

Майкл С. МакКоркодейл, доктор философии.

Анализ лампового предусилителя и моделирование SPICE

Майкл С. МакКоркодейл © 2005 г.

Абстрактный

Анализируется и моделируется каскад лампового предусилителя с общим катодом. Представлена концепция линейной слабосигнальной модели переменного тока для лампового триода, которая используется для анализа схемы. Аналитические расчеты коэффициента усиления и полосы пропускания предусилителя получены и сравнены с результатами моделирования в среде spice3f5, где показано хорошее совпадение между ними.

Дополнительные материалы

В этой статье будет проанализирована и смоделирована схема лампового предусилителя с использованием триода 12AX7. Технический паспорт триода будет использоваться в качестве справочного материала для определения соответствующих рабочих параметров устройства. Схема предусилителя будет смоделирована в среде Berkeley spice3f5, а исполняемый файл этого симулятора для платформы Windows доступен ниже. Список соединений spice для схемы предусилителя, которую необходимо проанализировать и смоделировать, также доступен ниже.



12AX7 High-Mu Twin Triode

9-Pin Miniature Type, General Data Sheet, Radio Corporation of America, подразделение электронных ламп, июль 1947 г.



Berkeley spice3f5

Бинагу для платформы Windows, любезно предоставлено Prof. Dr.-Ing. Хольгер Форт, Университет Дуйсбург-Эссен, ноябрь 2005 г.



Preamplifier Spice Netlist

Spice3f5-совместимый список соединений для схемы предусилителя, которая будет проанализирована и смоделирована в этой статье.

Анализ

Перед выполнением анализа полезно заметить, что в любой схеме аналогового усилителя присутствуют два типа электрических сигналов, и свойства каждого из них не идентичны. Составной сигнал, присутствующий в схеме усилителя, состоит из изменяющихся во времени сигналов переменного тока (AC) и неизменных во времени сигналов постоянного тока (DC). В данной работе сигналы постоянного тока обозначаются заглавными буквами. Например, ток пластины постоянного тока представлен I_P . Сигналы переменного тока обозначаются строчными буквами, и, соответственно, ток пластины переменного тока обозначается i_p . Напряжения следуют идентичной форме обозначений. На рис. 1 показаны эти компоненты переменного и постоянного тока с использованием описанных обозначений для каскада предусилителя с общим катодом.

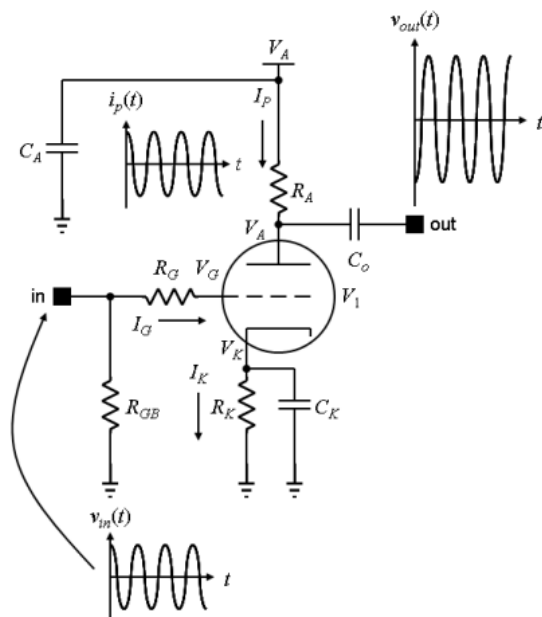


Рис. 1. Компоненты сигнала переменного и постоянного тока в каскаде предусилителя с общим катодом.

Конденсатор ведет себя как блок постоянного тока. Однако в целом он будет передавать сигналы переменного тока, но передача будет зависеть от частоты сигнала, типа конденсатора и общей емкости. Эти различия объясняются механизмом протекания тока в каждом случае. Сигналы постоянного тока перемещают заряд за счет проводимости. Электроны из одной точки цепи непрерывно перемещаются в другую из-за электрического поля, которое создается разностью потенциалов или напряжением. Когда конденсатор полностью

заряжается за счет проводимости заряда на каждую пластину, конденсатор выглядит как разомкнутая цепь для сигналов постоянного тока. Напротив, сигналы переменного тока распространяются через конденсаторы по механизму смещения. Небольшие количества заряда перемещаются к пластинам конденсатора и от них, и заряд никогда не проходит через конденсатор. Тем не менее, это смещение заряда является средством, с помощью которого сигналы переменного тока распространяются через конденсаторы. Сигнал переменного тока накладывается на сигнал постоянного тока, таким образом, составной сигнал может быть разложен, и каждый компонент может быть обработан отдельно путем наложения. Для полноты картины стоит отметить, что это верно только для первого порядка, поскольку нелинейность в цепи приведет к тому, что компоненты сигнала переменного тока вызовут компоненты сигнала постоянного тока, но это выходит за рамки данной статьи. Наконец, будет показано, что смещение усилителя по постоянному току влияет на некоторые свойства цепи по переменному току, такие как коэффициент усиления. Стоит отметить, что это верно только для первого порядка, поскольку нелинейность в цепи приведет к тому, что компоненты сигнала переменного тока порождают компоненты сигнала постоянного тока, но это выходит за рамки данной статьи. Наконец, будет показано, что смещение усилителя по постоянному току влияет на некоторые свойства цепи по переменному току, такие как коэффициент усиления.

Начните анализ, вспомнив общую конфигурацию катода, показанную на рис. 2.

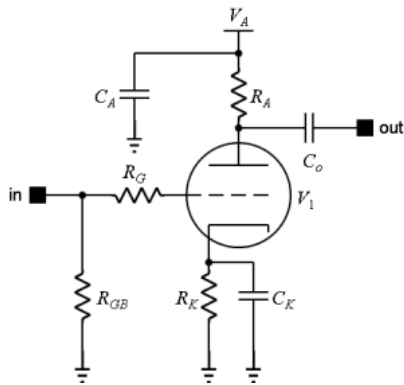


Рис. 2: Каскад предусилителя с общим катодом.

Резистор смещения сетки, R_{GB} , обеспечивает путь постоянного тока с высоким сопротивлением к земле, таким образом, он смещает сетку до нуля вольт постоянного тока. Кроме того, он устанавливает входное сопротивление предусилителя. Обычно желательно, чтобы входное сопротивление усилителя было как можно выше, чтобы входной сигнал не ослаблялся делителем напряжения, настраиваемым входным сопротивлением усилителя и выходным сопротивлением источника сигнала. Шунтирующий конденсатор C_K обеспечивает путь переменного тока от катода к земле. Следовательно, катодный резистор R_K не влияет на сигнал переменного тока, поскольку катод фактически является заземлением переменного тока. Сеточный резистор, R_G , ограничивает частотную характеристику предварительного усилителя, взаимодействуя с емкостью между сеткой и пластиной, чтобы создать RC-цепь с точкой -3 дБ или точкой половинной мощности примерно 20 кГц, как будет показано далее. Этот резистор ограничивает частотную характеристику и гасит любые колебания, которые могут возникнуть на более высоких частотах за пределами звуковой полосы. Пластиначные и катодные резисторы просто ограничивают постоянный ток в лампе, или, точнее, они устанавливают точку смещения или точку покоя.

Затем полезно определить некоторые параметры переменного тока лампы, чтобы можно было получить модель переменного тока, чаще называемую моделью слабого сигнала. Имейте в виду, что модель слабого сигнала — это именно модель. Модели предназначены для аппроксимации реальной физической работы устройства, и наиболее полезные модели обычно являются линейными. Работа ламп или любого другого устройства, если уж на то пошло, в общем нелинейна. Однако если можно представить работу устройства знакомыми и простыми линейными элементами схемы, такими как резисторы и конденсаторы, то модель облегчает ручной анализ. Параметры линейной модели слабого сигнала следующие:

$$\mu = \left. \frac{\partial v_p}{\partial v_g} \right|_{i_p}$$

$$g_m = \left. \frac{\partial i_p}{\partial v_g} \right|_{v_p}$$

$$r_p = \left. \frac{\partial v_p}{\partial i_p} \right|_{v_g}$$

$$\mu = g_m r_p$$

уравнение 1: Определения модели слабого сигнала.

Здесь r_p — динамическое сопротивление пластины, g_m — взаимная проводимость (или крутизна), μ — коэффициент усиления усилителя

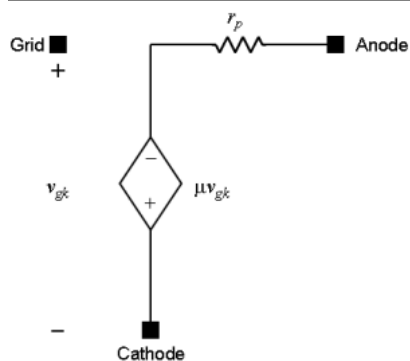
μ - это не коэффициент усиления каскада усилителя, а скорее этот параметр количественно определяет усиление разомкнутого контура или ненагруженного усиления усилителя. Таким образом, μ на самом деле является максимально возможным коэффициентом усиления для каскада.

Если читатель не знаком с исчислением, μ оператор представляет собой частную производную функции многих переменных по переменной в знаменателе. Это можно рассматривать как дифференциальное изменение или очень небольшое изменение одного параметра по отношению к другому. Прямая полоса означает «при постоянном удержании». Таким образом, динамическое сопротивление пластины представляет собой небольшое изменение напряжения пластины по отношению к небольшому изменению тока пластины при постоянном напряжении управляющей сетки.

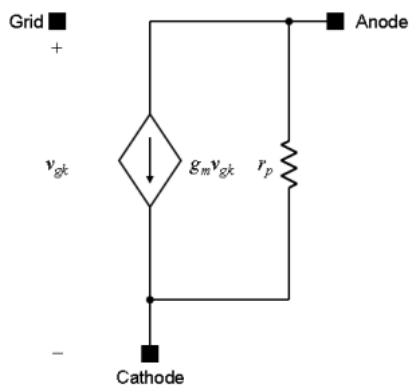
Точно так же взаимная проводимость - это изменение тока пластины по отношению к напряжению сетки при поддержании постоянного напряжения пластины. Таким образом, если напряжение сетки незначительно изменяется, то индуцируется небольшое изменение тока пластины. Это отношение представляет собой взаимную проводимость, которая является фундаментальной для работы лампы. Сетка управления управляет током от пластины к катоду. Здесь этот факт был определен количественно.

С этими параметрами можно получить линейную «модель слабого сигнала» для устройства. Хотя нет абсолютного определения того, что такое слабый сигнал, можно с уверенностью предположить, что звуковой сигнал всегда слаб в схеме предусилителя. Более строгое определение, которое обычно применяется, состоит в том, что слабый сигнал должен иметь не более 5% общих гармонических искажений (THD). Идея такой метрики заключается в том, что при 5% THD нелинейность существенна, поэтому линейная модель становится недостаточно точной. Ступени усилителя мощности не могут быть смоделированы с помощью модели слабого сигнала, потому что сигнал большой, коэффициент нелинейных искажений высокий, а линейные дифференциальные параметры неприменимы.

Линейные модели слабого сигнала для триода показаны на рис. 3. Треугольные источники напряжения и тока на рис. 3 представляют собой зависимые источники, означающие, что напряжение или ток зависят от другого напряжения или тока в другом месте цепи. В моделях на рис. 3 конденсаторы отсутствуют, поэтому в модели нет частотно-зависимых устройств. Хотя это очень простая модель, она точна для расчета усиления средней полосы или усиления в середине звуковой полосы.



(A)



(B)

Рис. 3: Эквивалентные линейные модели слабого сигнала средней полосы для триодной электронной лампы: (A) Модель зависимого источника напряжения. (B) Зависимая модель текущего источника.

На рис. 3А в модели слабого сигнала используется зависимый источник напряжения. Таким образом, когда прикладывается напряжение между сеткой и катодом, индуцируется соответствующее напряжение между пластиной и катодом, которое умножается на параметр μ . В этом случае сопротивление пластины включено последовательно с этим источником. Двойную часть этой схемы можно получить, заменив источник напряжения эквивалентным источником тока, параллельным сопротивлению пластины, преобразование, известное как эквивалентность Нортон. Две модели электрически идентичны по клеммам. Например, использование модели зависимого источника напряжения на рис. 3А даст напряжение пластины $-\mu v_{gk}$. Для сравнения, напряжение пластины $-g_m v_{gk} r_p$ можно определить, используя модель зависимого источника тока, показанную на рис. 3В. Однако произведение $g_m r_p$ равно μ , как показано в

уравнении . 1, таким образом, две модели эквивалентны по клеммной колодке.

Паразитные конденсаторы существуют между каждым выводом лампы и влияют на частотную характеристику предусилителя. Эти конденсаторы показаны на рис. 4. Они возникают из-за физической конструкции устройства.

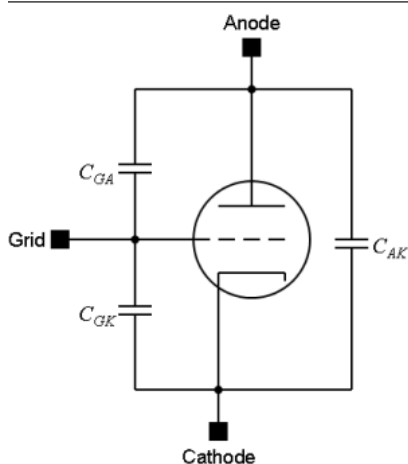


Рис. 4: Паразитные оконечные конденсаторы лампового триода.

Эти частотно-зависимые компоненты могут быть включены в модель слабого сигнала средней полосы. Модификации модели зависимого источника тока показаны на рис. 5.

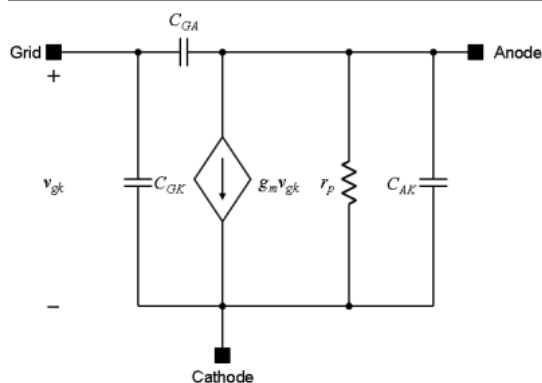


Рис. 5: Модель слабого сигнала линейно-зависимого источника тока для триода, включая частотно-зависимые паразитные конденсаторы.

Читатель может удивиться, почему в этой модели конденсаторы не замыкаются на сигнал переменного тока. Это связано с тем, что эти конденсаторы влияют на сигнал переменного тока. Конденсаторы, которые ранее были замкнуты накоротко, были шунтирующими конденсаторами и, как правило, очень большими, поэтому полное сопротивление переменному току очень мало. Следовательно, эти конденсаторы можно точно смоделировать как короткое замыкание. Паразитные конденсаторы в приведенной выше модели по сравнению с ними малы, поэтому соответствующим импедансом нельзя пренебречь. Эти устройства фактически доминируют в частотной характеристике каскада предусилителя, как будет показано ниже.

С помощью новой линейной модели слабого сигнала для триода можно получить эквивалентную схему слабого сигнала для каскада предусилителя с общим катодом. Существует несколько простых правил для определения эквивалентной схемы слабого сигнала для каскада предусилителя. **Это должно быть сделано только для анализа, поэтому на самом деле не делайте этого со схемой.** Правила следующие:

Закоротите все разделительные и обходные конденсаторы благодаря низкому импедансу по отношению к сигналу переменного тока.

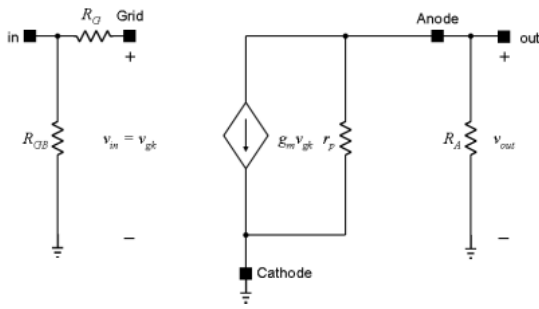
Замкните источник питания на землю, так как он имеет фиксированное напряжение.

Замените активные устройства (трубки) соответствующей линейной моделью слабого сигнала.

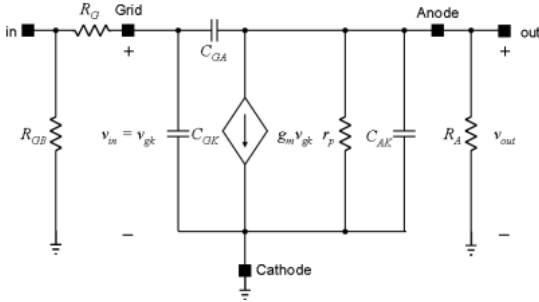
При необходимости уменьшите количество параллельных и последовательных пассивных устройств из новой схемы.

Выполните желаемый анализ и вычислите желаемые параметры производительности.

На рис. 6А показана модель слабого сигнала средней полосы для схемы предусилителя, показанной на рис. 2, где были применены вышеупомянутые правила. Усиление средней полосы можно определить по этой схеме, а на рис. 6В показана частотно-зависимая модель, включающая паразитные конденсаторы, которые можно использовать для определения полосы пропускания или частоты -3 дБ предварительного усилителя. На обоих рисунках была выбрана модель зависимого источника тока, потому что ее проще анализировать, как будет показано ниже. Однако можно также использовать модель зависимого источника напряжения, и результаты будут идентичными.



(А)



(Б)

Рис. 6: Модель слабого сигнала для каскада предусилителя с общим катодом с использованием эквивалентной модели зависимого источника тока. (А) Среднеполосная модель. (Б) Модель, зависящая от частоты, включая паразитные конденсаторы.

Ссылаясь на фиг. 6А, напряжение на пластине или выходе будет произведением тока на выходе и параллельной комбинацией r_p и R_A . Ток на выходе равен $g_m v_{gk}$, $v_{gk} = v_{in}$, таким образом, коэффициент усиления равен v_{out}/v_{gk} . Вывод выражения для коэффициента усиления является просто вопросом алгебры и показан ниже, где A_v обозначает коэффициент усиления по напряжению.

$$i_p = -g_m v_{gk}$$

$$v_{out} = i_p (R_A || r_p)$$

$$v_{out} = -g_m v_{gk} (R_A || r_p)$$

$$v_{in} = v_{gk}$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m (R_A || r_p)$$

уравнение 2: Аналитические выражения для расчета коэффициента усиления по напряжению в средней полосе предусилителя с общим катодом.

В выражениях выше оператор $||$ представляет собой параллельную комбинацию сопротивлений или, в частности, инверсию суммы инверсий для каждого резистора.

Коэффициент усиления (μ), взаимная проводимость (g_m) и динамическое сопротивление пластины (r_p) являются функциями точки смещения, что можно увидеть в техническом паспорте устройства. Именно так сигналы постоянного и переменного тока взаимозависимы. Должно быть очевидно, что R_A включен в окончательное уравнение усиления. Очевидное изменение R_A изменит точку смещения, что также изменит параметры модели переменного тока и, следовательно, коэффициент усиления. Перед выполнением моделирования SPICE представлен численный пример. Изучите схему на рис. 7.

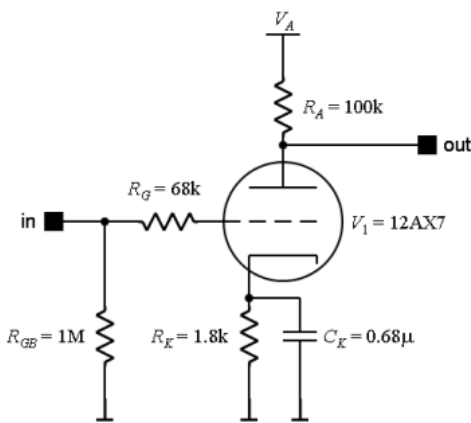


Рис. 7: Схема предусилителя для численного анализа.

Модель средней полосы переменного тока источника тока для этого каскада показана на рис. 6А для этой схемы. На рис. 6В представлена частотно-зависимая модель. Хорошо известно, что в конфигурации с общим катодом входная-выходная емкость доминирует над частотной характеристикой, а всеми другими паразитными конденсаторами можно пренебречь. Паразитный конденсатор, подключенный от входа к выходу, называется C_{GA} . Используя хорошо известную теорему Миллера, этот конденсатор прямой связи можно смоделировать эквивалентным входным конденсатором, который умножается на коэффициент усиления каскада и шунтирует входной сигнал. Эту концепцию можно исследовать далее в любом тексте по элементарным схемам. Преобразование Миллера позволяет свести схему на рис. 6В к схеме, показанной на рис. 8.

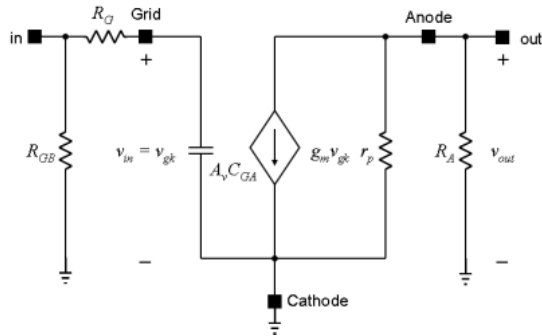


Рис. 8: Упрощенная линейная частотно-зависимая модель предусилителя с общим катодом с использованием теоремы Миллера.

Для номиналов катодного и пластинчатого резисторов, показанных на рис. 7, напряжение сетки постоянного тока составляет 0 В постоянного тока, в то время как напряжение пластины будет приблизительно равно 250 В постоянного тока. Обращаясь к таблице данных для 12AX7, где соответствующий график изображен на рис. 9, можно определить сопротивление пластины и взаимную проводимость (или крутизну). На графике вручную нарисованы интерполяционные линии между кривыми для пластинчатых напряжений 300 В постоянного тока и 200 В постоянного тока. Взаимная проводимость и динамическое сопротивление пластин находятся путем определения точек, в которых эти кривые пересекают линию, где напряжение сетки = 0 В постоянного тока. Как показано, динамическое сопротивление пластины и взаимная проводимость составляют 36 кОм и 2,8 мм ом соответственно.

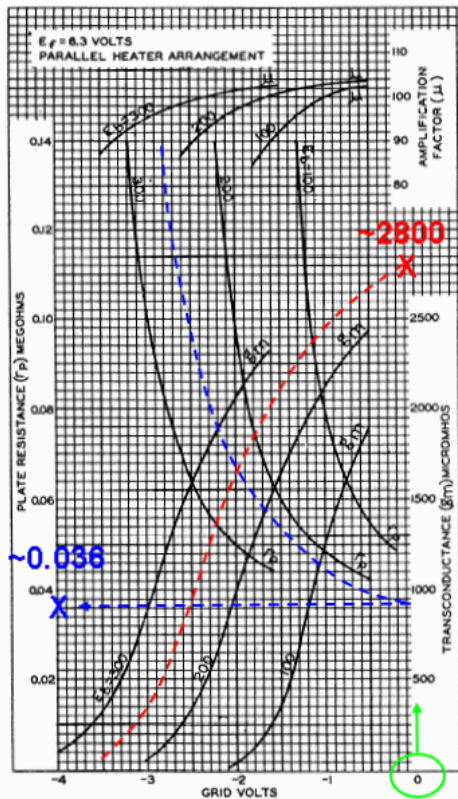


Рис. 9: Выдержка из таблицы данных 12AX7, где $r_p = 0,036 \text{ МОм} = 36 \text{ кОм}$ и $g_m = 2800 \text{ мкм} = 2,8 \text{ мм ом}$.

Прибыль рассчитывается следующим образом:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m (R_A \parallel r_p)$$

$$A_v = -2.8 \times 10^{-3} (100 \times 10^3 \| 36 \times 10^3) = -74.1$$

$$|A_{v,dB}| = |20 \log(74.1)| = 37.4 \text{ dB}$$

уравнение 3: Численные расчеты усиления в средней полосе для предусилителя с общим катодом.

В последнем расчете в уравнении. 3 линейное усиление преобразуется в децибелы, или дБ, что является обычным способом представления усиления каскадов усилителя.

Полоса пропускания, или частота -3 дБ, может быть рассчитана, если учесть, что постоянная времени RC , связанная с сопротивлением входной сетки и конденсатором Миллера, доминирует в частотной характеристике. Все остальные паразитные конденсаторы можно не учитывать. Таким образом, постоянная времени RC , связанная с этим устройством, может быть рассчитана, а частота -3 дБ может быть определена путем взятия обратной величины этой постоянной времени и преобразования из радианов в герцы. Значение C_{GA} можно получить из таблицы данных 12AX7, оно составляет 1,7 пФ, как показано на рис. 10.

	Without External Shield	With External Shield ^a	
Grid to plate (Each unit)	1.7	1.7	μf
Grid to cathode and heater (Each unit).	1.6	1.8	μf
Plate to cathode and heater:			
Unit No.1	0.46	1.9	μf
Unit No.2	0.34	1.9	μf

Рис. 10: Выдержка из таблицы данных 12AX7, где $C_{GA} = 1,7 \text{ мкФ} = 1,7 \text{ пФ}$.

Тогда пропускная способность рассчитывается следующим образом:

$$f_{-3dB} \approx \frac{1}{2\pi CR}$$

$$f_{-3dB} \approx \frac{1}{2\pi |A_v| (C_{GA} R_G)}$$

$$f_{-3dB} \approx \frac{1}{2\pi |74.1| (1.7 \times 10^{-12}) (68 \times 10^3)} = 18.6 \text{ kHz}$$

уравнение 4: расчет полосы пропускания -3 дБ для предусилителя с общим катодом.

Далее эти расчеты сравниваются с моделированием.

SPICE Моделирование

Хотя предыдущий анализ был тривиальным, использование более сложной модели излишне усложнило бы анализ. Делать это нецелесообразно, поскольку цель ручных расчетов состоит в том, чтобы просто определить параметры, которые наиболее существенно влияют на характеристики предусилителя, а затем внести соответствующие коррективы в конструкцию. Таким образом, использование программы моделирования является незаменимым инструментом, поскольку разработчик может повысить сложность и точность модели без увеличения времени проектирования.

Для последующего моделирования использовался пакет Berkeley spice3f5. В этой статье не рассматривается формат списка соединений SPICE или использование SPICE, но существует множество ссылок на эту тему, которые могут помочь читателю. Список соединений SPICE для каскада предусилителя можно скачать в начале этой статьи. Кроме того, будут представлены команды, необходимые для получения показанных результатов. Читателю не потребуется никакой дополнительной информации, чтобы воспроизвести идентичные результаты.

На рис. 11 представлена схема моделируемой цепи. Цифры в кружках относятся к узлам в списке соединений наверху иерархии. Номера без кружков относятся к узлам в модели подсхемы предусилителя. Как показано, v(1) соответствует входному напряжению, v(2) соответствует выходному напряжению и v(3) соответствует напряжению источника питания.

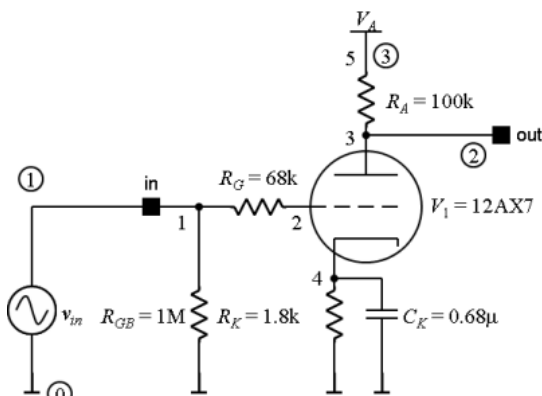


Рис. 11: Схема предварительного усилителя для моделирования, иллюстрирующая узлы списка соединений spice. Номера узлов, обведенные кружком, используются на верхнем уровне иерархии списка соединений. Необведенные моды используются в подсхеме предусилителя.

Были выполнены три различных моделирования: OP, TRANS и AC. Анализ OP обеспечивает рабочие токи и напряжения постоянного тока. Анализ переходных процессов определяет реакцию во временной области, а анализ переменного тока показывает частотную характеристику или усиление по частоте. Результаты анализа ОП представлены в таблице 1.

```

i(va)  = 1.104340e-03
i(vin) = 0.000000e+00
v(1)   = 0.000000e+00
v(2)   = 2.395655e+02
v(3)   = 3.500000e+02

```

Таблица 1: Результаты моделирования OP для предусилителя с общим катодом.

Чтобы сгенерировать эти результаты, прокомментируйте анализы TRANS и AC в списке соединений, раскомментируйте анализ OP и выполните команды, показанные ниже.

```

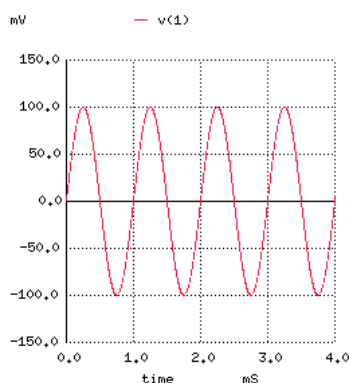
--
Program: Spice, version: 3f5 Build 2.5
Compiled with MINGW32 GCC-3.2.1 within MSYS
Date built: Sun Feb 29 13:18:47 MEZMZ 2004
Spice 1 -> cd netlist directory
current directory: netlist directory
Spice 2 -> preamplifier.sp
Circuit: PREAMPLIFIER

Spice 3 -> run
Spice 4 -> print i(va) i(vin) v(1) v(2) v(3)
--

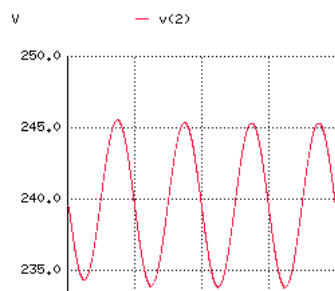
```

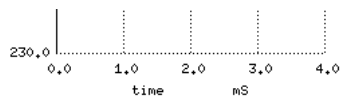
Здесь $i(va)$ ток, потребляемый от источника питания. Таким образом, ток смещения составляет примерно 1,1 мА, как и предполагалось. $v(1)$ — напряжение сети, и оно, конечно, смещено на землю через резистор 1 МОм. Как показано, ток сетки отсутствует, $i(vin)$ так как vin подключен непосредственно к сети. Напряжение пластины $v(2)$ составляет примерно 240 В, а напряжение питания $v(3)$ — 350 В.

Моделирование переходного процесса обеспечивает отклик во временной области для данного входа. Входной сигнал $v(1)$ был выбран равным 100 мВ и 1 кГц, как показано на рис. 12А. Выходной сигнал $v(2)$ показывает значительное усиление на пластине, как показано на рис. 12В. При осмотре коэффициент усиления составляет примерно 60, поскольку выходной сигнал колеблется примерно на 6 В от нуля до пика при входном напряжении 100 мВ от нуля до пика.



(A)





(Б)

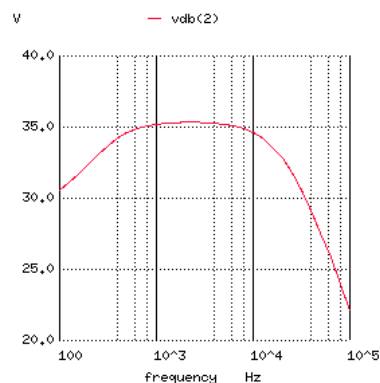
Рис. 12: Результаты моделирования TRANS (А) Входной сигнал в управляющей сетке. (Б) Выходной сигнал на пластине.

Чтобы сгенерировать эти результаты, закомментируйте анализы ОР и АС в списке соединений, раскомментируйте анализ TRANS и выполните следующие команды.

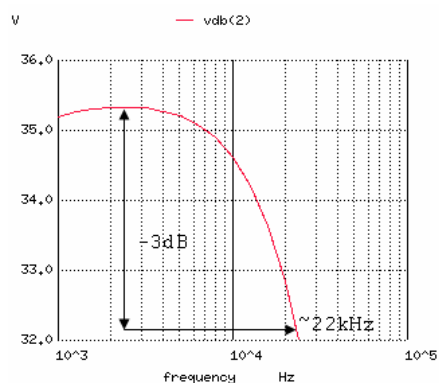
```
--
Program: Spice, version: 3f5 Build 2.5
Compiled with MINGW32 GCC-3.2.1 within MSYS
Date built: Sun Feb 29 13:18:47 MEZMZ 2004
Spice 1 -> cd netlist directory
current directory: netlist directory
Spice 2 -> preamplifier.sp
Circuit: PREAMPLIFIER

Spice 3 -> run
Spice 4 -> plot v(1)
Spice 5 -> plot v(2)
--
```

Точно так же, выполняя анализ переменного тока, определяется частотная характеристика предварительного усилителя. Результаты показаны на рис. 13.



(А)



(Б)

Рис. 13: Результаты моделирования переменного тока: (А) от 10 до 100 кГц. (Б) показывает частоту -3 дБ.

Чтобы сгенерировать эти результаты, закомментируйте анализы ОР и TRANS в списке соединений, раскомментируйте анализ АС и выполните следующие команды.

```
--
Program: Spice, version: 3f5 Build 2.5
Compiled with MINGW32 GCC-3.2.1 within MSYS
Date built: Sun Feb 29 13:18:47 MEZMZ 2004
```

```

Spice 1 -> cd netlist directory
current directory: netlist directory
Spice 2 -> preamplifier.sp

Circuit: PREAMPLIFIER

Spice 3 -> run
Spice 4 -> plot vdb(2) xlimit 100 1e5
Spice 4 -> plot vdb(2) xlimit 1e3 1e5
--

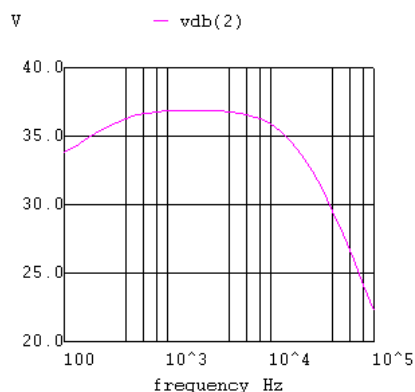
```

Усиление очень плоское на частотах, представляющих интерес для усиления звука. Кроме того, видно, что усиление в средней полосе составляет примерно 35 дБ, что очень близко к аналитическому прогнозу в 37,4 дБ. На рис. 13В частотная характеристика увеличена, и частота, при которой усиление уменьшается на 3 дБ, составляет приблизительно 22 кГц. Этот результат также хорошо соответствует аналитическому прогнозу 18,6 кГц. Аналитические расчеты усиления средней полосы и частоты -3 дБ имеют погрешность +6,86% и -15,5% соответственно по сравнению с результатами моделирования.

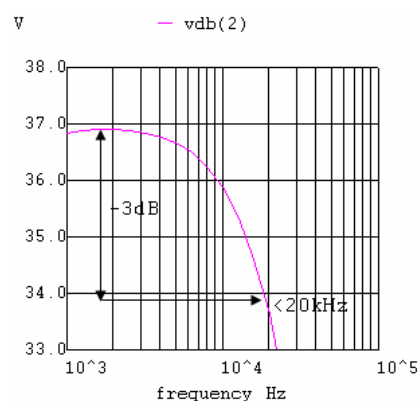
Уроки дизайна

Хотя в этом примере анализ дал довольно точные результаты, цель анализа не в том, чтобы получить максимально точный результат, а в том, чтобы понять параметры схемы, которые влияют на интересующие параметры производительности, такие как коэффициент усиления. Имея это в виду, разработчик может легко настроить параметры схемы и использовать симулятор для точного определения критических параметров производительности.

Имея это в виду, возникает очевидный вопрос, как можно увеличить коэффициент усиления? Как показано в уравнении 2, увеличение R_A позволит достичь этой цели. Однако без штрафа не обходится. Рассмотрим уравнение 3, где видно, что с увеличением коэффициента усиления полоса пропускания уменьшается. Для подтверждения этого было выполнено моделирование, в котором R_A было увеличено до 200 кОм. Результаты показаны на рис. 14.



(A)



(B)

Рис. 14: Результаты моделирования переменного тока для $R_A = 200$ кОм: (A) от 10 до 100 кГц. (B) показывает частоту -3 дБ.

На рис. 14А видно, что усиление увеличилось почти до 37 дБ, что соответствует линейному усилению почти 71. Однако полоса пропускания теперь меньше 20 кГц, как показано на рис. 14В. Этот простой пример должен дать читателю как аналитические, так и конструкторские навыки для разработки каскадов усилителей звука на электронных лампах.

Заключение

В этой работе была представлена концепция линейной эквивалентной модели слабого сигнала как для триодной электронной лампы, так

и для анализа предусилителя. Аналитические прогнозы сравнивались с моделированием, где было обнаружено хорошее совпадение. Эта работа готовит читателя к более сложному анализу и моделированию, которые необходимы для расширенного проектирования и анализа аудиосистем.

Связанные ссылки

Луи Н. Риденур и др., *Ламповые усилители*, 1-е изд., Серия радиационных лабораторий Массачусетского технологического института, Нью-Йорк: McGraw-Hill Book Company, 1948.

Альфред Дж. Кот-младший и Дж. Барри Оукс, *Линейные схемы на электронных лампах и транзисторах: унифицированный подход к линейным активным схемам*, Нью-Йорк: McGraw-Hill Book Company, 1961.

Карл Т. Комптон и др., *Магнитные цепи и трансформаторы*, Нью-Йорк: John Wiley & Sons, 1950.

К. О'Коннор, *The Ultimate Tone*, Канада: London Power Press, 1995.

Ф. Лэнгфорд-Смит и др., *Справочник проектировщика радиотрона*, 4-е изд., Сидней: Wireless Press, 1953.

Пол Р. Грей и Роберт Г. Мейер, *Анализ и проектирование аналоговых интегральных схем*, Нью-Йорк: John Wiley & Sons, 1993.

Рон М. Килковски, *SPICE: Практическое моделирование устройств*, Нью-Йорк: McGraw-Hill Book Company, 1995.