

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ОДНОТАКТНЫЙ КАСКАД НА ВАКУУМНОМ ТРИОДЕ

Часть 2

Евгений Карпов

Приведенная ниже схема является практическим примером реализации мощного выходного ESE каскада.

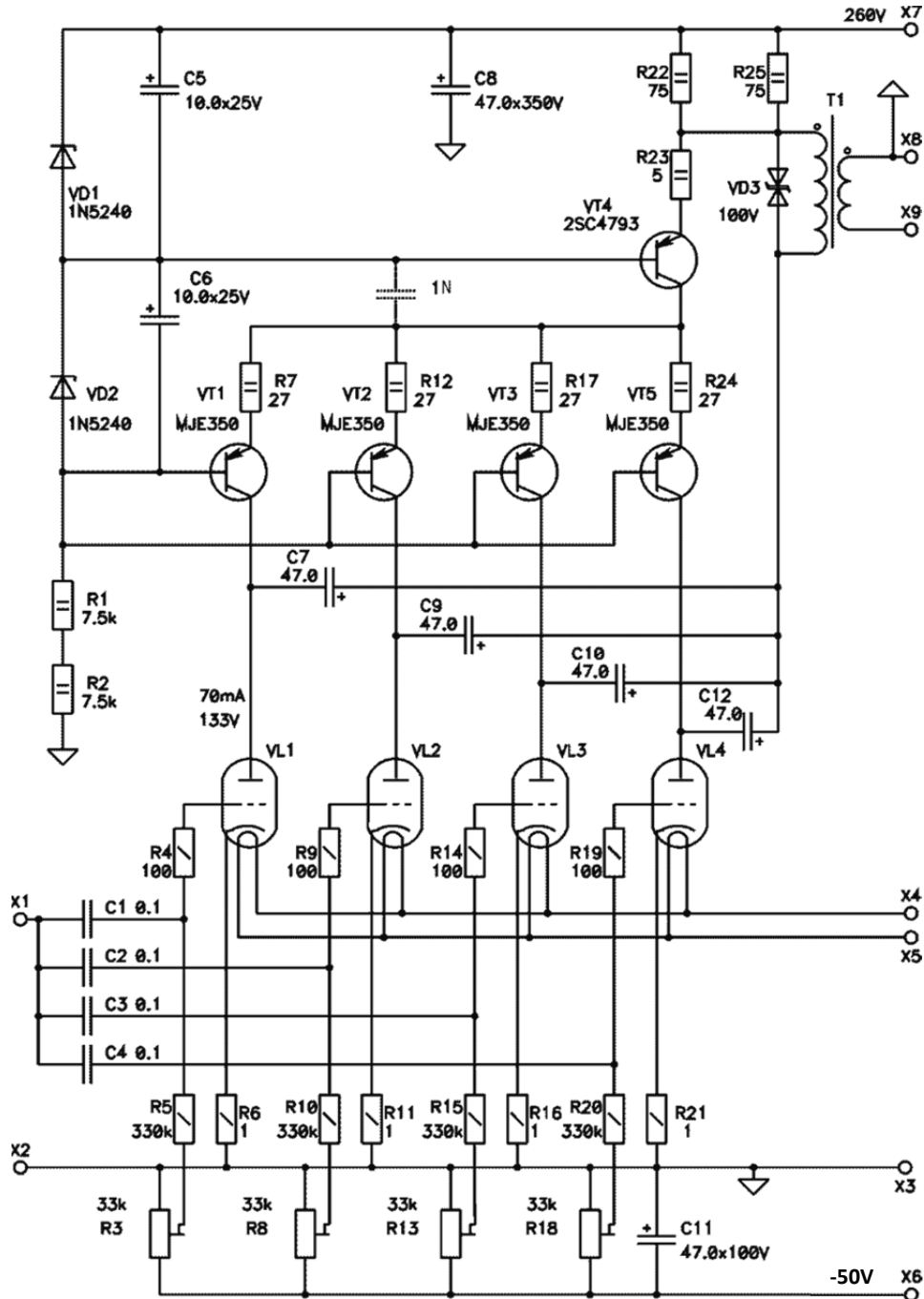


Рисунок 1

Реализация достаточно мощного выходного каскада имеет ряд особенностей, связанных в основном с ограничениями элементной базы. Дело в том, что номенклатура мощных высоковольтных PNP или P-MOSFET транзисторов очень ограничена, и наиболее просто схема реализуется на лампах с относительно низкими рабочими напряжениями. В принципе, нет никаких теоретических ограничений на тип применяемой лампы, но использование «высоковольтных» ламп приводит к некоторому усложнению схемы. Чтобы обойти эти ограничения, каскад реализован на четырех параллельно включенных лампах 6С19П.

Лампы выходного каскада включены и по постоянному, и по переменному току параллельно. Для балансировки токов ламп была немного модифицирована схема управляемого каскодного источника тока. Собственно ток покоя всего каскада задает источник тока на транзисторе VT4, динамическое управление величиной выходного тока осуществляется введением сигнала, пропорционального току нагрузки в эмиттер этого транзистора. Величину коэффициента K можно регулировать изменением соотношения резисторов R23 и R22 || R25.

Суммарное сопротивление этих резисторов ($R_{23} + R_{22} \parallel R_{25}$) должно оставаться постоянным для обеспечения неизменного тока покоя каскада. На время настройки эти резисторы целесообразно заменить на мощный переменный резистор.

Выходная ступень источника тока разделена на четыре канала, образованных транзисторами VT1, VT2, VT3, VT5. Включение в их эмиттеры дополнительных резисторов обеспечивает равномерное распределение токов через лампы (погрешность не превышает нескольких процентов). Это позволяет (при стабилизированном питании каскада) загружать лампу по мощности на 90÷95% без риска ее повредить. Такое построение каскада позволяет наращивать выходную мощность простым параллельным включением дополнительных ячеек. По переменному току все аноды ламп объединены через суммирующие емкости (C7, C9, C10, C12). Эквивалентное выходное сопротивление каскада со стороны анодов находится на уровне 100 – 120 Ом. Весьма низкое выходное сопротивление и отсутствие подмагничивания в трансформаторе существенно облегчает его реализацию и позволяет минимизировать влияние нелинейности тока намагничивания сердечника.

Лампы работают с фиксированным смещением, и режим работы каждой лампы может регулироваться независимо резисторами R3, R8, R13, R18. По переменному току сетки ламп включены параллельно через разделительные емкости. На первый взгляд, такое решение может показаться громоздким, но позволяет использовать лампы без особого предварительного подбора, подобрать 8 ламп в любительских условиях с идентичными характеристиками довольно сложно.

Отрицательным моментом является повышенная нагрузка на драйвер из-за сеточных резисторов.

Параллельно первичной обмотке включен супрессор (VD3), он защищает источник тока от повреждения при перегрузке усилителя и при переходных процессах при включении. Для полного исключения теоретического влияния цепи защиты супрессор можно заменить на вакуумный разрядник с напряжением срабатывания 90-100 вольт.

Собственно выходной каскад имеет следующие параметры:

Максимальная выходная мощность	8W
Номинальное сопротивление нагрузки	8 Ω
Коэффициент усиления (без учета выходного трансформатора)	~2.5
Выходное сопротивление	~1.2Ω
Мощностная полоса	10Hz÷30kHz
Напряжение возбуждения	~18Vrms
Потребляемая мощность по анодной цепи	~80W

С точки зрения внешнего наблюдателя схема ведет себя как классический одноканальный каскад, но обладает лучшей линейностью и лучшими динамическими характеристиками по сравнению с классической реализацией. Большой ток покоя позволяет усилителю хорошо справляться со сложными нагрузками. Субъективно это выражается в лучшей проработке деталей и ровном тональном балансе. Ниже приведены зависимости общего коэффициента гармоник и распределения уровней гармоник от выходной мощности.

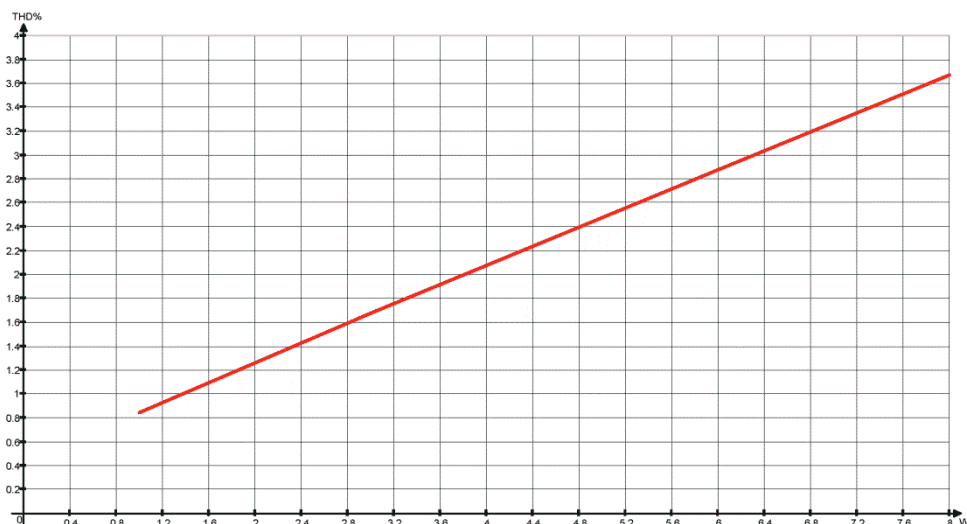


Рисунок 2

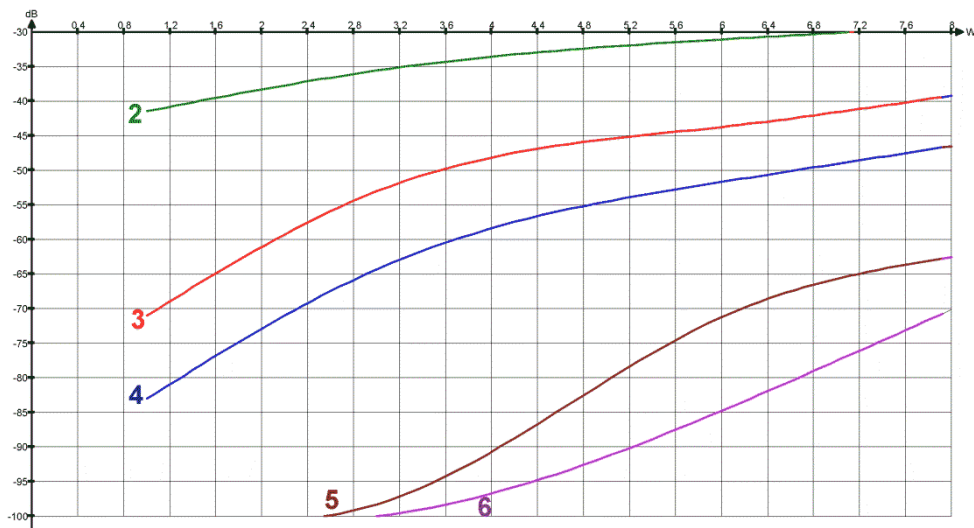


Рисунок 3

Приятной неожиданностью оказалось линейное возрастание искажений с ростом выходной мощности вплоть до начала ограничения, ну и то, что гармоник мало – само собой. Это говорит о том, что форма огибающей искажений, близкая к благоприятной, сохраняется во всем диапазоне выходной мощности. Для лучшего представления о характере вносимых искажений на рисунках 4 и 5 показан спектр при двух уровнях выходной мощности (1W и 9W).

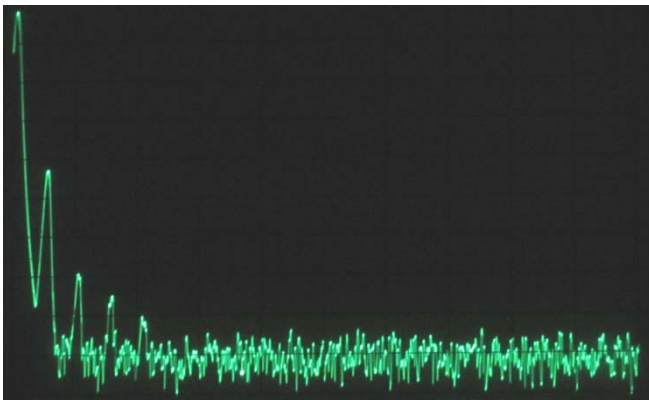


Рисунок 4

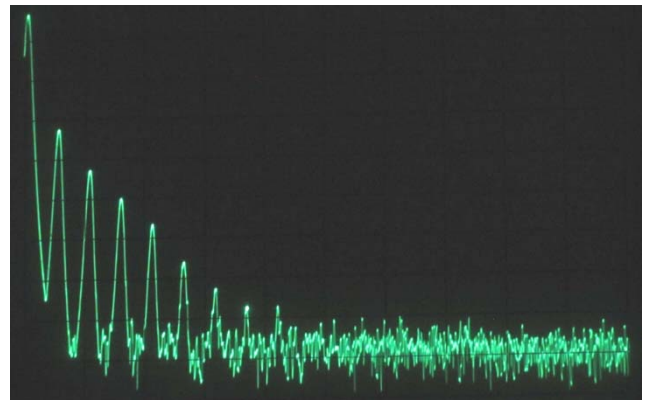


Рисунок 5

Никаких особых требований по реализации такого каскада в «железе» нет. Выходные транзисторы многоканального источника тока желательно разместить на общем радиаторе соответствующей площади (рассеиваемая мощность порядка 30 ватт), чтобы обеспечить одинаковую температуру кристаллов. А транзистор VT4 - на отдельном радиаторе с площадью порядка 100см². В макетном варианте источник тока был собран как отдельный узел с принудительным охлаждением тихоходным вентилятором. Отдельно надо остановиться на суммирующих емкостях C7, C9, C10, C12. В макете использовались емкости Nichicon, в принципе ничего не мешает (кроме стоимости) заменить их на пленочные или бумажные емкости и немного уменьшить их номинал. Здесь следует иметь в виду, что уменьшение номинала емкости приводит к сдвигу частоты резонанса контура, образованного эквивалентной емкостью и индуктивностью намагничивания трансформатора в область звуковых частот. В результате вы можете получить нежелательный (или желательный) подъем АЧХ каскада в области низких частот.

Напряжение питания каскада должно быть тщательно отфильтровано, а источник питания иметь достаточную энергетiku. Амплитуда тока, потребляемого от источника, может достигать 360mA. Идеальный вариант - стабилизированная система питания.

Индуктивность намагничивания трансформатора выбрана достаточно большой – 2 Генри. Это позволяет, учитывая маленькое выходное сопротивление каскада, минимизировать влияние нелинейных составляющих тока намагничивания сердечника. Трансформатор намотан на сердечнике ШЛМ 25x32 из стали 3413 с глубоким секционированием.

Первичная обмотка содержит 7 секций провода ПЭЛ-0.27 по 135 витков, между секциями первичной обмотки намотаны 6 секций вторичной обмотки по 36 витков провода ПЭВ2 -1.12. Намотка рядовая, межсекционная изоляция ПЭТ пленка толщиной 0.1мм в два слоя. Такая конструкция позволяет получить исключительно низкую индуктивность рассеяния. В принципе, сердечник имеет несколько завышенные габариты. Для прототипа использовались сердечники и обмоточные провода, имеющиеся в наличии. В итоге, окно трансформатора не заполнено полностью. Так что при желании над трансформатором можно еще поработать в направлении оптимизации его параметров – снижения сопротивления обмоток и увеличения индуктивности намагничивания. Для сердечника также вполне пригодны широко распространенные стали 3410, 3411. При выборе магнитопровода надо подыскивать сердечник с приблизительно таким же сечением, но меньшей длиной магнитной линии. Возможно, потребуется пересчет числа витков обмоток, только надо сохранить значение коэффициента трансформации между первичной и вторичной обмотками.

Налаживание каскада при правильной сборке не вызывает особых сложностей. На сетках ламп устанавливают напряжение смещения порядка -35 вольт. Анодное напряжение устанавливают 160-170 вольт, устанавливают на анодах ламп напряжение около 130 вольт (регулировкой напряжения смещения), и контролируют ток каждой лампы. В случае необходимости подстраивают общий ток каскада регулировкой (R25 или R22). Допустимый разброс токов ламп 2-3мА. Потом повышают анодное напряжение до номинального и подстраивают напряжения на анодах ламп. При желании, заменив резисторы R23, R22, R25 на переменный резистор (трансформатор подключается к среднему выводу), можно на слух подстроить значение коэффициента K. В последнюю очередь проверяют отсутствие самовозбуждения источника тока. При наличии самовозбуждения (зависит от монтажа) устанавливают и подбирают корректирующую емкость.

В заключение хочу сказать, что в каскаде были опробованы и другие типы ламп, имеющих близкие параметры. Испытывались лампы 6Н5С и 6Н13С, и вот что получилось в такой схеме. Наихудший результат показала лампа 6Н13С, 6Н5С заняла второе место, и лучший результат получился с 6С19П. Что примечательно, на субъективное восприятие в большей степени влияет не интегральная характеристика – коэффициент гармоник, а их огибающая.