

ГИБРИДНЫЙ МИР

Часть 2

Гибридный усилитель с простым выходным каскадом

Евгений Карпов

В статье описана схема простого гибридного усилителя с выходным каскадом на MOSFET транзисторе, в котором все каскады работают в классе «А».

Даны рекомендации по монтажу усилителя и его наладке. Приведены результаты испытаний макета усилителя и сравнительный анализ его параметров с параметрами лампового однотактного выходного каскада.

Все теоретические рассуждения, приведенные в предыдущей статье, реализованы в этой простой схеме. Почему сразу не реализовать более сложный вариант с лучшими параметрами? По очень простой причине - высокая повторяемость и простота настройки этой схемы, отсутствие сложных моточных узлов и дефицитных деталей дает возможность ее повторить даже малоопытным радиолюбителям. Для настройки усилителя вполне достаточно иметь только тестер. Усилитель достаточно легко модернизируется до более сложного варианта.

Усилитель имеет следующие параметры:

Номинальная выходная мощность (W)	3;
Номинальное сопротивление нагрузки (Ω)	8;
Чувствительность (V)	0.2;
Уровень шума (не взвешенный) (db)	-65;
Выходное сопротивление (Ω)	0.57;
Коэффициент гармоник при номинальной мощности (%)	0.61;
Коэффициент гармоник при выходной мощности 1W (%)	0.25;
Мощностная полоса с неравномерностью <1db (kHz)	0.02÷200;
Скорость нарастания выходного напряжения (V/ μ s)	14.5.

Схема усилителя

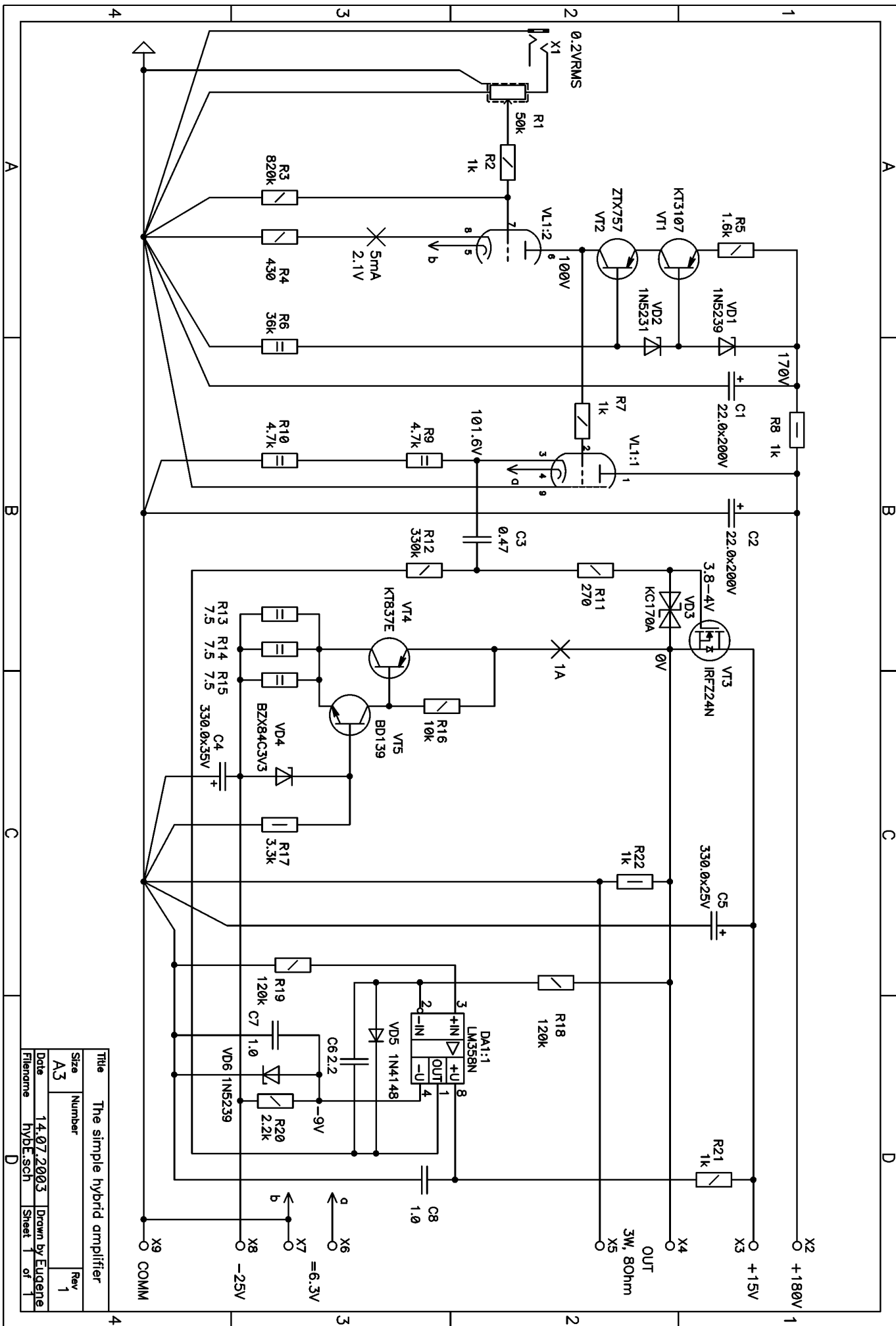
Схема усилителя приведена на рисунке 1. Усилитель трехкаскадный. Первый каскад на лампе VL1.2 с каскодным источником тока в анодной цепи является усилителем напряжения. Второй каскад выполнен на лампе VL1.1, включенной катодным повторителем, – драйверный. Третий каскад, выходной, выполнен на полевом транзисторе VT3, включенном по схеме истокового повторителя с источником тока в цепи истока. Все каскады работают в классе «А», использование цепи общей обратной связи не предусмотрено. Для стабилизации режима выходного каскада по постоянному току используется цепь местной отрицательной обратной связи, в которую входит интегратор на микросхеме DA1.

Рассмотрим назначение элементов усилителя и его работу более подробно.

Входной сигнал через регулятор уровня R1 и антипаразитный резистор R2 поступает на управляющую сетку лампы первого каскада VL1.2. Режим каскада задается катодным резистором R4, на котором выделяется напряжение смещения. Резистор R3 несет защитные функции и обеспечивает поступление напряжения смещения на сетку VL1.2 при пропадании контакта в движке переменного резистора R1. Источник тока в анодной цепи VL1.2 реализован на элементах VT1, VT2, R5, R6, VD1, VD2. Резистор R5 является элементом токовой обратной связи и задает величину выходного тока. Стабилитрон VD1 генерирует опорное напряжение для источника тока и совместно со стабилитроном VD2 задает режим по постоянному току для транзистора VT2. Резистор R6 задает режим работы стабилитронов VD1, VD2. Входной каскад питается через дополнительный фильтр, реализованный на элементах R8, C1.

С анодной цепи лампы VL1.2 усиленный по напряжению сигнал через антипаразитный резистор R7 поступает на управляющую сетку лампы драйверного каскада VL1.1. Катодный повторитель на лампе VL1.1 выполнен по стандартной схеме и особенностей не имеет. Резисторы R9, R10 являются катодной нагрузкой VL1.1.

С выхода катодного повторителя через разделительную емкость C3 и антипаразитный резистор R11 сигнал поступает на затвор полевого транзистора VT3, работающего в выходном каскаде. Также, через резистор R12 на затвор VT3 поступает сигнал обратной связи по постоянному току. Стабилитрон VD3 защищает затвор полевого транзистора от перенапряжения при переходных процессах. Источник тока, задающий режим работы выходного каскада, реализован на элементах VT4, VT5, R13÷R15, R16, R17, VD4. Резисторы R13÷R15 являются элементом токовой обратной связи и задают величину выходного тока. Стабилитрон VD4 генерирует опорное напряжение для источника тока, а резистор R17 задает режим стабилитрона по постоянному току. Резистор R16 уменьшает влияние обратного тока коллектора транзистора VT4 при повышенной температуре. Интегратор цепи обратной связи по постоянному току реализован на элементах DA1.1, R18, R19, C6, VD5. Резистор R18 и конденсатор C6 являются времязадающими элементами, резистор R19 уменьшает влияние входного тока операционного усилителя. Диод VD5 служит элементом



Title		The simple hybrid amplifier	
Size	Number	Rev	
A3		1	
Date	14.07.2003	Drawn by	Eugene
Filename	HYB.E.SCH	Sheet	1 of 1

Рисунок 1

нелинейной обратной связи, охватывающей операционный усилитель, и исключает появление большого отрицательного напряжения на его выходе. Использование нелинейной обратной связи позволяет уменьшить время отклика замкнутой системы при переходных процессах. Операционный усилитель питается от силовых источников, положительное напряжение питания подается через фильтр на элементах R21, C8, а отрицательное напряжение поступает через дополнительный параметрический стабилизатор, выполненный на элементах VD6, R20, C7.

Блокировочные емкости по питанию C2, C4, C5 устраняют влияние паразитных параметров проводников.

Полный перечень компонентов усилителя приведен в таблице 1.

Таблица 1

Колл.	Поз. Обоз.	Элемент	Номинал	Тип	Производитель	Замена
2	C1, C2	Емкость	22.0x200V	ECA2DM220B	Panasonic	Любой
1	C3	Емкость	0.47	МКР-10 0.47x250VDC	WIMA	К40-У9
1	C4	Емкость	330.0x35V	ECA1VM331B	Panasonic	Серии FC, FK
1	C5	Емкость	330.0x25V	ECA1EM331B	Panasonic	Серии FC, FK
1	C6	Емкость	2.2	VP45BY225KX	Vishay	
2	C7, C8	Емкость	1.0	VP45BY105KB	Vishay	КМ-6
1	DA1	М/С		LM358N	National Semiconductor	
1	R1	Резистор	50k	EVUE3JFK4B503	Panasonic	
1	R2	Резистор	1k	МЛТ-0.25-5%-А		C2-23
1	R3	Резистор	820k	МЛТ-0.25-5%-А		C2-23
1	R4	Резистор	430	ОМЛТ-0.25-2%-А		C2-23
1	R5	Резистор	1.6k	ОМЛТ-0.25-2%		C2-23
1	R6	Резистор	36k	МЛТ-2-5%		C2-23
1	R7	Резистор	1k	МЛТ-0.25-5%-А		C2-23
1	R8	Резистор	1k	МЛТ-0.5-5%		C2-23
2	R9, R10	Резистор	4.7k	МЛТ-2-5%		C2-23
1	R11	Резистор	270	МЛТ-0.25-5%		C2-23
1	R12	Резистор	330k	МЛТ-0.25-5%		C2-23
3	R13 - R15	Резистор	7.5	C2-23-2-1%		МЛТ-2
1	R16	Резистор	10k	МЛТ-0.25-5%		C2-23
1	R17	Резистор	3.3k	МЛТ-0.5-5%		C2-23
2	R18, R19	Резистор	120k	МЛТ-0.25-5%		C2-23
1	R20	Резистор	2.2k	МЛТ-0.25-5%		C2-23
1	R21	Резистор	1k	МЛТ-0.25-5%		C2-23
1	R22	Резистор	1k	МЛТ-0.5-5%		C2-23
1	VD1	Диод		1N5239	Microsemi Corp.	Д818В(Г)
1	VD2	Диод		1N5231	Microsemi Corp	КС156Г
1	VD3	Диод		КС170А		2С170А
1	VD4	Диод		BZX843V3	Fairchild Semiconductor	КС133Г
1	VD5	Диод		1N4148	PHILIPS	КД521, КД522
1	VD6	Диод		1N5239	Microsemi Corp.	Д818В(Г)
1	VL1	Лампа		6Н23П		6Н23ПЕ(В)
1	VT1	Транзистор		КТ3107Б		
1	VT2	Транзистор		ZTX757	Zetex	КТ505*
1	VT3	Транзистор		IRFZ24	International Rectifier	
1	VT4	Транзистор		КТ837Е		
1	VT5	Транзистор		BD139	ST Microelectronics	КТ3102**
1	X1	Разъем		112А	Switchcraft	

* - имеет худшие параметры

** - при подборе транзистора КТ837Е с $\beta > 40$

Особенности конструкции и налаживание

Особых требований к конструкции усилителя нет, наиболее удобно собрать схему усилителя на печатной плате, но вполне возможно использовать навесной монтаж на расшивочных пане-

лях, правда, при установке транзисторов VT1, VT2 придется проявить некоторую изобретательность (таким образом был собран макет усилителя). При использовании навесного монтажа микросхему DA1.1 и компоненты ее обвязки монтируют на маленькой печатной (или макетной) плате, которая устанавливается рядом с выходным каскадом.

В любом случае, топология соединений элементов должна соответствовать показанной на принципиальной схеме. Все соединения следует стремиться делать минимальной длины. При использовании во входной цепи экранированного провода (например, от гнезда X1 к резистору R1) необходимо использовать свитую пару проводов (сигнальный и земляной) в общем экранирующем чулке. Экранирующий чулок заземляется с одной стороны (у приемника сигнала), использовать экранирующий чулок как проводник нельзя. В двухканальном усилителе для каждого канала используется отдельный экранированный кабель. Напряжения питания подводятся к усилителю от каждого источника отдельно свитой парой проводов, земляные цепи источников объединяются непосредственно в общей точке усилителя, а не возле источников. Все источники питания усилителя стабилизированы.

Мощные транзисторы выходного каскада VT3, VT4 необходимо установить на теплоотвод, способный рассеять порядка 45 ватт тепловой мощности (при нормальных условиях охлаждения требуется площадь $900 \div 1000 \text{ см}^2$). Целесообразно, установив несколько дополнительных изолирующих опор, смонтировать все элементы выходного каскада непосредственно на охладителе. Антипаразитные резисторы R2, R7 должны располагаться как можно ближе к управляющим сеткам ламп, такое же требование и к антипаразитному резистору R11, он должен быть расположен у затвора транзистора и иметь выводы минимальной длины. Так же у транзистора VT3 необходимо разместить стабилитрон VD3. Рядом с выходным каскадом располагают блокировочные емкости C4 и C5.

Разделительную емкость C3 желательно использовать высококачественную. Наряду с металлобумажными масляными емкостями, высоким качеством обладают импортные поликарбонатные емкости (маркируются MKC), не плохие параметры имеют полипропиленовые емкости, предназначенные для импульсных применений. Полиэстеровые емкости использовать нежелательно.

Процесс наладки усилителя можно значительно упростить, если проделать ряд простых предварительных работ.

Во-первых, перед монтажом желательно проверить все компоненты на целостность и соответствие номиналам (конечно, если это возможно).

Во-вторых, желательно измерить напряжение стабилизации при рабочем токе стабилитронов VD1, VD4 и заранее вычислить и, соответственно, подобрать номиналы резисторов R5, R13 ÷ R15 для получения нужной величины тока. Для расчетов с достаточной точностью можно считать, что напряжение база-эмиттер транзисторов VT1 и VT5 равно 0.6V.

Наладка усилителя начинается с тщательной проверки правильности монтажа. Если все смонтировано правильно, усилитель включается без нагрузки и с закороченным входом (движок резистора R1 в нижнем (по схеме) положении).

Сразу после включения необходимо проверить величину напряжений питания (предполагается, что все источники питания имеют систему защиты от перегрузки), если все напряжения в норме – переходят к контролю величины токов покоя первого и выходного каскада, а затем к измерению напряжений в контрольных точках схемы. Начинать измерения в схеме можно после прогрева усилителя (приблизительно через 1÷2 минуты). Величины токов удобно определить по падению напряжения на резисторе R4 – для первого каскада, и R13 – для выходного каскада. Все измерения напряжений производят относительно общего провода усилителя вольтметром с входным сопротивлением не менее 1MΩ.

Допускается отклонение напряжений в контрольных точках и отклонение тока первого каскада от указанных на $\pm 10\%$, ток выходного каскада должен быть не менее 1A, напряжение на выходе усилителя не должно превышать величины $20 \div 30 \text{ mV}$.

При существенных отклонениях от заданных величин необходимо произвести подстройку режимов работы (требуется весьма редко). Ток первого каскада подстраивается подбором резистора R4, ток выходного каскада подстраивается подбором резисторов R13 ÷ R15, напряжение на аноде лампы VL1.2 устанавливается подбором резистора R4. Если напряжение на выходе усилителя не близко к нулю, то необходимо проверить правильность монтажа и целостность элементов выходного каскада и цепи обратной связи по постоянному току (подстраивать здесь нечего).

На этом наладку усилителя можно считать законченной, можно подключить динамики, ис-

точник сигнала и послушать, что получилось.

При наличии более широкого спектра измерительного оборудования, в частности, осциллографа следует проверить отсутствие самовозбуждения усилителя на высоких частотах и произвести измерение всех параметров усилителя. Подробно на этих вопросах мы задерживаться не будем, я думаю, что тот, кто имеет такое оборудование – знает, что с ним делать.

Результаты макетирования

На рисунке 2 приведен спектр выходного сигнала при максимальной выходной мощности, а на рисунке 3 спектр выходного сигнала при мощности 1W. В таблице 2 и 3 даны численные значения уровней гармоник.

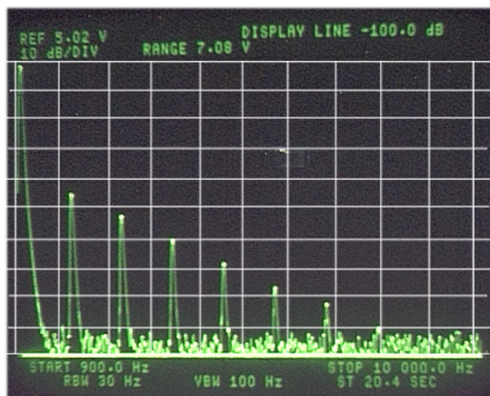


Рисунок 2

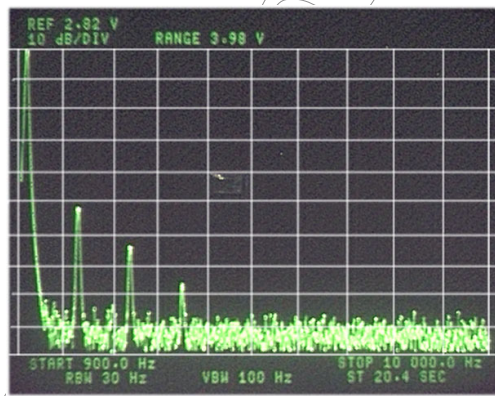


Рисунок 3

Таблица 2

Гармоника	1	2	3	4	5	6	7
Уровень (db)	0	-44	-52	-60	-68	-76	-82
%	100	0.63	0.25	0.1	0.04	0.015	0.008

Таблица 3

Гармоника	1	2	3	4	5	6	7
Уровень (db)	0	-52	-63	-76	0	0	0
%	100	0.25	0.07	0.015	0	0	0

Но наибольший интерес представляет сравнительный анализ спектров выходного сигнала гибридного усилителя и классической ламповой однотактной схемы. На рисунке 4 приведен спектр выходного сигнала усилителя на лампе 6Ф5П в триодном включении при выходной мощности 1W и работе на оптимальную нагрузку. Красными точками отмечены уровни, соответствующие работе в классическом однотактном каскаде, а белыми - при использовании катодной связи.

Какие выводы можно сделать, сравнивая спектрограммы на рисунках 2 и 4?

- Оба усилителя имеют быстро затухающий спектр, причем, гибридная схема имеет явные преимущества перед классическим каскадом, как по уровню, так и по количеству наблюдаемых гармоник.
- Общий уровень гармоник у гибридной схемы приблизительно в 2.5 раза меньше.
- Для всех схем характерно преобладание второй гармоник.
- Схемы имеют разный характер затухания спектра. Для ламповых схем характерно затухание гармонических составляющих по закону, близкому к экспоненциальному. У гибридной схемы гармонические составляющие затухают почти линейно. Что лучше, сказать трудно. Степень маскирования второй гармоникой более высоких гармонических составляющих у

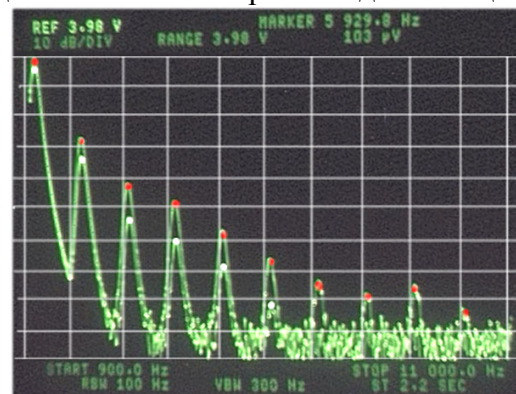


Рисунок 4

ламповой схемы выше, но с другой стороны, если спектр обогащен высшими составляющими, как у классического однотактного каскада, он затухает медленнее.

Если подвести итог, то можно сказать, что звук гибридной схемы немного отличается от звука полностью ламповой схемы и, по-моему, в лучшую сторону – дополнительная окраска почти отсутствует.

Следует также учитывать, что гибридный усилитель имеет прекрасную переходную характеристику. Отсутствие в тракте значительных реактивностей позволяет без искажений и паразитных колебаний воспроизводить крутые фронты и хорошо передавать динамику звука. Достижимые без особых сложностей скорости нарастания выходного напряжения для гибридных схем в несколько раз выше, чем в ламповых. На рисунке 5 приведена осциллограмма выходного напряжения гибридного усилителя при возбуждении прямоугольным импульсом (для повышения разрешения ос-

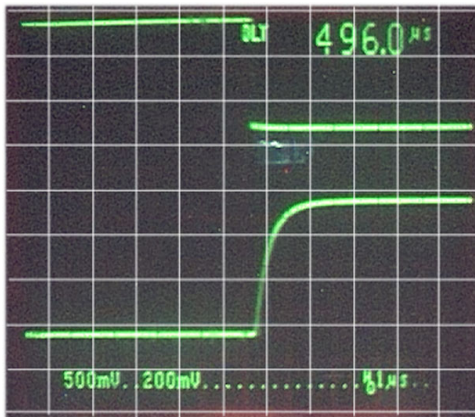


Рисунок 5

Верхний луч – входной сигнал
Нижний луч – выходной сигнал

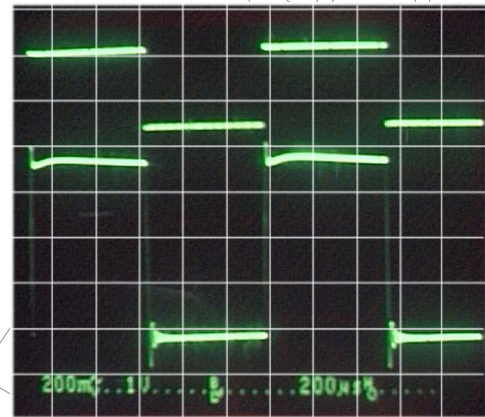


Рисунок 6

Верхний луч – входной сигнал
Нижний луч – выходной сигнал

циллограмма растянута и показан только один фронт). Для сравнения, на рисунке 6 приведена аналогичная осциллограмма для однотактного лампового каскада с трансформаторным выходом.

Из осциллограмм хорошо видна разница в выходном сигнале. Гибридная схема воспроизводит фронт практически без искажений, мы видим только время нарастания сигнала. У ламповой однотактной схемы вершины импульса искажены, причем несимметрично, и на фронтах наблюдаются колебания. Хотя амплитуда колебаний и асимметрия незначительны, по этим косвенным признакам можно сделать вывод о наличии нелинейности фазочастотной характеристики и паразитных резонансов.

Чтобы вы имели полное представление о частотных свойствах схемы, на рисунке 7 показана экспериментально снятая амплитудно-частотная характеристика усилителя при максимальной выходной мощности и работе на активную нагрузку.

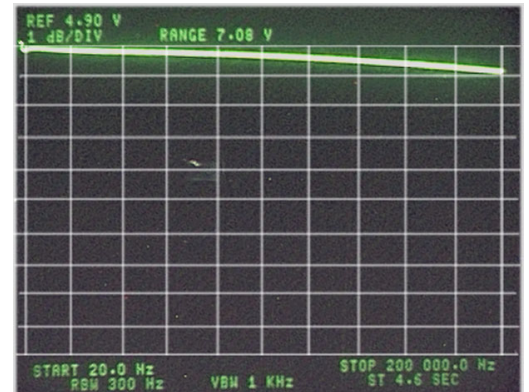


Рисунок 7

Заключение

Заключение этой статьи будет несколько необычным, потому что имеет к изложенному выше материалу косвенное отношение.

В этом цикле из двух статей вам были представлены две главы из будущей книги (первая – в сокращенном варианте, вторая – в полном объеме) с рабочим названием – «Гибридный мир». Хотя книга посвящена одной теме: проектированию гибридных схем аудиоусилителей с однотактным транзисторным выходным каскадом, в ней также затронут широкий круг вопросов, связанных с проектированием аудиоустройств, содержащих ламповые каскады. Приведен сравнительный анализ характеристик каскадов разных типов, даны рекомендации по оптимальному их использованию и выбору режимов работы, приведены методики и примеры расчета.

Следует отметить, что приведенные методики расчета и рекомендации по выбору режимов работы каскадов ориентированы на достижение одной цели – получение максимальной линейности и желаемых переходных характеристик. В результате, появились существенные отличия в последовательности расчетов и наборе критериев по сравнению с типовыми примерами, приводимыми в классических учебниках по ламповой технике.

В основном, книга предназначена для тех, кто хочет научиться сам проектировать и рассчитывать такие схемы. В книге рассмотрены практически все этапы проектирования усилителя, от выбора структуры и расчета элементов каскадов, до выбора параметров и расчета источника питания. Но книга может быть интересна и тем, кто хочет просто повторить схему усилителя, рассмотренные схемы усилителей сопровождаются всей необходимой информацией для их повторения, включая рекомендации по монтажу и наладке.

Более подробно с содержанием книги вы можете ознакомиться, взглянув на рабочий вариант [оглавления](#). Издание книги планируется на конец осени этого года.

Я надеюсь, что, прочтя эту книгу, вы найдете ответы на множество вопросов, связанных с проектированием гибридных одноктных усилителей мощности и просто ламповых каскадов.

НЕЖЕЛТШУ