

Эта статья, написанная почти 50 лет назад, представляет интерес и по сей день и практически неизвестна русскоязычному читателю. Оригинальный подход, рассматривающий вакуумный триод с малым усилением как систему с внутренней обратной связью, позволяет более точно и полно описать работу усилительного каскада. На мой взгляд, результаты этой работы этим не ограничиваются, так как позволяют делать более общие выводы о допустимости и целесообразности применения местных обратных связей в усилителях низкой частоты.

Я считаю своим долгом выразить благодарность Денису Афанасьеву, высококвалифицированному специалисту и разработчику уникальной аудиоаппаратуры. Благодаря энтузиазму Дениса и предоставленным им материалам, эта статья стала доступна для широкого круга читателей.

Евгений Карпов

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ, СВОЙСТВЕННАЯ ТРИОДУ

Доктор Н. Stockman

Перевод Евгения Карпова

РЕЗЮМЕ — предлагается заменить триод - пентодом с бесконечным внутренним сопротивлением (для описания величины анодного тока используется упрощенное выражение - $g_m dV_c$) и дополнительной, мнимой величиной э.д.с. в цепи сетки. Эта замена позволяет показать «обратное влияние» поля анода на поле у катода. Показано, как это преобразование дает возможность получить практические формулы, описывающие схему на триоде, исходя из теории обратной связи.

Сопоставление триода с пентодом имеет как достоинства, так и недостатки. Если рассмотреть триод с математической точки зрения, как пентод с бесконечным внутренним сопротивлением, который охвачен отрицательной обратной связью, то несомненным преимуществом такой замены является возможность использовать теорию отрицательной обратной связи для описания работы триода. Но в некоторых случаях такой упрощенный подход невозможен.

Предлагаемый метод при рассмотрении работы схем предварительных и выходных каскадов, использующих триоды с малым μ , представляет значительный интерес. Так как именно для таких триодов наиболее сильно выражено обратное воздействие поля анода на катод.

Это воздействие электрического поля анода есть, по существу дела, вид отрицательной обратной связи.

На Рис. 1 (а) показана схема на обычном пентоде, как пример использования любой многоэлектродной лампы с экранирующей сеткой.

На Рис. 1 (b) показана схема на обычном триоде.

Динамическая проводимость g_{md} для схемы на пентоде равна -

$$g_{md} = g_m = \frac{dI_b}{dV_c} \quad (1)$$

для триода она, соответственно, равна -

$$g_{md} = \frac{r_a}{r_a + Z_b} \quad g_m = \frac{dI_b}{dV_c} \quad (2)$$

или

$$g_m = \frac{dI_b}{dV_{ce}} \quad (3)$$

где dV_{ce} эквивалентное напряжение на управляющей сетке

$$dV_{ce} = dV_c + \frac{1}{\mu} dV_b \quad (4)$$

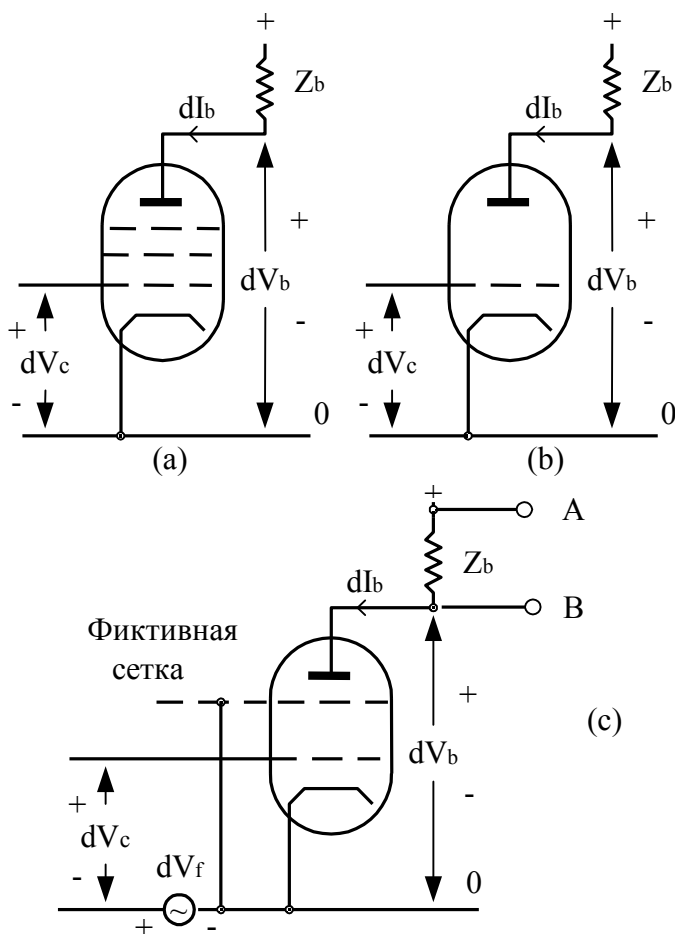


Рис. 1. Схема включения пентода (а) и триода (b), эквивалентная схема включения триода с мнимым напряжением dV_f в цепи сетки - (с).

Из приведенных выше выражений видно, что выражение (1) становится идентичным с выражением (3), когда слагаемое dV_b/μ в выражении (4) стремится к нулю. Наличие этого слагаемого можно рассмотреть как результат удаления экранирующих и защитных сеток из лампы в схеме на Рис.1 (а).

Таким образом, логично рассмотреть dV_b/μ как напряжение обратной связи, введенное последовательно с dV_c , и суммирующееся с ним, которое возникает из-за недостатка электрического экранирования между анодом и катодом. (Если dV_c положительно, то слагаемое, зависящее от dV_b , будет иметь отрицательный знак, следовательно $-dV_{ce} < dV_c$).

Выражение (2) является формой записи теоремы Эквивалентной Анодной Цепи. Эту теорему также можно применить к схеме, показанной на рисунке 1(с). Где фиктивная экранирующая сетка была введена между анодом и катодом для нормирования передачи напряжения dV_b из анодной цепи в цепь сетки. Это влияние учитывается, как фиктивное напряжение $dV_f = dV_b/\mu$ в соответствии с выражением (4). Теперь можно установить эквивалентность между схемой на рисунке 1(с) и базовой схемой с обратной связью по напряжению, Рис. 2 (b), где A коэффициент усиления каскада на триоде, функционирующего как пентод. Таким образом, $A = -g_m Z_b$, и β - коэффициент передачи обратной связи $1/\mu$. Основное уравнение для схемы на триоде может теперь быть получено, исходя из теории обратной связи. Таким образом, величина фактического усиления каскада на триоде приобретает известную форму

$$A_a = \frac{A}{1 - \beta A} = \frac{-\mu Z_b}{r_a + Z_b} \quad (5).$$

Приведенное полное сопротивление Z_{AB} , наблюдаемое между выходами А, В на рисунке. 1 (с) может быть определено для $dV_c = 0$, если подключить к этим выходам источник напряжения dV_0 , который отдает ток dI_0 в параллельную схему, и вычисляется по очевидной формуле (по переменному току Z_b и r_a соединены параллельно)

$$Z_{AB} = \frac{dV_0}{dI_0} = \frac{r_a Z_b}{r_a + Z_b} \quad (6).$$

Это уравнение ясно показывает уменьшение выходного сопротивления каскада из-за шунтирования Z_b малой величиной r_a триода с малым $-\mu$. На вышеупомянутые вычисления выходного сопротивления фиктивный экран не оказывает влияния; на поле у катода воздействует

только поле управляющей сетки, влияние поля анода отсутствует и $dV_f = 0$.

Применение внешней обратной связи может рассматриваться как логическое добавление к уже существующей внутренней обратной связи, определенной по методу, приведенному выше. Это подразумевает, что коэффициент обратной связи должен быть изменен так, чтобы учесть внешнюю обратную связь. Например, очень простая схема внешней обратной связи показана на рисунке 2 (а), где используется трансформатор для введения напряжения обратной связи $dV_f = k dV_b$ (где k - константа) в цепь сетки.

Чтобы учесть влияние обеих отрицательных обратных связей, выражение для коэффициента обратной связи должно принять вид -

$$\beta = \frac{1}{\mu} + k \quad (7).$$

Фактическое усиление в этом примере - равно

$$A_a = \frac{A}{1 - \beta A} = \frac{-\mu Z_b}{r_a + (\mu k + 1) Z_b} \quad (8).$$

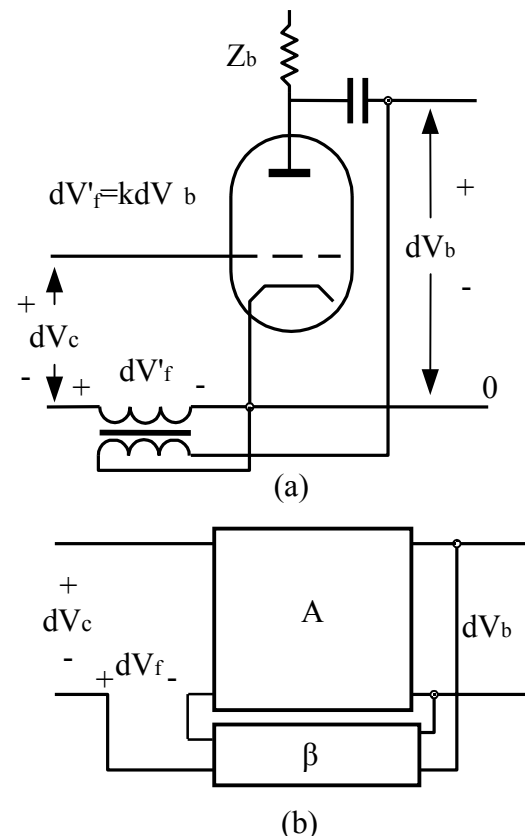


Рис. 2, Схема (а) для получения напряжения обратной V_f (в соответствии с рис. 1 (с)) и (b) эквивалентная структура системы с обратной связью.

Применение внешней обратной связи может рассматриваться как логическое добавление к уже существующей внутренней обратной связи, определенной по методу, приведенному выше.

Это подразумевает, что коэффициент обратной связи должен быть изменен так, чтобы учесть внешнюю обратную связь.

Например, очень простая схема внешней обратной связи показана на рисунке 2 (а), где используется трансформатор для введения напряжения обратной связи $dV_f = k dV_b$ (где k - константа) в цепь сетки. Чтобы учесть влияние обеих отрицательных обратных связей, выражение для коэффициента обратной связи должно принять вид -

$$\beta = \frac{1}{\mu} + k \quad (7).$$

Фактическое усиление в этом примере – равно

$$A_a = \frac{A}{1 - \beta A} = \frac{-\mu Z_b}{r_a + (\mu k + 1) Z_b} \quad (8).$$

Расширяя пример далее, мы можем рассмотреть работу трансформатора в области его верхней граничной частоты, в этой частотной области передаточная характеристика имеет пик из-за резонансных явлений, вызванных его паразитными реактивными параметрами. Известно, что применение отрицательной обратной связи приводит к сглаживанию передаточной характеристики. Фактически, сглаживание передаточной характеристики происходит и без применения внешних обратных связей за счет действия внутренней обратной связи в лампе. Удаление внутренней обратной связи привело бы к максимальному всплеску на передаточной характеристике. Это лишний раз подтверждает одинаковую природу внутренней и внешней обратной связи, так как их влияние приводит к одинаковым результатам.

Аналогично, наличием внутренней обратной связи можно объяснить лучшие частотные свойства триода по сравнению с пентодом.

Рассмотрение введения внешней положительной обратной связи и, вообще, использование любой обратной связи, в истинном смысле слова, следует предварить тем, что мы должны оценить реальное влияние коэффициента обратной связи на параметры схемы на триоде.

Влияние коэффициента обратной связи показано в выражении (5). Если $\beta A = 0$, то $A_a = A$, что соответствует отсутствию обратной связи.

Реверсирование подключения одной из обмоток трансформатора приводит к возникновению положительной обратной связи, величина которой также описывается выражением (7), однако с обратным знаком для k . Если ввести положительную обратную связь такой величины, что $k = 1/\mu$, то обратная связь будет отсутствовать, так как $\beta=0$. Истинную величину обратной связи в каскаде на

триоде можно определить путем сравнения его параметров с параметрами другой схемы, имеющей такую же глубину обратной связи.

Таким образом, если например, измерить приведенный уровень шума в схеме с заданной глубиной обратной связи по сравнению со схемой без обратной связи, и если второй член в выражении (4) сравним по величине с первым, то правильные результаты (имеется в виду уменьшение уровня шума пропорционально заданной глубине обратной связи) могут быть получены, только если второй член в выражении (4) равен нулю, что соответствует использованию пентода с "нулевой" внутренней обратной связью.

Если продолжать увеличивать k далее, изменяя коэффициент трансформации, при $\beta A = 1$ будет достигнута точка начала генерации. Решив уравнение (7) для условия $k = -k^*$, и умножив его на A , мы получаем граничное условие возникновения колебаний

$$k^* = \frac{1}{g_m Z_b} + \frac{1}{\mu} \quad (9)$$

Полученная величина k^* показывает необходимое значение отрицательного сопротивления, возникающего в схеме, охваченной результирующей петлей обратной связи, и эквивалентно положительному сопротивлению потерь. Первый член в выражении (7) характеризует величину положительной обратной связи, которая была бы необходима, чтобы заставить электронную лампу генерировать, если это эквивалент пентода. Вторым членом характеризует дополнительную обратную связь, необходимую в схеме триода, чтобы компенсировать уже существующую отрицательную обратную связь, порожденную влиянием анода на электрическое поле у катода. Критерий возникновения колебаний в схеме - $\beta A=1$ математический и является идеализацией. С технической точки зрения этот критерий не выполняется не только когда $\beta A=1$, но и если βA близко к 1. Причина этого - увеличенная величина β на начальных стадиях развития процесса регенерации и, как следствие, нарушение условий возникновения колебаний. Полученная формула определения величины обратной связи имеет ограниченное применение, так как она получена из уравнений Кирхгоффа, и не учитывает нелинейность реальной схемы.

Использование предложенной теории к триодам с большим μ приводит к тому, что второй член в уравнении (4) становится очень мал и его можно не учитывать, и какого-либо экранирования анода от катода не требуется (имеется в виду область низких частот).

Использование ламп с большим μ в области высоких частот, что является более предпочтительным, требует применения защитных или экранирующих сеток, устраняющих влияние поля анода на управляющую сетку. Это экранирование позволяет уменьшить так называемый эффект Миллера, который широко описан в литературе и здесь не обсуждается.

Следует отметить, что в случае использования триодов с малым μ в области высоких частот, основная теория, данная выше, естественно, была расширена для учета эффекта Миллера. Коэффициент передачи должным образом модифицируется для учета эффективной связи между анодом и цепями сетки.

Таким образом, одна обобщенная теория обратной связи охватывает оба явления изменения усиления триода, обсуждавшихся выше.

В 1918 г. В. Шоттки предложил лампу с экранирующей сеткой. Экранирующая сетка была введена с целью блокирования влияния поля переменного тока анода на катод при одновременном поддержании поля постоянного тока у катода, что соответствует удалению второго члена в выражении (4).

Аналогичный результат может быть теоретически получен за счет применения положительной обратной связи, компенсирующей внутреннюю отрицательную обратную связь. Возможно, если бы существовало идеальное решение (*хотя бы простое*) для введения положительной обратной связи, триоды с малым μ сегодня использовались бы во многих устройствах, теперь использующих пентоды.

Пока не существует какого-либо решения, позволяющего удалить второй член в выражении (4), сравнимого по простоте с экранирующей сеткой, предложенной Шоттки (позже были предложены лучевые лампы).

Такой подход, однако, не противоречит основным законам физики и может быть применен в будущем. Будущие усилительные устройства, конкурирующие с низкочастотной выходной лампой, могут использовать другие базовые принципы усиления - магнитные усилители, сегнетоэлектрические усилители, транзисторные усилители и, возможно, другие. Где эквивалент второму члену в выражении (4) или фактически отсутствует или может быть устранен методами, не применимыми к электронной лампе.