

ГИБРИДНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Евгений Карпов

Эта статья носит сугубо практический характер и посвящена практической реализации гибридного усилителя. Основным интерес, конечно, представляет реализация выходного каскада (теоретическая подоплека его работы достаточно подробно описана в статье «[Гибридный мир](#)»). Собственно сам усилитель состоит из нескольких независимых узлов – выходного каскада, драйвера, системы защиты выхода от перегрузок и постоянной составляющей, предстабилизатора. Здесь мы коснемся только узлов звукового тракта, остальные узлы могут быть реализованы по любым известным схемам. Хотя и драйвер может быть совершенно другим, в том числе, и твердотельным.

Если вернуться к выходному каскаду, то условно можно сказать, что это четвертое поколение устройств, построенных по такой идеологии. В схеме уже устранена большая часть детских болезней, она имеет хорошую повторяемость, и более чем 5-летняя эксплуатация таких усилителей показала их высокую надежность. Кстати, один из таких усилителей трудится у меня и используется как эталонный.

Выходной каскад работает в классе «А» и обладает смешанными свойствами между двухтактным и однотоактным каскадами, но по характеру вносимых искажений и короткому «хвосту» гармоник он ближе именно к однотоактной ламповой схеме. При желании, можно рассматривать его как и двухтактный несимметричный каскад.

Не столь важно, как эту схему классифицировать, более интересным для читателей будет субъективная оценка звука. Можно сразу сказать, что поклонников классического однотоактного лампового звука она, наверное, не устроит. Отсутствие выходного трансформатора и широкополосность (диапазон рабочих частот выходного каскада простирается от единиц герц до сотен килогерц), высокая скорость нарастания выходного сигнала накладывает на звук свой отпечаток. Звук точен и быстр, передаются все мелкие нюансы. В чем-то он похож на звук классического твердотельного усилителя, но нет сухости и колючести, характерной для многих усилителей с глубокой обратной связью. Естественно, полностью отсутствует такое неприятное явление, как рост или стабилизация уровня искажений на малых выходных мощностях.

Усилитель ведет себя «правильно», снижение выходной мощности приводит к снижению уровня искажений и постепенному исчезновению высших гармонических искажений, падают и интермодуляционные искажения. В области малых и средних мощностей доминирующими становятся искажения лампового драйвера. При максимальной мощности (15W) уровень искажений всего тракта не превышает 0.15%, и максимальная наблюдаемая гармоника – восьмая. При снижении мощности до 10 ватт уровень искажений падает до 0.07%, и максимальная наблюдаемая гармоника – третья.

Выходное сопротивление – $0.3 \div 0.4$ ома, усилитель нормально работает практически с любой 8-омной акустикой с чувствительностью более $86 \div 87$ dB. Так как уровень ограничения выходного сигнала определяется выходным каскадом и происходит довольно резко, желательно иметь в усилителе пиковый индикатор выходной мощности.

Схема выходного каскада приведена на рисунке 1. Собственно усилительным элементом является единственный транзистор VT1, все остальные компоненты обеспечивают стабилизацию его режима.

ОУ DA1 стабилизирует на выходе нулевой потенциал на выходе усилителя, транзисторы VT2, VT3, VT4 совместно с резисторами R6, R8, R10 являются управляемым источником тока с двумя входами.

Потенциал на первом входе (база VT4) задает ток покоя выходного каскада, через второй вход (эмиттер VT4) вводится управляющий сигнал, пропорциональный току нагрузки. Необходимый коэффициент пропорциональности обеспечивается линейным усилителем на ОУ DA2. В принципе, использование операционного усилителя необязательно, но позволяет уменьшить сопротивление датчика тока, которое непосредственно влияет на выходное сопротивление усилителя.

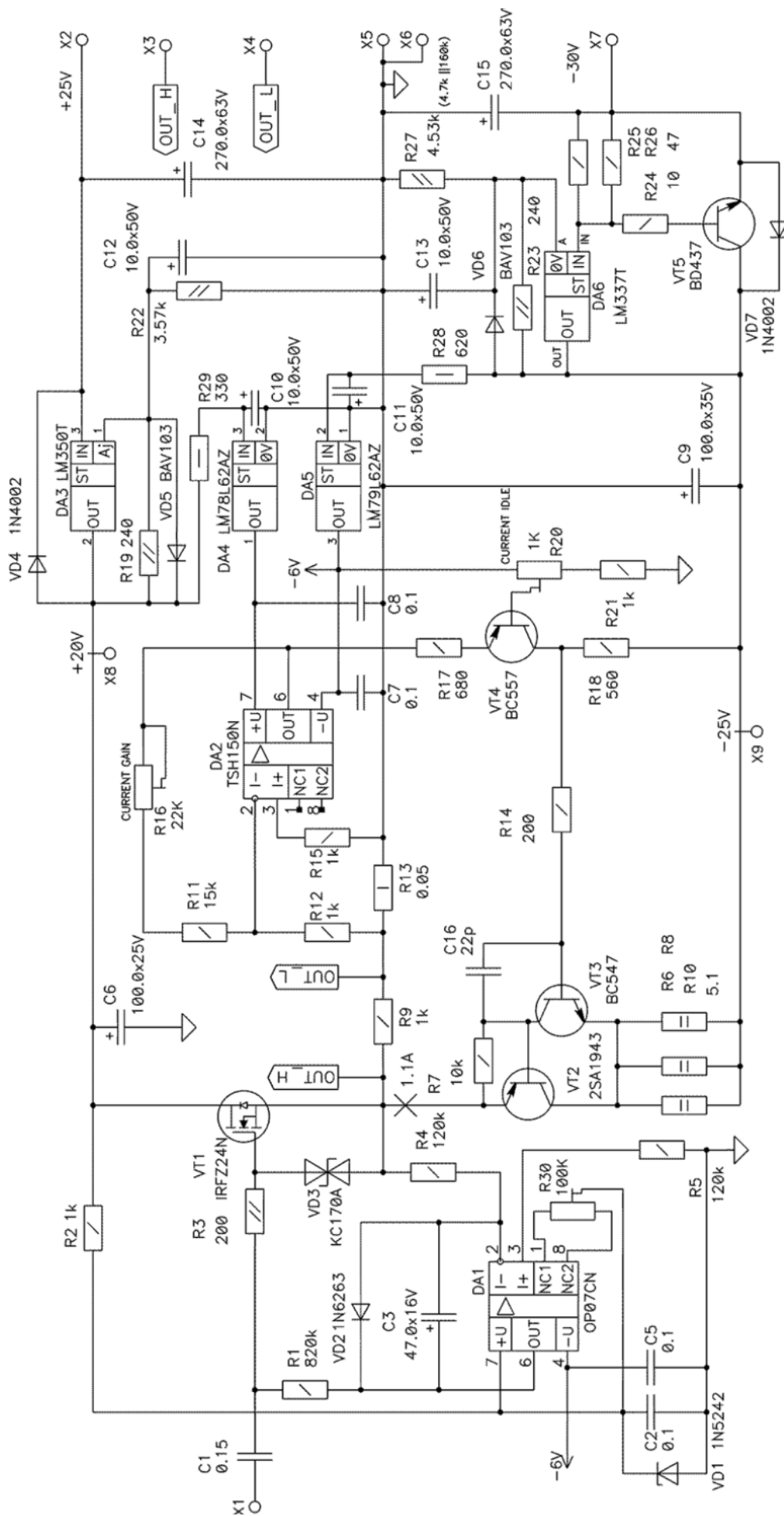


Рисунок 1

Выходной каскад питается от собственных локальных стабилизаторов, расположенных в непосредственной близости от него. Вообще, учитывая большое количество компонентов и широкополосность, выходной каскад целесообразно реализовать на отдельной печатной плате минимальных габаритов (использование SMD компонентов приветствуется), в которую впаяны все силовые компоненты. Вся конструкция крепится к охладителю. Использование локальных стабилизаторов значительно уменьшает перекрестную межканальную помеху, что позволяет использовать один первичный источник для питания обоих выходных каскадов. И основное: стабилизированное питание способствует снижению всех видов искажений самого звукового тракта.

Первичный двухполярный источник питания должен обеспечивать нестабильность выходного напряжения порядка $3\div 4\%$, иметь достаточную энергоемкость и максимальный пиковый выходной ток около 5 ампер (2.5 ампера на канал). Использовать можно, как простейшие линейные стабилизаторы с вторичной стороны, так и групповой стабилизатор с включением регулирующего элемента с первичной стороны силового трансформатора. Вполне достаточна емкость конденсаторов фильтра 10000.0 микрофарад на канал.

Общая мощность, рассеиваемая таким модулем, достигает 65 ватт, соответственно с этим надо и выбирать подходящий охладитель с эффективной площадью порядка $1300\div 1500\text{ см}^2$. Как общая рекомендация – желательно греть охладитель модуля до температуры $40\div 50\text{ C}^\circ$ при нормальных условиях. Каких-то особых требований к компонентам и их типам нет, главное, чтобы они не были «левыми», непонятного происхождения. Резисторы R16, R20 – многооборотные. Следует обратить внимание на качество конденсатора C1, датчик тока R13 должен быть безиндуктивным (использовался резистор ERJL1WKF), ОУ DA2 должен иметь полосу не менее 150 МГц и малое время установления.

При исправных компонентах и правильной сборке наладка модуля не вызывает затруднения. Движки переменных резисторов устанавливаются в среднее положение, подают напряжения питания и устанавливают резистором R20 ток покоя. Проверяют выходные напряжения локальных стабилизаторов, при необходимости – подстраивают, дают схеме прогреться и корректируют ток покоя. Подают на вход синусоидальный сигнал 1 кГц и, плавно его повышая, добиваются минимального уровня искажений при максимальной мощности резистором R16. Кстати, критерии настройки могут быть разными: минимум искажений при максимальной мощности, минимальная длина «хвоста» гармоник при мощности близкой к максимальной, желаемый характер скорости спада «хвоста». Для осознанных манипуляций при настройке надо использовать спектроанализатор, можно попробовать это проделать на слух. В любом случае, окончательная подстройка коэффициента в петле стабилизации должна проводиться на готовом усилителе с поочередным объективным и субъективным контролем.

Использование лампового драйвера – не самоцель и не дань моде, тут больше технических предпосылок. Ламповый драйвер позволяет получить большой размах выходного сигнала с хорошей линейностью без использования цепей глубокой ОС, и в большинстве случаев дает возможность обойтись вообще без общей отрицательной связи. Нельзя обойти и тот факт, что незначительная окраска, которую все-таки привносит ламповая часть тракта, делает звук комфортнее субъективно. Объяснить эту взаимосвязь строго на данный момент не представляется возможным, хотя корреляция между объективными параметрами и субъективным восприятием наблюдается. Так что у конструкторов есть возможность поэкспериментировать, как с режимами драйвера, так и с его реализацией.

Схема драйвера приведена на рисунке 2. На входе драйвера используется каскад с катодной связью и динамическим питанием. Он обеспечивает маленькую и стабильную входную емкость и большой размах выходного напряжения с хорошей линейностью.

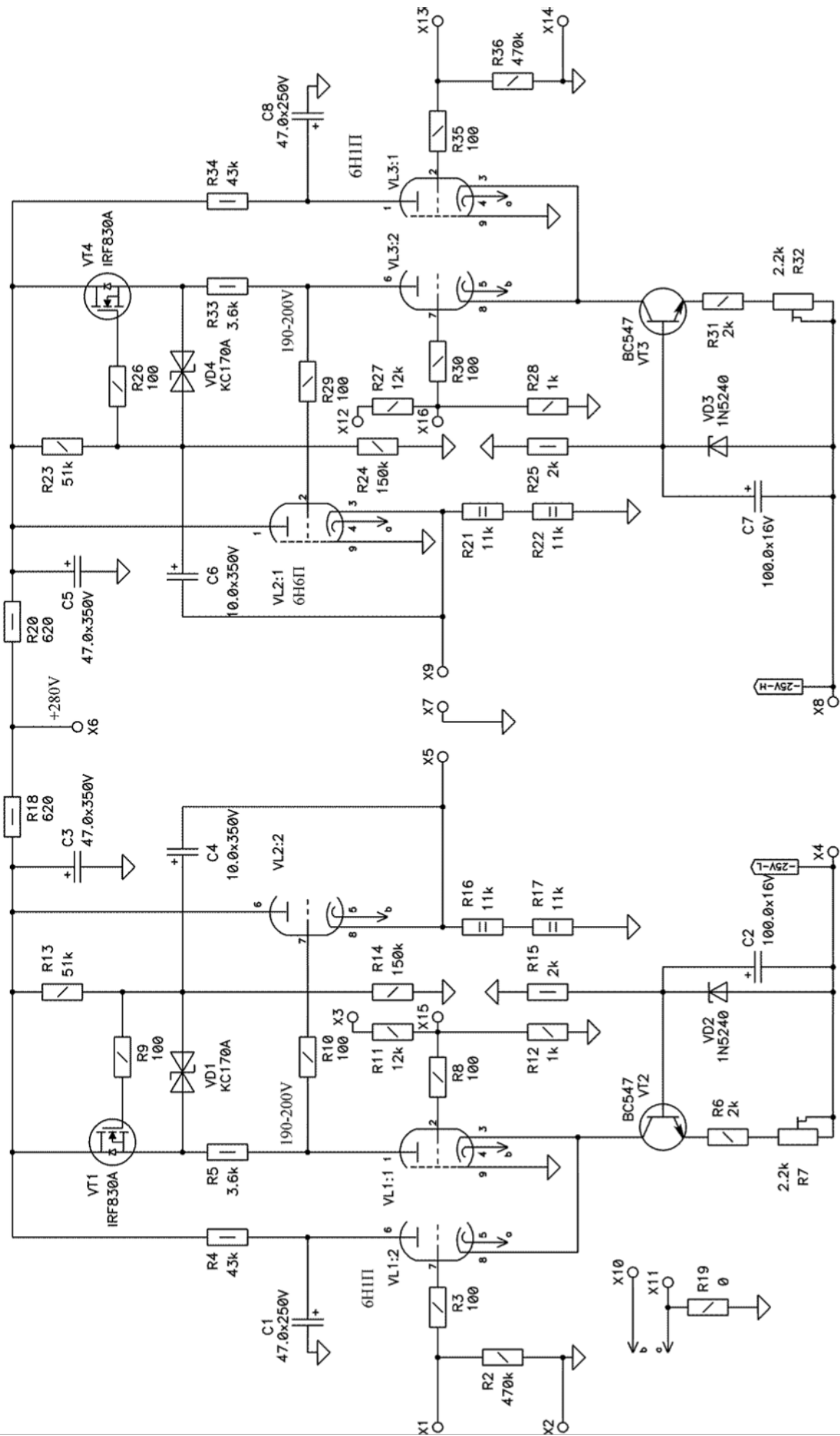


Рисунок 2

На выходе драйвера установлен катодный повторитель, отделяющий усилительный каскад от линии связи с выходным модулем и от самого модуля. Хотя наличие этого каскада не обязательно, но он улучшает частотные характеристики тракта и повышает линейность за счет разгрузки выхода первого каскада. Это также позволило выбрать ток покоя первого каскада достаточно маленьким. В схеме драйвера предусмотрена возможность введение неглубокой общей ОС. Для этого на второй вход первого каскада (X3, X12) подается сигнал с его выхода. Если цепь ОС не используется, то второй вход заземляется (X15, X16 подключаются к общему проводу). Коэффициент передачи драйвера приблизительно равен значению μ первой лампы. При указанных лампах чувствительность усилителя получается около 0.4 вольт, что позволяет использовать его с большинством источников без предварительного усилителя, просто установив на входе регулятор громкости.

Драйвер питается от двух стабилизированных источников. Напряжение анодного источника - 280 вольт, уровень пульсаций не более нескольких милливольт. Стабилизатор может быть любым, в том числе, и один из описанных на сайте (например, [«Высоковольтный стабилизатор с малым уровнем пульсаций»](#)). Если используется групповой стабилизатор, то можно обойтись просто стабилизатором средней мощности на нужное напряжение. Особая долговременная стабильность тут не требуется, определяющими будут пульсации на его выходе. Потребление тока по этой цепи порядка 20mA.

Отрицательное напряжение берется от стабилизатора «своего» выходного каскада.

Если питающие напряжения хорошо отфильтрованы, то уровень шумов и фона на выходе усилителя не превышает – 97 dB.

Конструктивно, драйвер может быть реализован и навесным монтажом на расшивочных панелях, так и на печатной плате. Охладители для транзисторов VT1, VT4 не требуются. Требования к монтажу – стандартные для устройств такого типа. Требования к компонентам не изменились – качественные и известных производителей. Резисторы R7, R32 – многооборотные. Хорошо работают и импортные аналоги советских ламп (если важно, что на лампе написано), естественно с подстройкой режима. Лампы VL1:1 и VL3:2 желательно подобрать в пару.

Наладка драйвера очень проста, резистором R7 (R32) на аноде лампы VL1:1 (VL3:2) устанавливают напряжение около 200 вольт.

Хочу обратить внимание читателей, что статья ориентирована на любителей достаточно высокой квалификации, так как в ней затронуты только основные вопросы изготовления усилителя. Все вопросы, связанные с системой питания, защиты, конструкции просто опущены в предположении, что читатель знает, что и как делать и имеет некоторый опыт в изготовлении подобных устройств. Также надо учесть, что большое количество твердотельных устройств с одной стороны, и наличие высоких напряжений с другой – требует и соблюдения правил техники безопасности, и определенной осторожности при разных манипуляциях с устройством. Необдуманные и поспешные действия могут оказаться фатальными для половины схемы. Так что перед тем, как браться за повторение, есть смысл объективно взвесить свои возможности.

В заключение хочу добавить, что усилитель очень хорош в паре с высокочувствительной широкополосной акустикой, и прекрасно вписывается в системы многополосного усиления как СЧ-ВЧ канал.