

ДРАЙВЕРНЫЙ КАСКАД

Евгений Карпов

В статье приведена схема лампового каскада, обеспечивающего большой размах выходного напряжения при умеренной величине напряжения питания, низкое выходное сопротивление и повышенную линейность.

Вопрос повышения выходной мощности однотактных усилителей достаточно актуален. И дело здесь не в погоне за мощностью как таковой, а в требованиях, диктуемых акустикой. Для получения приемлемой мощности в 8÷15 ватт часто используют либо параллельное включение ламп, или мощные регулирующие лампы (6С19П, 6Н5С, 6Н13С, 6С33С). Однако это сразу порождает очередные проблемы, связанные с возбуждением выходного каскада.

Параллельное включение выходных ламп приводит к значительному возрастанию емкостной, а часто и активной нагрузки на драйверный каскад. Использование мощных регулирующих ламп затрудняется весьма низким коэффициентом усиления выходного каскада и, как следствие, необходимостью получения от драйвера большого размаха выходного напряжения. Если первая проблема достаточно просто решается использованием промежуточного катодного повторителя, то вторая проблема более неприятна и требует значительного повышения напряжений питания драйвера и включения ламп последовательно либо применения согласующего трансформатора.

Чаще всего используют согласующий трансформатор, но на мой взгляд, это совсем не лучшее решение. Реализовать согласующий трансформатор с полосой 80÷100 кГц (неравномерность – 0.1÷0.2 dB), высокой линейностью и малыми фазовыми искажениями – весьма сложная задача. Следует также отметить, что наличие собственных паразитных параметров трансформатора вкупе с реактивным характером нагрузки, приводит к отклонению АЧХ тракта в области высоких частот от желаемой. Поэтому я попробовал решить эту задачу исключительно схемотехническими средствами без использования моточного узла.

Тем, кто все-таки решил использовать согласующий трансформатор, рекомендую не ограничиваться заверениями продавца в исключительном качестве их продукции, а потребовать полную техническую спецификацию на трансформатор с численным указанием его основных параметров. Собственно говоря, это следует делать и при приобретении выходных трансформаторов. В итоге трансформатор вы, может, так и не купите, но удовольствие от ответов получите!

Теоретические предпосылки

В основу построения этой схемы было положено давно известное решение - каскад с динамическим питанием (Рис 1). Рассмотрим, как работает такая схема чуть подробнее. В статическом режиме (входной сигнал отсутствует) напряжение питания каскада равно U_0 и определяется источником опорного напряжения E_0 . Напряжение на аноде лампы U_A будет зависеть от установленного уровня смещения. Ток лампы можно вычислить из следующего соотношения –

$$I_{VL} = I_{RA} = \frac{U_0 - U_A}{R_A} \quad (1).$$

Фактически, в этом режиме схема не отличается от обычного резистивного каскада. Однако при появлении входного сигнала выходной сигнал арифметически суммируется с опорным напряжением E_0 и, соответственно, напряжение питания U_0 начинает меняться синфазно с напряжением U_A . В этом случае выражение (1) приобретет следующий вид –

$$I_{VL} = I_{RA} = \frac{(U_0 + U_{OUT}) - (U_A + U_{OUT})}{R_A} = \frac{U_0 - U_A}{R_A} \quad (2).$$

Как вы видите, упрощение полной записи в выражении (2) приводит опять к выражению (1). Отсюда можно сделать вывод, что лампа в таком каскаде работает при фиксированном анодном токе. Такой режим работы благоприятно сказывается на линейности каскада. Полезной для нас является еще одна особенность схемы – возможность устанавливать статический и динамический режим работы лампы независимо. Таким образом, при значительной величине напряжения источника питания можно обеспечить нахождение лампы (по предельному уровню постоянного напряжения на аноде) в области допустимых режимов и одновременно получить большой размах выходного напряжения.

Регулирование напряжения смещения лампы (E_b) приведет как к изменению напряжения на аноде лампы, так и тока через нее. Это непосредственно следует из выражения (1). Небольшое из-

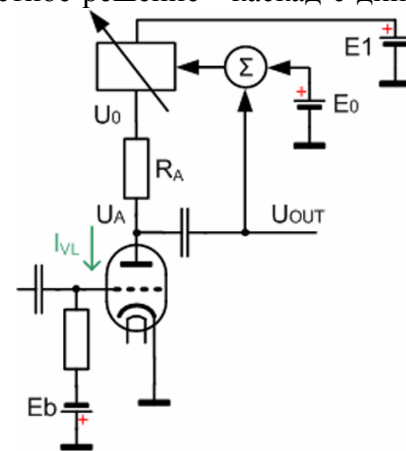


Рисунок 1

менение схемотехники каскада позволяет обеспечить регулирование анодного напряжения лампы без изменения тока покоя.

Схема такого каскада показана на рисунке 2. Ее основное отличие от предыдущей схемы заключается в наличии гальванической связи между анодом лампы и входом регулятора напряжения. В этом случае ток лампы определится следующим соотношением –

$$I_{VL} = I_{RA} = \frac{U_A + E_0 - U_A}{R_A} = \frac{E_0}{R_A} \quad (3).$$

Из выражения видно, что теперь ток лампы не зависит от напряжения на ее аноде. Возможность независимой установки тока покоя и напряжения на аноде лампы позволяет произвести более точную настройку каскада для достижения наилучшей линейности. В динамическом режиме обе схемы работают одинаково.

Все наши рассуждения проводились в предположении, что регулятор и сумматор имеют единичный масштаб преобразования и частотно независимы, а нагрузка отсутствует. В реальной схеме эти условия не соблюдаются в полной мере, но при правильном проектировании схемы и в области частот до сотен килогерц погрешностями, связанными с неидеальностью схемы, можно пренебречь.

Хочу заметить читателям: несмотря на то, что лампа работает при фиксированном токе, эти каскады не полностью эквивалентны каскаду с источником тока в аноде лампы.

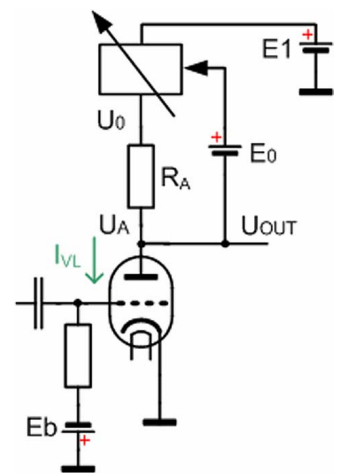


Рисунок 2

Схема каскада

При проектировании каскада не ставилась задача использовать только лампы. Такая постановка вопроса просто неразумна, и в большинстве случаев приводит или к недоиспользованию потенциальных возможностей ламп, или к значительному усложнению схемы. Например, в нашем случае, это приведет к техническим сложностям в организации питания цепей накала «взвешенных» ламп и потребует существенного увеличения питающих напряжений. Поэтому мы пойдем путем оптимальных компромиссов.

Полная схема драйверного каскада показана на рисунке 3.

Структура каскада полностью соответствует схеме, показанной на рисунке 2. Для улучшения линейности собственно усилительного каскада на лампе VL1 в схему добавлен истоковый повторитель на транзисторе VT4. Во-первых, это устраняет нежелательное влияние цепей динамического питания на усилительный каскад, во-вторых, появляется дополнительный мощный выход. Использование каскодного источника тока (VT5, VT6) в цепи истока VT4 обеспечивает высокую линейность повторителя. Источник напряжения смещения (E_0 на рисунке 2) реализован на каскодном источнике тока (VT2, VT3) и резисторе R8, а регулятор напряжения питания усилительного каскада на истоковом повторителе (транзистор VT1).

Таким образом, протекающий через резистор R8 фиксированный ток создает на нем фиксированное падение напряжение, которое суммируется с напряжением на истоке VT4 и поступает на затвор VT1, и соответственно, определяет напряжение питания усилительного каскада. При появлении на аноде лампы переменной составляющей она, практически без ослабления, будет транслироваться на затвор VT1, так как сопротивление

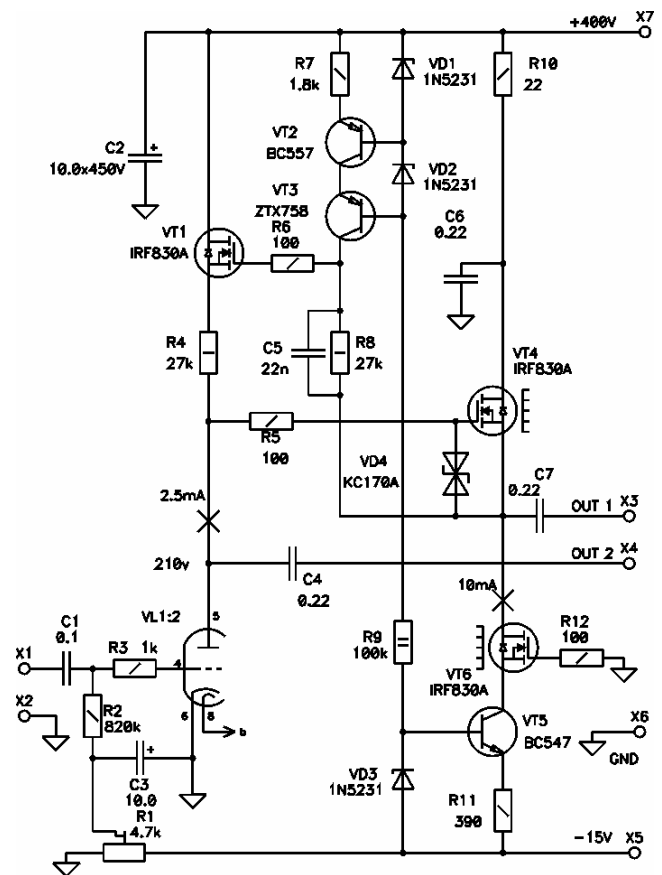


Рисунок 3

источника тока очень велико. Для компенсации потерь переменной составляющей из-за входной емкости истокового повторителя и выходной емкости источника тока резистор R8 зашунтирован емкостью C5.

При необходимости, в усилительном каскаде может быть использовано и автоматическое смещение. В этом случае сеточный резистор заземляется, а в цепь катода лампы включают резистор с сопротивлением $3.6\text{k}\Omega$, зашунтированный пленочной емкостью величиной $9\div 10\mu\text{F}$.

Параметры каскада

Параметры каскада измерены при номинальных напряжениях питания и сопротивлении нагрузки: по выходу 1 – $47\text{k}\Omega$, по выходу 2 – $1\text{M}\Omega$.

Коэффициент передачи	18
Номинальное выходное напряжение (размах)	260V
Выходное сопротивление (выход 1)	$\sim 90\Omega$
Выходное сопротивление (выход 2)	$\sim 15\text{k}\Omega$
Допустимая емкость нагрузки (выход 1)	10nF
Неравномерность частотной характеристики (20Hz÷200kHz, выход 1)	-0.15dB
Неравномерность частотной характеристики (20Hz÷600kHz, выход 1)	-3dB

Зависимость уровня гармоник от размаха выходного напряжения показана на рисунке 4, а спектр выходного сигнала на выходах 1 и 2 - на рисунках 5 и 6 соответственно.

Спектрограммы сняты при номинальном выходном напряжении, спектр искажений типичен для резистивного лампового каскада – в спектре выходного сигнала присутствует только вторая, третья и четвертая гармоника. Как вы видите, заметных различий между спектрограммами с обоих выходов нет, объективные результаты подтверждаются и при прослушивании. Поэтому целесообразно использовать именно его в качестве основного. Выход 2 весьма критичен к нагрузке, и использовать его без особой необходимости не стоит.

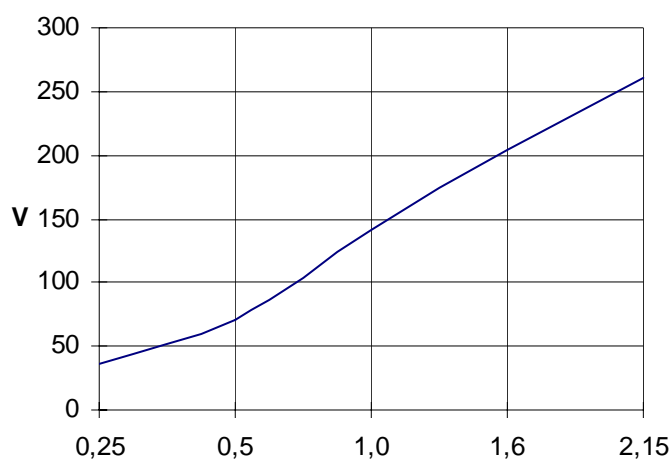


Рисунок 4

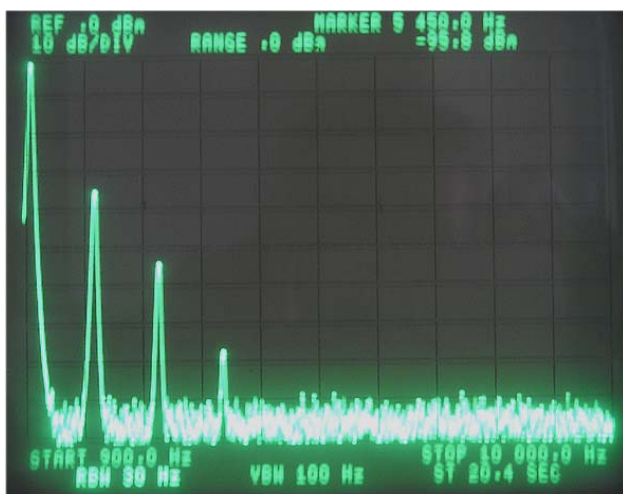


Рисунок 5

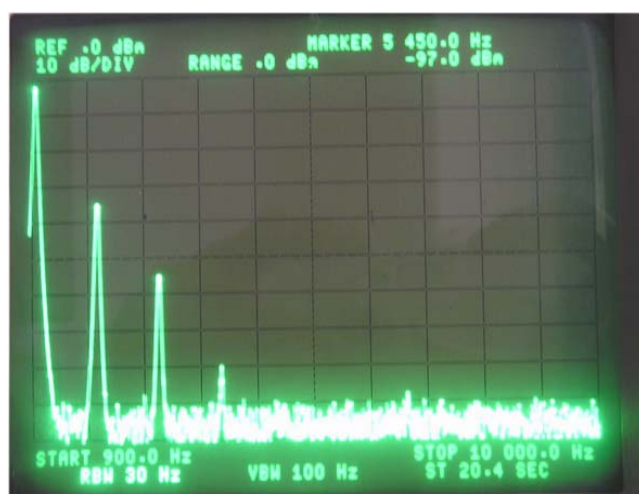


Рисунок 6

Детали, конструкция, рекомендации

Особых требований к элементам нет, только следует обратить более пристальное внимание на типы применяемых емкостей, находящихся непосредственно в цепи сигнала. Транзисторы VT4 и

VT6 устанавливаются на радиаторы с тепловым сопротивлением $15 \div 20 \text{C}^\circ/\text{ватт}$. Резистор R1 желательно использовать многооборотный.

В схеме можно использовать и элементы других типов. Транзисторы VT2, VT3 можно заменить на КТ3107 и КТ3102 с β не менее 150. Транзисторы VT1, VT4, VT6 можно попробовать заменить мощными полевыми высоковольтными транзисторами других типов. Основным критерием при выборе замены должны быть величины собственных емкостей транзистора, они должны быть не более, чем у IRF830. При смене типа этих транзисторов следует тщательно проконтролировать линейность каскада, так как не все типы ключевых полевых транзисторов хорошо работают в линейном режиме. Стабилитроны VD1÷VD3 можно использовать любого типа, с током стабилизации $5 \div 10 \text{mA}$, тип стабилитрона VD4 изменять не следует. Вместо лампы 6Н8С можно использовать и другие триоды с широким раскрытием анодных характеристик.

Монтаж каскада можно выполнить как навесным способом, так и печатным монтажом, что предпочтительнее (использовались оба варианта). В любом случае, следует учитывать, что каскад имеет значительное усиление и широкую частотную полосу. Поэтому необходимо обеспечить минимальный уровень паразитных связей между его выходом и входом, и правильную разводку земляной шины.

Для достижения декларируемых параметров каскад необходимо питать стабилизированными напряжениями. Источник -15V удобно реализовать на стандартном трехвыводном стабилизаторе; высоковольтный источник, в простейшем случае, может быть параметрическим на стабилитронах.

Низкое выходное сопротивление каскада позволяет его с успехом использовать для возбуждения ламп в режиме с сеточными токами, но при этом ток сетки не должен превышать тока покоя выходного истокового повторителя. В случае необходимости ток покоя выходного повторителя можно увеличить, увеличив при этом площадь охладителей транзисторов VT4 и VT6. При этом снизится и выходное сопротивление каскада за счет роста крутизны VT4.

При использовании каскада в усилителе, имеющем общую обратную связь, следует самым серьезным образом отнестись к вопросу устойчивости всей схемы. Здесь надо обратить внимание на два момента – широкополосность каскада и появлении при емкостной нагрузке в АЧХ усилителя выброса на частоте около 250kHz . При емкости нагрузки 10nF амплитуда выброса может достигать 5dB .

Каскад использовался для возбуждения лампы 6С33С, а также пяти параллельно включенных ламп 6С19П, и показал хорошие результаты.