или $100 \cdot 10^{-12}$ F). Для низкой частоты (например $\omega_k = 400$) емкость C_o имеет очень большое сопротивление

$$\frac{1}{\omega_k C_o} = \frac{1}{400 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 25\,000\,000 \, \Omega.$$

Сопротивления, лежащие параллельно этой емкости, а именно— R_g и R_a , бывают значительно меньше, порядка нескольких сот или даже десятков тысяч ом; поэтому емкость C_o при низших частотах не имеет никакого влияния на величину внешней нагрузки, а следовательно, и на коэффициент усиления. При средних частотах, порядка $\omega = 5000 - 6000$, сопротивление емкости C_o еще настолько велико, что оно не влияет на коэффициент усиления. Только при высших частотах ($\omega = 30\,000 - 60\,000$) сопротивление емкости C_o может оказаться такого же примерно порядка, как и сопротивление R_a и R_g , тогда емкость C_o будет заметно уменьшать сопротивление внешней нагрузки и, следовательно, снижать коэффициент усиления.

Приведенные соображения относительно влияния емкостей C_i и C_o дают нам возможность упростить эквивалентную схему рис. V,4. Для самых низких частот мы имеем схему, изображенную на рис. V,5. Она отличается от схемы рис. V,4 тем, что в ней отсутствует емкость C_o .

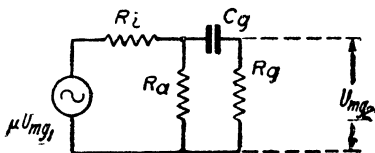


Рис. V,5.

Для самых высоких частот мы имеем схему рис. V,6, в ней мы пренебрегаем падением напряжения на конденсаторе C_g . Наконец для довольно широкой полосы средних частот мы имеем схему рис. V,7, в ней отсутствуют обе емкости (C_g и C_o).

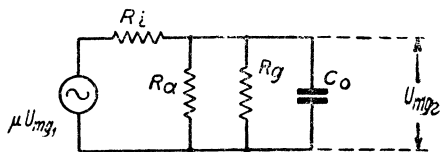


Рис. V,6.

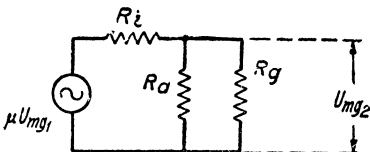


Рис. V,7.

Сопротивление анодной нагрузки для средних частот равно

$$R = \frac{R_a R_g}{R_a + R_g}. \quad (5,3)$$

Сопротивление утечки R_g , как увидим ниже, берут раз в 5—20 больше, чем анодное сопротивление. Поэтому можно считать, что $R \cong R_a$. Анодная нагрузка при средних частотах не меняется с частотой, поэтому коэффициент усиления K будет постоянен; он равен для средних частот следующей величине

$$K_o = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1}; \text{ здесь } \alpha = \frac{R_a}{R_i}.$$

При низших частотах часть напряжения, как мы видели, будет падать на конденсаторе C_g ; поэтому коэффициент усиления при

низшем пределе частот K_n будет меньше, чем при средних частотах K_o . Завал равен по предыдущему

$$M_n = \frac{K_o}{K_n}.$$

Чем меньше падение напряжения на конденсаторе C_g , тем меньше завал M_n . Для того чтобы падение на C_g было мало, надо, чтобы R_g было велико, а $\frac{1}{\omega_n C_g}$ мало или C_g велико.

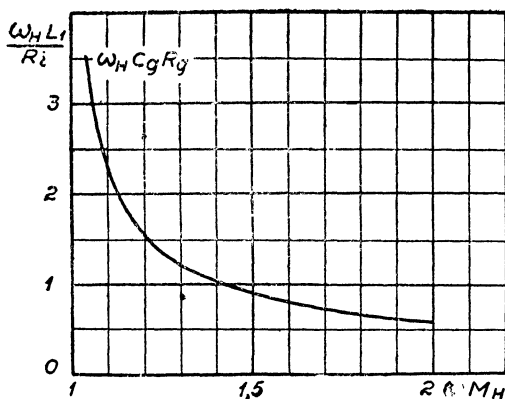


Рис. V,8.

Отсюда можно заключить, что завал тем меньше, чем больше R_g и чем больше C_g . На рис. V,8 дана зависимость между величиной завала M_n и произведением $\omega_n R_g C_g$ ¹⁾. Этим графиком можно пользоваться при расчете. Например имеется задание, чтобы при частоте $\omega_n = 400$ завал M_n был не больше 1,1. По графику V, 8 определяем для $M_n = 1,1$ величину $\omega_n R_g C_g = 2,3$.

$$\text{Произведение } R_g C_g = \frac{2,3}{\omega_n} = \frac{2,3}{400} = 0,00575.$$

1) Величину M_n определяем следующим образом. Из схем рис. V,5 и V,7 видно, что коэффициент усиления при средних частотах K_g так будет относиться к коэффициенту усиления при низшей частоте K_g как сумма сопротивлений емкости C_g и утечки R_g относится к сопротивлению R_g

$$\frac{K_o}{K_n} = \frac{\frac{1}{j\omega_n C} R_g}{R_g} = \frac{1}{j\omega_n C_g R_g} + 1.$$

Модуль этого отношения равен

$$M_n = \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_n C_g R_g}\right)^2 + 1}.$$

Отсюда величина $\omega_n C_g R_g$ равна

$$\omega_n C_g R_g = \frac{1}{\sqrt{M_n^2 - 1}}. \quad (5,4)$$

Эта зависимость дана графически на рис. (V,8).

Если $R_g = 500\,000\ \Omega$, то емкость C_g должна быть равна

$$C_g = \frac{0,0055}{500\,000} = 11\,000 \cdot 10^{-12}\ \text{F},$$

или емкость $C_g = 10\,000\ \text{см}$.

Если емкость C_g или сопротивление R_g будут взяты больше, то завал M_n будет меньше заданного и частотная характеристика будет лучше требуемой. Кривая рис. V,8 дает нам минимальное значение для C_g , R_g , ниже которого спускаться нельзя.

Итак, путем правильного подбора емкости C_g и утечки R_g мы можем завал частотной характеристики на низких частотах уменьшить до любой требуемой величины.

Обратимся к схеме на рис. V,6 для высших частот. Как уже указывалось выше, сопротивление емкости C_o уменьшает общее сопротивление нагрузки и этим снижает коэффициент усиления. Так как мы не можем уменьшить емкость C_o ниже известного предела, то в данном случае применим лишь первый метод улучшения частотной характеристики, разобранный нами в предыдущем параграфе. Для уменьшения завала на высоких частотах M_o надо сопротивление R_a или R_g снизить до такой степени, чтобы оно было меньше сопротивления емкости $\frac{1}{\omega_o C_o}$ при выс-

шем пределе частот ω_o .

Уменьшая сопротивление R_a или R_g , мы снижаем коэффициент усиления. Значит улучшение частотной характеристики на высоких частотах возможно лишь за счет снижения коэффициента усиления K_o .

Математический анализ схемы на высоких частотах дает нам следующее неравенство, которое должно быть соблюдено ¹⁾

$$\frac{1}{\alpha} \geq \frac{R_i \omega_o C_o}{\sqrt{M_o^2 - 1}} - 1. \quad (5,5)$$

¹⁾ Коэффициент частотных искажений для высшей частоты M_o может быть определен следующим образом. Коэффициент усиления для средних частот равен

$$K_o = \mu \frac{R}{R_i + R} = \mu \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R}}.$$

Коэффициент усиления для высших частот (рис. V, 6) равен

$$\bar{K}_o = \mu \frac{\bar{Z}_a}{R + \bar{Z}_a} = \mu \frac{1}{1 + \frac{R_i}{\bar{Z}_a}}.$$

Чем больше C_o , ω_s и R_i и чем меньше допустимый завал M_s , тем больше должно быть отношение $\frac{1}{\alpha}$, а следовательно, тем меньше должна быть величина $\alpha = \frac{R_a}{R_i}$. Величина C_o обычно порядка 100—150 см; допустимый завал на один каскад обычно бывает не больше $M_s = 1,15$. На рис. V,9 дана для этих значений C_o и M_s зависимость между допустимой величиной α и произведением $R_i \omega_s$. Например: дан высший предел частот $\omega_s = 60\,000$; внутреннее сопротивление лампы равно $R_i = 100\,000 \text{ } \Omega$. Надо найти допустимую величину α . Произведение

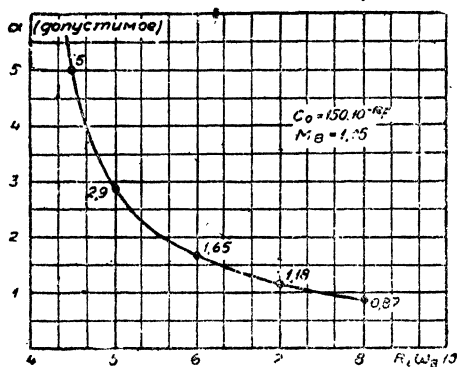


Рис. V,9.

$$\omega_s \cdot R_i = 60\,000 \cdot 100\,000 = 6 \cdot 10^9.$$

По кривой рис. V,9 находим для этого значения $\omega_s R_i$ величину $\alpha = 1,65$. Значит, α

Здесь \bar{Z}_a — сопротивление внешней нагрузки, состоящее из сопротивления R и параллельно лежащей емкости C_o

$$\frac{1}{\bar{Z}_a} = \frac{1}{R} + j\omega_s C_o.$$

Вычисляем отношение $\frac{K_o}{K_s}$

$$\frac{K_o}{K_s} = \frac{1 + \frac{R_i}{\bar{Z}_a}}{1 + \frac{R_i}{R}} = \frac{1 + \frac{R_i}{R} + j\omega_s C_o R_i}{1 + \frac{R_i}{R}} = 1 + j \frac{\omega_s C_o R_i}{1 + \frac{R_i}{R}}.$$

Модуль этой величины равен M_s

$$M_s = \sqrt{1 + \frac{(\omega_s C_o R_i)^2}{\left(1 + \frac{R_i}{R}\right)^2}}.$$

Заменяем отношение $\frac{R_i}{R}$ через $\frac{1}{\alpha}$ и определяем из полученного равенства величину $\frac{1}{\alpha}$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{R_i \omega_s C_o}{\sqrt{M_s^2 - 1}} - 1. \quad (5,5)$$

не должно быть больше, чем 1,65 (меньше оно, разумеется, может быть). Анодное сопротивление определяется из формулы $\alpha = \frac{R_a}{R_i}$

$$R_a = \alpha \cdot R_i = 1,65 \cdot 100\,000 = 165\,000 \text{ } \Omega.$$

Коэффициент усиления при средних частотах равен

$$K_o = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1} = \mu \frac{1,65}{1,65 + 1} = 0,62 \text{ } \mu.$$

При этом завал на частоте $\omega_s = 60\,000$ равен $M_s = 1,15$, ибо график рис. V, 9 составлен именно для этого завала. Если бы мы величину α взяли меньше, чем 1,65, то мы получили бы меньший завал, но и меньший коэффициент усиления.

Если емкость C_o больше или меньше, чем $150 \cdot 10^{-12}$ F, то можно также пользоваться графиком рис. V, 9 для определения α , при этом надо только при вычислении величины $\omega_s R_i$ помножить ее на отношение $\frac{C_o}{150 \cdot 10^{-12}}$. Допустим, например, что

в разобранном нами случае величина $C_o = 180 \cdot 10^{-12}$ F.

Тогда мы получим следующий результат

$$\omega_s \cdot R_i \frac{C_o}{150 \cdot 10^{-12}} = 60\,000 \cdot 10\,000 \frac{180 \cdot 10^{-12}}{150 \cdot 10^{-12}} = 7 \cdot 2 \cdot 10^9.$$

По графику рис. V,9 находим α для этого значения $\omega_s R_i$; $\alpha = 1$; так как емкость C_o возросла, то величина допустимого α стала меньше.

На основе приведенных соображений и, пользуясь графиками рис. V,8; V,9 или формулой (5,4), можно произвести расчет одного или нескольких каскадов усиления.

В отношении режима лампы возможны два случая работы.

Первый случай—это работа на прямолинейном участке статической характеристики лампы, динамическая характеристика при этом также прямолинейна, поэтому нелинейные искажения отсутствуют. Внутреннее сопротивление лампы R_i на этом участке характеристики наименьшее, а это выгодно для уменьшения завала на высоких частотах, что видно из формулы (5,4) и из рис. V,9. Основной и очень крупный недостаток работы на прямолинейном участке заключается в том, что для питания анода необходима анодная батарея довольно высокого напряжения (несколько сот вольт) при значительном анодном токе.

Второй случай—это работа на нижнем сгибе статической характеристики. При достаточно большом внешнем сопротивлении динамическая характеристика настолько пологая и, несмотря на

кривизну статической характеристики, настолько мало отличается от прямой линии, что нелинейные искажения, вносимые лампой, ничтожно малы. При этом режиме получается значительная экономия в расходовании анодной батареи, ибо анодный ток покоя гораздо меньше, чем в первом случае; напряжение батареи в данном случае также значительно меньше. Основным недостаток этого режима заключается в том, что на нижнем сгибе лампа имеет большое внутреннее сопротивление R_i , а это ведет к ухудшению частотной характеристики на высоких частотах.

Для примера произведем расчет одного каскада усиления на лампе, характеристика и данные которой приведены на рис. V,10.

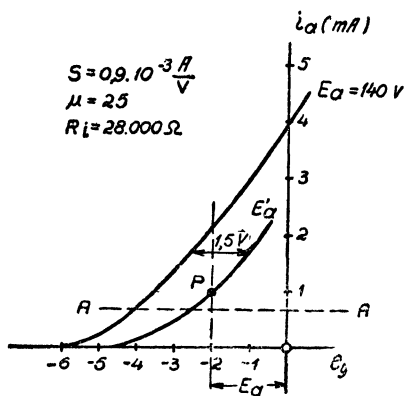


Рис. V,10

Схема дана на рис. V,3. Требования к усилителю следующие: нижний предел частот $\omega_n = 300$; завал $M_n = 1,15$. Высший предел частот $\omega^* = 100\,000$; завал $M_s = 1,15$. Амплитуда напряжения на сетке равна $U_g = 1$ V. Введем сперва расчет для первого случая — для работы на прямолинейном участке характеристики. Внутреннее сопротивление лампы на прямолинейном участке равно $R_i = 28\,000 \Omega$. Определим прежде всего допустимую величину α . Произведение $R_i \omega_s = 28\,000 \times 100\,000 = 2,8 \cdot 10^9$. Из рис. V,9

видно, что для этой величины $R_i \omega_s$ допустимо любое α .

Приступаем к выбору режима. Так как $U_{m0} = 1$, то целесообразно взять смещение, равное $E_g = -2$ V, тогда максимальное напряжение на сетке не будет превышать -1 V и токов на сетке не будет. На рис. V,10 дана характеристика для $E_a = 140$ V. Чтобы не повышать напряжения анодной батареи, мы должны выбрать минимально допустимое напряжение на аноде; нижний загиб начинается при анодном токе в $0,66$ mA (рис. V,10, линия AA). Выберем величину тока покоя немного большую, $I_{a0} = 1$ mA. Проведем через точку, соответствующую этому анодному току и смещению на сетку $E_g = -2$ V (точка P), статическую характеристику. Эта характеристика соответствует некоторому меньшему анодному напряжению E'_a ; она сдвинута вправо по отношению к первой на $1,5$ V; поэтому

$$E_a - E'_a = 1,5 \cdot \mu \cong 38 \text{ V},$$

отсюда

$$E'_a = E_a - 38 = 140 - 38 \cong 100 \text{ V}.$$

Итак, мы остановились на анодном напряжении в 100 V. Теперь выберем α ; с точки зрения коэффициента усиления усилителя

надо величину α брать как можно больше. Однако, чем больше мы берем α , тем больше величина анодного сопротивления $R_a = \alpha R_i$, а чем больше R_a , тем больше должно быть напряжение анодной батареи E_s , ибо оно равно

$$E_s = E'_a + R_a I_{a-}.$$

Поэтому α берут не больше 3—4; при дальнейшем увеличении α коэффициент усиления возрастает не на много. Возьмем $\alpha = 3$; тогда $R_a = 3 \cdot 28\,000 \cong 85\,000 \, \Omega$. Потребное напряжение батареи равно

$$E_s = 100 + 85\,000 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 185 \, \text{V}.$$

Коэффициент усиления на средних частотах равен

$$K_o = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1} = 25 \frac{3}{3 + 1} \cong 19.$$

Исходя из завала на низких частотах $M_n = 1,15$, определяем по кривой рис. V, 8 величину $\omega_n R_g C_g = 1,8$. При $\omega_n = 300$

$$R_g C_g = \frac{1,8}{300} = 0,006.$$

Выбираем R_g в 6 раз больше, чем R_a , тогда $R_g = 6 \cdot 85\,000 = 500\,000 \, \Omega$, емкость C_g должна быть не меньше следующей величины

$$C_g \geq \frac{0,006}{500\,000} = 12\,000 \cdot 10^{-12} \, \text{F}.$$

Выбираем емкость C_g в 20 000 см. Итак, мы получили следующие данные:

$$\begin{aligned} E_s &= 185 \, \text{V}; \\ I_{a-} &= 1 \cdot 10^{-3} \, \text{A}; \\ K &= 19; \\ R_a &= 85\,000 \, \Omega; \\ R_g &= 500\,000 \, \Omega; \\ C_g &= 20\,000 \, \text{см}. \end{aligned}$$

Завал на низких и на высоких частотах меньше заданного.

Посмотрим теперь, что у нас получилось бы, если бы мы захотели работать на нижнем сгибе статической характеристики. Пусть напряжение анодной батареи будет равно $E_s = 140 \, \text{V}$; зададимся анодным сопротивлением $R_a = 200\,000 \, \Omega$. Построим для этого случая динамическую характеристику так, как это

было указано в главе II. На рис. V,11 дана статическая характеристика той же лампы и построена динамическая характеристика для $R_a = 200\,000\ \Omega$.

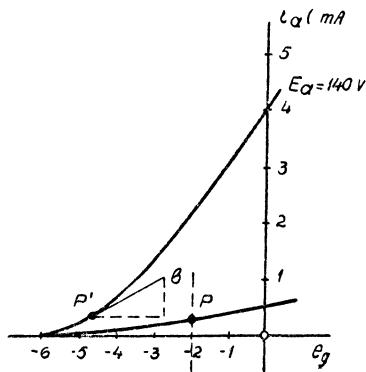


Рис. V,11.

Выберем так же, как и раньше, смещение $E_g = -2\text{ V}$; тогда рабочая точка будет лежать в точке P , что соответствует точке P' статической характеристики. В этой точке крутизна (наклон касательной $в P'$) значительно меньше, чем на прямолинейном участке.

Крутизна $S = 0,33 \cdot 10^{-3}\text{ A/V}$; внутреннее сопротивление в этой точке равно

$$R_i = \frac{\mu}{S} = \frac{25}{0,33 \cdot 10^{-3}} = 75\,000\ \Omega;$$

следовательно,

$$\alpha = \frac{R_a}{R_i} = \frac{200\,000}{75\,000} = 2,7;$$

коэффициент усиления равен

$$K_o = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1} = 25 \frac{2,7}{2,7 + 1} = 18.$$

Сравним результаты с ранее полученными данными.

Напряжение анодной батареи $E_a = 140\text{ V}$, т. е. меньше, чем в первом случае; ток покоя $I_{a_0} = 0,33 \cdot 10^{-3}$ или в три раза меньше, чем в первом случае; коэффициент усиления $K_o = 18$, почти такой же, как и в первом случае. Казалось бы, что этот режим почти во всех отношениях лучше. Но посмотрим, что будет с завалом на высоких частотах. Величина $\omega_s \cdot R_i = 100\,000 \cdot 75\,000 = 7,5 \cdot 10^9$. По графику рис. V,9 для этой величины $\omega_s \cdot R_i$ α должно быть около единицы, а у нас $\alpha = 2,7$, следовательно, завал на высоких частотах будет значительно больше допустимого. Его можно подсчитать по формуле (5,4). Он равен $M_s = 1,35$. Итак, второй вариант не годится из-за большого завала на высоких частотах.

При подсчете мы произвольно выбрали величину R_a ; возможно, что при меньшем R_a —порядка $150\,000\ \Omega$ —мы получили бы вполне удовлетворительные результаты. Для того чтобы наиболее рационально рассчитать усилитель, надо просчитать целый ряд вариантов и выбрать из них наиболее удачный.

Остановимся на вопросе о том, какие требования следует предъявлять к деталям усилителя на сопротивлениях. Наиболее ответственной деталью является анодное сопротивление. По нему

проходит анодный ток, на нем выделяется иногда значительная мощность. В хороших усилителях рекомендуется анодные сопротивления делать из проволоки. Обычно применяют для этого изолированную высокоомную проволоку диаметром 0,05—0,15 мм, в зависимости от величины анодного тока (плотность тока берется не больше одного ампера на квадратный миллиметр).

Если неумело намотать проволоку, то сопротивление будет иметь большую распределенную емкость, т. е. емкость между отдельными витками обмотки; все эти частичные емкости дадут какую-то результирующую емкость, включенную параллельно анодному сопротивлению. Эта емкость складывается с емкостью C_0 и ухудшает частотную характеристику усилителя на высоких частотах. При неправильной намотке собственная емкость сопротивления может быть равна некоему сотням сантиметров, т. е. значительно больше, чем емкость C_0 .

Наибольшую емкость дает так называемая бифилярная намотка (весь провод складывают вдвое и наматывают так, что начало и конец провода находятся вместе). Поэтому применяя бифилярную намотку нельзя. Большую емкость дает простая цилиндрическая намотка, если провод намотан несколькими слоями на цилиндрический каркас. Наименьшую емкость дает секционированная обмотка—катушка или каркас имеют вид, изображенный на рис. V, 12; промежутки между стенками заполняются

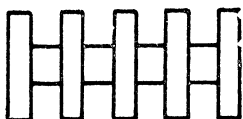


Рис. V, 12.

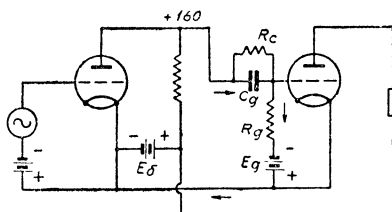


Рис. V, 13.

проводом; сперва заполняется одна секция, затем следующая и т. д. При такой намотке распределенная емкость не превышает обычно 20—30 см.

Сопротивление утечки менее ответственная деталь, ибо она не находится под током. Поэтому здесь применяют масляные сопротивления.

Основное требование, предъявляемое к переходной емкости,— это высокое сопротивление изоляции. Допустим, что сопротивление изоляции R_c емкости C_g равно $R_c = 10 \cdot 10^6 \Omega$ (рис. V, 13) и сопротивление утечки $R_g = 10^6 \Omega$; далее пусть анодное напряжение лампы $E_a = 160 \text{ V}$ и смещение на сетку следующего каскада равно $E_g = -10 \text{ V}$. Через сопротивление R_c и R_g к минусу анодной батареи потечет ток I_- .

Величина этого тока равна

$$I = \frac{E_a - E_g}{R_c + R_g} = \frac{160 + 10}{10 \cdot 10^6 + 10^6} = 15,5 \cdot 10^{-6} \text{ A.}$$

На сопротивлении утечки R_g благодаря току I будет падение напряжения, равное $I \cdot R_g = 15,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6 = 15,5 \text{ V}$.

Благодаря этому на сетке второй лампы смещение будет не -10 V , как мы этого хотели, а $15,5 - 10 = +5,5 \text{ V}$.

Усилитель при этом будет работать очень плохо. Отсюда видно, какую роль играет хорошая изоляция и малая утечка емкости C_g . Сопротивление изоляции емкости C_g должно быть минимум в 500 раз больше сопротивления утечки R_g .

Подведем итоги всему сказанному:

1. Уменьшение коэффициента усиления на низких частотах в усилителе на сопротивлении происходит благодаря падению напряжения на переходной емкости C_g . Чем больше произведение $C_g R_g$, тем меньше завал на низких частотах M_n .

2. Уменьшение коэффициента усиления на высоких частотах происходит благодаря шунтирующему действию емкости C_o . Чем больше емкость C_o и внутреннее сопротивление R_i , тем больше завал на высоких частотах M_v . Уменьшить завал на высоких частотах M_v можно путем уменьшения R_a или α . Однако это ведет к снижению коэффициента усиления.

3. Емкость C_o состоит из динамической емкости сетки последующего каскада и из собственной емкости анодного сопротивления. Чтобы уменьшить завал на высоких частотах, надо анодное сопротивление R_a делать безземкостным; секционированная намотка дает наименьшую величину распределенной емкости.

4. В усилителе на сопротивлениях можно работать на прямолинейном участке статической характеристики и на нижнем сгибе. В первом случае требуется высокое напряжение анодной батареи E_a , во втором случае, вследствие большого внутреннего сопротивления R_i лампы на нижнем сгибе характеристики, сильно возрастает завал на высоких частотах M_v .

5. В качестве анодного сопротивления в усилителях высокого качества желательно применять проволочные сопротивления. Конденсатор переходной емкости C_g должен иметь высокую изоляцию. Его сопротивление изоляции должно быть минимум в 500 раз больше, чем сопротивление R_g .

3. Усилитель на дросселях.

На рис. V,14 дана схема усилителя на дросселях; на рис. V,15 дана эквивалентная схема одного каскада усиления. Мы видим, что эквивалентная схема очень похожа на разобрannую нами выше схему усиления на сопротивлениях. Разница лишь в том,

что вместо анодного сопротивления стоит дроссель. Это создает два принципиальных отличия дроссельного усилителя от усилителя на сопротивлениях. Первое отличие заключается в том, что постоянный анодный ток не имеет падения напряжения на внешней нагрузке, ибо омическое сопротивление дросселя ничтожно мало; поэтому все напряжение анодной батареи E_a попадает на анод лампы, т. е. $E_a = E_0$. Это является преимуществом дроссельного усилителя; здесь для работы на прямолинейном участке статической характеристики лампы не требуется большого напряжения анодной батареи, как в усилителе на сопротивлениях. Второе отличие заключается в том, что наличие дросселя является дополнительной причиной завала частотной характеристики на низких частотах. Рекомендуем вспомнить пример,

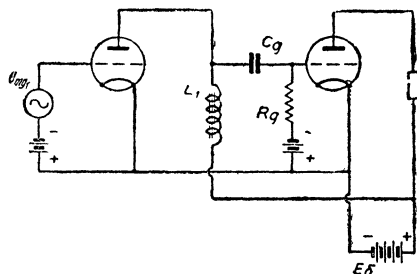


Рис. V, 14.

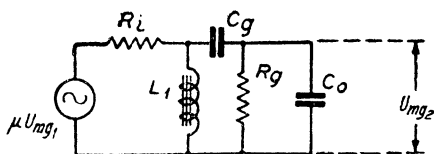


Рис. V, 15.

разобранный нами в первом параграфе этой главы, — там в аноде лампы стоял дроссель; при малой индуктивности дросселя сильно уменьшался коэффициент усиления на низких частотах. Это и понятно: с уменьшением частоты сопротивление дросселя ωL уменьшается. Если $\omega_n L$ недостаточно велико, то $a_n = \frac{\omega_n L}{R_i}$ может

резко уменьшиться по сравнению со средними частотами, и коэффициент усиления упадет. Значит, в дроссельном усилителе при низких частотах имеются две причины, вызывающие завал частотной характеристики, — это, во-первых, сам дроссель, а во-вторых, переходная емкость C_g .

При низких частотах мы можем емкостью C_0 пренебречь; тогда получаем эквивалентную схему, изображенную на рис. V, 16. При средних частотах можно пренебречь падением напряжения на емкости C_g , тогда мы получим схему рис. V, 17. Как видно из

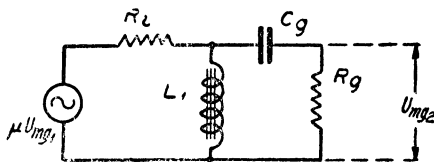


Рис. V, 16.

схемы, при частоте $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_0}}$ мы получим резонанс между

емкостью C_0 и индуктивностью L_1 . При резонансной частоте сопротивление емкостной и индуктивной ветви, вместе взятых, будет

равно бесконечности, и мы схему рис. V,17 можем заменить схемой рис. V,18, где анод нагружен только на одну утечку R_g .

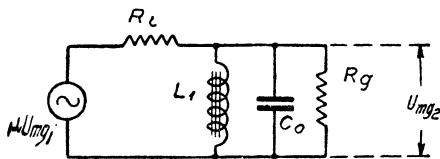


Рис. V,17.

Практически для довольно широкой полосы средних частот справедлива схема рис. V,18. Для высших частот сопротивление самоиндукции настолько велико, что им можно пренебречь, тогда мы получаем схему рис. V,19. Здесь

так же, как и в усилителе на сопротивлениях, емкость C_0 является причиной завала частотной характеристики.

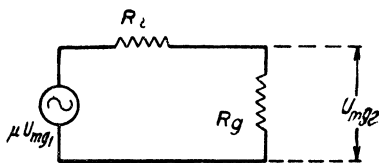


Рис. V,18.

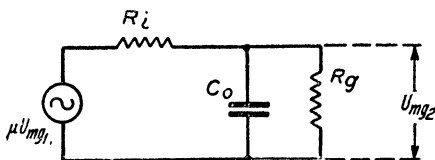


Рис. V,19.

Итак, частотная характеристика дроссельного усилителя так же, как и усилителя на сопротивлениях, имеет завал в сторону низких и в сторону высоких частот; она обычно имеет вид, изображенный на рис. V, 20; кривая I соответствует плохому усилителю с большой емкостью C_0 и малой самоиндукцией L_1 ; кривая II соответствует хорошему усилителю с большой самоиндукцией L_1 и малой емкостью C_0 .

Расчет усилителя на дросселях ведется следующим образом.

Исходя из допустимого завала для низких частот M_n , определяем произведение $\omega_n C_g R_g$ и величину самоиндукции L_1 ; причем для того и другого пользуемся кривой рис. V,8 (§ 2). По этой кривой находим $\omega_n C_g R_g$ и одновременно величину $\frac{\omega_n L_1}{R_i}$.

Величину $C_g R_i$ рекомендуется брать на 30—50%, больше полученной из кривой рис. V,8. Далее так же, как в усилителе на сопротивлениях, находим по кривой рис. V,9 или по формуле

$$\frac{1}{\alpha} \geq \frac{R_i \omega_n C_0}{\sqrt{M_n^2 - 1}} - 1 \quad (5,4)$$

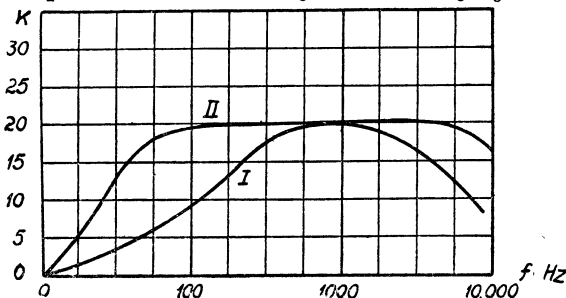


Рис. V,20.

допустимую величину α . Величина α в данном случае будет отношением сопротивления утечки R_g к внутреннему сопротивлению лампы R_i

$$\alpha = \frac{R_g}{R_i}.$$

Определив α , находим $R_g = \alpha R_i$, а следовательно, и C_g (произведение $R_g C_g$ нам уже известно). Зная α , находим коэффициент усиления на средних частотах

$$K_o = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1}.$$

Решим пример: дана лампа СО-118, параметры лампы следующие

$$R_i = 26\,000 \, \Omega; \mu = 34.$$

Требуется построить один каскад усиления на дросселях:

$$\begin{aligned} \omega_k &= 300; \\ \omega_s &= 50\,000; \\ M_k &= 1,05; \\ M_s &= 1,05; \\ C_o &= 300 \cdot 10^{-12} \text{ F.} \end{aligned}$$

По кривой рис. V, 8 для $M_k = 1,05$ находим

$$\frac{\omega_k L}{R_i} = 3,$$

отсюда

$$L = \frac{3 R_i}{\omega_k} = \frac{3 \cdot 26\,000}{300} = 260 \text{ H.}$$

Величина $\omega_k C_g R_g = 3$, следовательно,

$$C_g R_g = \frac{3}{\omega_k} = 0,01.$$

По формуле (5,8) определяем допустимую величину α

$$\frac{1}{\alpha} \cong \frac{26\,000 \cdot 50\,000 \cdot 300 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{1,05^2 - 1}} - 1.$$

$$\frac{1}{\alpha} \cong 0,24.$$

$$\alpha \cong 4.$$

Если α будет больше, то завал на высоких частотах будет больше заданной величины $M_s = 1,05$.

Определяем $R_g = \alpha R_i = 4 \cdot 26\,000 = 100\,000 \text{ } \Omega$.

Величина $C_g = \frac{C_g R_g}{R_g} = \frac{0,01}{100\,000} = 100\,000 \cdot 10^{-12} \text{ F}$.

Мы указывали выше, что емкость C_g надо взять больше расчетной. Поэтому берем $C_g = 150\,000 \text{ см}$.

Коэффициент усиления на средних частотах равен

$$K_o = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1} = 34 \frac{4}{4 + 1} = 27.$$

Итак, мы определили все нужные величины:

$$L = 260 \text{ H};$$

$$C_g = 150\,000 \text{ см};$$

$$R_g = 100\,000 \text{ } \Omega;$$

$$K = 27.$$

Выбор режима лампы в данном случае не представляет никаких трудностей: он производится на общих основаниях, рассмотренных нами в главе II и III.

Часто бывает необходимо использовать имеющийся готовый дроссель для усилителя. Иногда у этого дросселя мала самоиндукция и усилитель искажает на низких частотах. Пользуясь первым методом, изложенным в § 1 этой главы, можно свести

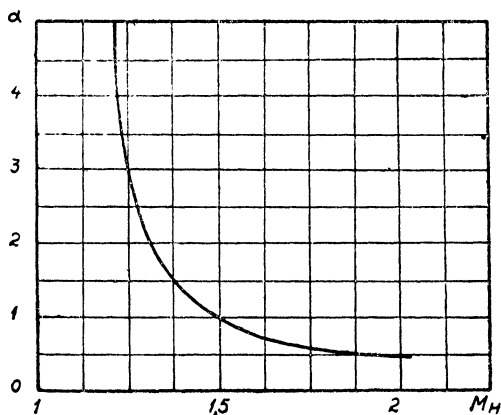


Рис. V,21.

до желательного минимума завал частотной характеристики на низких частотах при любом дросселе. Для этого необходимо лишь уменьшить сопротивление утечки R_g (утечка играет в данном случае роль омического шунта). На рис. V,21 дан график, показывающий, какой величины нам надо взять $\alpha = \frac{R_g}{R_i}$, чтобы

уменьшить завал на низких частотах до $M_n = 1,15$.

Поясним на примере способ пользования графиком на рис. V,21. Дана та же лампа, что в предыдущем примере, но дроссель имеет самоиндукцию не 260 H, а лишь 75 H, тогда

$$\frac{\omega_n L}{R_i} = \frac{300 \cdot 75}{26\,000} = 0,86.$$

По графику рис. V,8 находим для этого значения $\frac{\omega_n L}{R_i}$ завал $M_n = 1,5$, значит при самоиндукции в 75 Н коэффициент усиления при $\omega_n = 300$ будет в 1,5 раза меньше, чем при средних частотах. Это нас не устраивает; надо, очевидно, уменьшить сопротивление R_g . По кривой рис. V,21 ищем величину α для $M_n = 1,5$; находим $\alpha = 1$. Значит для того, чтобы снизить завал до значения $M_n = 1,15$, надо α сделать равной единице или $R_g = \alpha, R_i = 26\,000 \Omega$. Частотная характеристика на высоких частотах от этого также улучшится. Но зато сильно падает коэффициент усиления

$$K_o = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1} = 34 \cdot \frac{1}{1 + 1} = 17.$$

Итак, за счет уменьшения сопротивления утечки R_g и снижения коэффициента усиления можно всегда улучшить частотную характеристику дроссельного усилителя.

Посмотрим теперь, какие требования надо предъявлять к деталям дроссельного усилителя. В отношении емкости C_g и утечки R_g можно только повторить все, что говорилось о них в предыдущем параграфе.

К дросселю предъявляются два основных требования: во-первых, он должен иметь определенную путем расчета самоиндукцию; во-вторых, он должен иметь как можно меньшую распределенную емкость. Эта емкость прибавляется к емкости C_o и уменьшает коэффициент усиления на высоких частотах. При неумелой намотке емкость дросселя может быть равна нескольким сантиметрам. Чем больше самоиндукция L , тем больше витков у дросселя, тем, следовательно, и больше распределенная емкость: в этом основная трудность проектирования усилителя на дросселях. Чтобы уменьшить емкость дросселя, его обмотку надо разбить на ряд секций, не меньше 6—8; тогда эта емкость снижается до 50—80 см. Вопрос о расчете дросселя будет разобран ниже.

Подведем итоги сказанному:

1. В дроссельном усилителе в отличие от усилителя на сопротивлениях нет постоянного падения напряжения на внешнем сопротивлении; поэтому можно работать на прямолинейном участке статической характеристики лампы, не имея большого напряжения анодной батареи.

2. Коэффициент усиления дроссельного усилителя уменьшается в области низких частот: а) вследствие шунтирующего действия дросселя L , б) вследствие падения напряжения на конденсаторе C_g .

3. В области высоких частот коэффициент усиления уменьшается благодаря шунтирующему действию емкости C_o . В эту

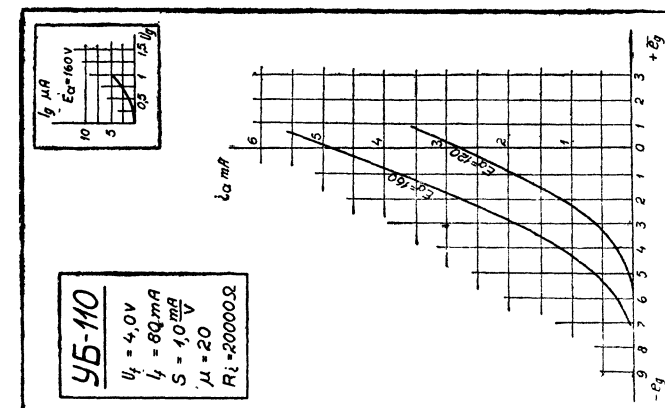


Рис. V, 22.

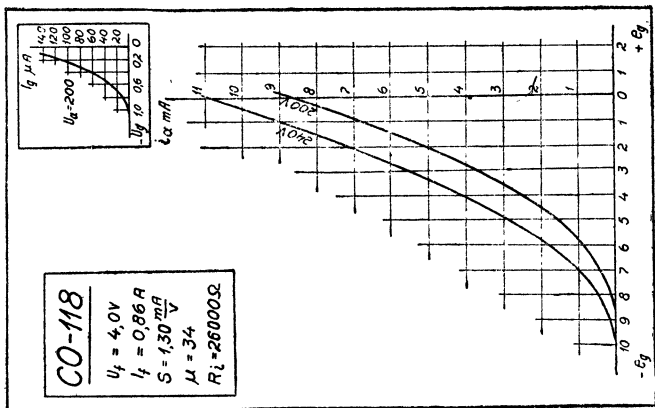


Рис. V, 23.

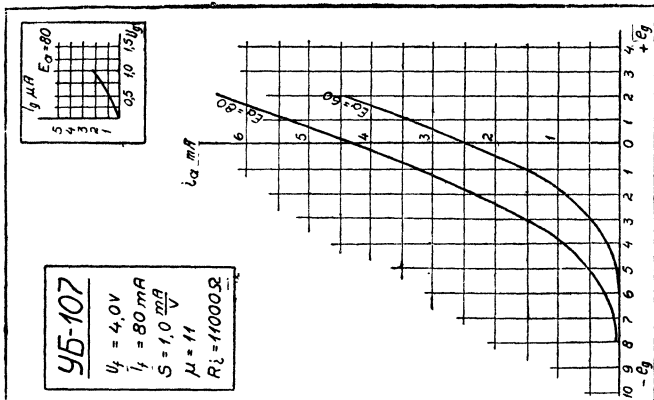


Рис. V, 24.

емкость входит, наряду с динамической емкостью лампы последующего каскада, собственная емкость дросселя.

4. Уменьшая сопротивление утечки R_g , можно исправить частотную характеристику дроссельного усилителя как на низких, так и на высоких частотах, но при этом снижается коэффициент усиления.

Контрольные вопросы.

1. В чем заключаются два основных метода улучшения частотной характеристики усилителя?
2. Почему работа на нижнем сгибе ламповой характеристики в усилителе на сопротивлении увеличивает завал M_s на высоких частотах?
3. Какие требования предъявляются к анодному сопротивлению?
4. Какие требования предъявляются к переходной емкости C_g ?
5. Каким образом улучшить частотную характеристику на низких частотах дроссельного усилителя, если самоиндукция дросселя мала?

Задание.

Надо спроектировать усилитель напряжения. Требования, предъявляемые к усилителю, следующие. Напряжение входа $U_{g1} = 0,1V$. Коэффициент усиления всего усилителя $K = 600$. В качестве ламп можно использовать лампу УБ-110 (рис. V,22), лампу СО-118 (рис. V,23) (эта лампа с подогревным катодом), лампу УБ-107 (рис. V,24). Усилитель можно выполнять на дросселях или на сопротивлениях.

Частотная характеристика должна удовлетворять следующим условиям: $\omega_o = 300$; $\omega_s = 50\,000$; $M_n = 1,25$; $M_s = 1,25$.

Требуется составить принципиальную схему, определить режим лампы (смещение, напряжение батареи, ток анода и т. д.); определить величины внешних нагрузок R_a , R_g , C_g , L .

ГЛАВА VI.

УСИЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТРАНСФОРМАТОРАХ.

1. Частотная характеристика усилителя напряжения на трансформаторах.

Усилитель напряжения на трансформаторах во многом похож на усилитель с дроссельной нагрузкой в аноде. Как в том, так и в другом усилителе нет постоянного падения напряжения в анодной цепи; первичная обмотка трансформатора имеет обычно небольшое омическое сопротивление, поэтому мы считаем, что анодное напряжение E_a равно напряжению батареи E_b . Выбор режима лампы производится так же, как в дроссельном усилителе. На низких и средних частотах усилитель на трансформаторах ведет себя так же, как дроссельный усилитель. Существенное различие мы имеем лишь в области высоких частот.

Основное, чем отличается усилитель на трансформаторах от усилителя с дросселем или сопротивлением в аноде, заключается, в возможности получить на каскад коэффициент усиления больший, чем коэффициент усиления лампы μ . В усилителе на трансформаторах подводимое к нему напряжение повышается не только лампой, но и трансформатором.

В этом большое преимущество усилителя на трансформаторах перед другими типами. Правда, ниже мы увидим, что величину коэффициента трансформации $\left(n = \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)$ нельзя выбирать произвольно, причем, чем больше коэффициент усиления лампы μ , тем меньше должна быть величина $\frac{1}{n}$, т. е. тем в меньшей степени

можно повысить напряжение при помощи трансформатора. Благодаря этому коэффициент усиления усилителя на трансформаторах бывает обычно не больше 20—30, т. е. колеблется в тех же пределах, что у усилителя на дросселе или на сопротивлении.

На рис. VI, 1 дана схема усилителя на трансформаторе; вторичная обмотка шунтируется омическим сопротивлением R_m . На значение этого сопротивления двоякое: во-первых, оно повышает

устойчивость работы усилителя, оно гасит самопроизвольные колебания, как это было выяснено в главе IV, во-вторых, оно улучшает частотную характеристику усилителя как на высоких, так и на низких частотах.

На рис. VI,2 дана эквивалентная схема одного каскада усилителя на трансформаторе. Вторичная обмотка нагружена на сопротивление $R_{ш}$ и на емкость C ; эта емкость состоит (так же, как и в усилителе на дросселе и на сопротивлениях) из динамической емкости лампы следующего каскада C_o и из собственной емкости вторичной обмотки трансформатора $C_{тр}$.

$$C = C_o + C_{тр}.$$

Величина $C_{тр}$ зависит от способа намотки трансформатора; при секционированной намотке она порядка 40—60 см; при несекционированной намотке она порядка 150—200 см. Большинство рыночных трансформаторов имеют несекционированную обмотку, поэтому они имеют большую емкость $C_{тр}$.

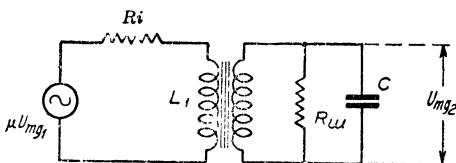


Рис. VI,2.

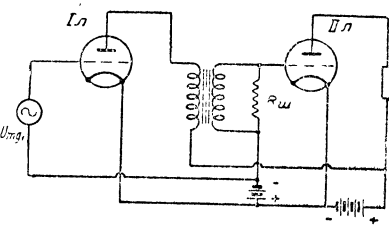


Рис. VI,1.

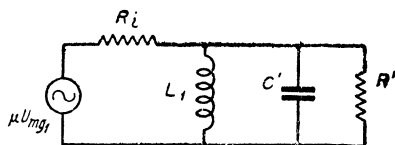


Рис. VI,3.

В главе II § 1, мы установили, что нагрузку во вторичной цепи трансформатора можно заменить некоторой эквивалентной нагрузкой, присоединенной к первичным клеммам трансформатора. Для этого надо сопротивление во вторичной цепи умножить на n^2 , а проводимость, очевидно, поделить на n^2 . В нашем случае эквивалентная нагрузка трансформатора, перенесенная в первичную цепь, будет состоять из сопротивления R' , равного

$$R' = R_{ш}n^2 \quad (6,2)$$

и из емкости C' равной

$$C' = \frac{C}{n^2}. \quad (6,3)$$

Емкость мы делим на n^2 , ибо емкость пропорциональна проводимости.

Для низких и средних частот мы можем усилитель на трансформаторе изобразить в виде эквивалентной схемы, данной на рис. VI,3. Здесь R' и C' — приведенные к первичной обмотке со-

противление шунта $R_{ш}$ и емкость C . Параллельно R' и C' включена самоиндукция L , которая равна самоиндукции первичной обмотки трансформатора. Мы видим, что схема ничем не отличается от схемы дроссельного усилителя для средних частот (рис. V, 15).

На высоких частотах схема усилителя на трансформаторе будет несколько иная, благодаря влиянию самоиндукции рассеяния обмоток трансформатора. Выясним подробнее, что такое самоиндукция рассеяния.

На рис. VI, 4 изображен схематически трансформатор. Когда по первичной обмотке проходит переменный ток, в железном сердечнике возникает переменный магнитный поток; силовые линии этого потока указаны пунктиром. Магнитный поток пронизывает витки вторичной обмотки, благодаря чему во вторичной обмотке возникает электродвижущая сила и в цепи вторичной обмотки

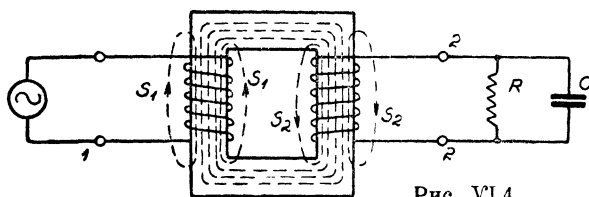


Рис. VI, 4.

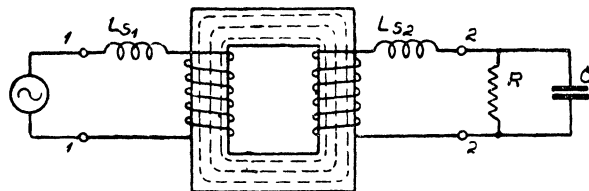


Рис. VI, 5.

течет ток. Этот ток в свою очередь создает магнитный поток в железе.

Такое взаимодействие между первичной и вторичной цепью трансформатора получается благодаря тому, что один и тот же магнитный поток охватывает витки первичной и вторичной обмотки. Однако есть такие силовые линии, которые охватывают

только витки первичной обмотки или только вторичную обмотку. Эти силовые линии изображены также пунктиром на рис. VI, 4 и обозначены буквами S_1 и S_2 . Значительная часть их пути лежит через воздух. Эти силовые линии образуют так называемый магнитный поток рассеяния. Поток рассеяния первичной цепи не будет никак воздействовать на вторичную цепь, и наоборот, поток рассеяния вторичной цепи не будет влиять на первичную. Благодаря потоку рассеяния образуется как в первичной, так и во вторичной цепи, некоторая самоиндукция, называемая самоиндукцией рассеяния. Когда переменный ток проходит через самоиндукцию рассеяния, то получается некоторое падение напряжения на ее клеммах.

Трансформатор с рассеянием мы можем заменить трансформатором без рассеяния, но с включенными последовательно в первичную и вторичную цепь самоиндукциями, равными соответственно самоиндукциям рассеяния первичной и вторичной

обмотки. Это показано на рис. VI,5. Трансформатор, изображенный на этом рисунке, не имеет потоков рассеяния. Действие же рассеяния заменено действием двух катушек самоиндукции L_{s1} и L_{s2} , включенных в первичную и вторичную цепи.

Эти самоиндукции очень невелики, сопротивление их ωL_{s1} и ωL_{s2} для низких и средних частот мало; следовательно, и падение напряжения на них мало; поэтому в области низких и средних частот они почти не влияют на коэффициент усиления и мы ими пренебрегаем. Иначе обстоит дело в области высоких частот (начиная от 2000 и выше); здесь сопротивление ωL_{s1} и ωL_{s2} становится внушительной величиной и весьма сильно влияет на коэффициент усиления усилителя.

В области высоких частот мы можем так же, как и в дроссельном усилителе, пренебречь ветвью, состоящей из самоиндукции первичной обмотки L_1 , ибо ωL_1 становится очень большим. Тогда мы получаем эквивалентную схему для высоких частот, изображенную на рис. VI,6. Здесь L_s равно сумме самоиндукции рассеяния первичной обмотки L_{s1} и перечисленной в первичную цепь (указанным выше методом) самоиндукции рассеяния вторичной обмотки L_{s2} . Сопротивление R' и емкость C' имеют те же значения, что и в схеме для средних и низких частот (рис. VI,3).

Величина самоиндукции рассеяния зависит, во-первых, от числа витков (как всякая самоиндукция, она пропорциональна квадрату числа витков), во-вторых, она зависит от конструкции трансформатора. Чем ближе расположены обе обмотки друг к другу, тем меньше самоиндукция рассеяния. Если бы мы выполнили трансформатор так, как указано на рис. VI,4, т. е. на одной половинке сердечника намотали бы первичную обмотку, а на второй половинке вторичную обмотку, то мы получили бы трансформатор с очень большим рассеянием. Он не был бы пригоден для усилительных целей, ибо, как мы сейчас увидим, в усилительном трансформаторе самоиндукция рассеяния должна быть как можно меньше; она должна быть значительно меньше, чем самоиндукция первичной обмотки L_1 . Обозначим отношение L_s к L_1 через σ

$$\sigma = \frac{L_s}{L_1}. \quad (6,4)$$

Величина σ называется коэффициентом рассеяния трансформатора. В хорошем междупламповом трансформаторе σ должно быть не больше, чем 0,01. Ниже мы укажем, каким образом надо делать трансформатор, чтобы величина σ была не выше указанной величины.

Итак, мы пришли к двум эквивалентным схемам усилителя на трансформаторе. Одна (рис. VI,3) для низких и средних частот, другая для высоких частот (рис. VI,6). Схема для низких и средних частот ничем не отличается от схемы дроссель-

ного усилителя. Поэтому при определении самоиндукции первичной обмотки трансформатора L мы можем пользоваться тем же графиком, что и при расчете дросселя L в дроссельном усилителе (рис. V,8). По заданному завалу на низких частотах M_n находим по графику величину $\frac{\omega_n L_1}{R_i}$, а отсюда L_1 ; мы видим, что L_1 надо брать тем больше, чем больше R_i лампы.

На средних частотах при частоте $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C'}}$ наступает так же, как и в дроссельном усилителе, резонанс; при этом схема рис. VI,3 может быть упрощена и представлена в виде схемы,

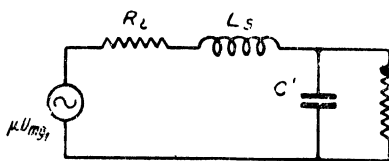


Рис. VI,6.

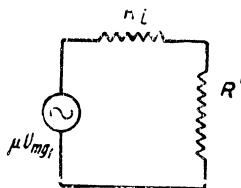


Рис. VI,7.

изображенной на рис. VI,7. Эта схема справедлива обычно для довольно широкой полосы средних частот. Коэффициент усиления для средних частот равен

$$K = \mu \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 1}. \quad (6,6)$$

Здесь $\alpha = \frac{R'}{R_i}$, где R' в свою очередь равно $R' = R_{ш} \cdot n^2$; величину α берут обычно в пределах от 6 до 10. При этом значении α шунт почти не уменьшает коэффициента усиления усилителя.

Итак, исходя из завала на низких частотах, определяют самоиндукцию первичной обмотки трансформатора; неизвестным остается еще пока коэффициент трансформации n ; его определяют из условия усиления на высоких частотах.

Обратимся к схеме на высоких частотах (рис. VI,6). В схеме имеется самоиндукция L_s и емкость C' ; значит, при некоторой частоте, равной приблизительно ¹⁾

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_s C'}} \quad (6,7)$$

наступит резонанс.

¹⁾ Вследствие наличия сопротивления R' , частота, при которой наступает резонанс, будет несколько отличаться от частоты, вычисленной по формуле (6,7); однако, разница будет весьма незначительной.

Это будет резонанс напряжений, ибо самоиндукция и емкость включены последовательно. Итак, в усилителе напряжения на трансформаторе мы имеем два резонанса: первый резонанс при средних частотах, обусловленный емкостью C' и самоиндукцией L' и второй резонанс при высоких частотах, обусловленный той же емкостью C' и самоиндукцией рассеяния L_s ; этот последний резонанс иногда называют резонансом рассеяния. Резонанс рассеяния имеет существенное влияние на частотную характеристику трансформаторного усилителя.

Для того чтобы уяснить себе это, предположим, что у нас пульт отсутствует; тогда схема рис. VI,6 примет вид, изображенный на рис. VI,8. Известно, что при резонансе напряжений сопротивление самоиндукции и емкости равно нулю.

Значит, при частоте

$$\omega_{II} = \frac{1}{\sqrt{L_s C'}} \quad (6,7)$$

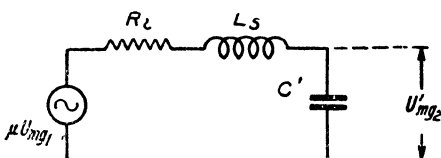


Рис. VI,8.

внешнее сопротивление нашего генератора будет равно нулю (короткое замыкание), в цепи потечет большой ток I , равный по закону Ома

$$I = \frac{\mu U_{mg1}}{R_i}. \quad (6,8)$$

Подсчитаем коэффициент усиления усилителя для этой частоты. Напряжение на вторую лампу мы снимаем с конденсатора C' ; оно будет равно

$$U'_{mg2} = I \cdot \frac{1}{\omega_{II} C'}. \quad (6,9)$$

Подставляя в формулу (6,9) вместо I его выражение (6,8), получим

$$U'_{mg2} = \frac{\mu U_{mg1}}{R_i} \cdot \frac{1}{\omega_{II} \cdot C'}. \quad (6,10)$$

Наконец, вместо ω_{II} вставим его выражение (6,7); тогда

$$U'_{mg2} = \mu U_{mg1} \frac{\sqrt{L_s C'}}{R_i C'} = \mu U_{mg1} \frac{1}{R_i} \sqrt{\frac{L_s}{C'}}. \quad (6,11)$$

U'_{mg2} — это напряжение на клеммах вторичной обмотки, отнесенное к первичной цепи, ибо все величины в нашей схеме отнесены к первичной цепи; для того чтобы получить действи-

тельное напряжение, подводимое ко второй лампе (U_{mg2}), мы должны U'_{mg2} поделить на коэффициент трансформации n .

$$U'_{mg2} = U_{mg2} \cdot n. \quad (6,12)$$

Коэффициент усиления, очевидно, равен отношению U_{mg2} и U_{mg1} .

$$K_{II} = \frac{U_{mg2}}{U_{mg1}}.$$

Деля в ф-ле (6,11) левую и правую часть на U_{mg1} и подставляя вместо U'_{mg2} его значение из формулы (6,12), мы получим

$$K_{II} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\mu}{R_i} \sqrt{\frac{L_s}{C}}.$$

Наконец, заменим емкость C' через равную ей величину $C' = \frac{C}{n^2}$, тогда окончательно получим формулу для коэффициента усиления в следующем виде

$$K_{II} = \frac{\mu}{R_i} \sqrt{\frac{L_s}{C}}. \quad (6,13)$$

Интересно отметить, что коэффициент усиления при втором резонансе не зависит от коэффициента трансформации. Величина K_{II} может значительно превышать коэффициент усиления для всех других частот.

Пример. Внутреннее сопротивление лампы равно $R_i = 10\,000 \, \Omega$; $L_s = 0,6 \, \text{H}$, емкость $C = 200 \cdot 10^{-12} \, \text{F}$, $\mu = 10$; коэффициент трансформации $n = \frac{1}{2}$.

Для средних частот (схема рис. VI,7) коэффициент усиления равен согласно формуле (6,6)

$$K_o = \mu \frac{1}{n} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 1}.$$

Так как шунт в данном случае отсутствует, то α бесконечно велико

$$K_o = \frac{\mu}{n}.$$

Подставляя числовые величины, имеем

$$K_o = 10 \cdot 2 = 20.$$

Подсчитаем теперь коэффициент усиления при втором резонансе на формуле (6,1)

$$K_{II} = \frac{\mu}{R_i} \sqrt{\frac{L_s}{C}} = \frac{10}{10\,000} \sqrt{\frac{0,6}{200 \cdot 10^{-12}}} = 55.$$

Итак, коэффициент усиления при втором резонансе в 2,75 раза больше, чем при средних частотах. На рис. VI,9 дана частот-

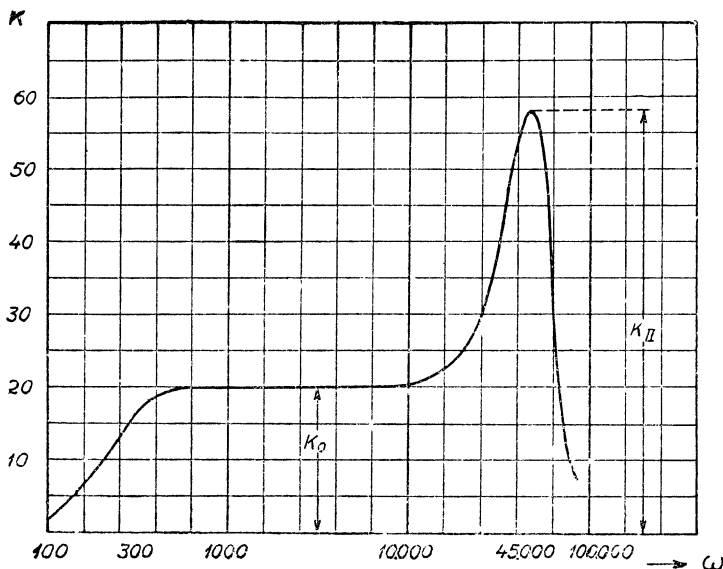


Рис. VI,9.

ная характеристика этого усилителя. При частоте второго резонанса, равной

$$\omega_{II} = \frac{1}{\sqrt{L_s C'}} = \frac{1}{\sqrt{L_s \frac{C}{n^2}}} = \frac{1}{\sqrt{0,6 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 4}} = 45\,000,$$

частотная характеристика имеет большую и острую пика. При частотах более высоких, чем ω_{II} , коэффициент усиления резко падает. Эта пика будет вносить сильные частотные искажения. Срезать пика можно при помощи шунта $R_{ш}$. Если шунт подобрать таким образом, чтобы $\alpha = \frac{R'_{ш}}{R_i}$ было порядка 6—10, то

обычно пика почти целиком срезается, и мы имеем или ровную частотную кривую, или лишь небольшой подъем. Если сопротивление шунта взять слишком малым, то на высоких частотах вместо подъема может получиться завал.

Правильно рассчитанный усилитель должен иметь резонанс рассеяния при частоте, примерно, равной высшему пределу усиливаемых частот ω_* . Это необходимо потому, что после резонанса рассеяния коэффициент усиления резко уменьшается. Из ф-лы (6,7) для частоты второго резонанса мы видим, что ω_{II} зависит от коэффициента трансформации

$$\omega_{II} = \frac{1}{\sqrt{L_s C}} = \frac{1}{\sqrt{L_s \frac{C}{n^2}}} \quad (6,7)$$

Подставляя в формулу (6,7) вместо ω_{II} заданную нам величину ω_* и решая выражение (6,7) относительно n , мы получим следующую расчетную формулу для определения величины коэффициента трансформации

$$n = \omega_* \sqrt{L_s C} \quad (6,14)$$

Из этой формулы видно, что допустимое n тем меньше, чем меньше емкость C и самоиндукция рассеяния L_s ; при большой емкости n может получиться больше единицы и трансформатор будет понижать.

Прделаем для примера расчет одного каскада усиления на трансформаторах для двух ламп: а) лампа с малым μ и малым внутренним сопротивлением (скажем, лампа УБ-107); б) лампа с большим μ и большим внутренним сопротивлением (скажем, лампа УБ-110). К усилителю предъявлены следующие требования: $\omega_k = 300$; $\omega_* = \omega_{II} = 50\,000$, $M_k = 1,15$. Емкость $C = 180 \cdot 10^{-12}$ F. Коэффициент рассеяния $\sigma = 0,01$. Ведем сперва расчет для лампы УБ-107: $\mu = 12$, $R_i = 10\,000$ Ω . По кривой рис. V, 8 находим для $M_k = 1,15$, что $\frac{\omega_k L_1}{R_i} = 1,8$; величина

$$L_1 = \frac{1,8 \cdot R_i}{\omega_k} = \frac{1,8 \cdot 10\,000}{300} = 60 \text{ H.}$$

По формуле (6,14) определяем коэффициент трансформации, заменяя $L_s = \sigma L_1$

$$n = \omega_* \sqrt{L_s C} = \omega_* \sqrt{\sigma L_1 C} = 50\,000 \sqrt{0,01 \cdot 60 \cdot 180 \cdot 10^{-12}} = \frac{1}{2}.$$

Задаваясь величиной $\alpha = 6$, вычисляем по ф-ле (6,6), коэффициент усиления на средних частотах

$$K_o = \frac{\mu}{n} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 1} = 12 \cdot 2 \frac{6}{6 + 1} = 20,6.$$

Сопротивление шунта определяем из следующего равенства

$$R' = R_u n^2 = \alpha R_i.$$

Отсюда

$$R_u = \alpha R_i \frac{1}{n^2}. \quad (6,15)$$

Для нашего случая R_u равно

$$R_u = 6 \cdot 10\,000 \cdot 2^2 = 240\,000 \text{ } \Omega.$$

Итак, мы получили следующие результаты: самоиндукция первичной обмотки $L_1 = 60 \text{ Н}$, коэффициент трансформации $n = \frac{1}{2}$. Сопротивление шунта $R_u = 240\,000 \text{ } \Omega$. Коэффициент усиления $K_o = 20,6$.

Прделаем тот же расчет для лампы УБ-110. $\mu = 25$, $R_i = 25\,000 \text{ } \Omega$. Величина L_1 для того же завала M_n будет равна

$$L_1 = \frac{1,8 R_i}{\omega_n} = \frac{1,8 \cdot 25\,000}{300} = 150 \text{ Н}.$$

Коэффициент трансформации по формуле (6,14) равен

$$n = \omega_s \sqrt{L_1 C} = 50\,000 \sqrt{0,01 \cdot 150 \cdot 180 \cdot 10^{-12}} = 0,82.$$

Задаваясь той же величиной $\alpha = 6$, вычисляем коэффициент усиления на средних частотах

$$K_o = \frac{\mu}{n} = \frac{\alpha}{\alpha + 1} = \frac{25}{0,82} \cdot \frac{6}{6 + 1} = 25,6.$$

Сопротивление шунта равно

$$R_u = 6 \cdot 25\,000 \cdot \frac{1}{0,82^2} = 216\,000 \text{ } \Omega.$$

Мы получили следующие результаты:

$$\begin{aligned} L_1 &= 150 \text{ Н}; \\ n &= 0,82; \\ R_u &= 216\,000 \text{ } \Omega; \\ K_o &= 25,6. \end{aligned}$$

Сопоставляя результаты для обоих случаев, мы можем сделать следующие выводы:

1. Применение лампы с большим μ почти не увеличивает коэффициента усиления усилителя.

2. Чем больше внутреннее сопротивление R_i лампы, тем больше должна быть самоиндукция первичной обмотки трансформатора и тем меньше можно повышать K при помощи трансформатора. Если бы мы взяли лампу с $R_i = 80\,000\ \Omega$, то пришлось бы ставить трансформатор с понижением.

Обычно в трансформаторном усилителе применяют лампы с небольшим внутренним сопротивлением, например лампу УБ-107, ПО-119, УБ-132, УО-104.

Итак, трансформатор может поднять коэффициент усиления в области высших частот, в области же низших частот он всегда будет снижать усиление по сравнению со средними частотами.

Если нужно поднять усиление также в области низших частот, то следует применить несколько иную схему включения

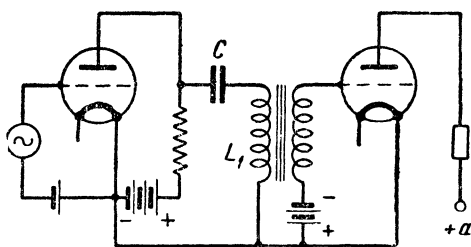


Рис. VI,10.

трансформатора, изображенную на рис. VI,10. Идея схемы следующая: в резонанс на низшей предел усиливаемой частоты ω_n настраивается переходная емкость C и самоиндукция первичной обмотки трансформатора L_1 . Благодаря этому коэффициент усиления по низшей частоте K_n повышается.

Подведем итоги всему сказанному:

1. Основное отличие усилителя на трансформаторах заключается в том, что его коэффициент усиления может быть больше коэффициента усиления лампы μ .

2. На низких и средних частотах усилитель на трансформаторах по своей эквивалентной схеме не отличается от усилителя на дросселях.

3. На высоких частотах усилитель на трансформаторах имеет резонанс рассеяния (между самоиндукцией рассеяния L_s и емкостью C'). При этом коэффициент усиления может быть в несколько раз больше, чем при средних частотах.

4. Шунт во вторичной обмотке применяется, во-первых, для повышения устойчивости работы усилителя, и, во-вторых, для уменьшения пика на частотной характеристике при резонансе рассеяния.

5. Коэффициент трансформации трансформатора подбирается таким, чтобы резонанс рассеяния наступал при частоте, примерно, равной ω_n . Чем больше внутреннее сопротивление лампы, тем меньше можно повышать напряжение при помощи трансформатора.

6. Чем меньше коэффициент рассеяния и емкость C , тем меньшим можно сделать n и, следовательно, в большей степени повысить напряжение при помощи трансформатора.

2. Расчет входных и междупламповых трансформаторов и дросселей.

Из расчета усилителя определяют, как мы видели, следующие величины: необходимую величину самоиндукции первичной обмотки трансформатора L_1 и коэффициент трансформации $n = \frac{w_1}{w_2}$. Далее известен анодный ток покоя $I_{a=}$, коль скоро выбран режим лампы. Не всегда постоянный анодный ток $I_{a=}$ проходит через обмотку трансформатора, бывают схемы (например, рис. VI, 10), где через первичную обмотку трансформатора проходит лишь переменная слагающая тока. В этом случае должна быть задана амплитуда переменного напряжения на клеммах первичной обмотки трансформатора U_{ma} ; эта величина определяется при расчете режима лампы. Итак, заданными являются следующие величины: L_1 , n , $I_{a=}$ или U_{ma} .

К трансформатору, работающему в усилителе напряжения, предъявляются два основных требования: а) собственная емкость витков вторичной обмотки C_{mp} должна быть минимальной; б) коэффициент рассеяния σ должен быть не выше определенной величины.

При расчете трансформатора мы исходим из заданных величин L_1 , n и $I_{a=}$ (или U_{ma}) и из указанных основных требований; расчет дает нам возможность определить объем и размеры железа, число витков первичной и вторичной обмоток, диаметры проводов и, наконец, способ расположения обмоток. Расчет усилительных трансформаторов во многом значительно сложнее расчета силовых трансформаторов. Здесь мы даем в упрощенном виде основные расчетные формулы, пользуясь которыми, можно проделать ориентировочный расчет-прикидку с достаточной для практики точностью.

Усилительный междупламповый трансформатор, как правило, не следует делать с воздушным зазором в железном сердечнике, ибо даже небольшой зазор, в сотые доли миллиметра, резко, уменьшает коэффициент самоиндукции первичной обмотки, увеличивает коэффициент рассеяния σ и, следовательно, снижает качество трансформатора; при сборке сердечника следует особо тщательно подгонять места стыков, чтобы зазор был минимальным; надо помнить, что плохая сборка сердечника может испортить всю частотную характеристику усилителя. Дроссель, через который проходит постоянный ток порядка 3—5 мА, обычно делают также без воздушного зазора, рассчитывают дроссель без зазора так же, как и трансформатор. Ниже мы даем расчет трансфор-

матора без воздушного зазора в сердечнике. Начинают расчет с определения объема железа. Так как в огромном большинстве случаев используются типовые железные пластины, то приходится лишь решать вопрос, какая из пластин наиболее подходящая и сколько пластин надо взять. На рис. VI,11, VI,12,

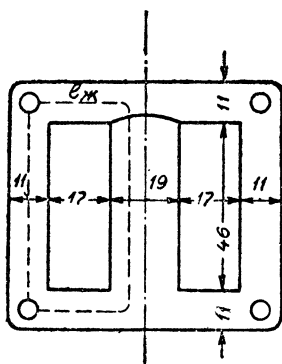


Рис. VI,11.

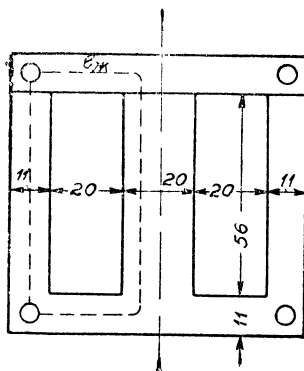


Рис. VI,12.

VI,13 даны размеры типовых железных пластин III-образной формы. Объем железа равен произведению средней длины магнитного пути (пунктирная линия на рисунках) $l_{жс}$ и площади поперечного сечения сердечника $Q_{жс}$. Так как между пластинками сердечника есть тонкие прокладки, то не вся площадь $Q_{жс}$ целиком заполнена железом, поэтому объем чистого железа немного меньше, это

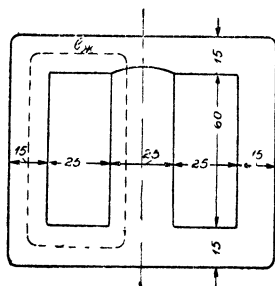


Рис. VI,13.

учитывают, умножая произведение $Q_{жс} l_{жс}$ на коэффициент заполнения железа $f_{жс}$. Этот коэффициент равен 0,9.

Итак объем железа $V_{жс}$ равен

$$V_{жс} = 0,9 Q_{жс} l_{жс},$$

$l_{жс}$ берут в сантиметрах; $Q_{жс}$ в кв. сантиметрах; $V_{жс}$ получается в кубических сантиметрах.

Объем железа определяется различно для случая, когда постоянный ток $I_{a=}$ проходит через обмотку трансформатора, и для случая, когда этот ток не проходит через нее.

В первом случае ток создает в железе постоянный магнитный поток, железо намагничивается. Этот поток тем больше, чем больше постоянный ток $I_{a=}$. Если объем железа мал, особенно если мала площадь сечения сердечника $Q_{жс}$, то через каждый квадратный сантиметр сечения будет проходить очень много магнитных силовых линий, или, что то же, магнитная индукция в железе B будет очень велика и при этом может наступить

магнитное насыщение в железе. В состоянии насыщения железо в значительной степени теряет свои магнитные свойства, благодаря этому самоиндукция первичной обмотки трансформатора будет мала, очень резко возрастет коэффициент рассеяния σ . Поэтому доводить железо до состояния насыщения нельзя; величина B не должна, как правило, превышать 4000—5000 гаусс. Отсюда понятно, что, чем больше сила тока $I_{a=}$, тем больше, очевидно, должен быть и объем железа.

Проверить, подходит ли данный объем железа для проектируемого трансформатора можно по следующей формуле ¹⁾

$$220 \cdot 10^4 \geq \frac{V_{ж}}{I_{a=}^2 L_1} \geq 5 \cdot 10^4. \quad (6,16)$$

Здесь $I_{a=}$ выражен в амперах; L в генри; $V_{ж}$ в куб. сантиметрах.

Если объем железа, деленный на выражение $I_{a=}^2 L$, меньше величины $5 \cdot 10^4$, то объем слишком мал, железо будет работать близко к насыщению. Если это выражение больше $220 \cdot 10^4$, то объем слишком велик, можно применить сердечник меньшего размера.

Если нужно вычислить объем сердечника, то целесообразно величину $\frac{V_{ж}}{I_{a=}^2 L_1}$ брать равной 20—30 $\cdot 10^4$.

Решим пример: дан сердечник, выполненный из железа III-20 (рис. VI, 12); длина $l_{ж} = 20$ см, сечение железа $Q_{ж} = 2 \times 3 = 6$ см, постоянный ток $I_{a=} = 10 \cdot 10^{-3}$ А; самоиндукция $L_1 = 50$ Н. Требуется выяснить, подходит ли указанный сердечник или нет.

¹⁾ Формула (6,16) получена следующим образом:
Коэффициент самоиндукции L_1 равен

$$L_1 = 0,4\pi \mu_0 \frac{w_1 Q_{ж}}{l_{ж}} \cdot 10^{-8} \text{ Н.} \quad (6,17)$$

Здесь μ_0 — начальная проницаемость железа.
Далее имеем следующее равенство

$$I_{a=} \cdot w_1 = aw \cdot I_{a=} \cdot l_{ж} \quad (6,18)$$

Здесь aw — ампервитки на один сантиметр длины магнитного пути. Исключая из формул (6,17) и (6,18) величину w_1 и заменяем $Q_{ж} \cdot l_{ж} = V_{ж}$. Тогда имеем;

$$\frac{V_{ж}}{I_{a=}^2 L_1} = \frac{10^8}{0,4\pi \mu_0 aw^2} \quad (6,19)$$

Величина $0,4\pi \mu_0$ есть функция aw , причем она колеблется в пределах от 500 до 250 при изменении aw от нуля до 3. Больше 3 величину aw брать не рекомендуется из-за больших нелинейных искажений. Меньше 0,4—0,3, aw брать невыгодно, ибо слишком раздутыми будут габариты. Верхний предел формулы (6,16) соответствует $aw = 0,3$, нижний предел $aw = 3$.

Объем железа $V_{ж} = 0,9 \cdot Q_{ж} \cdot l_{ж} = 0,9 \cdot 6 \cdot 20 = 108$ см, величина

$$\frac{V_{ж}}{I_a^2 L} = \frac{108}{(10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 50} = 2,16 \cdot 10^4.$$

Сравнивая полученный результат с ф-лой (6,16), мы видим, что данный сердечник мал для нашей цели. Объем железа должен быть минимум в 2,3 раза больше. Этого можно достигнуть при помощи того же размера пластин, взяв, скажем толщину сердечника в 2,3 раза больше, т. е. вместо 3 см в $3 \times 2,3 = 7$ см. Но тогда конструктивно трансформатор получился бы очень неудобным. Поэтому лучше применить в данном случае железо типа III-25 (рис. VI,13); длина $l_{ж} = 25$ см, сечение сердечника можно взять $Q_{ж} = 2,5 \times 5 = 12,5$ см. Тогда объем железа будет равен

$$V_{ж} = 0,9 \cdot 25 \cdot 12,5 = 280 \text{ см.}$$

Отношение объема к $I_a^2 L_1$ будет равно

$$\frac{280}{(10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 50} = 5,6 \cdot 10^4.$$

Такой сердечник подойдет, как говорится, в „обрез“.

Во втором случае, когда через первичную обмотку трансформатора не проходит постоянный ток I_a , можно применять сердечники меньших размеров.

В данном случае размер трансформатора должен быть таков, чтобы в его окне разместились первичная и вторичная обмотки.

После определения объема железа находят число витков w_1 исходя из заданной величины самоиндукции первичной обмотки L_1 .

Для определения w_1 служит одна из следующих формул¹⁾.

$$w_1 = 450 \sqrt{\frac{l_{ж}}{0,9 Q_{ж}}} \cdot \sqrt{L_1}. \quad (6,20)$$

$$w_1 = 700 \sqrt{\frac{l_{ж}}{0,9 Q_{ж}}} \cdot \sqrt{L_1}. \quad (6,21)$$

Формула (6,20) применяется во втором случае, т. е. когда ток I_a не проходит через обмотку трансформатора (при пушпульной схеме применяется эта же формула). Формула (6,21) применяется тогда, когда ток I_a проходит через обмотку, когда объем железа $V_{ж}$ близок к минимальному значению формулы (6,16), т. е. когда

отношение $\frac{V_{ж}}{I_a^2 L_1}$ порядка $5 \cdot 10^4$. Если это отношение приближается к максимальному значению, т. е. порядка $220 \cdot 10^4$, то надо самоиндукцию L_1 определять по формуле (6,20).

¹⁾ Формулы (6,20) и (6,21) получены непосредственно из формулы (6,17). В формуле (6,20) величина $0,4\pi\mu_0$ взята равной 500, а в формуле (6,21) $0,4\pi\mu_0 = 250$.

Следующий этап расчета заключается в определении диаметра провода первичной и вторичной обмотки и проверки того, разместится ли обмотка в окне трансформатора. В первом случае, когда по проводу первичной обмотки проходит постоянный ток $I_{a=}$, необходимо сечение провода первичной обмотки q определять исходя из плотности тока. Плотность тока Δ надо брать не больше одного ампера на кв. миллиметр. Поэтому величину q можно определить из следующей формулы

$$q = \frac{I_{a=}}{\Delta} = I_{a=}. \quad (6,22)$$

Здесь q —в кв. миллиметрах; $I_{a=}$ —в амперах.

Во втором случае, когда ток $I_{a=}$ не проходит по обмотке, надо сечение q выбирать из такого расчета, чтобы омическое сопротивление провода первичной обмотки r было не больше $0,1 R_i$, где R_i —внутреннее сопротивление лампы, в аноде которой стоит трансформатор. Дело в том, что сопротивление обмотки r по схеме включено последовательно с R_i ; r как бы увеличивает внутреннее сопротивление эквивалентного генератора; поэтому величину r надо делать малой по сравнению с R_i . Исходя из этого условия, величину q можно определить следующим образом: известно, что сопротивление медного провода в омах равно

$$r = 0,0175 \frac{l}{q}. \quad (6,23)$$

Здесь l —длина провода в метрах, а q —сечение в кв. миллиметрах. В нашем случае $l = w_1 l_1$, где l_1 —длина одного витка обмотки в метрах; r_1 по условию должно быть равно или меньше, чем $0,1 R_i$. Подставляя это в ф-лу (6,24) определяем из нее сечение q_1

$$q_1 = 0,0175 \frac{w_1 l_1}{0,1 R_i}. \quad (6,24)$$

Здесь q_1 —в кв. миллиметрах; l_1 —в метрах; R_i —в омах.

Формула (6,24) является расчетной формулой для определения сечения провода первичной обмотки.

Сопротивление провода вторичной обмотки r_2 должно быть мало по сравнению с сопротивлением шунта R_w . Это требование имеет следующее объяснение: омическое сопротивление вторичной обмотки включено по схеме последовательно с сопротивлением шунта R_w , если r_2 велико по сравнению с R_w , то в нем будет теряться значительная доля полезного напряжения, отдаваемого лампой. Поэтому величину r_2 надо брать в 10—15 раз меньше, чем R_w . Формула для расчета q_2 аналогична формуле (6,24). Она имеет следующий вид

$$q_2 = 0,0175 \frac{w_2 l_2}{0,1 \cdot R_w}. \quad (6,25)$$

Здесь l_2 —длина одного витка вторичной обмотки в метрах; w_2 —число витков вторичной обмотки; $R_{ш}$ —сопротивление шунта; q_2 —сечение провода в кв. миллиметрах.

Обычно для вторичной обмотки можно применять самые тонкие сорта проволоки диаметром от 0,09 до 0,05 мм.

Определив таким образом сечение q_1 и q_2 , мы по ним находим диаметры d_1 и d_2 и выбираем ближайшие существующие диаметры провода. Далее надо проверить, влезет ли обмотка в окно нашего железа. Для этого вычисляют прежде всего площадь сечения чистой меди Q_m по следующей формуле

$$Q_m = (w_1 q_1 + w_2 q_2) \cdot 10^{-2}. \quad (6,26)$$

Если q_1 и q_2 —в квадратных миллиметрах, то Q_m мы получаем в кв. сантиметрах. Отношение площади окна $Q_{ок}$ к площади сечения меди Q_m называется коэффициентом заполнения меди f_m

$$f_m = \frac{Q_{ок}}{Q_m}. \quad (6,27)$$

Подсчитав величину Q_m , вычисляем f_m по формуле (6,27). Если коэффициент f_m велик, то обмотка разместится свободно, если f_m мал, то обмотка не войдет. Для разных сортов провода и для различных условий работы трансформатора величина f_m различна. Ниже даются ориентировочные значения f_m для различных проводов:

Типы провода	f_m
ПЭ	4,5—6
ПВО	6—8
ПВД	8—10
ППД	6—8

Если окажется при подсчете, что f_m значительно больше или значительно меньше норм, указанных в таблице, приходится делать пересчет сердечника.

Следующий этап расчета—это выбор типа намотки и расположение обмотки. На рис. VI,14 показан цилиндрический тип намотки. Ближе к сердечнику мотается первичная обмотка, поверх нее—вторичная. Можно мотать обе обмотки на одном каркасе и проложить между ними лишь прокладку из бумаги или кембрика. При такой намотке коэффициент рассеяния σ невелик, однако, распределенная емкость вторичной обмотки очень велика.

В междудулампных трансформаторах для уменьшения емкости надо вторичную обмотку секционировать, т. е. разбивать на отдельные части (секции). Здесь возможны два типа намоток. Первый тип является также цилиндрической намоткой, но каркас делится перегородками на ряд секций. Первичная и вторичная обмотки мотаются на одном каркасе и разбиты, следовательно, на секции. Второй тип намотки—дисковый, или галетный, он

схематически изображен на рис. VI,15. Вся обмотка разбивается на ряд галет или дисков, которые мотаются отдельно. При сборке

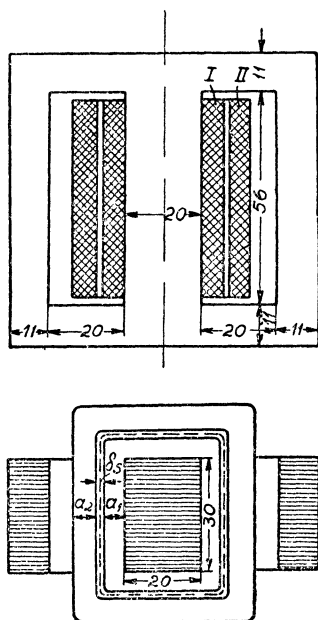


Рис. VI,14.

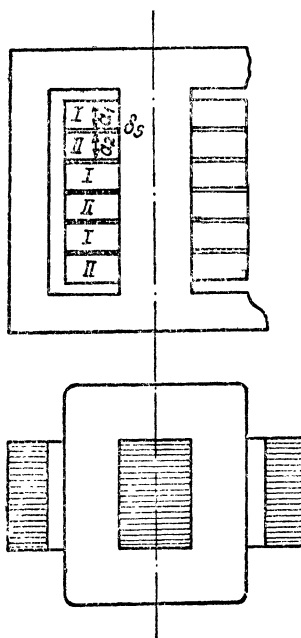


Рис. VI,15.

ставят попеременно галеты первичной и вторичной обмотки; при этом получается очень небольшая распределенная емкость и малый коэффициент рассеяния. Последний способ удобнее в производстве и дает лучшие результаты в смысле качества. Коэффициент рассеяния в междудулампном трансформаторе при указанных методах намотки порядка 0,01—0,008. Распределенная емкость вторичной обмотки порядка 40—60 см.

Подведем итоги всему сказанному:

1. При расчете усилительного трансформатора заданными являются величины L_1 ; n ; $I_{a=}$ (или U_{ma}). Основные требования, предъявляемые к трансформатору, это минимальная емкость вторичной обмотки и небольшой коэффициент рассеяния.

2. Расчет трансформатора разбивается на следующие этапы: 1) определение объема железа, 2) определение числа витков, 3) определение диаметра проводов первичной и вторичной обмотки и вычисление коэффициента заполнения меди, 4) выбор типа и размещение обмотки.

3. При наличии постоянного подмагничивающего тока $I_{a=}$, объем железа определяется по формуле VI, 16.

Если объем слишком мал, то в железе наступает насыщение, при этом уменьшается самоиндукция L_1 и возрастает коэффициент рассеяния σ .

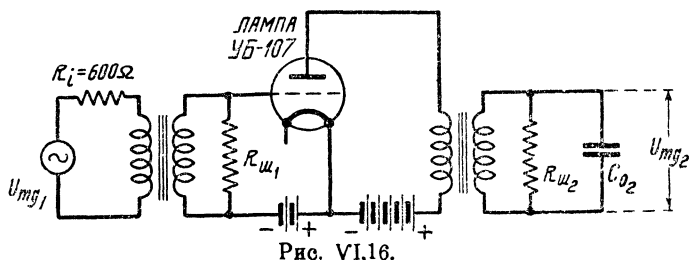


Рис. VI,16.

4. Число витков определяется по формуле

$$w_1 = 450 \sqrt{\frac{L_{жс}}{Q_{жс}}} \sqrt{L_1}$$

в случае отсутствия постоянного тока подмагничивания и по формуле

$$w_1 = 700 \sqrt{\frac{L_{жс}}{Q_{жс}}} \sqrt{L_1}$$

в случае наличия тока подмагничивания.

5. Сечение провода первичной обмотки подбирается таким образом, чтобы омическое сопротивление первичной обмотки было не больше $0,1 R$; омическое сопротивление вторичной обмотки должно быть в 10—15 раз меньше сопротивления шунта $R_{ш}$.

6. Простая цилиндрическая намотка дает малый коэффициент рассеяния, но большую распределенную емкость. Для уменьшения распределенной емкости применяют секционированную намотку (или цилиндрическую или галетную).

Контрольные вопросы.

1. Почему в анод лампы с большим внутренним сопротивлением нельзя ставить трансформатор с малым n , т. е. с большим повышением?
2. Чем вредна емкость $C = C_0 + C_{тр}$?
3. Как влияет шунт в междупламповом трансформаторе на частотную характеристику и для чего его надо ставить?
4. Почему при наличии постоянного тока ($I_{а=}$), проходящего через первичную обмотку трансформатора, нельзя делать трансформатор с очень малым габаритом железа?

Задание.

Дана схема на рис. VI,15 (лампа УБ-107): рассчитать входной трансформатор и трансформатор в аноде лампы УБ-107. Выбрать режим лампы; определить величину U_{mg} . Задано: полоса частот $\omega_n = 600$; $\omega_s = 50\,000$. Допустимые частотные искажения при низшей частоте на оба каскада $M_n = 1,1$. Величина $C_{тр} = 200 \mu F / C_{аг}$ у лампы УБ-107 равна $6 \cdot 10^{-12} F$.

ГЛАВА VII.

УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ.

1. Как выбирать режим лампы в усилителе мощности?

Усилитель мощности является обычно последним каскадом усиления.

Основная задача усилителя мощности—отдать во внешнюю цепь мощность, заданную условиями проектирования. Коэффициент нелинейных искажений при этом должен быть ниже некоторой заданной величины (обычно ниже 5—10%).

Отсюда ясно, что в усилителе мощности правильный выбор лампы и режима лампы имеет решающее значение.

В усилителе напряжения, стоящем в первых каскадах усиления, лампа используется обычно в очень небольших пределах. Поэтому выбор режима здесь не представляет никаких трудностей, надо только обеспечить работу целиком в отрицательной области и выбрать наиболее прямолинейный участок характеристики, чтобы свести к минимуму величину нелинейных искажений.

В последних каскадах усиления напряжения на сетку лампы подается обычно настолько большое напряжение, что существует опасность перегрузки лампы; поэтому надо, во-первых, выбрать такую лампу, которая допускала бы данную „раскачку“ (напряжение на сетку) и, во-вторых, поставить ее в такой режим, при котором нелинейные искажения минимальны.

В усилителе мощности надо так выбрать режим, чтобы лампа отдавала полезную мощность, близкую к предельной для данного типа ламп, и в то же время не вносила заметных нелинейных искажений.

Выясним прежде всего, что понимается под словом „выбор режима ламп“. Выбрать режим это значит: 1) установить анодное напряжение E_a или напряжение анодной батареи (выпрямителя) E_g ; 2) установить величину смещения на сетку E_g ; 3) установить величину тока покоя I_{a0} ; 4) определить наибольшую допустимую „раскачку“ на сетку лампы $U_{g\max}$; 5) установить величину анодной нагрузки лампы R_a ; 6) определить полезную мощность, отдаваемую лампой.

Выбор режима лампы производят графическим методом, ибо характеристика лампы не может быть точно выражена какой-либо математической формулой. Характеристика лампы в середине имеет участок, очень близкий к прямой линии; ясно, что в этом участке нелинейные искажения почти отсутствуют. Однако работа только на этом участке характеристики лампы сильно ограничила бы использование лампы. Поэтому обычно используют также часть нижнего загиба характеристики. В этом участке статическая характеристика лампы нелинейна, но динамическая характеристика, идущая более полого, имеет сравнительно небольшую кривизну, поэтому величина нелинейных искажений может быть ниже допустимой нормы. Чем меньше мы используем нижний загиб, тем меньше коэффициент нелинейных искажений.

Область использования ламповой характеристики мы можем ограничить двумя линиями (рис. VII,1). Вертикальная линия

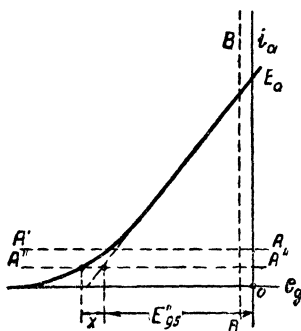


Рис. VII,1.

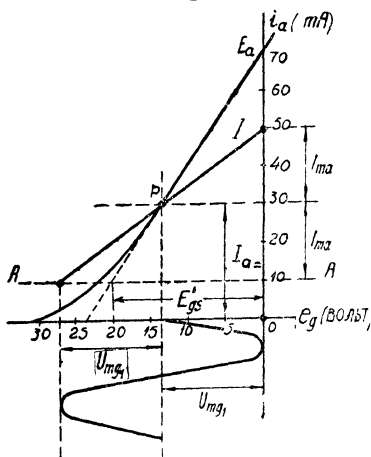


Рис. VII,2.

BB —отрезает нам область токов сетки, и на участке справа от этой линии работать нельзя, динамическая характеристика должна целиком лежать слева от этой линии; если мы работаем до нуля на сетке, то линия BB совпадает с осью ординат, если мы допускаем некоторый заход в положительную часть, то линия BB лежит справа от оси ординат. Горизонтальная линия AA отрезает нижний загиб характеристики; динамическая характеристика должна целиком лежать выше линии AA . На рис. VII,1 приведены две линии—одна ($A'A'$) соответствует небольшому использованию нижнего загиба, другая ($A''A''$) соответствует большему использованию загиба. Если мы хотим целиком использовать весь загиб, то линия AA совпадает с осью абсцисс. Чем ниже линия отреза AA , тем большую мощность можно снять с лампы, но тем больше и нелинейные искажения, вносимые лампой.

Обратимся к рис. VII, 2, 3, 4. На трех рисунках изображена одна и та же статическая характеристика лампы при одном и

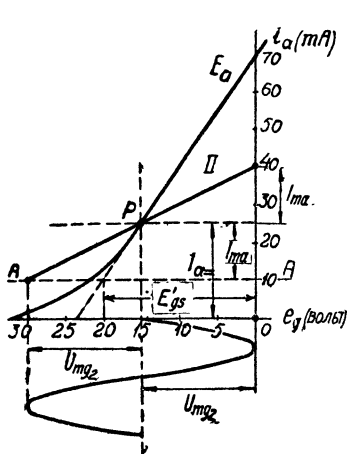


Рис. VII,3.

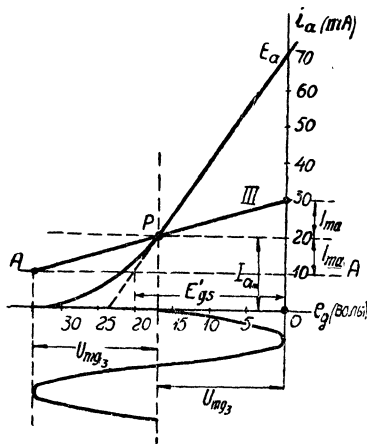


Рис. VII,4.

том же анодном напряжении E_a . Вертикальной линией отреза служит ось ординат, иными словами, мы используем лампу до нуля на сетку, горизонтальная линия отреза AA проведена на высоте 10 mA. Динамические характеристики, изображенные на этих же рисунках, соответствуют разным нагрузкам в анодной цепи. Динамическая характеристика I (рис. VII,2) соответствует величине $\alpha = 1$ ($\alpha = \frac{R_a}{R_i}$). Это видно непосредственно из рисунка; наклон динамической характеристики вдвое меньше наклона (крутизны) статической характеристики

$$S_d = \frac{S}{2}.$$

В главе II § 3 мы вывели формулу (2,14) для динамической характеристики. Она имеет следующий вид

$$S_d = S \frac{1}{1 + \alpha}. \quad (7,1)$$

В данном случае величина $\frac{1}{1 + \alpha}$ должна равняться половине, а отсюда $\alpha = 1$.

Динамическая характеристика II (рис. VII,3) соответствует величине $\alpha = 2$; наклон ее равен

$$S_d = S \frac{1}{1 + \alpha} = S \frac{1}{3}.$$

Наконец, динамическая характеристика III (рис. VII,4) соответствует величине $\alpha = 4$; ее наклон равен

$$S_d = S \frac{1}{1 + 4} = S \frac{1}{5}.$$

Все три режима являются вполне законными, ибо динамические характеристики не выходят за пределы области, ограниченной линиями AA и осью ординат; каждый из режимов соответствует максимально допустимому использованию лампы при данной нагрузке, ибо концы динамических характеристик лежат на линии AA и оси ординат: достаточно немного лишь увеличить раскачку на сетку, как мы выйдем за пределы дозволенной области. Поэтому амплитуды напряжения на сетку U_{mg1} ; U_{mg2} ; U_{mg3} ; являются предельно допустимыми величинами для данной нагрузки в аноде. Посмотрим по рисункам, чему численно равны эти величины.

Из рис. VII, 2 находим $U_{mg1} = 13$

Из рис. VII, 3 „ $U_{mg2} = 15$

Из рис. VII, 4 „ $U_{mg3} = 17$

Отсюда мы можем сделать следующий вывод: чем больше α или чем больше сопротивление внешней нагрузки R_a , тем больше предельно допустимая амплитуда переменного напряжения на сетку. С этой точки зрения надо величину α брать как можно больше.

Из приведенных рисунков видно, что для каждого значения $\alpha = \frac{R_a}{R_i}$ имеется вполне определенная рабочая точка, соответствующая наивыгоднейшему режиму, при котором с лампы можно снять наибольшую неискаженную мощность. Возьмем, например, $\alpha = 2$ (рис. VII,3) и выберем рабочую точку выше той, которая дана на рис. VII,3. Тогда мы получим режим, изображенный на рис. VII,5. Нижний конец динамической характеристики лежит выше линии AA, следовательно, нами используется не вся дозволенная область. Величина предельно допустимой раскачки ($U_{g \max}$) будет в данном случае меньше, чем на рис. VII,3, и мощность, отдаваемая лампой, будет так же меньше.

На рис. VII,6 изображен тот же режим ($\alpha = 2$), но рабочая точка выбрана слишком низко. Поэтому верхний конец динамической характеристики лежит левее оси ординат; опять используется не вся дозволенная область, поэтому предельная неискаженная мощность, отдаваемая лампой, меньше, чем при правильно выбранном режиме.

Посмотрим, как при заданной величине E_a и α выбрать наивыгоднейшую рабочую точку и определить величину $U_{g \max}$. На

рис. VII,7 дан режим, соответствующий какой-то величине E_a и α . Верхний конец динамической характеристики лежит на оси ординат, нижний—на линии отрезка AA .

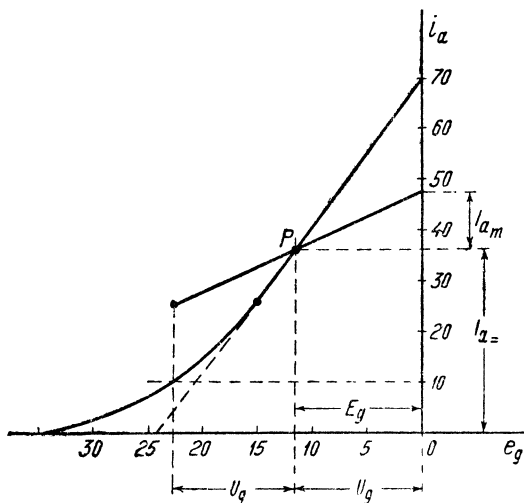


Рис. VII.5.

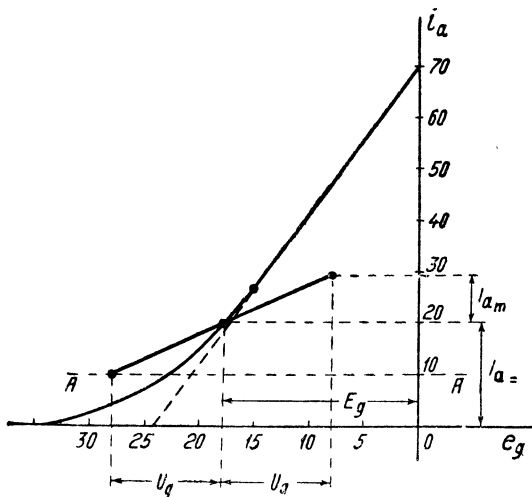


Рис. VII.6.

Составляем следующие равенства (рис. VII,7)

$$U_{g\max} = E'_{gs} - l \quad (7,2)$$

$$\frac{I_{am}}{U_{g\max}} = S_d = S \frac{1}{1 + \alpha}. \quad (7,3)$$

Величину E'_{gs} мы называем напряжением запираения. Эта величина равна расстоянию от начала координат до точки пересечения линии AA с продолжением прямой части характеристики. Величина E'_{gs} определяется непосредственно по статической характеристике, соответствующей заданному анодному напряжению E_a ; надо лишь выбрать линию отрезка AA .

Из рис. VII,7 видно, что

$$\frac{I_{am}}{l} = S$$

или

$$l = \frac{I_{am}}{S}. \quad (7,4)$$

Подставляем значение для l в выражение (7,2)

$$U_{g\max} = E'_{gs} - \frac{I_{am}}{S}. \quad (7,5)$$

Решаем равенства (7,3) и (7,5) относительно неизвестных $U_{g\max}$ и I_{am} : из (7,3) находим

$$\frac{I_{am}}{S} = U_{g\max} \frac{1}{1 + \alpha},$$

подставляем в равенство (7,5)

$$U_{g\max} = E'_{gs} - U_{g\max} \frac{1}{1 + \alpha}.$$

$$U_{g\max} \left(1 + \frac{1}{1 + \alpha} \right) = E'_{gs}.$$

$$U_{g\max} = E'_{gs} \frac{\alpha + 1}{\alpha + 2}. \quad (7,6)$$

Величину амплитуды тока определяем из равенства (7,3), подставляя вместо $U_{g\max}$ его значение (7,6)

$$I_{am} = SE'_{gs} \frac{1}{\alpha + 2}. \quad (7,7)$$

Формула (7,6) дает решение поставленной задачи, т. е. выбор наивыгоднейшей рабочей точки при заданных E_a и α .

Итак при выборе режима поступаем следующим образом:

1. Строим статическую характеристику, соответствующую заданному анодному напряжению E_a .

2. Проводим вертикальную линию отрезка BB (для усилителей мощности этой линией обычно служит ось ординат).

3. Продолжаем прямолинейную часть характеристики до пересечения с осью абсцисс.

4. Проводим горизонтальную линию отрезка AA ; эту линию следует проводить так, чтобы отношение между отрезком x (рис. VII,7) и величиной E'_{gs} было определенной величины. Чем больше отношение $\frac{x}{E'_{gs}}$, тем больше коэффициент нелинейных

искажений. Следующая таблица дает зависимость между коэффициентом нелинейных искажений и этим отношением:

$\frac{x}{E'_{gs}}$	γ
$\frac{1}{60}$	0,01
$\frac{1}{30}$	0,02
$\frac{1}{20}$	0,03
$\frac{1}{10}$	0,05
$\frac{1}{6,5}$	0,07
$\frac{1}{4}$	0,1

Обычно для усилителя мощности можно брать γ в пределах от 0,05 до 0,07; поэтому отношение $\frac{x}{E'_{gs}}$ берут в пределах от $\frac{1}{10}$

до $\frac{1}{5}$. На рис. VII,1 линия $A'A'$ соответствует отношению

$$\frac{x}{E'_{gs}} = \frac{1}{11}; \text{ линия же } A''A'' - \text{ отношению } \frac{x}{E'_{gs}} = \frac{1}{6}.$$

5. Установив таким образом границы использования лампы, мы определяем предельно допустимое переменное напряжение на сетку лампы, пользуясь формулой

$$U_{g\max} = E'_{gs} \frac{\alpha + 1}{\alpha + 2}. \quad (7,7)$$

Определив эту величину, откладываем ее влево по линии AA , отсюда восстанавливаем перпендикуляр и находим рабочую точку в точке пересечения этого перпендикуляра с характеристикой лампы.

Перейдем теперь к определению мощности, отдаваемой лампой.

В главе II, § 2 мы вывели следующую формулу для определения мощности

$$P_{\sim} = \mu S \frac{U_{mg}^2}{2} \frac{\alpha}{(\alpha + 1)^2}. \quad (7,8)$$

Заменяем в этой формуле U_{mg} его выражением (7,6), тогда

$$P_{\sim} = \mu S \frac{E'_{gs}}{2} \frac{\alpha}{(\alpha + 2)^2}. \quad (7,9)$$

Подсчитаем, пользуясь этой формулой, полезную мощность, отдаваемую лампой для режимов, изображенных на рис. VII, 2, 3, 4.

Крутизну лампы S можно определить непосредственно из рисунка, она равна

$$S = \frac{70 \cdot 10^{-3}}{23,5} \approx 3 \cdot 10^{-3}.$$

Допустим, что коэффициент усиления лампы $\mu = 7$. Определяем полезную мощность для всех трех случаев:

$$\text{для случая } \alpha = 1 \text{ (рис. VII,2): } P_{a1} = 7.3.10^{-3} \frac{20^2}{2} \cdot \frac{1}{(1+2)^2} = 0,47 \text{ W};$$

$$\text{для случая } \alpha = 2 \text{ (рис. VII,3): } P_{a2} = 7.3.30^{-3} \frac{20^2}{2} \cdot \frac{2}{(2+2)^2} = 0,525 \text{ W};$$

$$\text{для случая } \alpha = 4 \text{ (рис. VII,4): } P_{a3} = 7.3.10^{-3} \frac{20^2}{2} \cdot \frac{4}{(4+2)^2} = 0,47 \text{ W}.$$

Коэффициент нелинейных искажений, вносимых лампой, тем меньше, чем больше α , т. е. чем ближе мы приближаемся к холостому ходу; при холостом ходе коэффициент нелинейных искажений при любом режиме равен нулю.

Иллюстрируем на конкретном примере изложенный метод выбора режима.

Рис. VII,8.

$$\frac{x \cdot 2 \cdot (x+2) - (x+2)^2}{(x+2)^4} = 0.$$
$$2a - (a + 2) = 0.$$

8 М. Г. МАРК.

$$U_{g\max} = E'_{gs} \frac{\alpha + 1}{\alpha + 2} = 8,5 \frac{3 + 1}{3 + 2} = 6,8 \text{ V.}$$

Откладываем эту величину влево от оси ординат, и находим точку c , из этой точки восстанавливаем перпендикуляр и находим рабочую точку p . Не трудно видеть, что отрезок pc равен амплитуде переменного тока I_{am} ; в данном случае $I_{am} = 2,5 \text{ mA}$; отрезок ep равен току покоя, $I_{a-} = 4 \text{ mA}$. Если нужно построить динамическую характеристику, то мы от точки c откладываем влево ту же величину $U_{g\max}$, получаем точку d и соединяем d с p прямой линией. Эта прямая и будет динамической характеристикой.

Мощность, отдаваемая лампой при этом режиме, определится из формулы (7,8)

$$P_{\sim} = \mu S \cdot \frac{U_{g\max}^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{(\alpha + 1)^2} = 8,1 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \frac{6,8^2}{2} \cdot \frac{3}{(3 + 1)^2} = 0,046 \text{ W.}$$

Итак, мы получили следующие результаты:

На сетку надо дать смещение $-6,8 \text{ V}$ (наш расчет ориентировочный, так что без особого вреда можно, разумеется, дать напряжение в -7 V).

Предельно допустимая „раскачка“ на сетку равна $U_{g\max} = 6,8 \text{ V}$. Коэффициент усиления усилителя равен

$$K = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1} = 8 \frac{3}{3 + 1} = 6.$$

Максимальная амплитуда переменного напряжения на внешней нагрузке равна

$$U_{ma} = K \cdot U_{g\max} = 6 \cdot 6,8 = 41 \text{ V.}$$

Величина внешней нагрузки должна быть при этом равна

$$R_a = aR_i = 3 \cdot 6200 = 18\,600 \text{ }\Omega.$$

Ток покоя равен $I_{a-} = 4 \text{ mA}$.

Мощность, отдаваемая лампой при раскачке в $6,8 \text{ V}$, равна

$$P_{\sim} = 0,046 \text{ W.}$$

Остается еще проверить, выдержит ли лампа указанный режим. Во время покоя (при отсутствии колебаний) к лампе подводится мощность, равная напряжению на лампе E_c , помноженному на ток покоя I_{a-}

$$P_c = E_c \cdot I_{a-}.$$

Эта мощность идет на нагревание анода лампы; если она чересчур велика, то аноды покраснеют, и лампа может выйти из строя.

Для каждой лампы указывается заводом предельная мощность, которую можно „рассеять“ или выделить в виде тепла на аноде. Для рассматриваемой лампы она должна быть не больше 2—3 W. В нашем случае мы имеем

$$P_o = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 140 = 0,56 \text{ W},$$

что вполне допустимо.

Если с лампы надо снять большую полезную мощность, то надо повысить анодное напряжение. Повышать его можно лишь до пределов, указываемых на этикетке лампы.

Укажем еще на способ быстрого определения (приблизительного) величины полезной мощности, которую можно снять с лампы. Для этого поступаем следующим образом: проводим линию отреза AA, как указано было выше; определяем из чертежа отрезок af (рис. VII,8), т. е. величину анодного тока в лампе при нуле на сетке (I_{ao}), минус отрезанный линией AA ток. Обозначим эту величину через I_{ao} ; для нашего примера

$$I_{ao} = 13 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-3} = 11,5 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

Мощность, отдаваемую лампой, можно вычислять по формуле

$$P_{\sim} = \frac{(I'_{ao})^2 \cdot R_i}{16}. \quad (7,10)$$

Для нашего примера получим

$$P_{\sim} = \frac{(11,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6200}{16} = 0,051 \text{ W}.$$

Мы получили несколько большую мощность, чем раньше; это объясняется тем, что формула (7,10) справедлива для $\alpha = 2$, а в нашем примере $\alpha = 3$. Однако для ориентировочной прикидки формулой (7,10) очень удобно пользоваться.

Выясним, какие требования следует предъявлять к лампе, работающей в усилителе мощности.

Основное требование заключается в том, чтобы лампа отдавала при небольшом сравнительно напряжении большую неискаженную мощность.

Из формулы для мощности P_{\sim} (7,9) видно, что мощность, отдаваемая лампой, тем больше, чем больше μ . Поэтому казалось бы, что надо выбирать лампу с большим μ . Однако это не так.

Лампу мы можем использовать только в левой отрицательной части ее характеристики. Лампа с большим коэффициентом усиления μ является „правой лампой“, т. е. почти вся ее характеристика лежит в положительной области; надо дать на анод

лампы очень высокое напряжение, чтобы сдвинуть характеристику влево. Поэтому для усилителя мощности низкой частоты пригодны лишь лампы с малым¹⁾ коэффициентом усиления μ . Эту величину берут в пределах от 4 до 9.

Из той же формулы (7,9) видно, что мощность, отдаваемая лампой, тем больше, чем больше крутизна.

Итак лампы, предназначенные для усиления мощности низкой частоты, должны иметь как можно большую крутизну и малый коэффициент усиления.

Следующие типы ламп могут быть использованы в усилителе мощности:

1. Лампа УК-30; она имеет $\mu=9$; $S=1,5$ mA/V;
2. Лампа УБ-132; она имеет $\mu=8$; $S=1,3$ mA/V;
3. Лампа УО-104; она имеет $\mu=4$; $S=2,5-3$ mA/V;
4. Лампа УК-33; она имеет $\mu=9$; $S=3-3,5$ mA/V;
5. Лампа М-89; она имеет $\mu=8$; $S=5$ mA/V.

Наконец, в усилителе мощности широко используется лампа Г5 ($\mu=11$, $S=1-1,2$ mA/V) и лампа М-250 и М-300; последняя имеет $\mu=16-17$, поэтому она требует довольно высокого анодного напряжения (порядка 4000 V), если мы хотим снять с нее большую мощность.

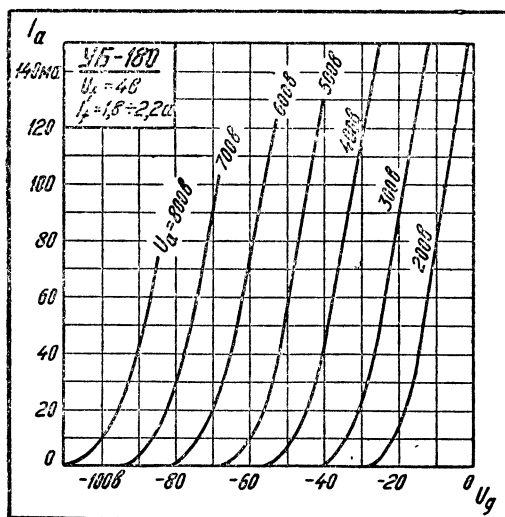


Рис. VII,9а.

¹⁾ Ниже будет показано, что в некоторых случаях применяют в усилителе мощности правые лампы с большим μ и при этом работают в положительной части характеристики.

В новой усилительной аппаратуре (выпуска 1936 г.) будет использована лампа типа УБ-180, имеющая крутизну, равную 6 мА/В и $\mu = 8 - 10$. Характеристики ее даны на рис. VII,9.

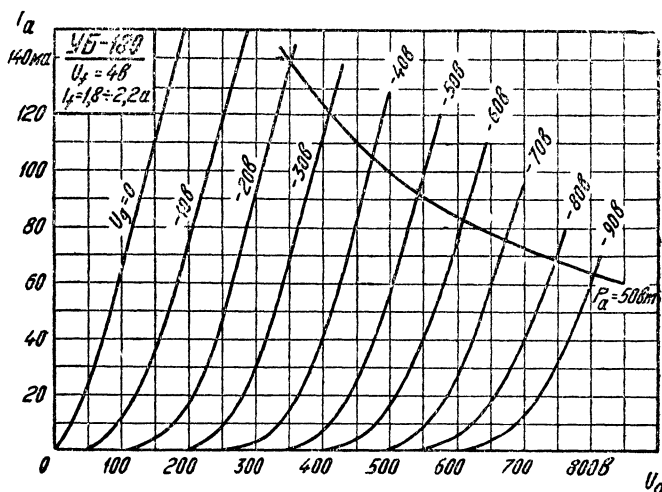


Рис. VII,96.

Суммируем все сказанное:

1 Выбор режима лампы в усилителе мощности производится таким образом, чтобы лампа не перегружалась, не вносила значительных нелинейных искажений и отдавала бы требуемую от нее мощность.

2. Определяя режим, мы по заданной величине E_a и α находим величины $U_{g \max}$, E_g , I_{am} , $I_{a=}$ и $P_{\sim a}$.

Величину α в усилителях мощности следует брать в пределах от 2 до 4.

3. При величине $\alpha = 2$ лампа отдает наибольшую неискаженную мощность; эту мощность можно определить по формуле

$$P_{\sim a} = \frac{I'_{ao}{}^2 R_i}{16}.$$

4. Чем ниже мы проводим горизонтальную линию отреза АА, тем большую мощность мы можем снять с лампы, но тем больше будет и величина нелинейных искажений, вносимых лампой. Величина нелинейных искажений, зависит от отноше-

ния $\frac{x}{E_{gs}}$; это отношение надо брать в пределах от $\frac{1}{6}$ до $\frac{1}{10}$.

5. После выбора режима надо всегда проверить, не превышает ли мощность рассеяния на аноде предельно допустимую величину. Мощность, рассеиваемую на аноде, определяем по формуле

$$P_{\sim a} = I_{a-} E_a.$$

6. Лампа, предназначенная для усиления мощности, должна иметь малое μ (от 4—9) и большую крутизну.

2. Двухтактная схема

В усилителе мощности применяется часто двухтактная схема или схема пушпул (рис. VII,10).

Вясним, как работает схема. К клеммам входного трансформатора подводится переменное напряжение. Из рис. VII,10

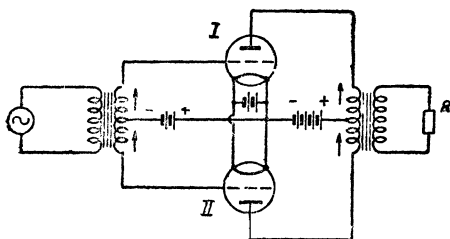


Рис. VII,10.

видно, что в тот момент, когда на сетку лампы I подается наибольшее положительное напряжение, на сетке лампы II имеется наибольшее отрицательное напряжение. Переменный ток анода изменяется одновременно с напряжением на сетке, следовательно, нарастанию тока в аноде первой лампы (стрелка от плюса ба-

тарей к аноду), соответствует спадание тока во второй лампе (стрелка от анода к плюсу). В результате в обеих половинках обмотки трансформатора будет течь переменный ток в одном направлении, следовательно, переменные магнитные потоки в железе, образованные током в обеих половинках обмотки, будут складываться.

Поэтому на клеммах вторичной обмотки трансформатора будет переменное напряжение.

Двухтактная схема имеет ряд преимуществ перед обычной схемой.

Перечислим эти преимущества:

1. При двухтактной схеме железо выходного трансформатора не подмагничивается постоянным током, потому что постоянная слагающая анодного тока течет в обеих половинках обмотки в разные стороны; поэтому размеры сердечника получаются значительно меньшими, чем при обычной схеме.

2. При питании нитей накала переменным током фон на выходе значительно меньше, чем в обычной схеме.

3. При питании анодов ламп от выпрямителя надо иметь значительно меньший сглаживающий фильтр, чем при обычной схеме.

Остановимся на пункте 2 и 3. На рис. VII,11 дана двухтактная схема с питанием накала от переменного тока. Анод мы питаем от выпрямителя с очень плохим фильтром; значит, между точками $+a$ и $-a$, при отсутствии переменного напряжения на сетку, будет течь не только постоянный ток покоя обеих ламп $2I_{a0}$, но и некоторый переменный ток, вследствие пульсации напряжения в выпрямителе. Однако этот переменный ток никакого действия на вторичную обмотку трансформатора оказывать не будет, ибо он течет в каждой из половинок первичной обмотки в противоположном направлении (стрелки на рис. VII,11). Значит, магнитный

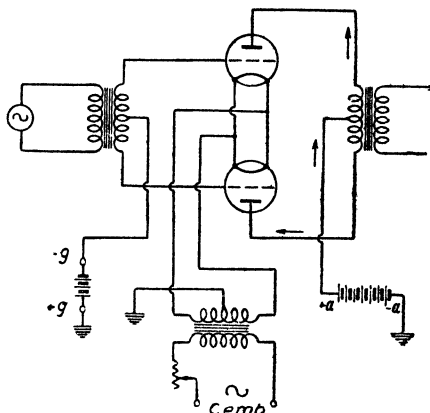


Рис. VII,11.

поток в железе, образованный током в первой половинке, будет скомпенсирован магнитным потоком, образованным благодаря току во второй половинке; в результате не будет никакого магнитного потока, и во внешней цепи мы фона не услышим. То же самое можно сказать и в отношении накала. Нить лампы, то охлаждаясь, то нагреваясь, будет вызывать колебания анодного тока в лампе; так как нити первой и второй лампы нагреваются и охлаждаются одновременно, то и анодный ток в обеих лампах будет нарастать и спадать одновременно; в железе трансформатора опять-таки будут образовываться два взаимно противоположных переменных магнитных потока, в сумме они дадут нуль.

Все наши рассуждения целиком справедливы, если схема совершенно симметрична, т. е. обе лампы и обе половинки трансформатора совершенно одинаковы. В действительности это не так, поэтому некоторый фильтр выпрямителя все же нужен. Если в каждом плече стоит не одна, а несколько ламп, то нужно их так подбирать, чтобы по возможности приближаться к симметрии. Часто имеется приспособление для измерения постоянного анодного тока в каждом плече в отдельности, тогда надо так подбирать лампы, чтобы анодные токи были по возможности одинаковыми.

Иногда схема устроена так, что имеется возможность для лампы каждого плеча подбирать смещение на сетку. Тогда можно так подобрать смещение, чтобы постоянная слагающая анодного тока в каждом плече была совершенно одинакова. На рис. VII,12 дана такая схема. Смещение на сетки подается от анодного напряжения (см. гл. I, § 3). Движками Π_1 и Π_2 можно менять смещение лампы правого или левого плеча.

Перечисленные нами преимущества двухтактной схемы не являются основными. Основное преимущество заключается в том,

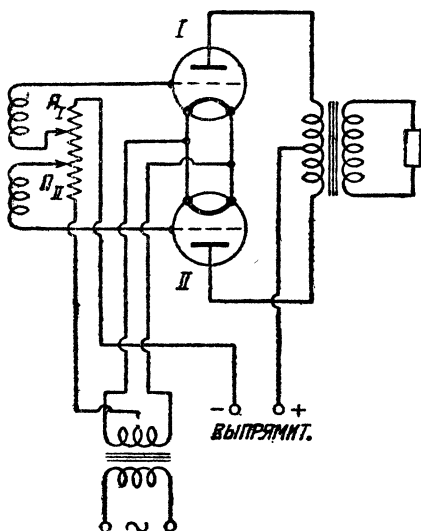


Рис. VII,12.

что при двухтактной схеме лампы можно использовать значительно шире, ибо нелинейные искажения, вносимые лампой, при этой схеме частично уничтожаются. В частности лампу можно использовать в режиме, указанном на рис. VII,13.

Этот режим называется режимом В в отличие от нормального усилительного режима, называемого режимом А.

В нормальной схеме лампа в режиме В вносила бы большие нелинейные искажения. Покажем, что в двухтактной схеме лампа в этом режиме не будет вносить искажений. Для этого обратимся к рис. VII,14. На нем изображена динамическая характеристика как первой, так и вто-

рой ламп; причем для второй лампы она опрокинута вниз: ось ординат для второй лампы служит ось $O_2 a_2$ и положительные значения тока откладываются книзу, а положительные значения напряжения на сетке влево. При таком построении мы можем рассмат-

ривать процесс одновременно в обеих лампах. Скажем, анодный ток в первой (верхней) лампе нарастает, это соответствует движению вправо, ток анода во второй лампе сперва уменьшается, а затем становится равным нулю. Известный период времени ток течет в обеих лампах (от точки p до c): магнитные потоки, образуемые этими токами в железе, направлены друг против друга. В точках p_1 и p_2 (момент покоя) токи в первой

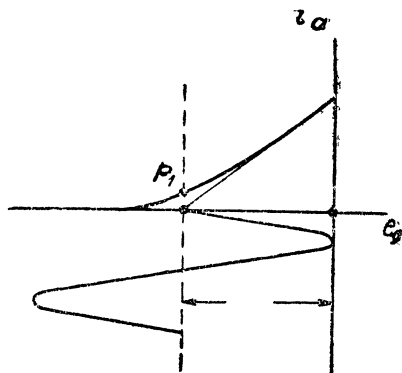


Рис. VII,13.

и второй лампе равны, поэтому результирующий магнитный поток в железе равен нулю. Затем при движении вправо ток первой лампы становится больше, а ток второй лампы уменьшается, поэтому результирующий поток в железе уже не равен нулю и постепенно возрастает. После точки c ток течет только в первой лампе, поэтому только он и будет создавать

[illegible]

мой линии pa_1 . В следующую половину периода лампы поменяются ролями, и магнитный поток будет меняться по прямой pa_2 . Значит, магнитный поток в железе меняется в зависимости от напряжения на сетке по закону прямой линии $a_2 pa_1$. Электродвижущая сила во вторичной обмотке будет меняться по этому же закону, и вся схема никаких нелинейных искажений вносить не будет. Во время работы стрелка амперметра в анодной цепи будет колебаться, однако, в данном случае это вовсе не означает, что усилитель перегружается.

1) В состоянии покоя при режиме В в аноде лампы течет ничтожно малый ток. Поэтому мощность рассеивания на аноде лампы в состоянии покоя очень мала. Благодаря этому расход энергии при этом режиме значительно меньше, чем при режиме А.

Так как в режиме В лампа фактически работает менее полупериода, а вторую половину периода заперта, то полезная мощность, выделяемая каждой лампой на внешнем сопротивлении, равна

Здесь I_m — максимальное мгновенное значение тока в лампе (рис. VII,14); R_{a1} — сопротивление, на которое нагружена лампа; $R_{\Sigma 1}$ — равно половине сопротивления всей внешней нагрузки.

Мощность, подводимая к каждой лампе при максимальной раскатке на сетку $U_{g \max}$, равна ¹⁾

$$P_{ma1} = \frac{I_a \cdot E_a}{\pi}. \quad (7,12)$$

Мощность рассеивания на аноде лампы равна

$$P_{a1} = P_{o1} - P_{\sim 1}. \quad (7,13)$$

Эта мощность рассеивается только во время выкриков при передаче речи и во время форте и фортиссимо при передаче музыки. В состоянии покоя и при малых напряжениях (пиано) мощность, рассеиваемая на аноде, значительно меньше.

Итак, преимущества режима В заключаются, во-первых, в возможности более широко использовать лампу и, во-вторых, в значительно меньшем расходе энергии.

Режим В особенно выгоден там, где усилитель питается не от выпрямителя, а от первичных или вторичных элементов, например, в местах отсутствия источников энергии переменного тока.

Рассмотрим вопрос об эквивалентной схеме двухтактного усилителя. Для этого выясним предварительно, какой ток течет в среднем проводе, т. е. в цепи анодной батареи (см. рис. VII,10).

¹⁾ Формула (7,12) выводится следующим образом: кривая тока в аноде лампы имеет вид, изображенный на рис. VII, 15; среднее значение тока (постоянная составляющая) для такой

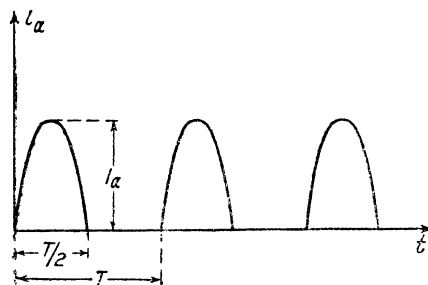


Рис. VII,15.

кривой равно $\frac{I_a}{\pi}$, где I_a — максимальный импульс. Очевидно, что мощность, отдаваемая батареей и подводимая к лампе, равна постоянному току $\left(\frac{I_a}{\pi}\right)$, проходящему через батарею и лампу, умноженному на постоянное напряжение на аноде лампы E_a

$$P_{o1} = \frac{I_a}{\pi} E_a.$$

Коэффициент полезного действия равен

$$\eta = \frac{P_{\sim 1}}{P_{o1}} = \frac{I_a \cdot U_{am}}{4} \cdot \frac{\pi}{I_a E_a} = \frac{\pi}{4} \frac{U_{am}}{E_a} \quad (7,14)$$

для режима А кпд равен

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{am}}{E_a}. \quad (7,15)$$

Этот ток, очевидно равен сумме токов обеих ламп. На рис. VII,16 изображен ток первой лампы, ток второй лампы и сумма этих

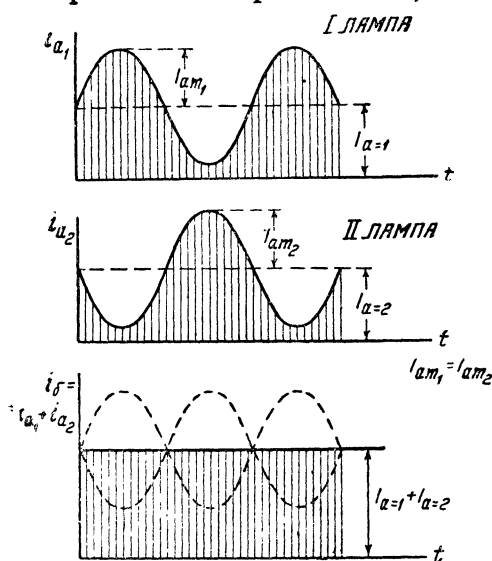


Рис. VII,16.

токов. Все это относится к режиму А. Из рис. VII,16 видно, что в среднем проводе течет только постоянный ток: переменный ток в среднем проводе отсутствует. Следовательно, при составлении эквивалентной схемы усилителя, справедливой для переменной слагающей тока, мы средний

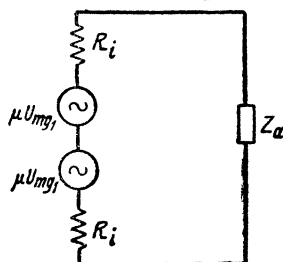


Рис. VII,17.

провод можем выкинуть (по нему ток не течет). Заменяем каждую из ламп генератором с эдс μU_{m1} и с внутренним сопротивлением R_i и выкидываем средний провод, тогда получаем эквивалентную схему, изображенную на рис. VII,17. Из схемы видно, что оба генератора работают последовательно на одно и то же сопротивление Z_a , равное всей внешней нагрузке.

Для режима В справедлива эта же эквивалентная схема, только вместо R_i надо брать $2R_i$, ибо внутреннее сопротивление эквивалентной схемы в режиме В вдвое больше, т. е. равно $2R_i$.

Подведем итоги всему сказанному:

1. Двухтактная схема имеет ряд преимуществ перед обычной схемой, поэтому она часто применяется в усилителях мощности.
2. Выходной трансформатор при двухтактной схеме имеет гораздо меньшие размеры, чем при обычной схеме.
3. Вредные колебания анодного тока вследствие накала нитей переменным током и плохой фильтрации анодного напряжения не создают колебаний напряжения на выходе. Благодаря этому получается экономия на фильтре.
4. Основным преимуществом двухтактной схемы является возможность использования лампы в режиме В.
5. Режим В дает значительную экономию в расходовании энергии на питание усилителя и дает возможность благодаря

более высокому КПД снимать с лампы большую полезную мощность по сравнению с режимом А.

3. Пентоды.

Разберем принцип работы лампы, имеющей между управляющей сеткой и анодом дополнительную сетку, называемую экранирующей (или экранной) (рис. VII,18).

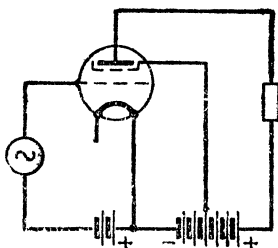


Рис. VII,18.

Если эту сетку сделать очень частой (густой), то на поток электронов будет мало влиять изменение анодного напряжения. Известно, что в обычной трехэлектродной лампе при частой сетке анодное напряжение значительно меньше влияет на поток электронов, чем при редкой сетке. В рассматриваемом случае мы имеем между анодом и нитью две сетки, одна из которых более редкая (управляющая сетка), другая более частая (экранная сетка). Очевидно на поток электронов сильно будет влиять изменение напряжения на первой и второй сетке и очень мало — напряжение на аноде. Это равносильно тому, что лампа имеет большой коэффициент усиления μ или малую проницаемость D . Если мы первую сетку соединим с нитью или дадим ей некоторое отрицательное смещение, на вторую сетку дадим положительное напряжение порядка 80—100 В, а на анод несколько большее напряжение, порядка 130—160 В (см. рис. VII,18), то в аноде потечет значительно больший ток, чем в трехэлектродной лампе, имеющей тот же коэффициент усиления μ и то же напряжение на аноде. Объясняется это следующим образом: в пространстве между второй сеткой и нитью электронный поток будет в основном определяться не анодным напряжением, а напряжением на экранной сетке. Так как первая сетка редкая, то обычно достаточно иметь на второй сетке напряжение порядка 80 В, чтобы иметь значительный электронный поток (соответствующий прямой части характеристики лампы).

Большая часть электронного потока попадет на анод, ибо анод имеет больший положительный потенциал, чем вторая сетка, и все электроны, проскочившие через отверстия второй сетки, попадут на анод; другие электроны, ударившись с большой силой о вторую сетку, выбьют из ее поверхности электроны, которые полетят в сторону более высокого анодного напряжения, т. е. к аноду. Таким образом, несмотря на незначительную величину напряжения на аноде и несмотря на большой коэффициент усиления лампы μ , мы имеем достаточно большой ток в аноде, даже при отрицательных напряжениях на управляющей сетке.

Выше было показано, что полезная мощность, отдаваемая лампой, пропорциональна коэффициенту усиления μ ; однако, трехэлек-

тродная лампа с большим μ для усиления мощности непригодна, ибо она является правой лампой, т. е. при небольших анодных напряжениях (100—200 В) и отрицательных смещениях на сетку, анодный ток лампы ничтожно мал, лампа фактически заперта. При наличии экранной сетки лампа, несмотря на большое μ , является все же левой лампой, т. е. достаточно небольшого анодного напряжения, чтобы получить большой анодный ток даже при отрицательных смещениях на управляющей сетке.

На рис. VII,19 изображена характеристика лампы с экранной сеткой (I) при $E_a = 160$ В. Коэффициент усиления этой лампы равен $\mu = 200$. На том же рисунке дана характеристика трехэлектродной лампы (II) с тем же коэффициентом усиления μ и при том же анодном напряжении.

В этом свойстве огромное преимущество экранированной лампы перед обычной трехэлектродной лампой. С экранированной лампы можно при одинаковом анодном напряжении и при одинаковой раскачке на сетку U_{mg} снять большую мощность, чем с трехэлектродной лампы.

Однако экранированная лампа имеет один крупный недостаток.

При напряжении на аноде, равном напряжению на экранной сетке, ток в аноде резко падает, почти до нуля. Причина этому следующая: электроны, ударяясь с большой силой об анод, выбивают вторичные электроны из поверхности анода. При напряжении на аноде большем, чем напряжение экранной сетки, выбитые электроны никуда не летят, а остаются на аноде. Но стоит напряжению на аноде сделаться хотя бы не намного меньше напряжения экранной сетки, как выбитые электроны устремляются от анода к экранной сетке, ибо электрон всегда летит в сторону более высокого потенциала. Таким образом внутри лампы возникает обратный поток электронов от анода к сетке, что ведет к резкому уменьшению анодного тока. На рис. VII,20 изображена зависимость анодного тока от напряжения на аноде: кривая имеет резкий провал при напряжении на аноде, несколько меньшем напряжения экранной сетки. При меньших напряжениях на аноде удары электронов об анод не настолько сильны, чтобы выбивать из его поверхности вторичные электроны, поэтому анодный ток несколько больше. В области провала лампу использовать нельзя, из-за больших нелинейных искажений.

Провал в характеристике можно устранить, если между анодом и электронной сеткой включить еще одну сетку (3-ю сетку), соединенную с нитью (рис. VII,22). Эта сетка вносит в прост-

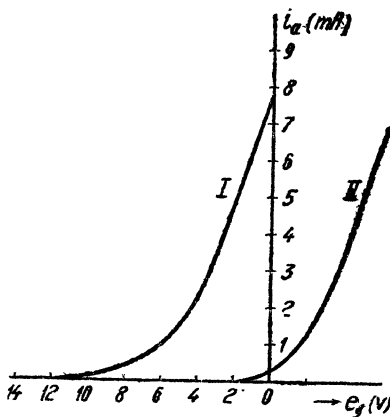


Рис. VII,19.

ранство между анодом и экраном потенциал нити более низкий, чем потенциал анода, благодаря этому обратный полет электро-

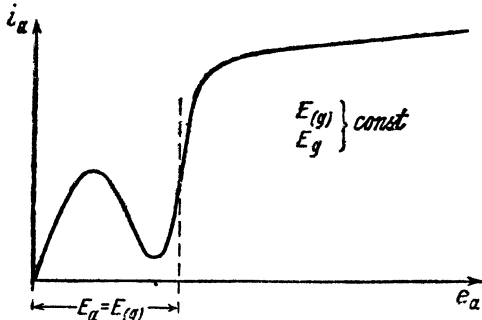


Рис. VII,20.

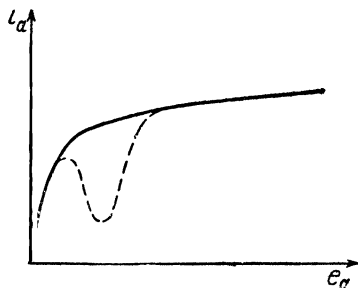


Рис. VII,21.

нов от анода к экранной сетке прекращается. Зависимость между анодным током и напряжением на сетке имеет при этом вид, указанный на рис. VII,21.

Лампа, имеющая 3 сетки, из которых одна управляющая, вторая экранирующая и третья защитная, расположенная между анодом и экраном, называется пентодом. Схема включения пентода дана на рис. VII,22.

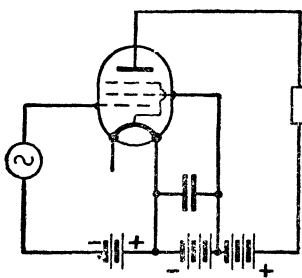


Рис. VII,22.

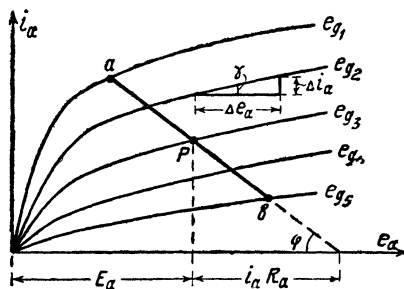


Рис. VII,23.

Рассмотрим вопрос о выборе режима пентода, работающего в качестве усилителя мощности. На рис. VII,23 дано семейство характеристик пентода в системе координат i_a в функции от e_a ; каждая характеристика соответствует какому-то значению смещения на сетку E_g . Не трудно видеть, что наклон характеристики (тангенс угла γ) равен величине $\frac{1}{R_i}$, ибо внутреннее сопротивление есть отношение приращения анодного напряжения (Δe_a) к приращению тока (Δi_a) при постоянном напряжении на сетке ($E_g = \text{const}$). Пентод имеет большое μ , а следовательно, и большое внутреннее сопротивление R_i , поэтому характеристики пентода весьма пологи.

Динамическая характеристика имеет вид прямой линии, наклонной к оси абсцисс. На рис. VII,23 изображена динамическая характеристика (a, P, b). Поясним, почему динамическая характеристика в этой системе координат имеет такой вид. Динамическая характеристика дает зависимость тока i_a от анодного напряжения (e_a) при наличии нагрузки R_a анодной цепи. Напряжение на аноде e_a всегда равно напряжению батареи E_g минус падение напряжения на внешней нагрузке (рис. VII,23). Это может быть выражено следующим равенством

$$e_a = E_g - i_a R_a. \quad (7,16)$$

Это равенство дает нам зависимость между i_a и e_a при наличии нагрузки в аноде, следовательно, это равенство и есть уравнение динамической характеристики. Наклон динамической характеристики (тангенс угла φ) равен $\frac{1}{R_a}$; это непосредственно видно из рис. (VII,23).

Выберем рабочую точку P (рис. VII, 24) и проведем для нее ряд динамических характеристик, соответствующих различным сопротивлениям нагрузки.

Чем больше R_a , тем положе идет динамическая характеристика. Из рисунка видно, что пологие характеристики (большое R_a) заходят в область, где анодный ток резко уменьшается (загиб характеристик); здесь работать нельзя, ибо форма кривой анодного тока будет сильно искажена, и коэффициент нелинейных искажений будет велик.

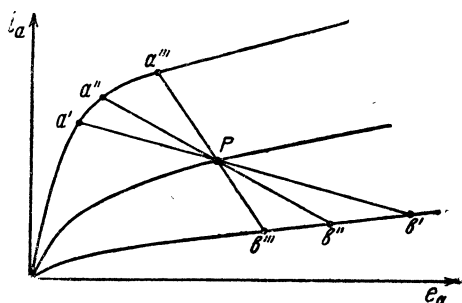


Рис. VII,24.

Итак, большое R_a , т. е. недогрузка пентода, ведет к нелинейным искажениям. В этом отличие пентода и его недостаток по сравнению с трехэлектродной лампой. Трехэлектродная лампа не допускает лишь перегрузки (уменьшение R_a), а недогрузка при трехэлектродной лампе не страшна. Пентод нельзя не только перегружать, но и недогружать. Режим пентода надо выбирать так, чтобы динамическая характеристика пересекала лишь прямолинейные части статических характеристик. Режим выбирается графически. Для примера произведем выбор режима для пентода типа CO-122. На рис. VII,25 дано семейство характеристик этого пентода. Рабочую точку выбираем в точке P . Это соответствует $E_a = 300\text{V}$; $I_a = 20 \cdot 10^{-3}\text{A}$; $E_g = -10\text{V}$. Если мы хотим использовать пентод до напряжения на сетку, равного -2V , то динамическая характеристика одним своим концом должна лежать на

характеристике, соответствующей $e_{g1} = -2V$. Чтобы не было значительных нелинейных искажений, конец динамической характеристики

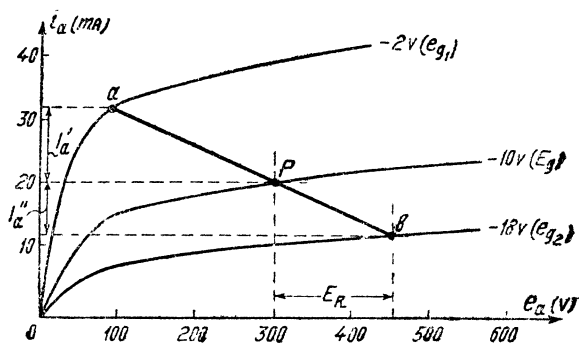


Рис. VII,25.

ристики не должен лежать левее точки a . Раскачка на сетку U_{g1} равна

$$U_{g1} = -E_g - 2 = -V.$$

Следовательно, другой конец динамической характеристики должен лежать на статической характеристике, соответствующей сеточному напряжению e_{g2}

$$e_{g2} = E_g - U_{g1} = -18 \text{ V}.$$

Проведем линию через точки a , P до пересечения с этой характеристикой. Линия a, P, b будет динамической характеристикой выбранного нами режима. Коэффициент нелинейных искажений будет тем больше, чем больше разность между I_a' и I_a'' . Если $I_a' = I_a''$, то нелинейные искажения малы. В нашем случае $I_a' - I_a'' = 3 \text{ mA}$ и коэффициент нелинейных искажений равен

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{I_a' - I_a''}{I_a' + I_a''} = \frac{1}{2} \frac{(12 - 9) \cdot 10^{-3}}{(12 + 9) \cdot 10^{-3}} = 0,07.$$

Сопротивление R_* определяется из отношения

$$R_* = \frac{E_R}{I_a'} = \frac{160}{9 \cdot 10^{-3}} = 18\,000 \text{ } \Omega.$$

Внутреннее сопротивление пентода 60-122 равно

$$R_i = 100\,000 \text{ } \Omega.$$

Оно значительно больше, чем сопротивление внешней нагрузки. В этом второе отличие пентода от трехэлектродной лампы. В усилителе мощности с трехэлектродной лампой мы всегда работаем при $\alpha = \frac{R_a}{R_i}$ большем единицы, порядка 3—4; в усилителе мощности с пентодом работают при α меньшем единицы, порядка 0,2—0,1.

Мощность, отдаваемую нашим пентодом для избранного нами режима, подсчитываем по формуле

$$P_{\sim} = \frac{I_{mai}^2 R_a}{2} \quad (7,17).$$

$$P_{\sim} = \frac{10,5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 18\,000}{2} = 1 \text{ W.}$$

Суммируем все сказанное относительно пентода.

1. Пентодом называется лампа с тремя сетками: а) управляющая сетка; б) экранная сетка; в) защитная сетка, расположенная между экранной сеткой и анодом, соединенная накоротко с нитью.

2. Пентод является левой лампой с большим коэффициентом усиления, поэтому при одном и том же анодном напряжении, при одной и той же раскачке на сетку с пентода можно снять значительно большую мощность, чем с обычной трехэлектродной лампы.

3. Пентод вносит при недогрузке значительные нелинейные искажения. В этом—один из основных недостатков пентода.

4. В усилителе мощности с пентодом работают в отличие от усилителя с трехэлектродной лампой при α меньшем единицы, порядка 0,1—0,2.

Иногда в усилителе мощности вместо пентода применяют трехэлектродные лампы с большим коэффициентом усиления μ (так называемые правые лампы). Лампы работают в двухтактной схеме в режиме В. Смещение на сетку равно обычно нулю, следовательно, лампа используется только в положительной области.

Ток сетки течет все время (первую половину периода в одной лампе, вторую половину—во второй лампе); он нагружает предварительный каскад; поэтому предварительный каскад должен быть достаточно мощным. Обычно мощность предварительного каскада должна составлять $\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{15}$ от мощности, отдаваемой последним каскадом. В этом—основной недостаток правых ламп.

Преимущество правых ламп заключается в том, что они работают без специального смещения на сетку в режиме В, т. е. при высоком коэффициенте полезного действия. Величина сопро-

тивления внешней нагрузки R_a здесь так же, как и у пентода, значительно меньше, чем R_i .

У нас правые лампы пока не применяются. Они имеют широкое применение в США.

4. Расчет усилителя с трансформаторным выходом.

В усилителе мощности почти всегда применяется трансформаторный выход. Причина этому следующая: выше мы показали, что трехэлектродная лампа отдает наибольшую полезную мощность, когда $\alpha=2$; далее было показано, что в усилителе с трехэлектродной лампой лучше работать при больших α , порядка 3—4; а в усилителе с пентодом при $\alpha \ll 1$.

Но величину $\alpha = \frac{R_a}{R_i}$ мы можем тогда выбирать по своему усмотрению, когда нам не задана анодная нагрузка, усилитель же мощности работает обычно на заданную нагрузку. Тут приходится на помощь трансформатор. Мы видели, что сопротивление нагрузки во вторичной цепи трансформатора R , приведенное к первичной цепи, равно

$$R' = Rn^2.$$

Подбирая коэффициент трансформации n , мы можем при любом заданном внешнем сопротивлении R сделать R' желательной для нас величины. Поясним это на примере: трехэлектродная лампа имеет внутреннее сопротивление $R_i = 3000 \Omega$; сопротивление нагрузки $R = 1000 \Omega$. Если бы мы нагрузку в 1000Ω включили прямо в анод, то мы поставили бы лампу в явно невыгодный режим. Поэтому включаем нагрузку через трансформатор. Надо определить коэффициент трансформации этого трансформатора.

Выбираем $\alpha = 3$. Приведенное к первичной обмотке внешнее сопротивление $R' = \alpha R_i$; в то же время $R' = Rn^2$.

Приравняем между собою правые стороны обоих равенств

$$\alpha R_i = Rn^2.$$

Отсюда находим коэффициент трансформации

$$n = \sqrt{\frac{\alpha R_i}{R}}. \quad (7,18)$$

Подставляем в формулу (7,18) числовые величины

$$n = \sqrt{\frac{3 \cdot 3000}{1000}} = 3.$$

Итак, надо взять трансформатор с понижением в три раза, тогда лампа будет работать в нормальном режиме.

Мы выяснили, почему в подавляющем большинстве случаев усилитель мощности имеет трансформаторный выход. Коэффициент трансформации выходного трансформатора определяется по формуле (7,18).

Перейдем к вопросу о частотных искажениях усилителя мощности с трансформатором. В отличие от усилителя напряжения трансформатор в усилителе мощности нагружен не на емкость, а только на омическое сопротивление (если разумеется внешняя нагрузка ваттная). Схема усилителя мощности дана на рис. VII, 26. Собственная емкость вторичной обмотки трансформатора обычно

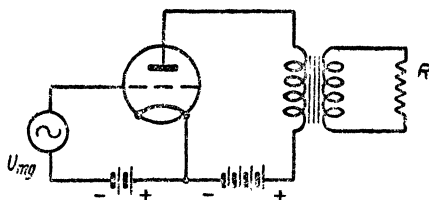


Рис. VII, 26.

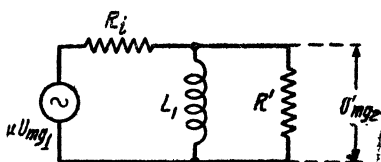


Рис. VII, 27.

настолько мала, что мы ею пренебрегаем. Эквивалентные схемы усилителя будут такими же, как и для усилителя напряжения на трансформаторах, но без емкости C' . Так, для низких и средних частот мы будем иметь схему, изображенную на рис. VII, 27; при средних частотах сопротивление ωL обычно настолько велико, что им можно пренебречь; тогда схема будет иметь вид, изображенный на рис. VII, 28. Для высоких частот схема дана на рис. VII, 29.

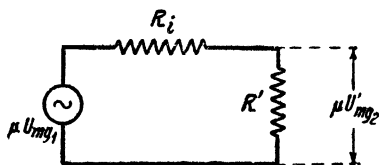


Рис. VII, 28.

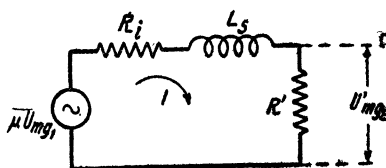


Рис. VII, 29.

Так как емкости отсутствуют, то никаких резонансов здесь не будет. На низких частотах мы будем иметь уменьшение коэффициента усиления из-за шунтирующего действия самоиндукции первичной обмотки L_1 . В этой области частот усилитель мощности ведет себя совершенно так же, как и усилитель напряжения с трансформаторной связью. Для определения величины самоиндукции L_1 и здесь служит график рис. VI, 8.

Коэффициент усиления при средних частотах (рис. VII, 28) определяется из следующей формулы

$$K_o = \frac{\mu}{n} \frac{\alpha}{\alpha + 1}$$

здесь $\alpha = \frac{R'}{R_i}$.

Самондукцию первичной обмотки L_1 можно определить или по графику рис. VI, 8, или по следующей формуле ¹⁾

$$L = \frac{R_i}{\omega_n} \frac{\alpha}{\alpha + 1} \frac{1}{\sqrt{M_n^2 - 1}}. \quad (7,19)$$

Здесь ω_n —низшая частота; M_n —допустимый коэффициент частотных искажений на низшей частоте.

Например: дан усилитель с пентодом

$$R_i = 70\,000 \, \Omega; \quad \alpha = 0,15; \quad M_n = 1,1; \quad \omega_n = 300;$$

требуется определить величину L_1 .

По формуле (7,19) находим

$$L = \frac{70\,000}{300} \cdot \frac{0,15}{0,15 + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,1^2 - 1}};$$

$$L_1 = 66 \, \text{H}.$$

¹⁾ Формула (7, 19) получена следующим образом: коэффициент усиления для низшей частоты, исходя из схемы рис. VII, 27, равен

$$\bar{K}_n = \frac{\mu}{n} \cdot \frac{\bar{Z}_a}{\bar{Z}_a + R_i} = \frac{\mu}{n} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_i}{\bar{Z}_a}} \quad (7,20)$$

Здесь \bar{Z}_a сумма двух параллельных сопротивлений R' и $j\omega L_1$

$$\frac{1}{\bar{Z}_a} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{j\omega L_1}. \quad (7,21)$$

Коэффициент частотных искажений M_n равен

$$\bar{M}_n = \frac{K_o}{K_n};$$

подставляем (7,18) и (7,20)

$$\bar{M}_n = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \left(1 + \frac{R_i}{\bar{Z}_a} \right);$$

подставляем (7,21) и переходим к модулю

$$M_n = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \sqrt{\left(1 + \frac{R_i}{R'} \right)^2 + \left(\frac{R_i}{\omega_n L_1} \right)^2}; \quad (7,22)$$

заменяем $\frac{R_i}{R'} = \frac{1}{\alpha}$ и решаем равенство (7,22) относительно L_1 .

$$L_1 = \frac{R_i}{\omega_n} \frac{\alpha}{\alpha + 1} \cdot \frac{1}{\sqrt{M_n^2 - 1}}. \quad (7,19)$$

Переходим к области высших частот. Здесь усилитель мощности существенно отличается от усилителя напряжения. Так как емкость C отсутствует, то никакого резонанса рассеяния здесь нет, а следовательно, нет и повышения коэффициента усиления (пика). Из эквивалентной схемы рис. VII,29 видно, что на высоких частотах коэффициент усиления будет уменьшаться из-за падения напряжения на самоиндукции рассеяния L_s . Чем больше частота ω , тем больше сопротивление ωL_s и тем больше на нем падает напряжение. Для того чтобы лишь небольшая доля напряжения ложилась на ωL_s , надо очевидно величину L_s делать как можно меньше, а сопротивление R' побольше. Величина $L_s = \sigma L_1$; самоиндукция L_1 определяется из условия завала на низких частотах M_n ; значит, для уменьшения L_s надо делать как можно меньше коэффициент рассеяния σ . Конструкция выходного трансформатора должна быть такова, чтобы величина σ была малой.

Величина R' должна быть большой, тогда высокие частоты лучше усиливаются, но $R' = \alpha R_i$; значит, чем больше α , тем меньше завал на высоких частотах.

Завал на высоких частотах M_s можно подсчитать по следующей формуле ¹⁾

$$M_s = \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{\omega_s L_1 \sigma}{R_i}\right)^2}{(\alpha + 1)^2}}. \quad (7,23)$$

1) Формула (7,23) получена следующим образом: из эквивалентной схемы для высших частот (рис. VII, 29) находим

$$\bar{I}_m = \frac{\mu \bar{U}_{m2}}{R_i + j\omega L_s + R'}. \quad (7,24)$$

Здесь \bar{I}_m — ток, текущий в цепи.

Напряжение на клеммах внешней нагрузки, приведенное к первичной цепи, будет равно

$$\bar{U}_{m2} = \bar{I}_m R' = \mu \bar{U}_{m21} \frac{R'}{R_i + j\omega L_s + R'}. \quad (7,25)$$

Неприведенное напряжение равно

$$\bar{U}_{g2} = \frac{U'_{g2}}{n}. \quad (7,26)$$

Объединяя формулы (7,25) и (7,26), находим коэффициент усиления

$$\bar{K}_s = \frac{\bar{U}_{g2}}{U_{g1}} = \frac{\mu}{n} \frac{R'}{R_i + j\omega L_s + R'}.$$

Делим числителя и знаменателя на R' и переходим к модулю

$$K_s = \frac{\mu}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{R_i}{R'}\right)^2 + \left(\frac{\omega L_s}{R'}\right)^2}}. \quad (7,27)$$

Можно поставить себе задачу по заданному завалу M_s и заданной α определить, какой величины должен быть коэффициент рассеяния σ . Тогда ф-ла (7,23) напишется следующим образом

$$\sigma \leq \frac{R_i}{\omega_s L_1} \sqrt{M_s^2 - 1} (\alpha + 1). \quad (7,28)$$

Для примера сделаем следующий расчет: дана лампа $R_i = 5000$; $\mu = 8$. Внешняя нагрузка $R = 500$ ом. Допустимы следующие частотные искажения: при $\omega_n = 300$, $M_n = 1,1$; при $\omega_s = 50\,000$, $M_s = 1,1$. Требуется определить L_1 , n и предельно допустимую величину σ .

Задаемся $\alpha = 3$; по формуле (7,28) находим n

$$n = \sqrt{\frac{\alpha R_i}{R}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 5000}{500}} = 5,5;$$

по графику рис. VI,8 находим для $M_n = 1,1$ величину $\frac{\omega_n L_1}{R_1} = 2,2$; отсюда

$$L_1 = \frac{2,2 R_i}{\omega_n} = \frac{2,2 \cdot 500}{300} = 37 \text{ Н.}$$

По формуле (7,28) определяем допустимый коэффициент рассеяния σ

$$\sigma \leq \frac{5000}{50\,000 \cdot 37} \cdot \sqrt{1,1^2 - 1} (3 + 1) = 0,005.$$

Такой малой величины σ достигнуть трудно. Обычно величина для σ , которую удается получить, равна 0,008—0,006. Поэтому задаемся большей величиной α ; $\alpha = 4$. Тогда величина σ будет равна

$$\sigma \leq \frac{5000}{50\,000 \cdot 37} \cdot \sqrt{1,1^2 - 1} (4 + 1) = 0,0063.$$

Это еще допустимо. При $\alpha = 4$ коэффициент трансформации будет равен

$$n = \sqrt{\frac{4 \cdot 5000}{500}} = 6,3.$$

Коэффициент частотных искажений равен

$$M_s = \frac{K_o}{K_s} = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\omega_s L_s}{R'}\right)^2}.$$

Если мы введем $\frac{\alpha}{\alpha + 1}$ под знак радикала и заменим $R' = \alpha R_i$, $L_s = L_1$, то получим формулу (7,23).

Итак подведем итоги всему сказанному:

1. Усилитель мощности с трансформаторным выходом дает возможность при любой заданной внешней нагрузке ставить лампу в нормальный для нее режим. Это достигается соответствующим выбором коэффициента трансформации.

2. На низких и средних частотах усилитель мощности почти ничем не отличается от усилителя напряжения на трансформаторах.

3. Уменьшение коэффициента усиления на высоких частотах обусловлено падением напряжения на самоиндукции рассеяния.

4. Основное требование, предъявляемое к выходному трансформатору, — это малая величина коэффициента рассеяния σ .

5. Чем больше $\alpha = \frac{R'}{R_a}$, тем лучше усиливаются высокие частоты.

Перейдем к конструктивному расчету трансформатора.

Основными исходными величинами при расчете выходного трансформатора являются: коэффициент полезного действия η ; самоиндукция первичной обмотки $L_{1\sigma}$; величина коэффициента рассеяния σ и величина коэффициента трансформации n .

КПД должен быть как можно больше: им обычно задаются в начале расчета (от 0,8 до 0,95).

Выше указывалось, что в выходных каскадах в большинстве случаев применяется двухтактная схема. Выходной трансформатор в этой схеме работает без постоянной слагающей магнитного потока; поэтому мы рассмотрим случай, когда трансформатор работает в условиях отсутствия постоянной слагающей магнитного потока.

Начнем с вопроса о коэффициенте полезного действия. При средних и высших частотах преобладают потери в меди. Потери в железе малы по сравнению с потерями в меди, поэтому ими можно пренебречь.

Полезная мощность, отдаваемая трансформатором, равна (рис. VII,29)

$$P_{\sim} = I^2 R'. \quad (7,29).$$

Мощность потерь в меди первичной и вторичной обмотки равна

$$P_{\mu} = I^2 r_1 + I^2 r'_2. \quad (7,30)$$

Здесь r_1 — сопротивление первичной обмотки; r'_2 — приведенная величина сопротивления вторичной обмотки, $r'_2 = r_2 \cdot n^2$; КПД равен отношению полезной к подводимой мощности

$$\eta = \frac{P_{\sim}}{P_{\sim} + P_{\mu}} = \frac{I^2 R'}{I^2 R' + I^2 r_1 + I^2 r'_2};$$

окончательно имеем для КПД следующую формулу

$$\eta = \frac{R'}{R' + r_1 + r'_2}. \quad (7,31)$$

Задавшись величиною КПД, мы определяем величину сопротивления обмоток. Обычно берут $r_1 = r'_2$. Тогда из формулы (7,31) получаем следующие расчетные формулы для r_1 и r_2

$$r_1 = \frac{R_{n2}}{2} \cdot \frac{1 - \eta}{\eta}, \quad (7,32)$$

$$r_2 = \frac{R}{2} \cdot \frac{1 - \eta}{\eta}. \quad (7,33)$$

Дальнейший этап расчета—это определение числа витков первичной обмотки.

Если размер железа выбран, то число витков определяется так же, как и в междудупном трансформаторе по формуле (6,20)

$$w_1 = 450 \sqrt{\frac{L_1 \cdot l_{жк}}{Q_{ж}}}. \quad (7,34)$$

Определив по формулам (7,34), (7,32, 7,33) величины r_1 , r_2 , w_1 , w_2 , необходимо проверить, годятся ли выбранные нами размеры железа.

Проверка производится в двух направлениях. Во-первых, проверяется возможность размещения обмотки в окне; во-вторых, выясняется, не превышает ли магнитная индукция в железе максимально допустимой величины (5000 гаусс).

Проверку размещения обмотки в окне производим следующим образом:

1) Определяем сечение провода первичной и вторичной обмотки по следующим формулам

$$q_1 = 0,0175 \frac{l_m \cdot w_1}{r_1}, \quad (7,35)$$

$$q_2 = 0,0175 \frac{l_m \cdot w_2}{r_2}. \quad (7,36)$$

Здесь l_m —средняя длина витка в метрах; q_1 и q_2 —сечение проводов в кв. миллиметрах.

2) Определяем сечение всей меди

$$Q_m = (w_1 q_1 + w_2 q_2) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2, \quad (7,37)$$

3) Определяем коэффициент заполнения меди

$$f_m = \frac{Q_{ок}}{Q_m}. \quad (7,38)$$

Здесь $Q_{ок}$ —площадь окна в железе. Если f_m не выходит из пределов тех величин, которые указаны в главе VI в таблице на стр. 102, то выбранные нами размеры железа первому условию удовлетворяют и надлежит лишь выполнить проверку на индукцию в железе. Если величина f_m окажется меньше допустимой, то надо или увеличить габарит железа, или пойти на уменьшение сечений проводов и, следовательно, на снижение КПД трансформатора. Если f_m получается значительно больше указанных в таблице величин, то целесообразно выбрать меньшие размеры железа.

Проверку на величину магнитной индукции производят при помощи следующей известной из теории силовых трансформаторов формулы

$$U_{ам} = \omega B \sim \omega_1 \cdot Q_{ж} \cdot 10^{-8}. \quad (7,39)$$

Здесь $U_{ам}$ —амплитуда напряжения на клеммах первичной обмотки трансформатора. Эта величина известна из расчета усилителя и режима лампы. ω —угловая частота. При расчете надо брать низший предел частоты ω_n , ибо магнитная индукция в железе ($B \sim$) тем больше, чем меньше частота. Это видно непосредственно из формулы (7,39). Следовательно, наиболее опасной с точки зрения насыщения железа является низшая частота.

ω_1 —число витков первичной обмотки; $Q_{ж}$ —сечение железа в кв. сантиметрах. Из формулы (7,39) определяем величину магнитной индукции $B \sim$

$$B \sim = \frac{U_{ам}}{\omega_n \cdot \omega_1 \cdot Q_{ж}} \cdot 10^8. \quad (7,40)$$

Если подсчитанная по формуле (7,40) величина $B \sim$ не превышает 5000, то выбранные размеры железа подходящи. Если величина $B \sim$ больше 5000—6000, то трансформатор вносит на низших частотах значительные нелинейные искажения. Величину $B \sim$ можно уменьшить, не меняя всех размеров железа, а увеличив лишь сечение $Q_{ж}$, при этом необходимо также пересчитать число витков по формуле (7,34).

Иллюстрируем, описанный метод расчета на конкретном примере.

Задано: $\omega_n = 300$; самоиндукция первичной обмотки трансформатора $L_1 = 10$ Н; нагрузка $R = 100$ Ω; коэффициент трансформации $n = 7$; $U_{ам} = 160$ В. КПД трансформатора $\eta = 0,8$. Выберем железо типа III-25 (рис. VII,30).

Сечение чистого железа берем равным $Q_{ж} = 2,5 \times 3,2 = 8 \text{ см}^2$, толщина железа с учетом прокладок равна 35 мм.

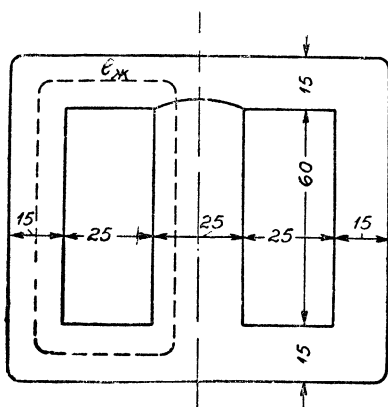


Рис. VII,30.

1) Определяем среднюю длину магнитного пути (рис. VII,30)

$$l_{ж} = (2,5 + 1,5) \cdot 2 + (6,0 + 1,5) \cdot 2 = 23 \text{ см.}$$

2) Определяем среднюю длину витка

$$l_{ж} = (25 + 20) \cdot 2 + (35 + 20) \cdot 2 = 200 \text{ мм.}$$

Выраженная в метрах величина $l_{ж}$ равна

$$l_{ж} = 0,2 \text{ м.}$$

3) Определяем величину R'

$$R' = R \cdot n^2 = 100 \cdot 7^2 = 5000 \Omega.$$

4) По формулам (7,32) и (7,33) находим r_1 и r_2

$$r_1 = \frac{100 \cdot 7^2}{2} \frac{(1 - 0,8)}{0,8} = 625 \Omega;$$

$$r_2 = \frac{100}{2} \cdot \frac{(1 - 0,8)}{0,8} = 12,5 \Omega.$$

5) По формуле (7,34) находим число витков первичной обмотки

$$w_1 = 450 \sqrt{\frac{10 \cdot 23}{8}} = 2400.$$

6) Определяем число витков вторичной обмотки

$$w_2 = \frac{2400}{7} = 340.$$

7) Подсчитываем по формулам (7,35) и (7,36) сечение проводов обмоток

$$q_1 = 0,0175 \frac{0,2 \cdot 2400}{625} = 0,0135 \text{ мм}^2,$$

$$q_2 = 0,0175 \frac{0,2 \cdot 340}{12,5} = 0,095 \text{ мм}^2.$$

8) Определяем сечение меди Q_m по формуле (7,37) и сечение окна в железе

$$Q_m = (2400 \cdot 0,0135 + 340 \cdot 0,095) \cdot 10^{-2} = 0,65 \text{ см}^2, \\ Q_{ок} = 6 \cdot 2,5 = 15 \text{ см}^2.$$

9) Подсчитываем коэффициент заполнения меди

$$f_m = \frac{15}{0,65} = 23.$$

Мы получили величину значительно большую той, которая дана в таблице на стр. 102. Отсюда следует, что можно выбрать меньший габарит железа, взять, скажем, железо типа III - 20 (см. рис. VI,12).

В данном случае сохраним то же железо, но увеличим сечение проводов и этим поднимем кпд.

Посмотрим, до какой величины возрастет кпд, если положить $f_m = 8,5$.

Сечение меди будет равно

$$Q_m = \frac{Q_{ок}}{f_m} = \frac{15}{8,5} = 1,76 \text{ см}^2.$$

Полагая $q_1 = \frac{q_2}{n}$, получим для q_1 следующую величину (см. формулу 7,37)

$$q_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_m \cdot 10^2}{w_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,76 \cdot 10^2}{2400} = 0,036;$$

для q_2 получаем

$$q_2 = q_1 n = 0,036 \cdot 7 = 0,25;$$

сопротивление r_1 будет равно

$$r_1 = 0,0175 \cdot \frac{0,2 \cdot 2400}{0,036} = 230 \text{ } \Omega.$$

Сопротивление r_2' должно также равняться 230 Ω , ибо мы исходим из равенства $q_1 = \frac{q_2}{n}$.

Подсчитываем кпд трансформатора по формуле (7,31)

$$\eta = \frac{5000}{280 + 230 + 5000} = 0,915.$$

Итак, при выбранном нами железе кпд трансформатора может быть доведен до 0,915.

Производим проверку на индукцию в железе по формуле (7,39)

$$B_{\sim} = \frac{160 \cdot 10^8}{300 \cdot 2400 \cdot 8} = 2800.$$

Второе условие выполняется.

Суммируем результаты расчета:

$$\begin{aligned}w_1 &= 2400; \\w_2 &= 340; \\q_1 &= 0,036; \\q_2 &= 0,25; \\\eta &= 0,915; \\d_1 &= 0,21 - 0,22 \text{ mm}; \\d_2 &= 0,55 \text{ mm}; \\f_{\kappa} &= 8,5; B_{\sim} = 2800.\end{aligned}$$

Итак, нами выяснен метод определения числа витков, сечения и диаметра проводов обмотки и метод определения пригодности того или иного размера железа.

Остался невыясненным еще один существенный вопрос—это вопрос о рассеянии.

Выше указывалось, что коэффициент рассеяния у выходного трансформатора должен быть мал. Величина коэффициента рассеяния зависит от способов намотки, поэтому при проектировании и изготовлении трансформатора большую роль играет способ размещения обмотки. Чем ближе расположены друг по отношению к другу вторичная и первичная обмотка, тем меньше рассеяние. Простая цилиндрическая обмотка, изображенная на рис. VII,31, дает большее рассеяние, чем цилиндрическая обмотка, разбитая на две продольных секции так, как указано на рис. VII, 32.

II-образное железо с простой цилиндрической обмоткой (см. рис. VII,33a), когда на каждом керне намотана половина первичной и половина вторичной обмотки, дает меньшее рассеяние, чем III-образное железо с простой цилиндрической обмоткой. Поэтому часто применяют II-образное железо с цилиндрической обмоткой. Оно особенно удобно при двухтактных схемах.

В выходных трансформаторах, стоящих в аноде мощных ламп, при анодном напряжении в несколько сот или тысяч вольт, надо соблюдать ряд правил намотки, предохраняющих трансформатор от пробоя. Опасным в отношении пробоя является первичная обмотка; ее надо тщательно изолировать от сердечника и от вторичной обмотки; далее необходимо изолировать

начало и конец первичной обмотки, между которыми имеется большая разность потенциалов. Для примера рассмотрим выход-

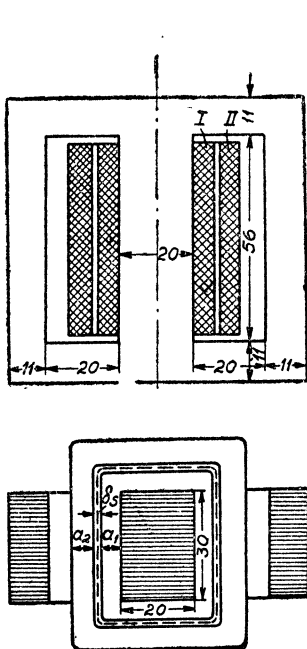


Рис. VII,31.

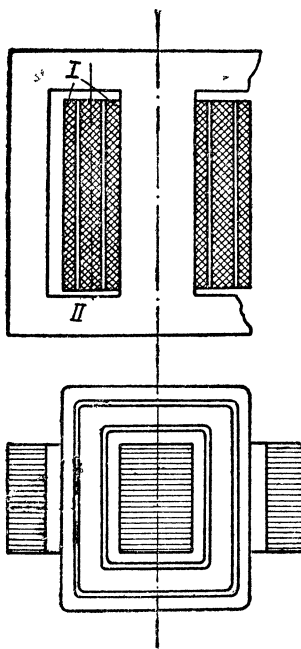


Рис. VII,32.

ной трансформатор мощного пушпульного каскада, изображенный на рис. VII,33а.

На каждом стержне намотана половина первичных витков и половина вторичных. Вторичная обмотка находится ближе к сердечнику. Первичная обмотка намотана на специальном каркасе. Самым опасным местом в отношении пробоя являются точки a и b ; первая соответствует началу первичной обмотки, вторая концу; точка a присоединяется к аноду первой лампы, точка b к аноду второй лампы, как это указано на рис. VII,33б. Между этими точками наибольшее напряжение. Чтобы уменьшить возможность пробоя, надо каркас первичной обмотки делать короче высоты окна и оставлять зазоры d ; эти зазоры должны быть от 5—10 мм. Расстояние между обеими полови-

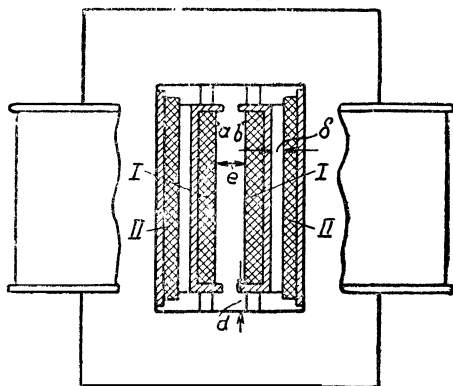


Рис. VII,33а.

ками первичной обмотки e должно быть 7—15 мм. Эти требования относятся к трансформаторам, работающим при анодном напряжении от 1000 до 3000 В. Расстояние между первичной и вторичной обмотками δ не должно быть больше 3—6 мм, ибо чем больше это расстояние, тем больше коэффициент рассеяния трансформатора. При указанном типе намотки коэффициент рассеяния обычно бывает порядка 0,01.

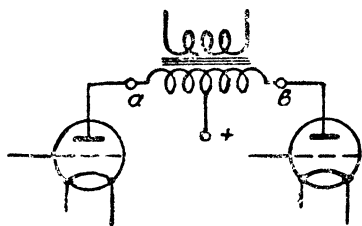


Рис. VII,33б.

Подведем итоги сказанному относительно расчета выходного трансформатора:

1) Заданными при расчете являются следующие величины:

$$L_1; n; \sigma; U_{am}.$$

2) Исходной величиной расчета является кпд трансформатора. Так как потери в железе малы по сравнению с потерями в меди, то кпд определяется как отношение полезной мощности к полезной мощности плюс потери в меди. Исходя из кпд, определяется сопротивление первичной и вторичной обмотки.

3) Размеры железа должны быть так выбраны, чтобы, во-первых, медь хорошо размещалась в окне (f_m не должно выходить за пределы величин, указанных в таблице на стр. 102) и, во-вторых, магнитная индукция в железе при низшей частоте не превышала 5000 гаусс.

4) В целях уменьшения рассеяния необходимо как можно ближе друг к другу располагать первичную и вторичную обмотку.

Задание.

Произвести расчет выходного каскада, имеющего в каждом плече пушпула по две лампы УБ-180.

Дано: анодное напряжение $E_a = 800$ В. Внешняя нагрузка 25 Ω ; характеристика лампы дана на рис. VII, 9.

Требуется: выбрать режим ламп, т. е. найти E_g ; U_{gmax} , I_a и отдаваемую мощность P_{\sim} . Величину a выбрать равной 3.

Далее требуется произвести электрический расчет выходного трансформатора, исходя из следующих условий

$$\omega_k = 600; \omega_s = 45\,000; M_k = 1,05; M_s = 1,1.$$

Надо определить: L_1, n, σ, U_{am} .

Наконец, необходимо произвести конструктивный расчет трансформатора. Размеры железа даны на рис. VI,34, требуется определить число витков $w_1; w_2$, величину $q_1; q_2; r_1; r_2$; кпд η и дать эскиз расположения обмотки.

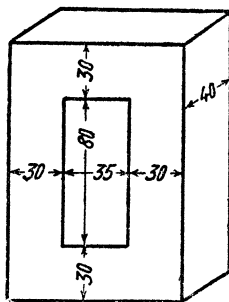


Рис. VII,34.

ГЛАВА VIII.

МНОГОКАСКАДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ.

1. Борьба с самовозбуждением.

Одно из основных требований, предъявляемых к усилителю, это абсолютная устойчивость в работе. Если усилитель имеет склонность к самовозбуждению (к генерации), то он для эксплуатации непригоден.

Самовозбуждение обнаруживается в телефоне, приключенном к выходу усилителя, в виде писка или в виде бульканья (звук похожи на работу мотоциклетного двигателя).

Выясним сперва причины самовозбуждения усилителя, а затем рассмотрим вопрос о мерах борьбы с генерацией, применяемых в современных усилителях.

Самовозбуждение возникает благодаря связи между выходными и входными цепями усилителя. Эта связь может осуществляться:

а) через емкость между сеткой и анодом лампы. Этот вопрос нами подробно обследован в главе III;

б) через паразитную емкость между отдельными деталями схемы усилителя (емкость монтажа и т. д.);

в) благодаря взаимной индукции между выходным и входным трансформаторами;

г) наконец, благодаря наличию общих источников питания (анодная батарея, сеточная батарея).

Самой опасной и неприятной связью в усилителях низкой частоты является связь через общие источники питания. На этом вопросе мы остановимся подробнее несколько ниже.

Борьба против генерации, обусловленной наличием емкостной или индуктивной обратной связи (пункт а, б, в), осуществляется путем экранировки отдельных цепей усилителя и путем шунтирования сеток ламп омическими сопротивлениями (см. главу III).

Остановимся на вопросе об емкостной обратной связи.

На рис. VIII,1 схематически изображен трехкаскадный усилитель; для упрощения схемы опущены источники питания и анодная нагрузка лампы изображена в виде прямоугольника,

на входе имеем генератор с эдс U_{mg1} и с внутренним сопротивлением R_2 . Входное сопротивление первой лампы равно Z_{01} .

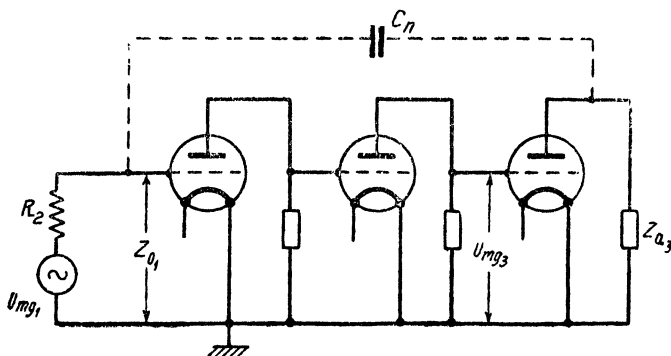


Рис. VIII,1.

Z_{01} состоит из емкости C_0 и сопротивления шунта на входе. Цепь накала заземлена.

Пусть между входной цепью и цепью выхода имеется паразитная емкость C_n . Действие этой емкости легко проследить, если усилитель, вернее вход его и последний каскад, изобразить в виде эквивалентной схемы (рис. VIII,2). В этой схеме последняя лампа заменена генератором с эдс μU_{mg3} и с внутренним сопротивлением R_i . Если бы емкость C_n была равна нулю, то никакой связи между последним каскадом и входной цепью усилителя не было бы. Наличие емкости C_n создает эту связь. По цепи, состоящей из емкости C_n и сопротивления Z_{01} , потечет ток I_n ¹⁾, обусловленный генератором с эдс, равной μU_{mg3} ; на

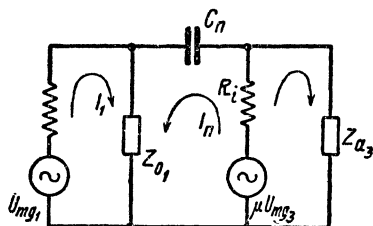


Рис. VIII,2.

сопротивлении Z_{01} , а следовательно, и на входе первой лампы будет переменное напряжение, равное $Z_{01} I_n$; оно обусловлено работой последнего каскада; следовательно, налицо обратная связь.

Если коэффициент усиления всего усилителя велик, то достаточно ничтожной емкости C_n порядка нескольких тысячных долей сантиметра, чтобы возникла генерация. Весьма приближенно условие устойчивой работы можно выразить следующим образом

$$C_n \leq \frac{1}{Z_{01} \cdot K \cdot \omega_s}. \quad (8,1)$$

¹⁾ Мы предполагаем, что вход разомкнут, т. е. генератор U_{mg1} отключен.

Здесь K — коэффициент усиления усилителя, ω_s — высшая частота, усиливаемая усилителем. Предположим, например, что $K = 10\,000$; $\omega_s = 50\,000$; $Z_{01} = 500\,000\ \Omega$. Найдем допустимую величину C_n , при которой усилитель работает устойчиво. По формуле (8,1) находим

$$C_n \leq \frac{1}{500\,000 \cdot 10\,000 \cdot 50\,000} = 0,004 \cdot 10^{-12}\ \text{Ф.}$$

Итак, C_n должна быть меньше четырех тысячных сантиметра.

Из формулы (8,1) видно, что, уменьшая Z_{01} , т. е. шунтируя вход первой лампы, мы повышаем устойчивость усилителя. Однако, шунтируя вход, мы одновременно увеличиваем нагрузку на усиливаемый генератор и этим снижаем коэффициент усиления. Поэтому этой мерой повышения устойчивости усилителя можно пользоваться лишь до известных пределов.

Когда к входу усилителя подключается усиливаемый генератор, особенно, если у него малое внутреннее сопротивление, то устойчивость усилителя повышается, ибо внутреннее сопротивление генератора R_s лежит параллельно входному сопротивлению Z_{01} и как бы шунтирует вход лампы (рис. VIII,2). Правда, иногда наблюдается обратная картина: с открытым входом усилитель не генерирует, а с подключенным на вход микрофоном он начинает генерировать. Это бывает тогда, когда соединительные цепи, присоединяемые к входу, имеют паразитную емкость с выходными цепями усилителя.

Прикосновение руки к сетке первой лампы в многокаскадном усилителе вызывает обычно сильную генерацию. Объяснение этого явления дано на рис. VIII,3.

Человеческое тело имеет некоторое сопротивление по отношению к земле: прикасаясь рукой к сетке, мы этим самым

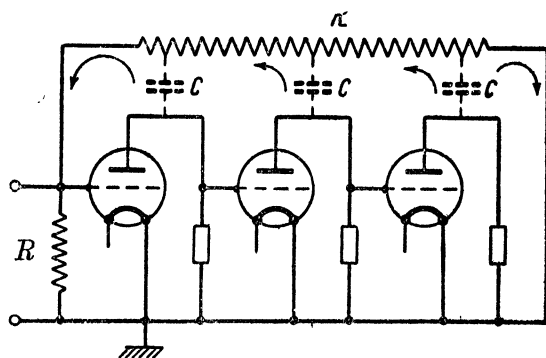


Рис. VIII,3.

включаем сопротивление своего тела между сеткой и нитью (землей); на рисунке это сопротивление обозначено буквой R . Наше тело имеет емкость по отношению к отдельным частям усилителя и, в частности, к анодным цепям ламп. На рис. VIII,3 эти емкости обозначены буквой C . Таким образом прикосновение руки к сетке первой лампы создает паразитную емкость между цепью входа и цепью выхода. Этой емкости обычно достаточно, чтобы возникла генерация.

Выясним теперь, как действует экран. На рис. VIII,4 изображен тот же трехкаскадный усилитель, что и на рис. VIII,1, но

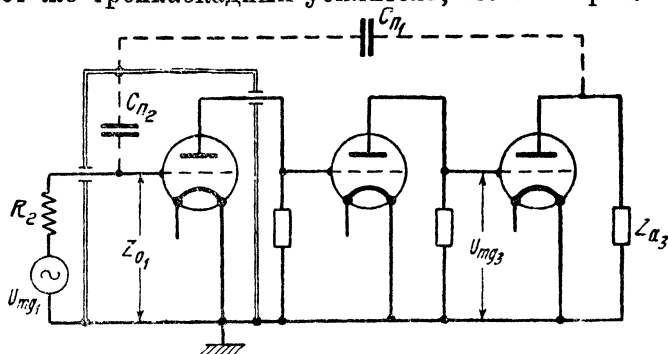


Рис. VIII,4.

сеточная цепь и лампа первого каскада заключены в металлический экран (медь или железо), экран заземлен. Тогда, очевидно, вместо емкости C_n мы имеем емкость между выходом и экраном C_{n1} и емкость между экраном и входной цепью C_{n2} . На рис. VIII,5 изображена эквивалентная схема для этого случая. Из

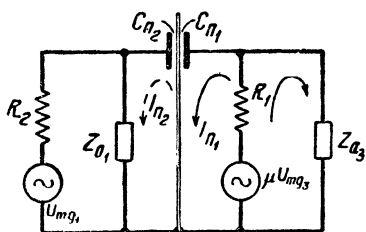


Рис. VIII,5.

схемы видно, что цепь, по которой течет ток I_{n1} , замкнута через экран на землю. Паразитный ток не потечет по цепи, состоящей из емкости C_{n2} и сопротивления Z_{01} , ибо эта цепь замкнута накоротко экраном.

Если экран не соединен с землей (нитью), то его действие сводится к нулю.

Перейдем к индуктивной связи.

На рис. VIII,6 схематически изображен сердечник выходного и входного трансформаторов. Большинство магнитных силовых линий в выходном трансформаторе замыкаются через сердечник, но небольшая часть линий замыкается через воздух; вокруг трансформатора имеется переменное магнитное поле. Если в это поле поместить входной трансформатор так, как указано на рис. VIII,6, то в его обмотке возникнет переменная эдс, т. е. налицо будет обратная связь между выходом и входом. Действие магнитного экрана (железо) показано на рис. VIII,7. Так как железо имеет гораздо меньшее магнитное сопротивление, чем воздух, то почти все силовые линии в пространстве, окружающем входной трансформатор, будут проходить по железу экрана, а не по воздуху внутри экрана. Таким образом внутри экрана магнитного поля не будет. Магнитный экран действует тем лучше, чем толще его стенка; например экран, сделанный из жести (0,1—0,3 мм), почти не экра-

нирует. Поэтому экран следует делать из толстого (1—3 мм) железа. Ясно, что в первую голову надо экранировать не выходной, а входной трансформатор.

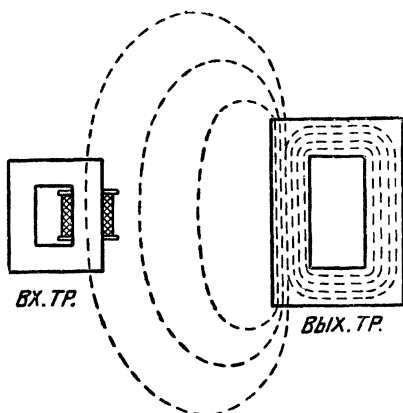


Рис. VIII,6.

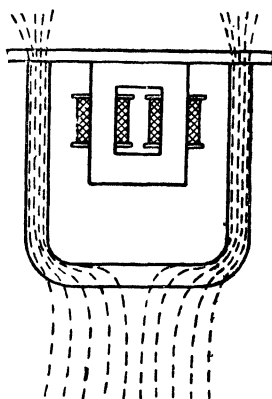


Рис. VIII,7.

Итак, действие емкостных и индуктивных паразитных связей парализуется, во-первых, шунтированием сетки лампы омическим сопротивлением и, во-вторых, соответствующей экранировкой входа. Емкостная связь особо опасна в усилителях, рассчитанных на более высокие частоты. В усилителях низкой частоты нет особой необходимости прибегать к солидной экранировке, защищающей от емкостной связи.

Рассмотрим вопрос о паразитной связи через общие источники питания и о методах защиты от этой связи.

На рис. VIII,8 изображен трехкаскадный усилитель с реостатной связью. Батарея смещения сеток и батарея накала на

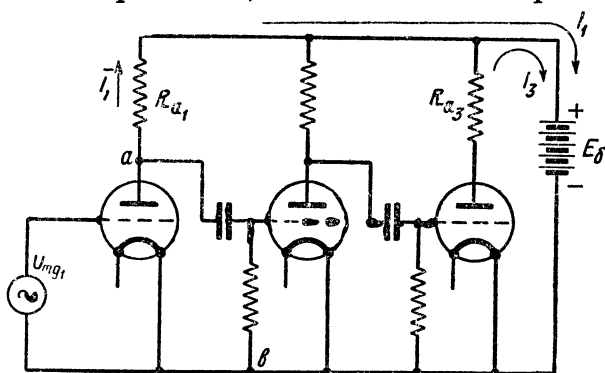


Рис. VIII,8.

рисунке не изображены. Изображена лишь анодная батарея. Выясним, как через анодную батарею осуществляется паразитная

связь между первым и третьим каскадами. Анодный ток первого каскада I_1 проходит через батарею E_δ , анодный ток третьего каскада I_3 проходит также через анодную батарею. То же, разумеется, можно сказать об анодном токе второго каскада, но мы его сейчас не рассматриваем, ибо нас интересует связь между первым и третьим каскадами. Анодная батарея имеет некоторое сопротивление переменному току R_δ ; это сопротивление является причиной связи между входом и выходом. Эквивалентная схема первого и третьего каскадов изображена на рис. VIII,9 (обозначения на рис. VIII,8, VIII,9 одинаковы). Так как через сопротивление R_δ проходит ток третьей лампы I_3 , то между точками a и b будет некоторая переменная разность потенциалов, равная $I_3 \cdot R_\delta$. Но точки a и b , как видно из фиг. VIII,8, находятся между сеткой (точка a) и нитью (точка b) второй лампы. Следовательно,

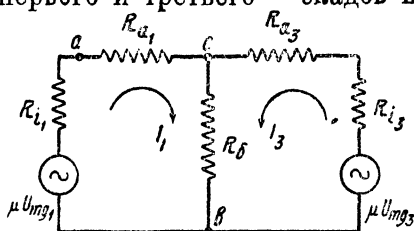


Рис. VIII,9.

переменное напряжение, обусловленное анодным током в третьей лампе, подается на вход второй лампы, т. е. налицо обратная связь между выходной цепью и входом.

Как же уменьшить эту связь?

Для этого в анод первой лампы надо включить развязывающий фильтр, состоящий из сопротивления R_ϕ и емкости C_ϕ , так, как указано на рис. VIII,10. Если сопротивление фильтра R_ϕ значительно больше, чем сопротивление фильтра

$\frac{1}{\omega C_\phi}$, то переменное

напряжение, обусловленное анодным током третьей лампы и вносимое в цепь первой лампы, будет ничтожно мало. Это легко заключить из эквивалентной схемы, изображенной на рис. VIII,11; на-

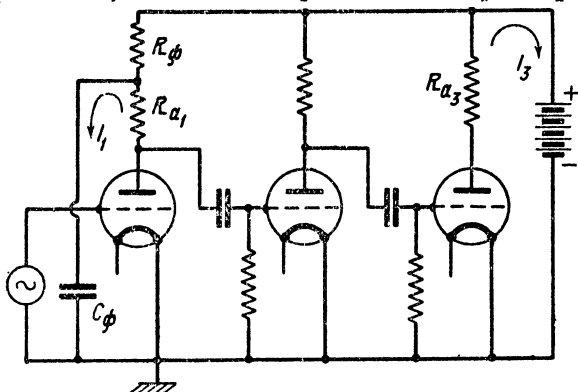


Рис. VIII,10.

пряжение на клеммах c' b' будет значительно меньше, чем на клеммах c , b , если $\frac{1}{\omega C_\phi} \ll R_\phi$.

Итак, развязывающий фильтр уменьшает связь через общую анодную батарею между первым и последним каскадами усилителя. Сопротивление фильтра R_ϕ должно быть большим по срав-

нению с сопротивлением емкости фильтра $\frac{1}{\omega C_\phi}$. К сожалению, величину R_ϕ нельзя брать очень большой, ибо через сопротивление R_ϕ течет постоянная слагающая анодного тока, и падение напряжения на R_ϕ уменьшает величину постоянного напряжения на аноде первой лампы E_a . Величину R_ϕ обычно берут порядка 10—20 тысяч ом. Величину C_ϕ надо брать не меньше 4 μF .

При более высоких частотах фильтр действует очень хорошо,

ибо чем больше частота, тем меньше $\frac{1}{\omega C_\phi}$. Самыми опасными с точки зрения генерации являются более низкие частоты. Если бы усилитель хорошо усиливал самые низкие частоты вплоть до нуля, то избавиться от самовозбуждения было бы чрезвычайно трудно; так например, при частоте $f=5 \text{ Hz}$ ($\omega=31,4$) емкость в 4 μF имеет сопротивление, равное

$$\frac{10^6}{31,4 \cdot 4} = 8000 \text{ } \Omega.$$

Если $R_\phi = 10\,000 \text{ } \Omega$, то действие развязывающего фильтра ничтожно. Поэтому чаще всего генерация возникает на самых низких частотах. Она воспринимается нашим ухом как бульканье. Усилитель, плохо усиливающий низкие частоты (ниже 70—100 Hz), работает более устойчиво, чем усилитель, хорошо усиливающий низкие частоты.

Обратная связь зависит от величины R_ϕ (сопротивление батарей). Чем больше R_ϕ , тем менее устойчиво работает усилитель. Часто можно наблюдать такую картину: при свежезаряженных аккумуляторах усилитель работает устойчиво, затем, спустя несколько часов работы, усилитель начинает генерировать. Это объясняется тем, что разряженная аккумуляторная батарея имеет раз в 20 большее сопротивление R_ϕ , чем свежезаряженная батарея.

Мы рассмотрели связь через анодную батарею. Аналогично действует общая батарея в сеточных цепях. Здесь также для уменьшения связи применяют развязывающие фильтры. На рис. VIII,12 изображен усилитель с развязывающим фильтром в цепи сеток первой и второй ламп. Здесь величину R_ϕ можно брать большой, порядка сотен тысяч ом, ибо через него постоянный ток не проходит.

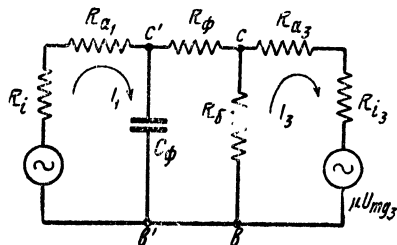


Рис. VIII,11.

Не всякая обратная связь ведет к самовозбуждению, иногда обратная связь не увеличивает, а уменьшает усиление и повы-

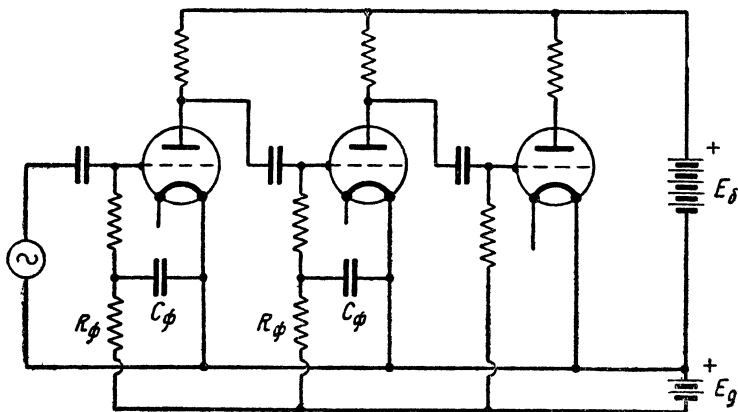


Рис. VIII,12.

шает этим устойчивость работы усилителя. Все зависит от фазы обратной связи. Каждый радиолюбитель, имевший дело с регенеративным приемником, знает, что при неправильно включенных концах катушки обратной связи генерация не возникает. Стоит же переключить концы катушки обратной связи т. е. изменить фазу обратной связи на 180° , и приемник заработает правильно, т. е. генерация будет возникать.

То же самое явление мы наблюдаем и при паразитных связях в усилителях. Установлено, например, что опасными с точки зрения генерации являются связи благодаря общему источнику питания действующие через каскад; например, связь между выходом третьего каскада и входом второго каскада (разобранный выше случай). Связь же, действующая между выходом и входом одного и того же каскада, не способствует, а глушит генерацию.

При связи через паразитную емкость картина несколько иная: связь между выходом и входом одного и того же каскада может способствовать возникновению генерации, связь между выходом третьего и входом первого каскадов также может способствовать самовозбуждению.

В усилителе с трансформаторной связью имеет большое значение, каким концом вторичная обмотка присоединена к сетке лампы. Часто бывает достаточно переключить концы вторичной обмотки трансформатора и генерация прекращается. При переключении концов мы поворачиваем на 180° фазу напряжения, подаваемого на сетку лампы, благодаря этому паразитная связь может превратиться из благоприятной для генерации в глушащую генерацию связь.

Скажем еще несколько слов о генерации высокой частоты, возникающей иногда в усилителях благодаря наличию паразит-

ных контуров высокой частоты, образуемых отдельными цепями усилителя.

Эти колебания не всегда даже удается обнаружить, заметны они по ненормальному режиму ламп и по отклонению катодного вольтметра, включенного на выход усилителя. Для борьбы с такими колебаниями лучше всего в анод и в сетку лампы вставить небольшое омическое сопротивление порядка 30—60 Ω . Иногда некоторое снижение анодного напряжения достаточно для прекращения генерации на высокой частоте. Колебания на высокой частоте возникают в усилителе значительно реже, чем генерация на низкой частоте.

В заключение остановимся еще на одном виде обратной связи. Часто можно наблюдать такое явление: если вблизи от ламп первых каскадов поставить репродуктор, включенный на выход усилителя, то при включении усилителя в репродукторе слышен сперва легкий, довольно чистый звон, затем он постепенно нарастает и переходит в очень сильный оглушающий вой. Это происходит благодаря микрофонному эффекту ламп. Если лампу подвергнуть механическому сотрясению, то нить лампы начинает вибрировать, это вызывает соответствующие колебания в потоке электронов, эти колебания усиливаются последующими каскадами, и на выходе в репродукторе мы слышим звон. Если репродуктор стоит близко к лампе, то колебания воздуха, обусловленные звуком, издаваемым репродуктором, поддерживают в лампе механические колебания; таким образом мы имеем так называемую акустическую (через звуковые колебания воздуха) обратную связь. Для уменьшения микрофонного эффекта ламп надо лампы панели амортизировать, т. е. прикреплять их к корпусу пружинами или на резинках. Для уменьшения акустической обратной связи приходится иногда весь усилитель покрывать специальным войлочным футляром.

Подведем итоги сказанному:

1. Генерация может возникать благодаря емкостной или индуктивной обратной связи между цепью выхода и цепью входа усилителя; поэтому цепь входа усилителя надо экранировать.

2. Прикосновение рукой к сетке лампы ведет обычно к возникновению генерации.

3. Генерация может возникнуть благодаря связи через общие источники питания (батарея анода, батарея сетки); для борьбы с этим видом паразитной связи применяют развязывающие фильтры, состоящие из сопротивления и емкости. Чем ниже частота, тем хуже действует фильтр.

4. Для возникновения генерации имеет существенное значение фаза обратной связи. Поэтому переключение концов вторичной обмотки трансформатора может вызвать или появление, или прекращение генерации.

5. В усилителе могут возникнуть колебания низкой частоты благодаря микрофонному эффекту лампы и акустической обратной связи. Для уменьшения микрофонного эффекта надо амортизировать ламповую панель.

2. Питание усилителя переменным током.

При питании накала переменным током применяются в усилителе напряжения лампы с косвенным накалом. Аноды питаются от выпрямителя. Часто даже при хорошем фильтре выпрямителя усилитель дает фон.

Основная причина—это статическая (емкостная) и индуктивная связь между входом усилителя и цепями, по которым протекает переменный ток. Больше всего влияет цепь накала; поэтому при монтаже проводники цепей накала следует располагать далеко от входных цепей: далее монтаж цепей накала следует осуществлять витой парой проводов, например, шнуром; при этом индуктивная связь цепей накала с другими цепями усилителя минимальна.

Сильное индуктивное влияние может оказывать силовой трансформатор выпрямителя на входной трансформатор усилителя, поэтому входной трансформатор следует солидно экранировать (толстый железный экран); большое значение имеет взаимное расположение входного и силового трансформаторов.

В целях уменьшения фона необходимо катод в подогревной лампе соединять со средней точкой накала, так как указано на рис. VIII,13.

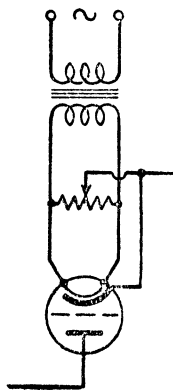


Рис. VIII,13.

3. Регулировка усиления.

Регулировка усиления осуществляется часто в цепи сетки второго каскада усилителя.

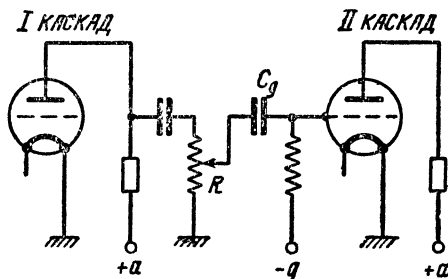


Рис. VIII,14.

Схема регулировки дана на рис. VIII,14. Регулировочное сопротивление R выполняется обычно в виде проволочного сопротивления; регулировка производится скачками через 2, максимум 3 dB.

Рассчитаем для примера регулировочное сопротивление. Дано: общий предел регулировки усиления—20 dB; должно быть 10 ступеней регулировки; каждая ступень должна давать уменьшение усиления на 2 dB. Полное сопротивление регулировки $R = 100\,000\ \Omega$.

Уменьшение усиления на 2 dB равносильно уменьшению усиления в 1,25 раз, ибо

$$20 \cdot \lg 1,25 = 2\ \text{dB}.$$

Поэтому разбивку сопротивления на секции производим, уменьшая каждый раз его в 1,25 раз: на рис. VIII,15 произведена эта разбивка.

Иногда регулировку осуществляют на входе усилителя. Если вход несимметричный, т. е. один конец входа заземлен, то регулировку можно производить по схеме, изображенной на рис. VIII,16. Такая схема регулировки имеется в усилителе типа УП-8. Между секциями регулировочного сопротивления и контактами переключателя вклю-

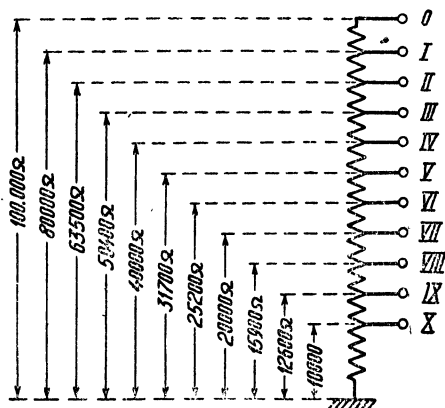


Рис. VIII,15.

чены последовательные сопротивления; это сделано для того, чтобы первичная обмотка трансформатора независимо от положения

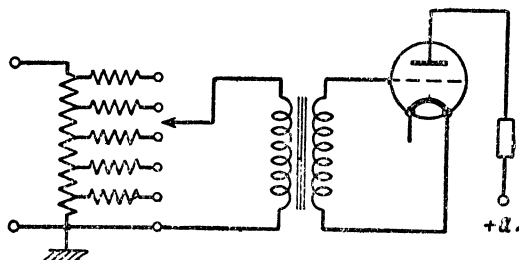


Рис. VIII,16.

переключателя всегда была замкнута на одно и то же сопротивление, иначе частотная характеристика усилителя будет меняться с изменением коэффициента усиления. Такого же типа регулятор усиления может быть и для симметричного входа; схема его изображена на рис. VIII,17.

Здесь должен быть переключатель с двумя ползунками, что немного усложняет конструкцию. Если имеется переключатель с тремя ползунками, то целесообразно применять схему, изображенную на рис. VIII,18.

4. Испытание усилителя.

Полную картину всех электрических качеств усилителя дают четыре характеристики усилителя, определяемые экспериментальным путем:

- 1) амплитудная характеристика усилителя
- 2) нагрузочная характеристика,

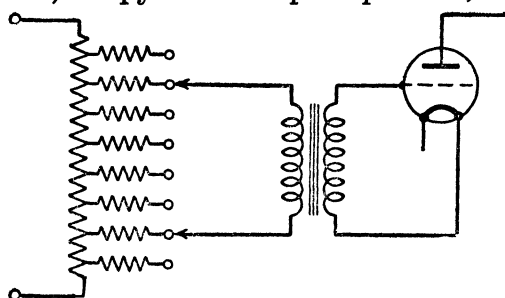


Рис. VIII,17.

- 3) кривая мощности,
- 4) частотная характеристика.

Остановимся подробнее на каждой в отдельности.

Амплитудная характеристика дает нам зависимость напряжения на выходе усилителя U_{m2} от напряжения на входе U_{m1} , при постоянной на-

грузке на выходе. Наклон этой характеристики равен коэффициенту усиления K .

На рис. VIII,19 изображена амплитудная характеристика усилителя. Вначале она прямолинейна; это значит, что напряжение на выходе возрастает пропорционально входному напряжению, коэффициент усиления постояен. Затем характеристика начинает загибаться; момент загиба со-

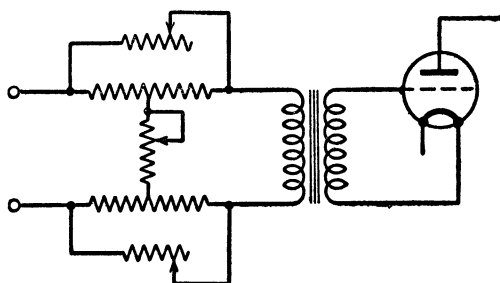


Рис. VIII,18.

ответствует началу перегрузки усилителя и появлению нелинейных искажений, коэффициент усиления после загиба начинает

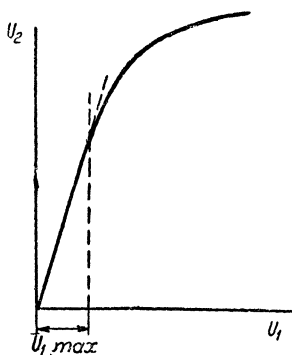


Рис. VIII,19.

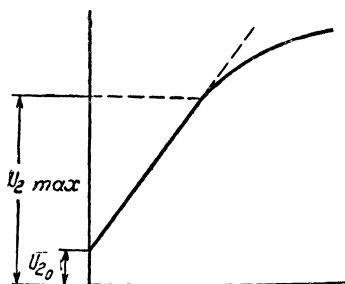


Рис. VIII,20.

падать. Итак, амплитудная характеристика показывает нам, во-первых, предельно допустимую величину напряжения на входе

усилителя ($U_{m1 \max}$), во-вторых, величину коэффициента усиления усилителя.

Если амплитудная характеристика начинается не от нуля, а выше, как это изображено на рис. VIII,20, то это может быть в силу следующих причин:

а) Усилитель генерирует, благодаря чему даже при отсутствии переменного напряжения на входе имеется некоторое напряжение на выходе. При этом обычно амплитудная характеристика на всем участке криволинейна.

б) Усилитель недостаточно экранирован от источника переменного напряжения на входе (звуковой генератор), благодаря чему имеется непосредственное воздействие этого источника на усилитель.

в) Усилитель дает некоторый начальный фон. Это обычно бывает у усилителей, питаемых переменным током. В этом случае отрезок U_{20} (рис. VIII,20) дает нам величину фона в вольтах; а отношение $\frac{U_{20}}{U_{2\max}}$ величину фона в долях полезного напряжения.

Таким образом при снятии амплитудной характеристики мы одновременно проверяем устойчивость работы усилителя и величину фона.

Нагрузочная характеристика дает нам зависимость напряжения на выходе усилителя от сопротивления нагрузки при постоянном напряжении на входе. В главе II была дана нагрузочная характеристика усилителя; приводим ее еще раз на рис. VIII,21. По оси абсцисс отложено сопротивление нагрузки R' ; цифры 1, 2, 3, 4, 5 обозначают величину α , т. е. отношение $\frac{R^1}{R_i}$, где R_i внутреннее сопротивление последнего каскада, а R^1 — перечисленное в первичную цепь трансформатора сопротивление нагрузки. Величину α можно нанести на ось абсцисс характеристики расчетным путем. Мы знаем, что при $\alpha = 1$ коэффициент усиления последнего каскада равен

$$K = \mu \frac{\alpha}{\alpha + 1} = \frac{\mu}{2}.$$

А при холостом ходе, когда α равна бесконечности, коэффициент усиления равен $K = \mu$.

Значит, напряжение на выходе усилителя при холостом ходе U_{2x} должно быть в два раза больше напряжения U_2 при $\alpha = 1$. Из этих соображений находим точку на оси абсцисс, соответствующую $\alpha = 1$, а дальше уже не трудно отложить отрезки для $\alpha = 2$; 3 и т. д. Из предыдущего мы знаем, что в трехэлектродной лампе величина α должна быть равной 3—4. Исходя из этого, мы по нагрузочной характеристике находим величину нормаль-

ной рабочей нагрузки на усилитель R_n (рис. VIII,21) и рабочего напряжения на выходе U_{2p} . При сопротивлении нагрузки, меньше чем R_n , усилитель будет перегружаться.

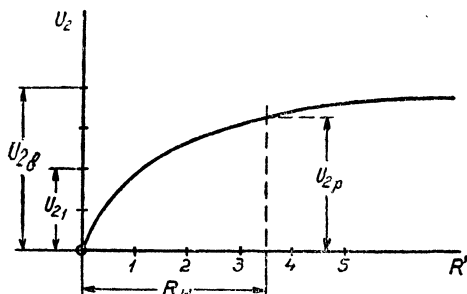


Рис. VIII,21.

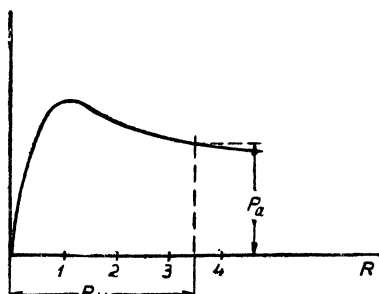


Рис. VIII,22.

Для определения максимальной неискаженной мощности, отдаваемой усилителем, служит кривая мощности. Эта кривая получается из нагрузочной характеристики расчетным путем. В самом деле, отдаваемая усилителем мощность $P \sim \frac{U_{m2}}{R}$.

Зависимость P от R дана в виде нагрузочной характеристики; значит, надо для ряда точек подсчитать величину мощности P и затем ее построить в зависимости от R . Кривая мощности дана на рис. VIII,22. При $\alpha = 1$ мы имеем наибольшую отдаваемую мощность, однако, этот режим, как мы видели, не является нормальным для усилителя. Откладывая по оси абсцисс величину нормального сопротивления нагрузки R_n , мы из кривой мощности находим ту неискаженную мощность P , которую можно снять с усилителя.

Мы указывали, что нагрузочная характеристика снимается при постоянной величине напряжения на входе усилителя. Чтобы получить на выходе предельную неискаженную мощность, надо на вход подать предельно допустимое напряжение U_{m1max} , которое определяется из амплитудной характеристики. Амплитудная характеристика, в свою очередь, должна сниматься при нормальной внешней нагрузке R_n . Поэтому порядок испытания таков: сперва при заведомо небольшом напряжении на входе снимают нагрузочную характеристику, по ней определяют величину R_n ; затем снимают при нагрузке, равной R_n , амплитудную характеристику, по ней определяют U_{m1max} ; наконец при напряжении U_{m1max} снимают еще раз нагрузочную характеристику, по ней определяют расчетным путем неискаженную мощность, отдаваемую усилителем.

Представление о частотных искажениях, вносимых усилителем, дает нам частотная характеристика. О ней мы говорили уже раньше. Здесь укажем лишь, что частотная характеристика

должна сниматься при напряжении на входе, равном $U_{m\max}$ и при нормальной нагрузке на выходе R_n .

Остановимся теперь на способах снятия указанных характеристик. Первые две характеристики (амплитудная и нагрузочная) могут быть сняты при наличии двух катодных вольтметров, делителя напряжения и переменного нагрузочного сопротивления. Источником переменного напряжения может служить городской переменный ток; это при условии, что испытуемый усилитель имеет лишь небольшой завал M_k при частоте в 50 Hz, иначе необходим генератор на частоту в 800 или 1000 Hz. Схема для снятия характеристики дана на рис. VIII,23.

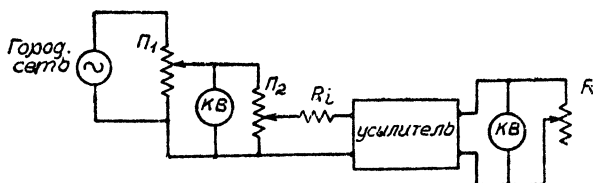


Рис. VIII,23.

К клеммам городской сети приключается грубый, неградуированный делитель напряжения P_1 , лучше всего для этой цели использовать потенциометр типа Рустрат на 500—1000 Ω . Далее напряжение подается на градуированный делитель напряжения P_2 ; лучше всего использовать для этой цели магазин сопротивлений от 1 до 10 000 Ω ; напряжение подается на все сопротивление магазина и измеряется катодным вольтметром со шкалой от 0,3 до 1,5 V. Снимаемое с делителя напряжение подается на вход усилителя. Последовательно в цепь входа усилителя включено сопротивление R_k ; оно соответствует внутреннему сопротивлению генератора, электродвижущую силу которого усилитель усиливает. Если вход усилителя рассчитан под микрофон, то это сопротивление должно быть порядка 300—500 Ω ; если вход рассчитан под адаптер, то сопротивление R_k надо брать порядка 1500—2000 Ω . На выходе усилитель нагружается на градуированное переменное сопротивление R_n ; падение напряжения на клеммах сопротивления R_n измеряется катодным вольтметром со шкалой от 10 до 100 V.

Для снятия частотной характеристики необходим звуковой генератор, дающий переменное напряжение разной частоты. Напряжение, даваемое генератором, должно быть обязательно синусоидальным, иначе снятая частотная характеристика не будет соответствовать действительной. Схема включения генератора та же, что на рис. VIII,23.

Подведем итоги сказанному:

1. Электрические качества усилителя определяются четырьмя характеристиками: амплитудной, нагрузочной, кривой мощности и частотной характеристикой.

2. Амплитудная характеристика дает нам величину коэффициента усиления и величину предельно допустимого напряжения на входе и выходе усилителя.

3. Нагрузочная характеристика и кривая мощности дают нам величину нормальной нагрузки усилителя и мощности, отдаваемой усилителем.

4. Амплитудную и нагрузочную характеристики можно снять, пользуясь в качестве источника напряжения на входе городским переменным током. Для снятия частотной характеристики необходим специальный звуковой генератор.

5. Неисправности в усилителе и их устранение.

Очень часто мощный усилитель плохо работает или вовсе выбывает из строя благодаря пробое в выходном трансформаторе. Неисправность выходного трансформатора можно сразу же обнаружить по анодному амперметру. Если трансформатор в порядке, то при холостом ходе стрелка анодного амперметра не должна колебаться даже при перегрузке усилителя со стороны входа, анодный ток все время будет равен току покоя, ибо динамическая характеристика при холостом ходе горизонтальна. Если в трансформаторе благодаря частичному пробое замкнулся накоротко ряд витков, то это создает значительную нагрузку на лампу, поэтому даже при снятой внешней нагрузке усилитель будет себя вести так, как будто он перегружен со стороны выхода—стрелка анодного амперметра будет сильно колебаться с изменением напряжения на входе. Если трансформатор пробит основательно, то при передаче на выходе будет слышен сплошной хрип и периодическое потрескивание.

Следующее очень часто встречающееся повреждение—это пробой переходных конденсаторов C_g . На обкладках этого конденсатора имеется напряжение, равное анодному напряжению лампы. Благодаря этому конденсаторы C_g часто пробиваются, при этом на сетку лампы попадает, как мы видели выше (глава V), анодное напряжение лампы предыдущего каскада. Усилитель обычно при этом совсем отказывается работать, коэффициент усиления резко падает, передача идет с большими искажениями.

Легко обнаружить обрыв в цепи сетки (обрыв утечки). При этом усилитель может нормально работать, но после каждого громкого выкрика он на некоторое время как бы замирает и следующие за выкриком звуки не воспроизводятся.

Часто причина плохой работы усилителя кроется в источниках питания. При разряженной анодной батарее усилитель вносит большие искажения, ибо лампы находятся в ненормальном режиме. Еще сильнее на качестве работы усилителя сказывается неправильное смещение на сетку лампы. Вообще, если усилитель плохо работает, надо прежде всего проверить режим ламп: проверить напряжение накала, напряжение анодного питания, анод-

ный ток в цепи каждой лампы и смещение на сетку. Это даст также возможность обнаружить неисправность лампы — газ в лампе, потерю эмиссии и пр.

Если во время работы усилителя слышны потрескивания, то это свидетельствует о плохом контакте в монтаже или в подводке. Особенно резкие потрескивания дает плохой контакт входной цепи. Поэтому в подводке входа надо особенно тщательно соединять между собою проводники.

Общая методика устранения повреждений в усилителе заключается в следующем.

Прежде всего надо найти место и причину повреждения. Это делается методом постепенного приближения: шаг за шагом проверяются отдельные части усилителя, пока не обнаруживается неисправность. Скажем, неисправность имеется в третьем каскаде усилителя. Проверяется первый каскад отдельно; для этого телефонная трубка приключается к концам анодной нагрузки первой лампы; если при легком ударе по лампе слышен в телефоне звон, то все в порядке. Далее включаются два первых каскада и таким же методом устанавливается их исправность. После этого включаются три каскада и сразу обнаруживается неисправность всего устройства; значит, причина в третьем каскаде. Если сразу не удастся выяснить, почему не работает третий каскад, то берут карманную батарею, соединяют ее одним концом с телефонной трубкой, другими концами батареи и телефонной трубки начинают проверять монтаж. При прикосновении к тем концам монтажа, где по схеме должно быть соединение, в телефоне должен получиться щелчок. Таким образом можно обнаружить обрыв в монтаже или замыкание между монтажными проводниками.

Подведем итоги сказанному:

1. Наиболее частые аварии в усилителе — это пробой выходного трансформатора, пробой переходных конденсаторов и конденсаторов анодных фильтров. Пробой трансформатора можно обнаружить по колебанию стрелки анодного амперметра при холостом ходе.

2. Обрыв в цепи сетки усилителя можно обнаружить по замиранию усилителя после выкриков.

3. Потрескивания во время работы обусловлены плохим контактом в монтаже или в подводке.

4. При плохой работе усилителя надо прежде всего проверить режим ламп. Недокал, меньшее анодное напряжение, неправильное смещение на сетку могут служить причиной плохой работы усилителя.

Задание.

Произвести проверочный расчет усилителя типа УП-8.

На рис. VIII, 24 дана принципиальная схема усилителя. Она несколько упрощена по сравнению с действительной схемой: выкинут переключатель на входе,

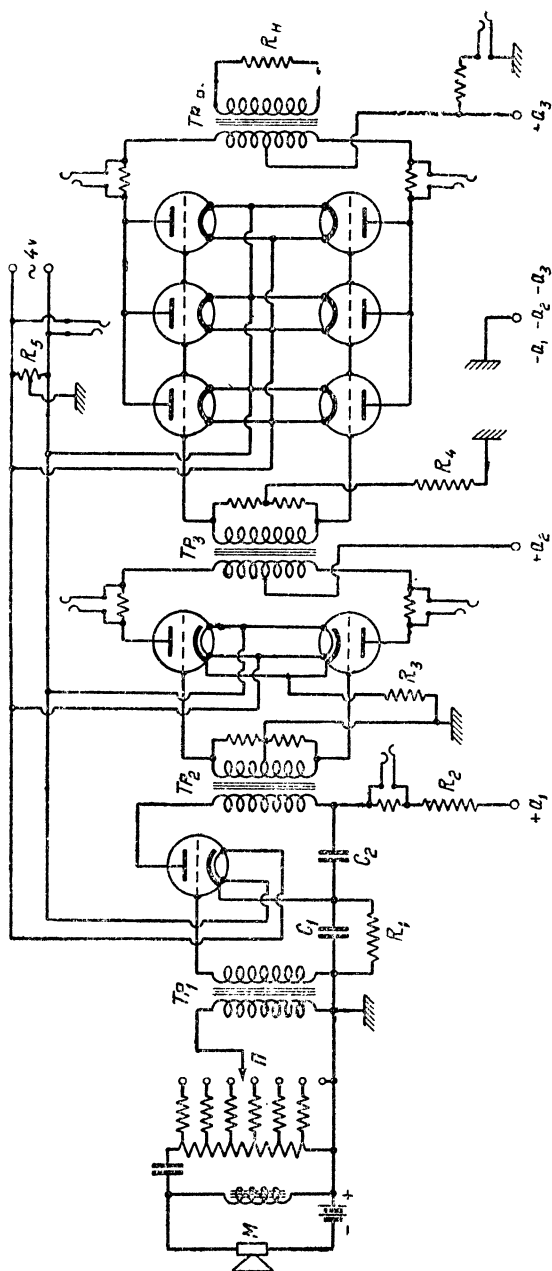


Рис. VIII, 24.

дающий возможность на вход подключать адаптер или приемник, или микрофон; далее выкинут переключатель для перехода на питание от аккумуляторов. В остальной схеме полностью сохранена.

Проверочный расчет разбивается на следующие основные части:

- 1) Разбор схемы.
- 2) Расчет режимов ламп и коэффициента усиления.
- 3) Расчет трансформаторов и частотной характеристики усилителя.

Разбор схемы.

1. Разобрать схему цепи накала; выяснить назначение сопротивлений R_5 .
2. Разобрать схему подачи анодного напряжения (найти путь прохождения анодного тока в цепи каждой лампы); выяснить назначение сопротивлений R_2 и емкости C_2 .
3. Разобрать схему подачи смещения на сетку каждого каскада. Выяснить назначение сопротивлений R_1 ; R_3 ; R_4 ; и емкости C_1 .
4. Разобрать схему входа и схему питания микрофона.
5. Перечислить, в каких цепях можно измерить ток и в каких напряжение.

Выбор режимов ламп.

1. Последний каскад. Дано: 6 ламп типа УО-104, включенных по схеме пушпул. Характеристика лампы УО-104 дана на рис. II,17 (стр. 39). Напряжение анода $E_a = 240$ V. Ток покоя в аноде всех 6 ламп $I_{a_0} = 210 \cdot 10^{-3}$ A. Сопротивление $R_4 = 190 \Omega$. Сопротивление нагрузки $R_n = 450 \Omega$.

Коэффициент трансформации выходного трансформатора $n = \frac{w_1}{w_2} = 2,3$.

Определить: величину смещения на сетке лампы E_{mg} ; величину a ; величину $U_{mg\max}$ (максимально допустимое напряжение на сетку). Построить динамическую характеристику одной лампы. Определить полезную мощность, отдаваемую всеми лампами.

2. Второй каскад. Дано: 2 лампы типа СО-118, включенных по схеме пушпул. Характеристика лампы дана на рис. 5,23 (стр. 84).

Напряжение анода $E_a = 210$ V.

Ток покоя в анодах обеих ламп — $I_{a_0} = 6 \cdot 10^{-3}$ A. Сопротивление $R_3 = 670 \Omega$. Данные трансформатора ТР-3 см. ниже в таблице.

Определить: величину смещения на сетку ламп E_g ; крутизну и внутреннее сопротивление и коэффициент усиления в рабочей точке; коэффициент усиления (при средних частотах) и потребное переменное напряжение на сетке каждой лампы.

3. Первый каскад. Дано: лампа типа СО-118.

Напряжение на клемме A_1 равно 240 V.

Ток покоя в аноде лампы $I_{a_0} = 2,8 \cdot 10^{-3}$ A.

Сопротивление $R_2 = 15\,000 \Omega$.

Сопротивление $R_1 = 1330 \Omega$.

Емкость $C_1 = C_2 = 4 \cdot 10^{-6}$ F.

Данные трансформатора ТР-1 и ТР-2 см. ниже в таблице.

Определить: напряжение на аноде E_a ; напряжение смещения на сетке E_g ; крутизну S ; внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ в рабочей точке; коэффициент усиления каскада при средних частотах; потребное напряжение на входе усилителя (вход трансформатора ТР-1).

Подсчитать степень фильтрации анодного фильтра.

Расчет трансформаторов и частотной характеристики усилителя.

В таблице даны основные величины, характеризующие каждый из трансформаторов.

Таблица 8

	Трансформатор входной (ТР-1)	Трансформатор между-ламповый (ТР-2) первый	Трансформатор между-ламповый (ТР-3) второй	Трансформатор выходной
1) Тип железа	Ш-25	Ш-25	Ш-25	Ш-25
2) Длина магнитного пути и сечение	См. рис. VII,30, сечение квадратное			$Q_{жс}=25 \times 50$
3) Число витков первичной обмотки, диаметр и тип провода	1260 $d_1 = 0,3 \text{ mm}$	12 000 $d_1 = 0,12$	12 000 $d_1 = 0,12$	1200 $d_1 = 0,23$
4) Число витков вторичной обмотки и диаметр	15 900 $d_2 = 0,08 \text{ mm}$	24 000 $d_2 = 0,08$	24 000 $d_2 = 0,08$	460 разные
5) Коэффициент рассеяния	0,008	0,008	0,008	0,006
6) Распределенная емкость вторичной обмотки	40 μF	50 μF	50 μF	—
7) Нагрузка трансформатора	Сетка-нить лампы СО-118	Сетка-нить-сетка двух ламп СО-118 и шунт в 200 000 Ω	Сетка-нить-сетка шести УО-104 по схеме пушпул	Нагружен на внешнее сопротивление в 450 Ω
Примечание:	Трансформатор микрофонный; внутреннее сопротивление микрофона $R_i = 1000 \Omega$			

Пользуясь этими данными, надо подсчитать коэффициент самоиндукции первичной обмотки L_1 каждого трансформатора. Определить коэффициент частотных искажений M_i при $\omega_n = 600$ для каждого каскада и для всего усилителя в целом; выразить величину M_n в децибеллах. Исходя из того, что емкость сетки-анод $C_{ог}$ у лампы СО-118 равна $6 \cdot 10^{-12} \text{ F}$, а у лампы УО-104 $8 \cdot 10^{-12} \text{ F}$, определить емкость, на которую нагружен каждый из трансформаторов; подсчитать частоту, при которой наступает второй резонанс. В ТР-1, 2, 3 определить коэффициент усиления при этом резонансе; подсчитать величину M_e для выходного каскада при частоте $\omega_e \cong 50\,000$.

СОДЕРЖАНИЕ

Глава I. Схемы усилителей и вопросы питания усилителей

1. Усилитель напряжения и усилитель мощности. Коэффициент усиления	3
2. Схемы междупламповых связей; схемы входа и выхода	7
3. Питание цепи накала	13
4. Способы подачи смещения на сетку и питание анода	17
Контрольные вопросы и задания	21

Глава II. Работа лампы в усилительном режиме.

1. Усилитель как генератор с электродвижущей силой μU_g и с внутренним сопротивлением R_i	22
2. Как вычислить коэффициент усиления и мощность, отдаваемую усилителем	28
3. Динамическая характеристика лампы и ее крутизна	30
4. Как построить динамическую характеристику в усилителе на сопротивлении и в усилителе на трансформаторе	35
5. Контрольные вопросы и задания	38

Глава III. Искажения в усилителях

1. Неперы и децибеллы	40
2. Частотные искажения в усилителе	42
3. Нелинейные искажения в усилителе	45
Задание	49

Глава IV. Входное сопротивление лампы.

1. Почему токи сетки вносят нелинейные искажения?	50
2. Внутренняя емкость лампы	55
Контрольные вопросы и задания	61

Глава V. Усилитель напряжения с реостатной и дроссельной связью

1. Причины частотных искажений в усилителях напряжения и способы их устранения	63
2. Усилитель на сопротивлениях и его расчет	68
3. Усилитель на дросселях	78
Контрольные вопросы и задания	85

Глава VI. Усилитель напряжения на трансформаторах.

1. Частотная характеристика усилителя напряжения на трансформаторах	86
2. Расчет входных и междупламповых трансформаторов и дросселей	97
Контрольные вопросы и задания	104

Глава VII. Усилитель мощности.

1. Как выбирать режим лампы в усилителе мощности?	105
2. Двухтактная схема	118
3. Пентоды	124
4. Расчет усилителя с трансформаторным выходом	130
Задание	142

Глава VIII. Многокаскадные усилители.

1. Борьба с самовозбуждением	143
2. Питание усилителя переменным током	152
3. Регулировка усиления	152
4. Испытание усилителя	153
5. Неисправности в усилителе и их устранение	158
Задание	159

Цена 1 р. 50 коп.

**ЗАКАЗЫ НАПРАВЛЯТЬ ПО АДРЕСУ:
МОСКВА 9, ул. ГОРЬКОГО, 17
СВЯЗЬТЕХИЗДАТ**