

СПЕКТРЫ - II

Евгений Карнов

В статье рассмотрены результаты исследования параметров различных типов ламп в каскаде с источником тока в анодной цепи. Приведены параметры электрических режимов этих ламп, обеспечивающие наивысшую линейность каскада и характерные спектры выходного сигнала в этих режимах работы. Даны рекомендации по использованию исследованных ламп.

Проведение этого маленького исследования, результаты которого представлены в этой статье, преследовало несколько целей:

Во-первых, я хотел объективно подтвердить целесообразность использования твердотельных источников тока в качестве анодной нагрузки лампы, и таким образом поколебать уверенность противников такого подхода и укрепить веру его сторонников.

Во-вторых, еще раз проверить правильность ряда рекомендаций по выбору режима работы предварительных каскадов, приведенных в книге «Схемотехника гибридных ламповых усилителей низкой частоты» (там же подробно описан каскад с источником тока и приведена методика расчета самого каскада и источника тока).

В-третьих, облегчить выбор типа лампы и ее рабочего режима всему радиолюбительскому и аудиофильскому братству.

В отличие от предыдущей статьи «Спектры», где режим испытаний для многих ламп существенно отличался от реального, полученные результаты можно сразу использовать на практике. Лампы испытывались именно в том режиме, в котором они должны работать в усилителе.

Цель работы и методика проведения эксперимента.

Основной целью этой работы был поиск оптимальных режимов работы лампы в каскаде с источником тока в анодной цепи, обеспечивающих максимальную линейность. Предположительное назначение каскада – работа в цепях предварительного усиления усилителей мощности, это определило перечень испытываемых ламп и величину выходного напряжения, при котором производились измерения.

Измерения проводились по схеме, показанной на рисунке 1. Фактически, это уже многократно описанная схема [1], [2], дополненная элементами регулирования величины тока лампы и напряжения смещения. Для исключения влияния входного сопротивления измерительного оборудования использовался измерительный буферный усилитель, имеющий очень высокое входное сопротивление и линейность (обращаю ваше внимание: в реальных устройствах достижение наилучших результатов требует **обязательного** использования катодного повторителя в качестве следующего каскада).

К выходу буферного усилителя (точка А) подключались измеритель нелинейных искажений (ИНИ) С9-11 и спектроанализатор НР-3585А, каскад возбуждался генератором ГЗ-118.

Исследовался диапазон рабочих токов лампы, ограниченный снизу – необходимыми частотными свойствами каскада, а сверху – допустимой мощностью рассеяния на аноде. Измерения проводились следующим образом: устанавливался минимальный (предварительно рассчитанный) рабочий ток лампы, напряжение на аноде лампы порядка 100 – 150V и выходное напряжение каскада 6V_{RMS} (в точке А), далее, изменением напряжения смещения U_g искался минимум коэффициента гармоник выходного напряжения. Рабочий ток лампы увеличивался, и процедура поиска минимума гармоник повторялась. В результате получалось несколько рабочих точек, претендующих на оптимальность, в этих точках поведение каскада исследовалось более подробно. Для ламп, имеющих PSpice модели, диапазон поиска оптимального режима сужался предварительным моделированием режимов работы на компьютере.

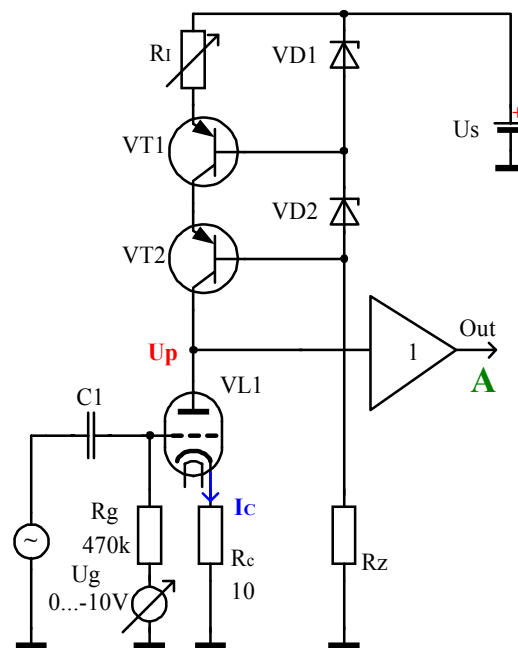


Рисунок 1

Оптимальной считалась точка, обеспечивающая наивысшую линейность каскада при наименьшем рабочем токе (*имеется в виду следующее: если минимальный уровень гармоник регистрировался при нескольких значениях тока покоя, то оптимальным считался наименьший из них*). Режим покоя лампы, соответствующий оптимальной точке, определялся двумя параметрами: напряжением на аноде лампы – U_{p0} и током катода лампы – I_{c0} (измерялся по падению напряжения на прецизионном резисторе R_c) в отсутствии сигнала.

Результаты

В процессе исследования разных типов ламп был обнаружен один любопытный эффект, мне кажется, не описанный нигде ранее. Оказалось, что для разных типов ламп характер изменения спектра искажений выходного сигнала в зависимости от небольших изменений режима по постоянному току, существенно разный. Причем, речь идет не о заходе в область малых токов и напряжений, где лампа существенно нелинейна и такие отличия вполне ожидаемы, а в рабочей области, где ничего не предвещает таких аномалий. Эффект носит устойчивый характер и мало зависит от конкретного экземпляра лампы. Было исследовано 18 типов ламп (в эту статью вошел не весь материал), и если лампа вела себя определенным образом, то испытание другого взятого наугад экземпляра, давало приблизительно ту же картину.

Поэтому я решил добавить к характеристикам лампы еще один субъективный параметр, характеризующий чувствительность спектра выходного сигнала к режиму лампы по постоянному току (в дальнейшем, просто чувствительность). Условно было введено три градации чувствительности – «Низкая», «Средняя», «Высокая».

- Для ламп, имеющих низкую чувствительность, характерно малое изменение спектра выходного сигнала при изменении режимов по постоянному току в широких пределах. Ярким представителем такого типа ламп является лампа 6Н8С, изменение режима по постоянному току приводит к незначительному ($1.5 \div 2.5\text{db}$) изменению уровня второй гармоники, высшие гармоники не появляются. Возможно, это одна из причин горячей любви аудиофилов к этой лампе, она прощает все мыслимые и немыслимые ошибки проектирования.
- Лампы со средней чувствительностью реагируют на изменение режима по постоянному току более остро, но прогнозируемо. Например, при понижении анодного напряжения изменения в спектре выходного сигнала становятся заметными очень скоро – уровень второй гармоники растет, появляются высшие гармоники. Чем дальше мы отходим от оптимальной точки, тем больше уровни гармоник и больше их количество.
- Лампы с высокой чувствительностью резко изменяют характер спектра выходного сигнала при относительно небольших изменениях режима по постоянному току и иногда имеют несколько рабочих зон с резким переходом между ними. Характерным примером может служить лампа 6СЗП. При изменении анодного напряжения всего на 6% лампа скачком меняет характер спектра – высшие гармоники исчезают, уровень второй гармоники увеличивается и при дальнейшем увеличении анодного напряжения меняется мало. Когда лампа находится в зоне высокой чувствительности, как правило, достигается минимальный коэффициент гармоник и лампа чрезвычайно чувствительна к режиму по постоянному току, незначительным изменением режима можно эффективно управлять уровнем и соотношением амплитуд гармоник. Для некоторых типов ламп приведены характеристики обоих режимов работы.

Отдельно был рассмотрен вопрос возможности работы ламп при низком анодном напряжении. Периодически появляющиеся в литературе рекомендации по использованию обычных ламп в резистивном каскаде и низких анодных напряжениях, мягко говоря, ничем не обоснованы. Использование источника тока в анодной цепи является одной из возможностей реально реализовать такой режим работы каскада с обеспечением приемлемого усиления, без захода в микротоковые режимы и удовлетворительными частотными свойствами. Для ламп, которые приемлемо, на мой взгляд, работали в таких режимах, приведены параметры этого режима.

Ниже, в сводной таблице приведены усредненные параметры оптимальных режимов работы всех ламп, а на рисунках - спектр выходного сигнала, характерный для них.

Следует учитывать, что лампы имеют значительный разброс параметров и полного совпадения параметров каскада при использовании различных экземпляров ламп не будет, но отличия получаются относительно не большими - 15÷25%. Поэтому и напряжение на сетке лампы охарактеризовано как ориентировочное и послужит для вас исходной величиной для проектирования.

Для комбинированных ламп приведены параметры триодной части, пентод 6Ж38П включен в режиме триода (обратите внимание на эту лампу).

* - ориентировочное значение

Тип лампы	Уровни гармоник (%)					Режим			Чувствительность	Рис.
	2	3	4	5	Σ	U_{p0} (V)	I_{c0} (mA)	U_g (V)*		
6Н8С	0.078	-	-	-	0.078	190	5	-6.6	Низкая	3
6Н9С	0.0062	0.01	0.0028	-	0.0121	190	2.4	-0.9	Высокая	4
6Г2	0.0786	0.0428	0.0183	0.0076	0.0917	195	1.3		Средняя	5
6Н2П	0.0458	0.0063	0.0042	-	0.0464	150	1.4	-0.23	Высокая	6
6Н1П	0.0737	-	-	-	0.0737	200	4	-4	Средняя	7
6Н5П	0.1099	-	-	-	0.1099	177	4.3	-6.9	Низкая	8
6С3П	0.0760	0.0097	0.0036	-	0.0767	91	7	-0.37	Высокая	9
6С3П	0.0923	-	-	-	0.0923	97	7	-0.54	Низкая	10
6Н16Б	0.0537	-	-	-	0.0537	176	4	-6.4	Низкая	11
6Н16Б	0.3367	0.0102	-	-	0.3368	33	1.4	-0.41	Высокая	12
6С53Н	0.0677	-	-	-	0.0677	218	3.2	-2.8	Низкая	13
6Ф3П	0.0199	0.0137	0.0036	-	0.0244	150	3.4	-0.7	Высокая	14
6Ф3П	0.0797	-	-	-	0.0797	190	3.4	-1.2	Низкая	15
6Ф5П	0.0610	0.0037	0.0027	-	0.0612	195	4.7	-2	Средняя	16
6Н15П	0.1140	-	-	-	0.114	200	5	-4.3	Низкая	17
6Ж38П	0.0356	-	-	-	0.0356	220	8	-5.3	Низкая	18
6С52Н	0.1	-	-	-	0.1	120	1.7	-1.6	Средняя	19
6С52Н	0.1164	0.013	0.0063	-	0.1173	46	1.2	-0.41	Средняя	20

Выводы

1. Сравнив полученные результаты с параметрами резистивных каскадов на тех же лампах, я считаю доказанным, что использование твердотельного источника тока существенно повышает линейность каскада и улучшает спектральный состав выходного напряжения.

Вы можете убедиться в этом сами, на рисунке 2 приведен спектр выходного сигнала резистивного каскада на лампе 6Н8С (я специально привожу пример изменения параметров каскада с этой лампой, так как она считается одной из самых линейных). Лампа работает приблизительно в том же режиме (используется та же самая лампа), что и в каскаде с источником тока ($U_{p0}=187V$, $I_{c0}=4.7mA$), сопротивление анодного резистора равно $20k\Omega$. Величина анодного резистора была выбрана в соответствии с часто встречающимися рекомендациями: принимать его величину в 2÷3 раза больше внутреннего сопротивления лампы в точке покоя (для этой лампы внутреннее сопротивление при токе 4.7mA равно 9150Ω). Теперь сравним спектрограммы: применение источника тока (Рис. 3) привело к уменьшению уровня второй гармоники почти в десять раз, третья гармоника исчезла вовсе. Соответственно, коэффициент гармоник каскада уменьшился с 0.608% до 0.078%, и выходной сигнал имеет более благоприятный спектр. При увеличении уровня выходного сигнала преимущества каскада с источником тока проявляются еще сильнее. Для других типов ламп характер изменений в спектре выходного сигнала аналогичен (уровни гармоник уменьшаются, высшие из низших гармоник - отсутствуют), поэтому я посчитал излишним приводить спектрограммы их выходного сигнала в резистивном каскаде.

2. Высокая линейность каскада с источником тока и улучшение спектра выходного сигнала существенно расширяет круг ламп, пригодных для применения в высококачественных усилителях

низкой частоты. Такие традиционно ругаемые лампы, как 6Н2П, 6Н3П*, 6Н23П* показывают отличные результаты по линейности и качеству звука.

3. Коэффициент усиления каскада с источником тока стремится к величине, равной μ лампы (при достаточно большом входном сопротивлении следующего каскада). В общем случае, это позволяет уменьшить необходимое число каскадов при сохранении заданной чувствительности.

4. Уменьшение величины анодного напряжения лампы приводит к ухудшению линейности каскада. Хотя каскад с источником тока позволяет реализовать такой режим работы для большинства ламп, использовать такие режимы в высококачественных усилителях не рекомендуется. Этот вывод справедлив не только для обычных радиоламп, но и для ламп, предназначенных для работы на низких напряжениях. Исследование ламп 6С63Н* и 6Н27П (типичное напряжение анода 28V) показало, что наилучшая линейность каскада достигается при гораздо больших анодных напряжениях.

5. При питании усилителя от нестабилизированного источника питания следует использовать лампы с низкой чувствительностью спектра выходного сигнала к режиму лампы. Применение стабилизированных источников питания (я вообще других не признаю), снимает это ограничение и дает возможность использовать все перечисленные выше лампы со стабильным результатом.

6. Если лампа имеет ярко выраженную зону с высокой чувствительностью спектра к режиму, то, по-видимому, ее следует избегать, так как данных о временной стабильности такого режима нет (во всяком случае, у меня). При настройке усилителя с использованием только ИНИ, существует опасность попадания именно в такую рабочую зону, так как именно в этом режиме достигается наименьший общий коэффициент гармоник в выходном напряжении каскада. При использовании таких ламп на этот момент следует обратить особое внимание.

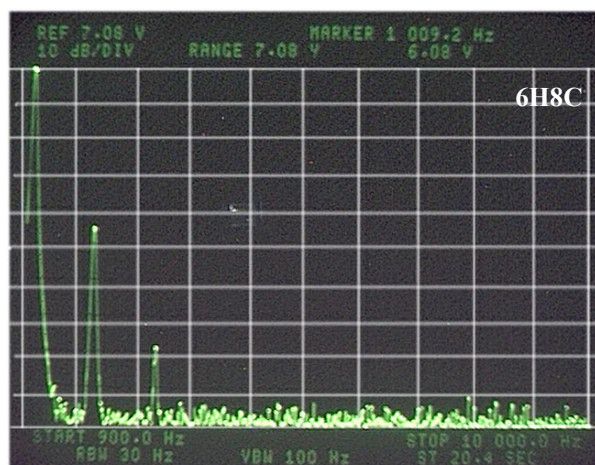


Рисунок 2

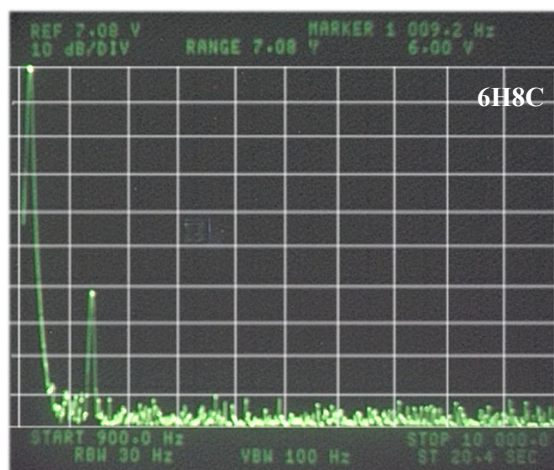


Рисунок 3

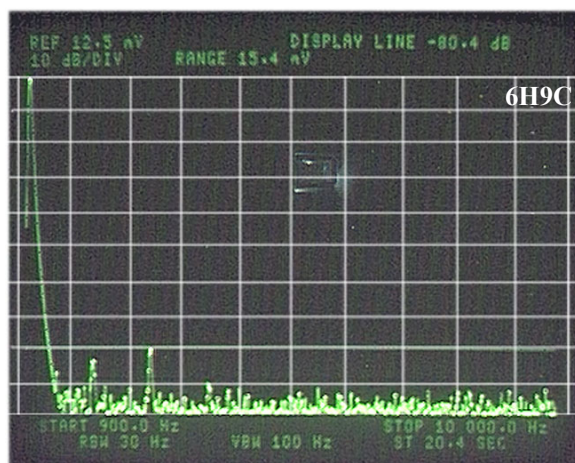


Рисунок 4

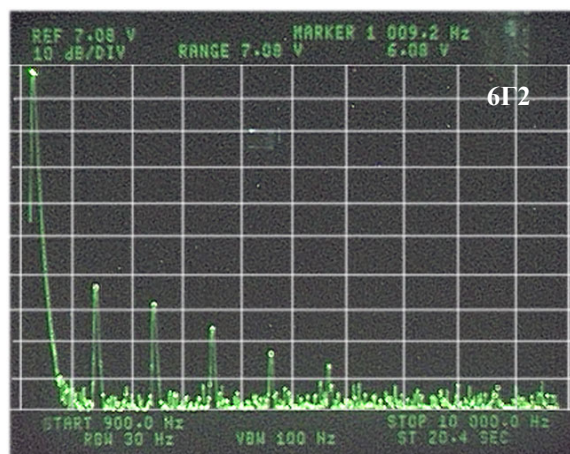


Рисунок 5

* - данные для этих ламп приведены в книге «Схемотехника гибридных ламповых усилителей низкой частоты»

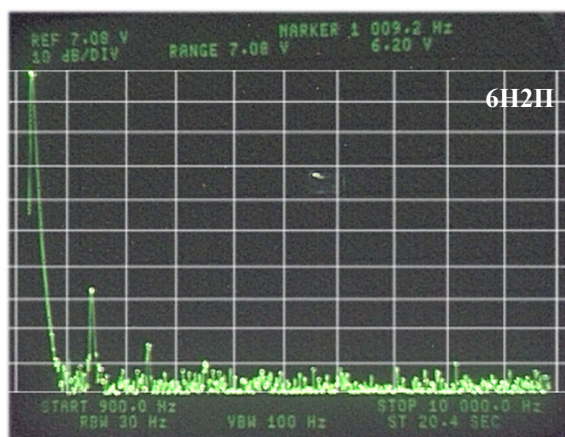


Рисунок 6

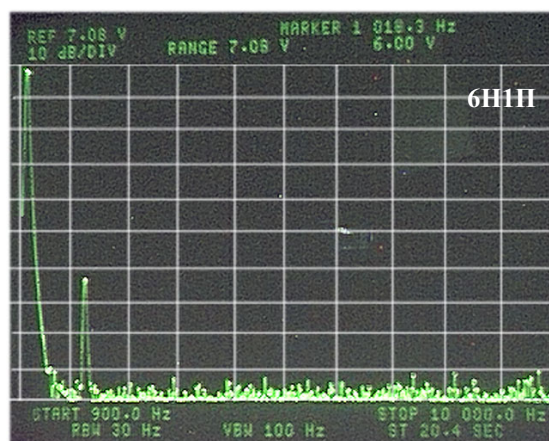


Рисунок 7

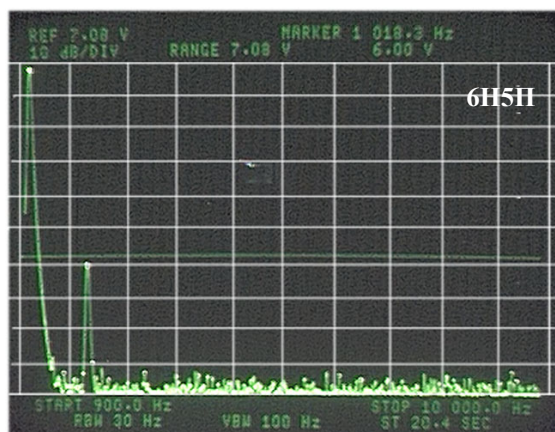


Рисунок 8

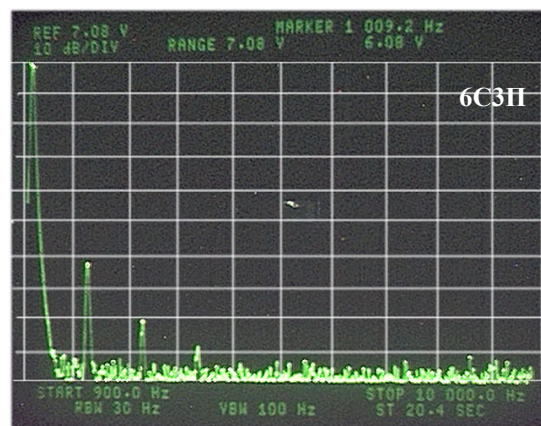


Рисунок 9

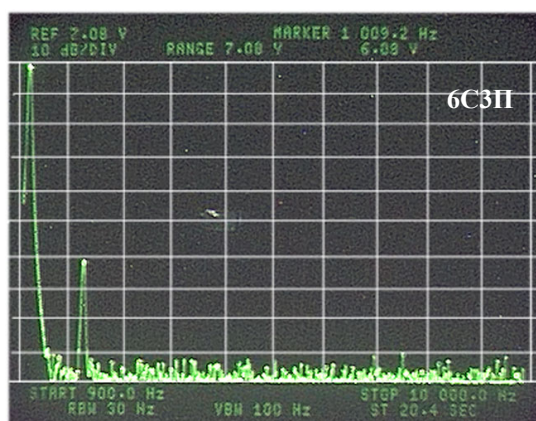


Рисунок 10

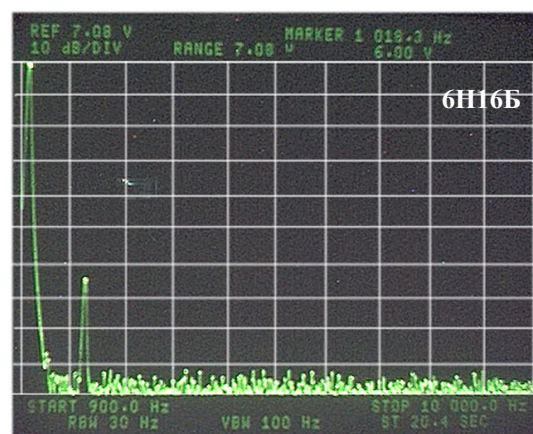


Рисунок 11

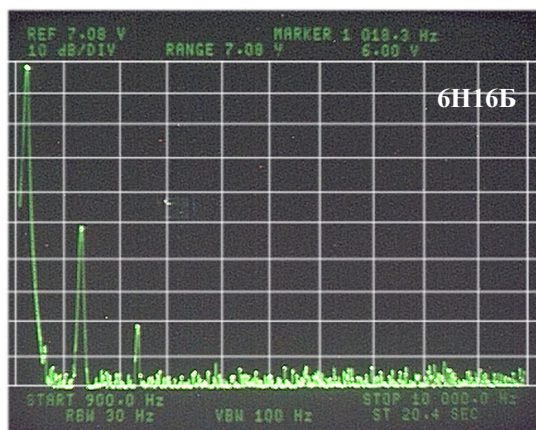


Рисунок 12

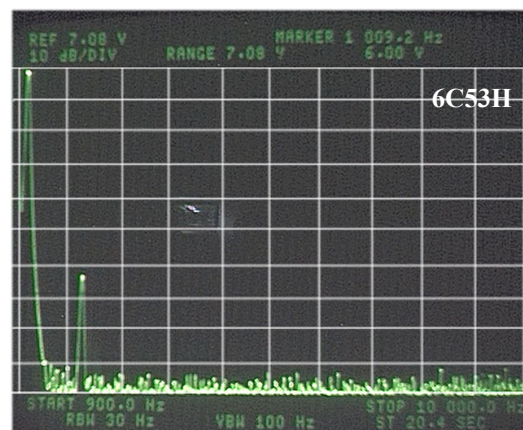


Рисунок 13

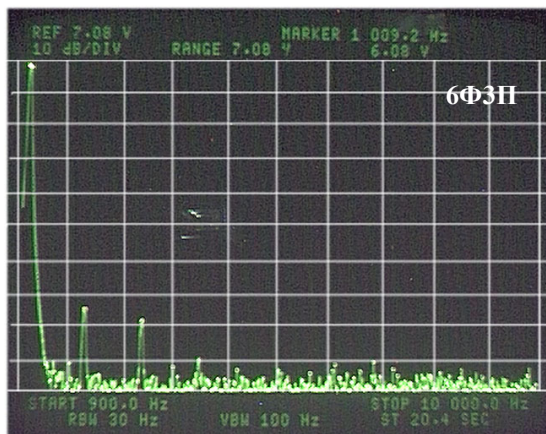


Рисунок 14

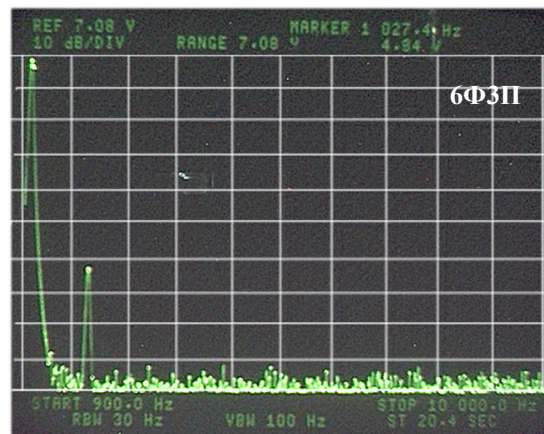


Рисунок 15

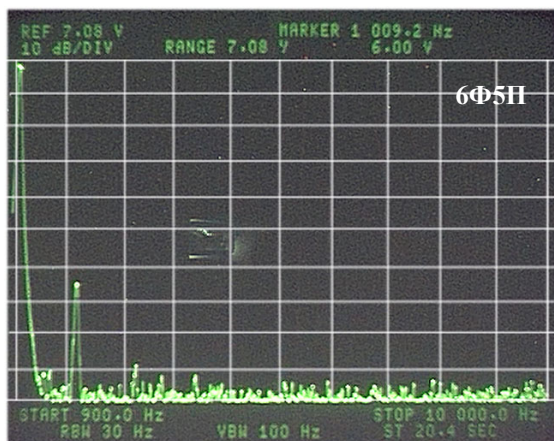


Рисунок 16

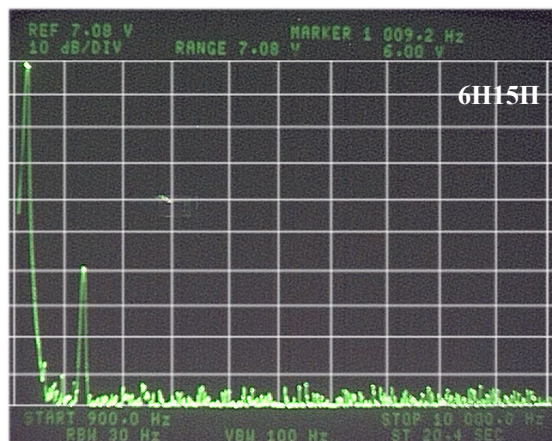


Рисунок 17

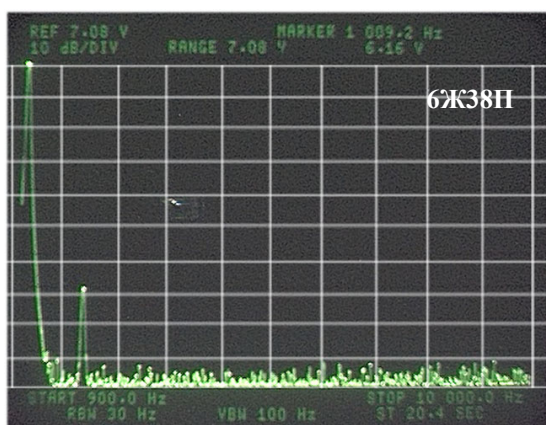


Рисунок 18

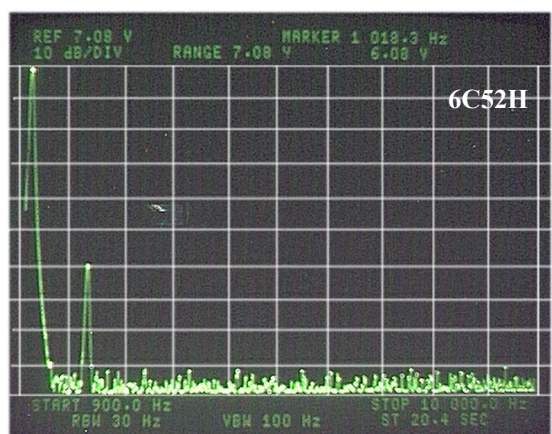


Рисунок 19

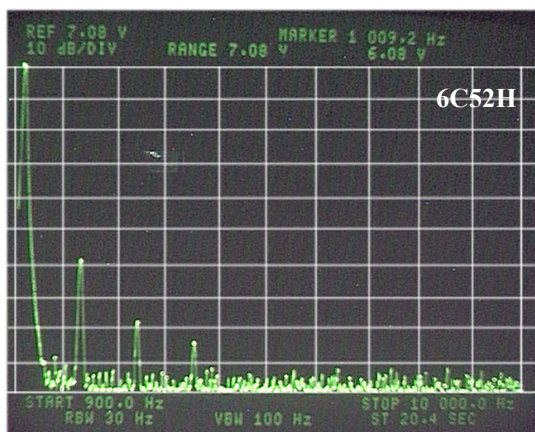


Рисунок 20

Литература

1. Е. Карпов, [Одноламповый усилитель](#), NexTube, 2003г.
2. Е. Карпов, [ТВЗ в ламповом УМЗЧ](#), Радио №4, 2003г.