

Г.С. Цыкин

**Отрицательная обратная
связь и ее применение**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
Г11

Г11 **Г.С. Цыкин**
Отрицательная обратная связь и ее применение / Г.С. Цыкин – М.: Книга
по Требованию, 2022. – 136 с.

ISBN 978-5-458-60407-9

ISBN 978-5-458-60407-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2022

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2022

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

§ 3. Основные схемы обратной связи

В настоящее время существует чрезвычайно большое количество различных видоизменений схем обратной связи. Для рассмотрения основных свойств всех этих схем потребовалось бы слишком много времени. Поэтому рассмотрим лишь наиболее интересные по своим свойствам и наиболее употребительные схемы.

По способу подачи обратного напряжения в цепь входа различают два основных типа схем: схема с последовательной обратной связью (рис. 1) и схема с параллельной обратной связью (рис. 2). Свойства обеих схем одинаковы, разница заключается лишь в том, что в первом случае напряжение обратной связи подается в цепь сетки последовательно с напряжением сигнала, а во втором случае параллельно, что, разумеется, принципиальной разницы не имеет.

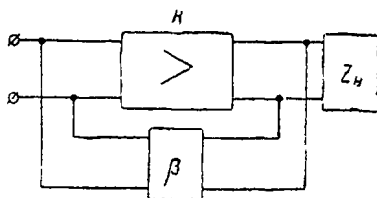


Рис. 2. Схема с параллельной обратной связью.

В практике чаще применяют последовательную связь, так как при этом получается меньший расход мощности из выходной цепи; при достаточно высоком входном сопротивлении устройства четырехполюсник β является ненагруженным; кроме того, в этом случае подаваемое в цепь входа напряжение обратной связи практически не меняется при изменении сопротивления источника сигнала. Математический анализ последовательной связи несколько проще, а поэтому он в основном и будет рассматриваться ниже.

Известные в настоящее время схемы обратной связи можно разделить на два вида, имеющие некоторые принципиальные отличия, а именно:

1) Схемы простой обратной связи

Все схемы простой обратной связи вызывают уменьшение коэффициента усиления того устройства, в котором они применены.

2) Балансные схемы обратной связи

Применение балансных схем не вызывает уменьшения усиления устройства; ввиду большей сложности таких схем обратной связи их основные свойства будут рассмотрены несколько позже (в гл. IV).

Схемы обратной связи имеют большое количество разновидностей, отличающихся друг от друга в основном только способом выделения той части выходного напряжения, которая подается с обратной фазой в цепь сетки, т. е. способом связи. При этом все основные свойства данного вида остаются неизменными, но

закон изменения параметров схемы при изменении сопротивления нагрузки меняется.

Различают три основные категории схем с различными способами связи:

1. Схема, в которой напряжение обратной связи пропорцио-

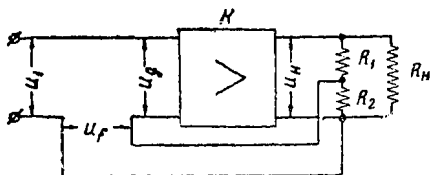


Рис. 3. Схема обратной связи по напряжению.

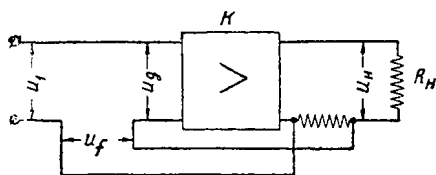


Рис. 4. Схема обратной связи по току.

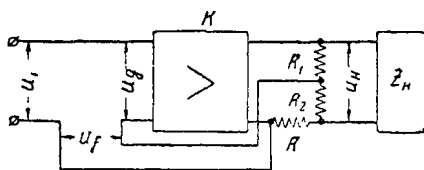


Рис. 5. Схема с комбинированной обратной связью.

нально выходному напряжению (связь по напряжению, рис. 3).

2. Схема, в которой напряжение обратной связи пропорционально току в выходной цепи (связь по току, рис. 4).

3. Схема с комбинированной обратной связью (рис. 5).

§ 4. Основные свойства схем с простой обратной связью¹⁾

Рассмотрим основные свойства схем с простой обратной связью, полагая, что частотные и фазовые искажения отсутствуют как в цепи самого усилителя, так и в цепи обратной связи.

Большинство этих свойств являются характерными также и для схем других видов. Вначале рассмотрим свойства, общие для всех трех разновидностей — для схемы с связью по напряжению, с связью по току и с комбинированной связью. Затем рассмотрим индивидуальные особенности этих схем.

Для рассмотрения общих свойств схемы обратной связи воспользуемся схемой усилителя с обратной связью по напряжению, приведенной на рис. 3.

В этом случае параллельно нагрузке анодной цепи R_N включен делитель напряжения, состоящий из двух сопротивлений R_1 и R_2 . Эти сопротивления по величине значительно больше R_N , и их влиянием на величину нагрузки анодной цепи можно пренебречь.

Напряжение U_f , падающее на сопротивлении R_2 и пропорциональное напряжению U_N , имеющемуся на нагрузке, подается с обратной фазой в цепь сетки. На схеме для простоты все источники питания опущены.

¹⁾ Для упрощения будем полагать, что амплитудная характеристика устройства квазилинейна, т. е. имеет незначительные отклонения от линейности. Более строгий анализ будет дан ниже, в § 6 настоящей главы.

Полагая, что сопротивления R_n, R_1, R_2 чисто активные и считая характеристику усилителя линейной, можно показать, что приведенная схема обладает рядом интересных свойств.

1. Уменьшение результирующего усиления устройства

Назовем коэффициентом усиления устройства с обратной связью

$$K_f = \frac{U_n}{U_1} \quad (1)$$

и коэффициентом усиления без обратной связи

$$K = \frac{U_n}{U_g}. \quad (2)$$

Тогда при наличии обратной связи

$$U_g = U_1 + U_f; \quad U_1 = U_g - U_f, \quad (3)$$

т. е. напряжение на входе U_g складывается из напряжения источника сигнала и напряжения обратной связи.

Если усилитель не вносит фазовых сдвигов, то для рис. 3

$$U_f = -U_n \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \beta U_n, \quad (4)$$

где

$$\beta = -\frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

Подставляя значение U_1 в выражение для коэффициента усиления устройства с обратной связью, получим

$$K_f = \frac{U_n}{U_1} = \frac{U_n}{U_g - U_f} = \frac{U_n}{U_g - \beta U_n} = \frac{K}{1 - \beta K}. \quad (6)$$

Если по абсолютной величине β отрицательно, то мы имеем отрицательную обратную связь, и коэффициент усиления всего устройства с обратной связью уменьшается $(1 + \beta K)$ раз

$$K_f = \frac{K}{1 - (-\beta)K} = \frac{K}{1 + \beta K}. \quad (7)$$

Величина βK представляет собой отношение напряжения обратной связи U_f к напряжению на входе устройства U_g . Это отношение определяет все основные свойства устройства с обратной связью и называется в дальнейшем коэффициентом связи.

2. Стабилизация усиления

Введение отрицательной обратной связи стабилизирует усиление устройства, уменьшая изменения усиления, имеющие место как при изменении параметров лампы (или ламп в многокаскадном усилителе), так и при изменении напряжения источников питания.

Это является очень ценным свойством схемы, так как в ряде случаев требуется иметь усилитель, усиление которого не должно заметно меняться ни при смене ламп, ни при изменении напряжений питания (например, усилители для измерений, усилители для телефонных и телеграфных трансляций и пр.).

Относительное изменение усиления при изменении параметров ламп или изменении питающих напряжений называется нестабильностью усиления устройства. Для устройства без обратной связи эта величина характеризуется отношением $\frac{dK}{K}$. Определяя аналогичным образом нестабильность усиления устройства с обратной связью, получим

$$\frac{dK_f}{K_f} = \frac{d\left(\frac{K}{1-\beta K}\right)}{\frac{K}{1-\beta K}} = \frac{(1-\beta K) dK + K \beta dK}{(1-\beta K)^2} \cdot \frac{1-\beta K}{K} = \frac{1}{1-\beta K} \cdot \frac{dK}{K}. \quad (8)$$

Отсюда видно, что нестабильность усиления уменьшилась в $(1-\beta K)$ раз; следовательно, стабильность усиления устройства (обратная величина) с применением отрицательной обратной связи увеличивается во столько же раз, во сколько падает усиление.

Применяя отрицательную обратную связь в многокаскадном усилителе с большим коэффициентом усиления K , не трудно получить значения $\beta K \gg 1$. Пренебрегая в этом случае единицей в знаменателе выражения (6), получим

$$K_f = \frac{K}{1-\beta K} \approx -\frac{K}{\beta K} = -\frac{1}{\beta}. \quad (9)$$

Это показывает, что при достаточно большой обратной связи усиление усилителя даже не зависит ни от коэффициента усиления ламп, ни от схемы и числа каскадов, а зависит только от затухания цепи обратной связи.

Пропорциональность между коэффициентом усиления усилителя и затуханием цепи обратной связи прямая; поэтому, например, увеличение затухания на определенный процент вызывает почти такой же процент прироста усиления. Отсюда можно заключить, что в случае необходимости корректирования частотной характеристики усилителя с обратной связью достаточно частотную характеристику затухания цепи отрицательной связи сделать аналогичной требуемой частотной характеристике усилителя¹⁾.

3. Уменьшение нелинейных искажений и помех

Предположим, что имеется устройство без обратной связи с коэффициентом усиления K , на выходе которого, кроме напряженного усиленного сигнала U_n , имеется напряжение дополнительных

¹⁾ Справедливо лишь при отсутствии фазовых искажений, что указывалось выше.

гармонических составляющих разного рода. Эти гармонические составляющие $d(U_n)$ являются функцией нелинейности характеристик устройства. Пусть кроме этого выходное напряжение содержит некоторое напряжение помех (фона) P , обусловленное пульсацией источников питания.

Введем в усилитель обратную связь, одновременно изменив входное напряжение настолько, чтобы выходное напряжение усиленного сигнала сохранило прежнее значение U_n .

При этом фон и гармоники, генерируемые усилителем, останутся прежними, но напряжение фона и гармоник на выходе усилителя будет определяться выражением

$$d(U_n)_f + P_f = d(U_n) + P + \beta K[d(U_n)_f + P_f], \quad (10)$$

так как выходное напряжение гармоник и фона теперь состоит из напряжения, генерируемого усилителем, и напряжения, подаваемого обратно в цепь входа и усиленного усилителем в K раз. Отсюда, решая уравнение (10) относительно выражения, стоящего в скобках, найдем

$$d(U_n)_f + P_f = \frac{d(U_n)}{1 - \beta K} + \frac{P}{1 - \beta K}. \quad (11)$$

Из полученного результата можно видеть, что при сохранении величины выходного напряжения величина нелинейных искажений и фона, вносимых устройством, уменьшается обратной связью в $(1 - \beta K)$ раз, т. е. во столько же, во сколько падает усиление.

Уменьшение нелинейных искажений и фона от источников питания позволяют значительно полнее использовать лампу, чем это удастся сделать без применения обратной связи. Компенсация кроссмодуляции, комбинационных тонов и клирфактора позволяет конструировать высококачественные усилители, работающие в режиме B с токами и без токов сетки. При этом можно получить высококачественное усиление одновременно с получением больших коэффициентов полезного действия, что является недостижимым без применения обратной связи.

Уменьшение помех, достигаемое применением обратной связи, позволяет упростить и удешевить конструкцию фильтров выпрямительных устройств, питающих усилитель.

Следует отметить, что применение обратной связи уменьшает лишь те помехи, которые генерируются в той части усилителя, которая захватывается цепью обратной связи. Помехи в цепи сетки первой лампы усилителя — например, термические шумы, эдс, наводимая в сердечнике входного трансформатора полем помех, и пр. — компенсироваться не будут. Обратная связь в этом случае лишь будет уменьшать усиление помех во столько же раз, во сколько и усиление основного сигнала, а следовательно, динамический диапазон передачи останется прежним.

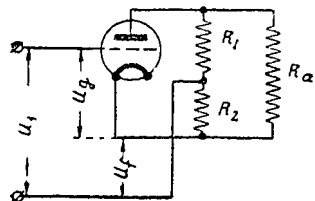
§ 5. Особые свойства и применение различных схем

1. Схема с связью по напряжению

Эквивалентные параметры схемы. Возьмем однокаскадный реостатный усилитель с связью по напряжению (рис. 6). Коэффициент усиления такого каскада

$$K_f = \frac{K}{1 - \beta K}, \quad (12)$$

где K есть коэффициент усиления каскада при отсутствии обратной связи.



При бесконечно большой величине сопротивления нагрузки R_a , т. е. при холостом ходе каскада

$$K_{xx} = \mu; \quad K_{fxx} = \mu_f = \frac{\mu}{1 - \beta \mu}, \quad (13)$$

где μ есть статический коэффициент усиления лампы каскада.

Рис. 6. Однокаскадный реостатный усилитель с отрицательной обратной связью по напряжению.

Источники питания для упрощения чертежа опущены.

Таким образом, при введении отрицательной обратной связи μ_f схемы меньше, чем μ лампы в $1 + |\beta \mu|$ раз.

При коротком замыкании сопротивления нагрузки обратно подаваемое напряжение U_f отсутствует, и напряжение сигнала полностью приходит на сетку лампы. Поэтому крутизна статической характеристики лампы S_f в схеме с связью по напряжению будет

$$S_f = \frac{dI_a}{dU_1} = \frac{dI_a}{dU_g} = S, \quad (14)$$

т. е. крутизна статической характеристики схемы при этом остается равной статической крутизне лампы.

Эквивалентная величина внутреннего сопротивления каскада равна

$$R_{if} = \frac{\mu_f}{S_f} = \frac{\mu}{(1 - \beta \mu) S} = \frac{R_i}{1 - \beta \mu}. \quad (15)$$

Отсюда видно, что внутреннее сопротивление лампы каскада при отрицательной обратной связи по напряжению как бы уменьшается в $1 + |\beta \mu|$ раз. Из этого непосредственно следует, что введение такой связи повышает отношение сопротивления анодной нагрузки к внутреннему сопротивлению каскада

$$\alpha_f = \frac{R_a}{R_{if}} = \frac{R_a(1 - \beta \mu)}{R_i} = \alpha(1 - \beta \mu). \quad (16)$$

Этот же результат — увеличение α оконечного каскада — получается при применении отрицательной связи по напряжению и в многокаскадных усилителях, независимо от числа каскадов усиления и схемы выходного каскада.

В результате увеличения α колебания напряжения на нагрузке при изменении ее сопротивления будут уменьшены, т. е. связь по напряжению стабилизирует усиление усилителя, не позволяя ему резко меняться при изменении сопротивления нагрузки. Следовательно, такая схема создает режим постоянства напряжения на нагрузке. Разумеется, при введении обратной связи не происходит изменения параметров самой лампы, а поэтому расчет режима каскада может производиться по обычным статическим характеристикам.

Одним из первых вариантов каскада с простой отрицательной связью можно считать схему, опубликованную в 1932 г. Беггелли [2], приведенную на рис. 7. Здесь второй проводник от источника сигнала подается не на делитель напряжения, стоящий в анодной цепи, а прямо на анод лампы.

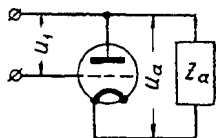


Рис. 7. Схема Беггелли.

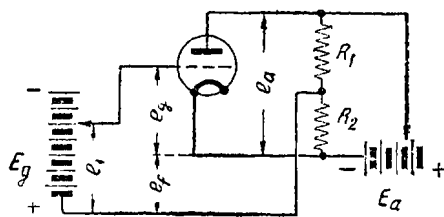


Рис. 8. Схема каскада усиления импульсов постоянного тока с отрицательной обратной связью по напряжению.

При этом β обращается в -1 , а эквивалентное внутреннее сопротивление и коэффициент усиления схемы определяются выражениями, следующими из ур-ний (15) и (13):

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + \mu}; \quad \mu_f = \frac{\mu}{1 + \mu}. \quad (17)$$

Следовательно, μ такой эквивалентной лампы всегда меньше единицы, и лампа дает не усиление сигнала по напряжению, а наоборот, его ослабление. Это и послужило препятствием для практического применения схемы.

Графическое построение характеристик лампы для каскада с связью по напряжению. Имея статические характеристики лампы, примененной в каскаде с обратной связью, не трудно графически построить семейство характеристик эквивалентной лампы. Эта лампа будет иметь уменьшенное в $1 + |\beta\mu|$ раз внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

Для построения характеристик, а также для их экспериментального получения можно воспользоваться схемой каскада усиления импульсов постоянного тока с обратной связью по напряжению, приведенной на рис. 8. Здесь E_g и E_a — источники

сеточного и анодного напряжений, R_1 и R_2 — сопротивления делителя напряжения обратной связи; обозначим, как и прежде, через β отношение

$$\beta = -\frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (18)$$

Возьмем семейство статических характеристик лампы 6Л6 (рис. 9) и, задавшись любым значением β , например, полагая $\beta = -0,1$, построим характеристики новой эквивалентной лампы.

Для этого возьмем какую-нибудь точку на одной из характеристик лампы; например, точку $e_a = 350$ в; $e_g = -10$ в, соответствующую анодному току в 150 мА. Применив отрицательную связь, мы в цепь сетка-катод подадим напряжение

$$e_g = e_1 - e_f, \quad (19)$$

где

$$e_f = \beta e_a = -0,1 \cdot 350 = -35 \text{ в.}$$

Для сохранения прежней величины анодного тока на вход схемы нужно теперь подать

$$e_1 = e_g + e_f = -10 - 35 = -45 \text{ в.}$$

Следовательно, для получения анодного тока 150 мА

при анодном напряжении в 350 в на вход схемы необходимо подать отрицательное смещение 45 в. Таким образом, для построения семейства характеристик эквивалентной лампы достаточно взять ряд точек на характеристиках данной лампы, прибавить к значениям e_g взятых точек βe_a , и соединить кривыми все полученные точки равных входных напряжений. На рис. 9 жирными линиями построены характеристики лампы 6Л6 при $\beta = -0,1$.

Характеристика $e_g = 0$ первоначального семейства останется пограничной линией, за которой будет начинаться область сеточных токов. Поэтому оптимальный режим лампы будет тот же в старой и новой системе координат; можно убедиться графически, что для получения того же режима потребуются увеличить напряжение, подаваемое на сетку, а нелинейные искажения будут уменьшены, примерно, во столько же раз.

Так как в действительной схеме цепь делителя напряжения содержит разделительный конденсатор, то смещение на сетку выбирается по первоначальному семейству характеристик.

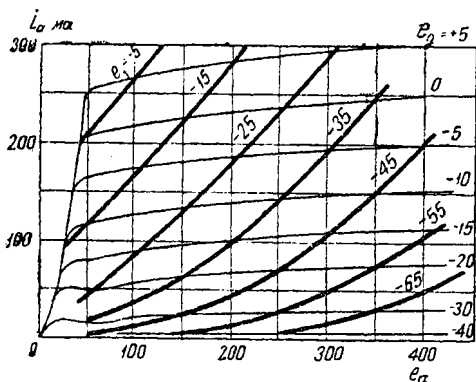


Рис. 9. Характеристики лампы 6Л6 с отрицательной обратной связью по напряжению для $\beta = -0,1$.

2. Схема с связью по току

Принципиальная схема каскада с отрицательной обратной связью по току приведена на рис. 10.

Напряжение обратной связи U_f , снимаемое с сопротивления R , включенного последовательно с сопротивлением анодной нагрузки R_a , будет прямо пропорционально току, текущему через нагрузку, а не напряжению на нагрузке, как в предыдущем случае. Максимальная компенсация искажений будет иметь место при наименьшем сопротивлении нагрузки. Такая схема не стабилизирует выходное напряжение, а наоборот, увеличивает колебания напряжения при изменении нагрузки, стабилизируя ток, текущий в нагрузке.

Эквивалентные параметры схемы. Для схемы рис. 10 коэффициент усиления каскада с отрицательной связью K_f представляет собой отношение переменной составляющей напряжения на нагрузке U_a к напряжению U_1 , подаваемому на вход каскада

$$K_f = \frac{U_a}{U_1} = \frac{U_a}{U_g - U_f} = \frac{K}{1 - \frac{U_f}{U_g}}, \quad (20)$$

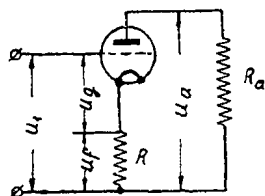


Рис. 10. Схема каскада усиления с отрицательной обратной связью по току.

где K есть коэффициент усиления схемы при замыкании сопротивления R (т. е. без обратной связи)

$$K = \frac{U_a}{U_g}. \quad (21)$$

Напряжение U_f равно

$$U_f = -I_a R = -\mu U_g \frac{R}{R + R_i + R_a}, \quad (22)$$

где I_a есть переменная составляющая анодного тока.

Заменяя в ур-нии (22) μ через K ($\mu = K \frac{R_i + R_a}{R_a}$), получим

$$U_f = -K U_g \frac{R(R_i + R_a)}{R_a(R + R_i + R_a)}. \quad (23)$$

Подставляя значение U_f в ур-ние (20), найдем

$$K_f = \frac{K}{1 + \frac{R(R_i + R_a)}{R_a(R + R_i + R_a)} K} = \frac{K}{1 - \beta K}, \quad (24)$$

где

$$\beta = -\frac{R(R_i + R_a)}{R_a(R + R_i + R_a)}. \quad (25)$$

При холостом ходе каскада $R_a = \infty$ и β делается равным 0; в этом легко убедиться, поделив числителя и знаменателя выражения (25) на R_a . Отсюда и при холостом ходе

$$K_{fxx} = \mu_f = \frac{K_{xx}}{1 - \beta K_{xx}} = \mu. \quad (26)$$

Следовательно, коэффициент усиления при холостом ходе для каскада с обратной связью по току равен μ примененной лампы.

При коротком замыкании нагрузки ($R_a=0$) крутизна динамической характеристики схемы будет

$$S_f = \frac{I_a}{U_1} = \frac{I_a}{U_g - U_f} = \frac{I_a}{U_g + I_a R} = \frac{S}{1 + SR}, \quad (27)$$

где S — статическая крутизна характеристики лампы каскада без обратной связи. Внутреннее сопротивление эквивалентной лампы равно

$$R_{if} = \frac{\mu f}{S_f} = \frac{\mu}{S} (1 + SR) = R_i (1 + SR). \quad (28)$$

Из выражений (28) и (26) не трудно видеть, что в результате применения обратной связи по току, внутреннее сопротивление лампы как бы увеличивается в $1 + SR$ раз, а коэффициент усиления эквивалентной лампы остается равным μ примененной лампы. Схема связи по току применяется в усилителях для измерений и генераторах в тех случаях, когда необходимо стабилизировать выходной ток, сделав его почти неизменным при колебаниях сопротивления нагрузки.

При использовании триода в таком каскаде коэффициент нелинейных искажений может быть сделан малым и почти неизменным при значительных перегрузках усилителя, вплоть до короткого замыкания. Это получается из-за увеличения коэффициента связи при уменьшающемся сопротивлении анодной нагрузки; увеличение кривизны динамической характеристики парализуется увеличением компенсирующего действия обратной связи.

Построение характеристик эквивалентной лампы. Построение эквивалентных статических характеристик производится по семейству статических характеристик лампы с помощью вспомогательной схемы

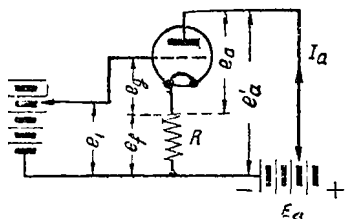


Рис 11. Схема каскада усиления импульсов постоянного тока с отрицательной обратной связью по току.

рис. 11. Построим характеристики лампы УО-104 при сопротивлении обратной связи $R=1000$ ом. Статические характеристики лампы изображены на рис. 12 тонкими линиями. Возьмем точку $I_a=20$ ма на характеристике $e_g=-40$ в. Анодное напряжение, соответствующее этой точке, равно 215 в; для получения того же тока при сопротивлении обратной связи $R=1000$ ом необходимо в анодную цепь подать напряжение

$$e'_a = e_a + i_a R = 215 + 20 = 235 \text{ в.}$$

При этом для получения прежнего анодного тока на вход схемы нужно подать смещение

$$e_1 = e_g - e_f = e_g + i_a R = -40 + 20 = -20 \text{ в.}$$

Таким образом, нами получена одна точка семейства характеристик эквивалентной лампы: $e'_a=235$ в, $i_a=20$ ма, $e_1=-20$ в.