

с 27,2 % (на частоте 54 Гц) до 12,8 % (на частоте 36 Гц). Нижняя граница КГИ по уровню 5 % уменьшилась со 121 Гц до 59 Гц. На частоте 60 Гц КГИ уменьшился с 22,4 % до 4,92 %, т. е. в 4,55 раза. При этом мощность, рассеиваемая в ГГ, возросла всего на 0,25 Вт, что на порядок ниже его номинальной мощности.

С изменением положения устойчивого равновесия катушки изменяется не только уровень искажений, но и характер АЧХ. На рис. 3 представлены АЧХ ГГ без подачи постоянного тока в звуковую катушку (красная кривая) и при подаче в катушку постоянного тока $-0,25$ А (зелёная кривая). В этом случае, как видно на рис. 3, АЧХ изменилась незначительно: немного снизилась частота основного резонанса и немного снизилось звуковое давление на частотах выше частоты основного резонанса.

У другой ГГ рассматриваемой стереопары искажения до коррекции оказались значительно меньше (рис. 4). И снизить уровень КГИ удалось сравнительно немного при подаче в звуковую катушку тока $-0,06$ А (рис. 5).

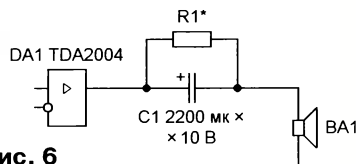


Рис. 6

В результате проведённой коррекции кривые КГИ обеих ГГ заметно сблизились, что характерно для ГГ одного типа при оптимальном расположении звуковых катушек в магнитном зазоре.

Схема установки для проведения измерений приведена на рис. 6. Постоянный ток в звуковую катушку громкоговорителя BA1 подавался посредством резистора $R1^*$, включённого параллельно разделительному конденсатору C1 на выходе усилителя, собранного на микросхеме DA1 (TDA2004). Все акустические измерения проводились в ближнем поле [5].

В рассматриваемом способе коррекции параметров электродинамических ГГ используется дополнительный источник постоянного тока, настраиваемый под конкретную ГГ, что удобнее всего реализовать в активных акустических системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алдошина И. А. Электродинамические громкоговорители. — М: Радио и связь, 1989.
2. Electrodynamic speaker driver. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrodynamic_speaker_driver (24.04.21).
3. Subwoofer. — URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Subwoofer> (24.04.21).
4. Алдошина И. Статья "Громкоговорители, часть 3.2". — URL: <http://www.moinf.info/articles/loudspeakers-3-2> (24.04.21).
5. Keele D. B., jr. Low-Frequency Loudspeaker Assessment by Nearfield Sound-Pressure Measurement. — URL: https://www.pearl-hifi.com/06_Lit_Archive/14_Books_Tech_Papers/Keele_D_B/LF_Near-field_Measurement.pdf (24.04.21).

Стереофонический УМЗЧ на лампах 6С33С

Д. ПАНКРАТЬЕВ, г. Ташкент, Узбекистан

Внимание читателей предлагается описание однотактного лампового УМЗЧ, работающего в режиме класса А, собранного на мощных триодах 6С33С. Основным назначением этих ламп является использование в качестве регулирующего элемента в электронных стабилизаторах. Однако за годы "ренессанса" ламповой техники, как и для многих других "незвуковых" ламп, накопился опыт их непрофильного применения в УМЗЧ с достижением вполне удовлетворительных результатов. Большая рассеиваемая мощность анода и малое внутреннее сопротивление делают применение ламп 6С33С в выходных каскадах достаточно привлекательным, вплоть до УМЗЧ с бестрансформаторным выходом. Условным недостатком можно считать большой ток накала, но в современных реалиях повального увлечения Hi-End общие показатели потребляемой мощности и КПД усилителя устойчиво отошли на третий план. Второе место после собственно качества звучания, пожалуй, следует отдать эстетическим показателям и эргономике. И как раз оригинальная конструкция этой лампы часто оказывается весомым аргументом в пользу её применения в УМЗЧ.

Однако эта лампа имеет и более значительный недостаток, который ограничивает выбор схемного решения и рабочей точки. Это — склонность к

лавинному саморазогреву при фиксированном, а иногда и при автоматическом смещении с большими анодными токами и сопротивлением утечки, что обусловлено большой тепловой инерционностью лампы. Для решения этой проблемы используются схемы со следящим смещением или последовательным автосмещением. Несколько наиболее распространённых схемных решений УМЗЧ на лампах 6С33С приведены в [1]. В основном это варианты схемы с автосмещением. Но шестая схема в этой статье — интересный вариант схемы Ульянова [2] с повышающим межкаскадным трансформатором и выходным трансформатором в цепи катода, а последняя схема — со следящим смещением, которое фактически реализует местную ООС по постоянному напряжению с помощью транзисторного дифференциального каскада. Последовательное автосмещение [3] отличается от обычного способом включения резистора смещения по отношению к фильтрующему конденсатору блока питания (БП). Существенный недостаток такого решения — требование наличия отдельных анодных обмоток и выпрямителей для каждого канала.

Особенностью лампы 6С33С также является монокотное уплотнение анодно-сеточных ВАХ при увеличении напряжения анода. Вследствие этого наблюдается выраженная асимметрия полу-

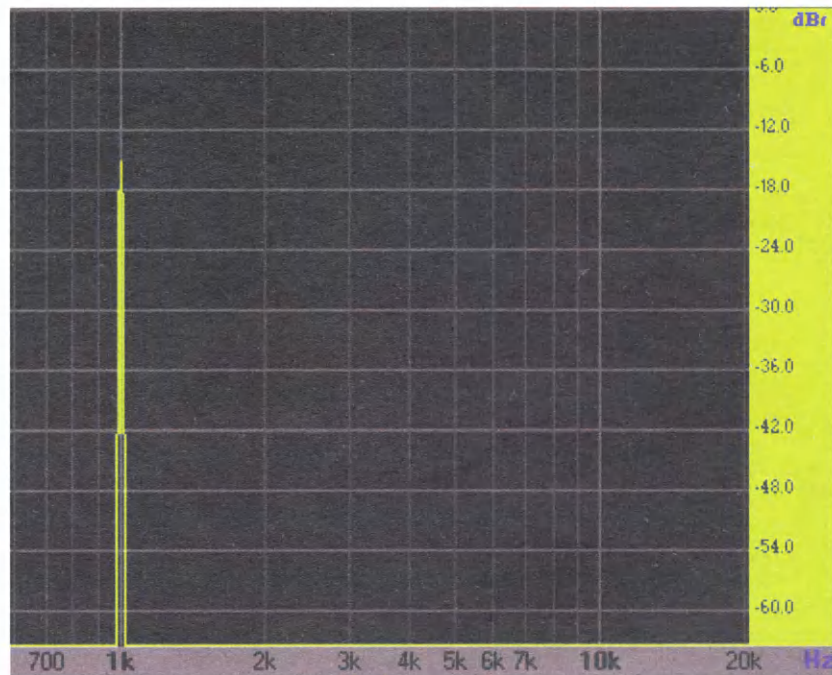


Рис. 1

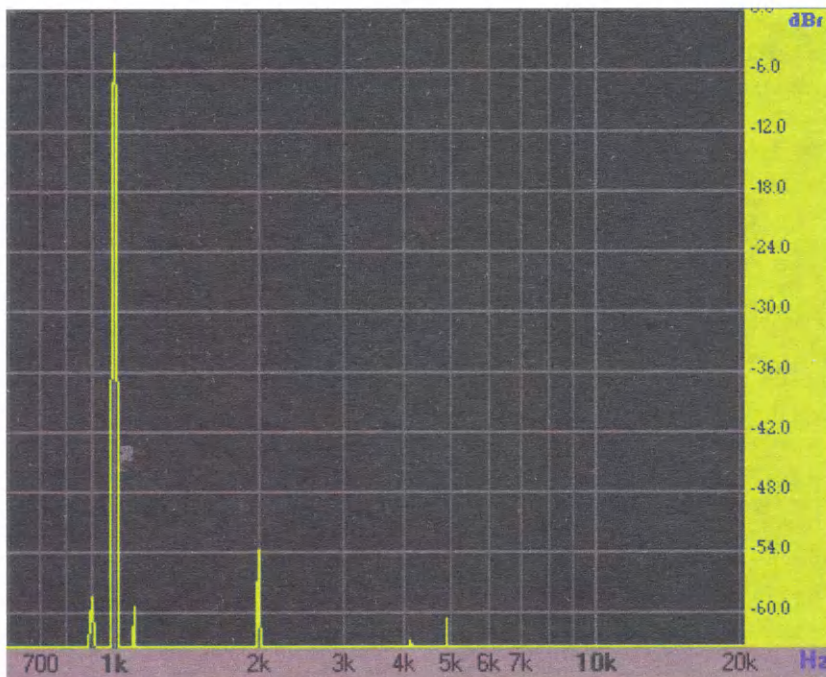


Рис. 2

волн выходного напряжения при большой мощности рассеивания и практически любых значениях сопротивления нагрузки. Это довольно характерно для многих "незвуковых" ламп. Поэтому на этапе проектирования следует определиться, чего мы хотим добиться от лампы: максимальной мощности или минимальных нелинейных искажений. От этого зависит выбор рабочей точки. Для решения второй задачи следует использовать правый участок семейства ВАХ с высокими значениями напряжений анод-катод и смещения. В этом УМЗЧ выбран именно такой режим.

Распространённым явлением среди многих аудиофилов, даже радиолюбителей со стажем, является стремление "выжать" из лампы максимально возможную мощность, в том числе с переходом в экстремальные области, где действительно может наблюдаться некоторое повышение линейности ВАХ. При этом часто приводится аргумент, который на самом деле аргументом не является, — зачем тогда использовать такую лампу? Не стоит забывать о том, что лампа используется не по прямому назначению, и даже в рекомендованных режимах выходная мощность остаётся

вполне достойной. Кроме того, следует учитывать, что лампы в современных реалиях вообще являются достаточно дорогим "удовольствием" и обладают ограниченным ресурсом даже без проведения экспериментов над ними.

В этом УМЗЧ для жёсткой стабилизации тока анода и формирования напряжения смещения используется генератор тока в катодной цепи. При этом также обеспечивается простота изменения положения рабочей точки аналогично схеме с фиксированным смещением. В целом, особенностями предлагаемого УМЗЧ являются:

- однотактный выходной каскад в режиме класса А (SE);
- простота и доступность для повторения;
- короткий звуковой тракт (всего два каскада усиления — драйвер и оконечный каскад);
- бестрансформаторное питание от сети переменного тока 230 В;
- ограничение потребляемого тока в момент подачи напряжения питания;
- плавное увеличение анодного напряжения при включении УМЗЧ;
- применение типовых трансформаторов ТН-46 в качестве звуковых для номинального сопротивления нагрузки 4 Ом;

- отсутствие местных и общей ООС по напряжению;
- использование генератора тока в цепи катода лампы выходного каскада;
- использование динамической нагрузки в драйвере;
- "горячая" механическая коммутация для оперативного выбора типа лампы драйвера.

Рассмотрим эти особенности более подробно. В целом, автор последовательно придерживается концепции популяризации ламповой звукотехники, отхода от принципа её "элитной" принадлежности и ряда шаблонов, неустанно генерируемых псевдо-аудиофилами. Эти шаблоны способствуют созданию ореола недостижимости, полумистической завесы, что отталкивает даже подготовленных радиолюбителей. В нашем конкретном случае выбор режима работы лампы в правой, более линейной области ВАХ предоставляет возможность отказаться от трансформатора анодного питания, позволяет улучшить массогабаритные показатели устройства и уменьшить материальные и временные затраты на его изготовление. Применение типовых трансформаторов в качестве выходных, конечно, отрицательно сказывается на полосе воспроизводимых частот. Однако правильный подбор их типа позволяет минимизировать потери, а повсеместное распространение цифровых источников звука с интегрированными эквалайзерами — полностью компенсировать их. Вообще, именно вопрос с поиском, приобретением и, особенно, изготовлением трансформаторов обычно является решающим не в пользу ламповых УМЗЧ.

При бестрансформаторном питании существует необходимость в ограничении тока зарядки конденсаторов выпрямителя. Для этого служит мощный резистор, последовательно включённый в

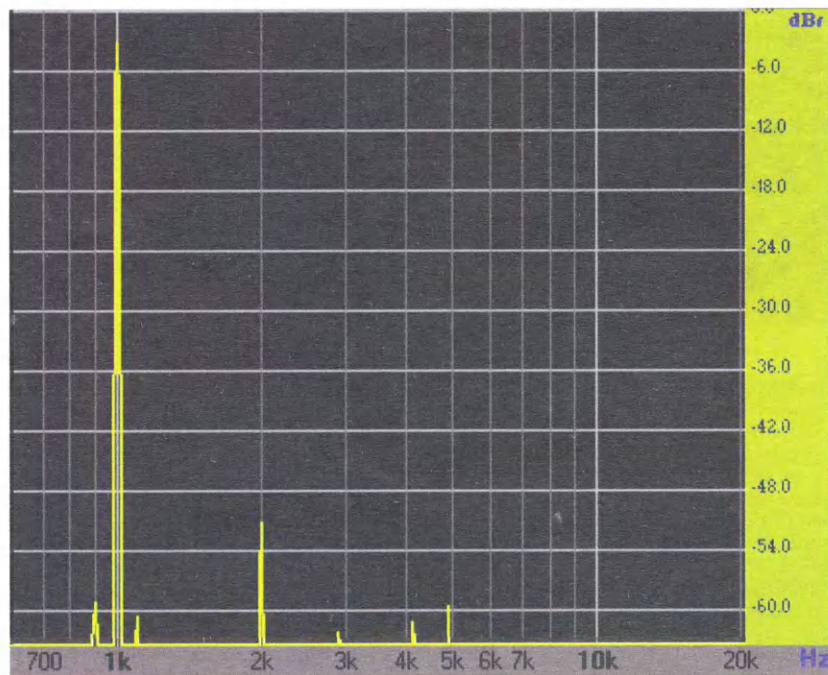


Рис. 3

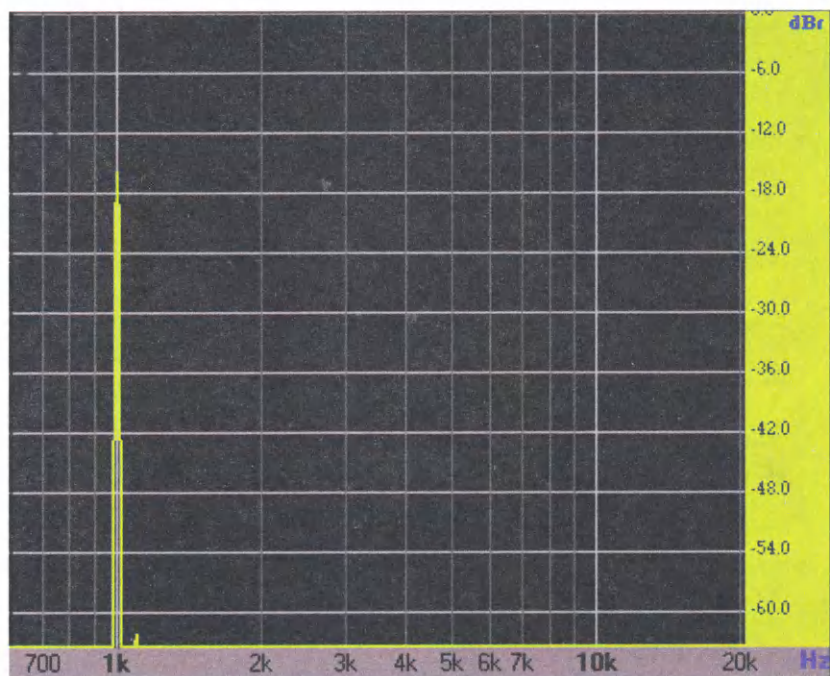


Рис. 4

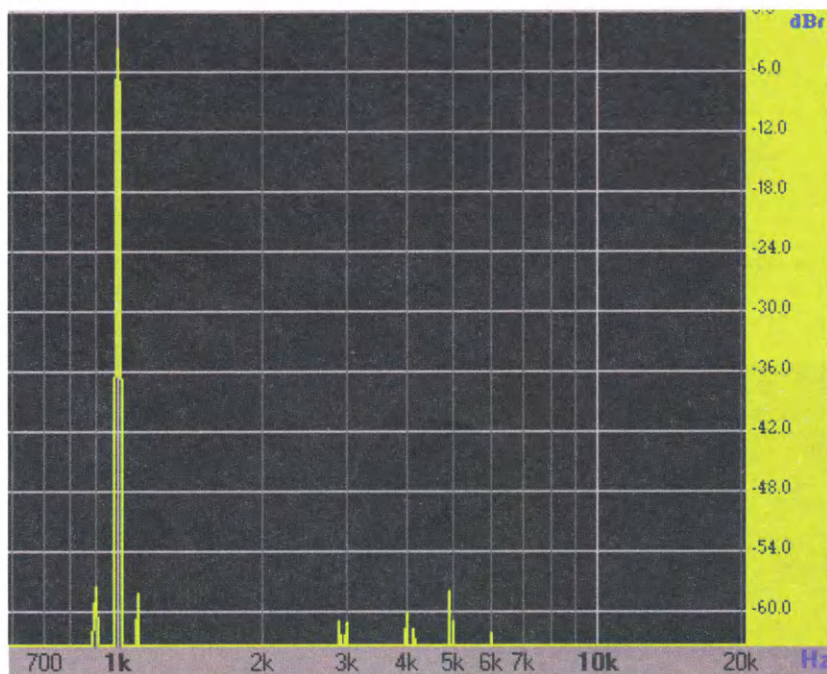


Рис. 5

цепь питания и коммутируемый контактами реле устройства контроля напряжения. Благодаря этому также происходит плавное нарастание анодного напряжения.

Включение динамической нагрузки в анодную цепь драйвера обеспечивает максимальные коэффициент усиления, линейность характеристик и эффективное согласование с выходным каскадом, благодаря чему расширяется выбор типа лампы для драйвера, вплоть до знаменитой 6П9С.

Опция "горячей" коммутации для выбора лампы драйвера будет полезна

для слушателей, считающих, что различные типы ламп "звучат" в соответствующих только им музыкальных стилях. Автор использует эту опцию для переключения с тетродов 6Э5П, обеспечивающих объективно наилучшие показатели в триодном режиме, на сдвоенный триод 6Н2П, 6Н3П, 6Н23П или подобный с банальной целью экономии ресурса менее доступного тетрода. Подробно вопрос выбора ламп для каскада предусиления (драйвера) будет рассмотрен далее.

Многие разработчики ламповых усилителей, даже действительно высокока-

чественных, почему-то упорно избегают указания объективных электрических параметров своих "детищ", а зачастую и не считают их необходимыми, заменяя их на субъективные, такие как прозрачность, глубина, детализация и т. д. Впечатляет также сравнительно новый и, видимо, весомый аргумент — стена звука. Можно упомянуть также рассыпчатые ВЧ, пухлые НЧ, выпуклые СЧ и даже два вида теплоты. Конечно, на заре времён, практически одновременно с возникновением аудиотехники возникла и аксиома, что хорошие электрические параметры ещё не являются гарантией хорошего звучания усилителя. С этим никто не спорит, но "аудиофилы" делают из этого неожиданный вывод — измерение объективных показателей вовсе необязательно. Между тем, учитывая тот факт (кстати, любимый "аудиофилами"), что ламповый усилитель является больше инструментом, звеном дополнительной обработки или "шлифовки" звука, указание его основных объективных параметров позволяет провести сравнительный анализ и на его основании сделать вывод о целесообразности повторения или доработки определённой конструкции, а также предвзвешенно оценить возможность использования с имеющимися в распоряжении радиолюбителя других звеньев звукового тракта — источников звука, корректоров и, конечно, акустических систем (АС).

Основные электрические характеристики УМЗЧ

Номинальная выходная мощность на частоте 1 кГц, Вт	5
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	4
Коэффициент нелинейных искажений (КНИ) при номинальной выходной мощности на частоте 1 кГц, %, не более	8
Полоса воспроизводимых звуковых частот при номинальной выходной мощности по уровню:	
-6 дБ	40 Гц...8 кГц
-12 дБ	24 Гц...16 кГц
Выходное сопротивление, Ом	0,8
Входное сопротивление, кОм	100
Номинальное входное напряжение, В	1
Уровень шума (фона) в рабочем диапазоне частот (невзвешенный), дБ, не более	-63

Выходная мощность и КНИ являются типичными для 6С3ЗС в выбранном режиме. Реальную выходную мощность УМЗЧ класса А (как лампового в схеме с ОК, так и транзисторного с ОЭ) при удовлетворительном КНИ и отсутствии ООС в первом приближении можно оценить на уровне 15...25 % от рассеиваемой мощности в режиме покоя в зависимости от сопротивления нагрузки (известно, что теоретический максимальный КПД — 50 %). В этом УМЗЧ значение этой мощности составляет

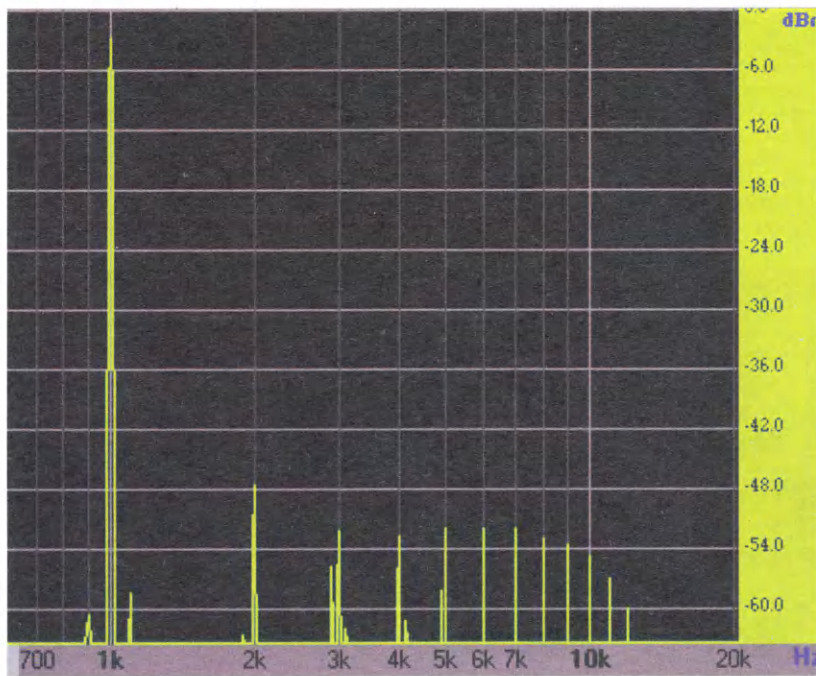


Рис. 6

около 30 Вт при максимально допустимой мощности на аноде 60 Вт. Заявляемые значения выходной мощности, значительно отличающиеся от оценочной, при заданных условиях и, тем более, превышающих теоретическую, могут свидетельствовать о выходе за пределы рекомендованных режимов, некорректных проведении измерений или трактовке их результатов. Исключение составляет усилитель по схеме Ульянова из-за включения нагрузки в цепь катода и, следовательно, наличия местной ООС.

Некоторое сужение полосы воспроизводимых частот обусловлено применением типовых трансформаторов ТН-46 в качестве выходных звуковых, и

также является типичным. Как было отмечено, это может быть просто скомпенсировано с помощью внешнего эквалайзера. Автор не является сторонником введения общей ООС без необходимости.

Рассмотрим теперь вопрос выбора ламп для драйверного каскада. Критерии оценки их пригодности следующие:

- триод или триодное включение тетрода/пентода с динамической нагрузкой в цепи анода;
- минимальный КНИ при выходном напряжении не менее 35 В (размах ± 50 В) и напряжении питания +270 В;
- коэффициент усиления — не менее 35.

Первый критерий можно считать

спорным или личным предпочтением автора, но он не противоречит, а скорее, соответствует принципам построения УМЗЧ категории Hi-End. Указанный размах выходного напряжения обеспечивает требуемую номинальную мощность на выходе УМЗЧ. Величина напряжения питания каскада обусловлена бестрансформаторным питанием усилителя и падением напряжения на элементах гальванической развязки по питанию.

На соответствие перечисленным критериям были проверены лампы нескольких типов. Измерения проводились на ПК с использованием программного обеспечения Visual Analyser [4]. Список ламп в порядке убывания степени пригодности: тетрод 6Э5П, триод 6Н9С (6Н2П), пентод 6Ж9П, триоды 6Н23П и 6Н3П. Измерения проводились с автосмещением в режиме, соответствующем минимальному значению КНИ для каждой конкретной лампы. Тетрод 6Э5П в триодном включении оказывается вне конкуренции, демонстрирует великолепные параметры и большую перегрузочную способность. За ним ожидаемо следует 6Н9С с высоким коэффициентом усиления.

Лампа **6Э5П** — при $U_a = 150$ В, $I_a = 10$ мА, $R = 300$ Ом, $U_c = -3$ В — $K_u = 40$ (здесь и далее U_a — напряжение на аноде; I_a — ток анода, R_k — сопротивление в цепи катода; U_c — напряжение на сетке относительно катода; K_u — коэффициент усиления по напряжению). Получился КНИ = 0,2 % при $U_{\text{вых}} = 10$ В (рис. 1); КНИ = 0,35 % при $U_{\text{вых}} = 35$ В (рис. 2); КНИ = 0,4 % при $U_{\text{вых}} = 40$ В (рис. 3). Причём третья и пятая гармоники появляются в спектре при $U_{\text{вых}} = 30$ В и КНИ = 0,3 %.

Лампа **6Н9С (6Н2П)** — при $U_a = 160$ В, $I_a = 1,5$ мА, $R_k = 680$ Ом, $U_c = -1$ В. КНИ = 0,2 % при $U_{\text{вых}} = 10$ В (рис. 4); КНИ = 0,33 % при $U_{\text{вых}} = 35$ В (рис. 5); КНИ = 1 % при $U_{\text{вых}} = 40$ В с ограничением (рис. 6); $K_u = 100$.

(Продолжение следует)

Многофункциональный измеритель RLC

А. ДЫМОВ, г.Оренбург

Этот прибор предназначен для измерения основных параметров линейных компонентов, к которым относятся резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, дроссели и другие намоточные изделия. Результат измерения отображается на двухстрочном LCD-дисплее. Измеряемые компоненты могут быть как выводные, так и для поверхностного монтажа (SMD). Кроме основных параметров, сопротивлений, ёмкостей и индуктивностей, измеритель позволяет определять несколько дополнительных параметров, такие как потери в конденсаторах, добротность катушек и

некоторые другие. Общий вид измерителя показан на рис. 1.

Прибор имеет широкий диапазон измерений для всех типов линейных компонентов. Диапазон измерения сопротивлений — от единиц ом до 15 МОм, ёмкостей — от единиц пикофарад до 15 мФ и индуктивностей — от единиц микрогенри до 99 Гн, при условии, что активное сопротивление измеряемой катушки индуктивности не превышает 1500 Ом. Чтобы охватить весь диапазон ёмкостей конденсаторов, используются два режима измерения, до 1 мкФ и более 1 мкФ.

Принцип измерения параметров элементов основан на использовании генераторов и измерении периода генерируемых сигналов, который изменяется в зависимости от параметров измеряемого элемента. Однако сильным дестабилизирующим фактором является температура, кроме того, оказывают влияние некоторые параметры элементов самих генераторов. Поэтому приходится использовать ряд программных ухищрений для снижения воздействия этих факторов на процесс измерения. Для получения минимальной погрешности измерения используется некоторое число пунктов меню для калибровки образцовых элементов.

В качестве управляющего устройства процессом измерения используется готовая плата модуля Arduino Mega 2560 (рис. 2). Выбор модуля обусловлен удобством применения готового узла управления, который легко адаптируется с платой измерителя с помощью разъемов. Использование этого модуля

Стереофонический УМЗЧ на лампах 6С3ЗС

Д. ПАНКРАТЬЕВ, г. Ташкент, Узбекистан

Лампа **6Ж9П** — при $U_a = 160$ В, $I_a = 6$ мА, $R_k = 330$ Ом, $U_c = -1,9$ В. КНИ = 0,26 % при $U_{\text{вых}} = 10$ В (рис. 7); КНИ = 0,85 % при $U_{\text{вых}} = 35$ В с появлением третьей и пятой гармоник (рис. 8); КНИ = 1,5 % при $U_{\text{вых}} = 40$ В с ограничением (рис. 9); $K_u = 45...50$. У пентодов этой серии антидинаatronная сетка имеет отдельный вывод и в триодном включении может быть подключена как к катоду, так и к аноду. Наилучший результат по совокупности параметров достигается при классическом подключении этой сетки к катоду.

Лампа **6Н23П** при $U_a = 145$ В, $I_a = 6$ мА, $R_k = 510$ Ом, $U_c = -3,25$ В имеет несколько повышенный КНИ, однако практически полностью определяемый второй гармоникой. КНИ = 0,32 % при $U_{\text{вых}} = 10$ В (рис. 10). КНИ = 0,9 % при $U_{\text{вых}} = 35$ В (рис. 11). Третья и пятая гармоники появляются в спектре при $U_{\text{вых}} = 40$ В, КНИ = 1,3 % (рис. 12), и лампа всё ещё не переходит в режим ограничения; $K_u = 40$.

Про **6НЗП** следует сказать особо. Изначально это — двойной триод для усиления и генерации ВЧ. В модификациях 6НЗП-ЕВ, 6НЗП-ДР эта лампа имела военное применение. В массовом производстве использовалась в основном в УКВ-модулях радиоприёмников. Долгое время эта лампа не находила устойчивого применения в звуко-технике. На взгляд автора, причина этого, во-первых, в том, что справочные ВАХ 6НЗП [5], получившие наиболее широкое распространение, не вполне соответствуют реальным. Точные данные приведены на четверть века раньше в [6]. Хотя возможен разброс и по годам выпуска. Различия оказываются существенными при работе в УНЧ с размахом входного сигнала более 1 В. По ВАХ [6] видно, что оптимальный "звуковой" режим, с точки зрения минимального КНИ, может быть достигнут при сравнительно большом смещении и высоком анодном напряжении. Но в этом случае сильно уменьшается крутизна. Во-вторых, коэффициент усиления 6НЗП сильно зависит от напряжения на управляющей сетке, что, в общем, нехарактерно для триодов. Применение динамической нагрузки позволяет свести к минимуму проявления указанных недостатков.

Для лампы **6НЗП** был проведён отдельный цикл измерений. Наилучшие показатели достигнуты при $U_a = 175$ В, $I_a = 3$ мА, $R_k = 1,3$ кОм, $U_c = -4$ В, $K_u = 35$; КНИ = 0,38 % при $U_{\text{вых}} = 10$ В (рис. 13), КНИ = 1,13 % при $U_{\text{вых}} = 35$ В (рис. 14). При этом же напряжении в спектре появляются третья и пятая гармоники. Таким образом, **6НЗП** в правильно

выбранном режиме оказывается сравнима с 6Н23П, давно занявшей свою нишу в звукотехнике. Кроме того, 6НЗП имеет уникальное в своём классе сим-

метричное расположение выводов, что оказывается очень удобным при монтаже. В качестве основной лампы драйвера в УМЗЧ выбрана именно эта. Отчасти это обусловлено тем, что с детских лет горячим желанием автора было увидеть и "услышать" её в звуковом тракте. Второй лампой выбран тетрод 6Э5П.

Коэффициент усиления распространённых пентодов 6П14П, 6П15П, 6П18П и EL84 в триодном включении обычно не превышает 20, поэтому для них измерения было решено не проводить. Лампа 6Ж52П, являясь, по сути, улучшенным аналогом пентодов из этой линейки,

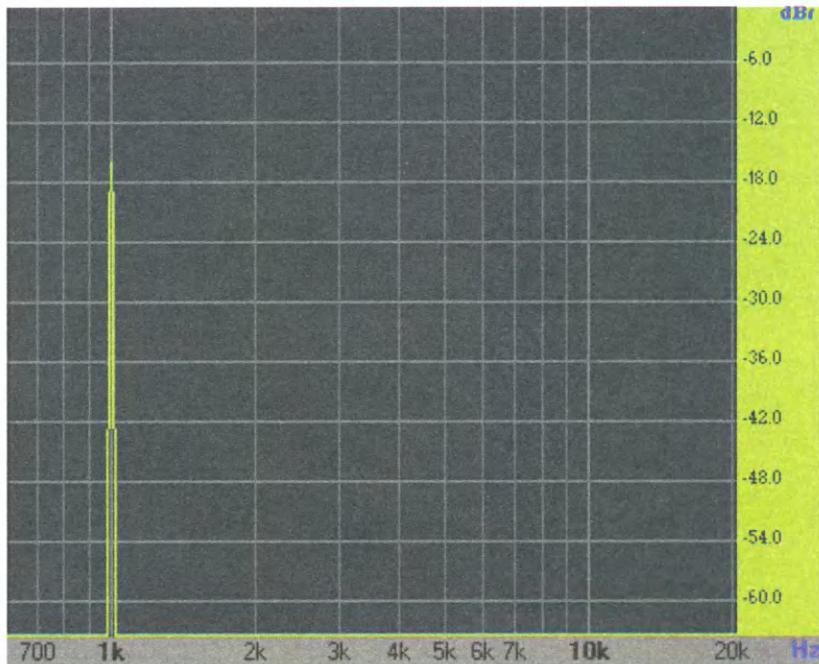


Рис. 7

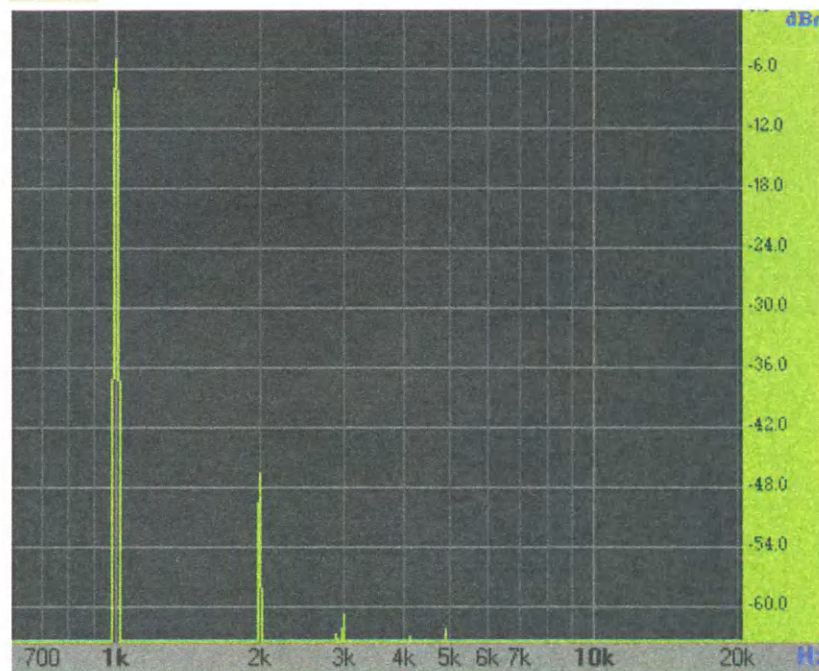


Рис. 8

Окончание.

Начало см. в "Радио", 2021, № 6

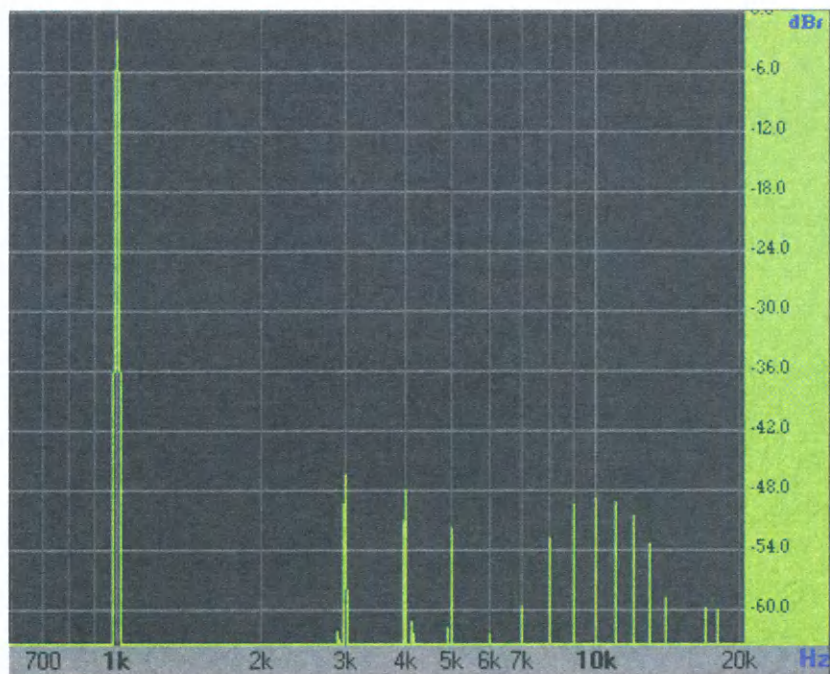


Рис. 9

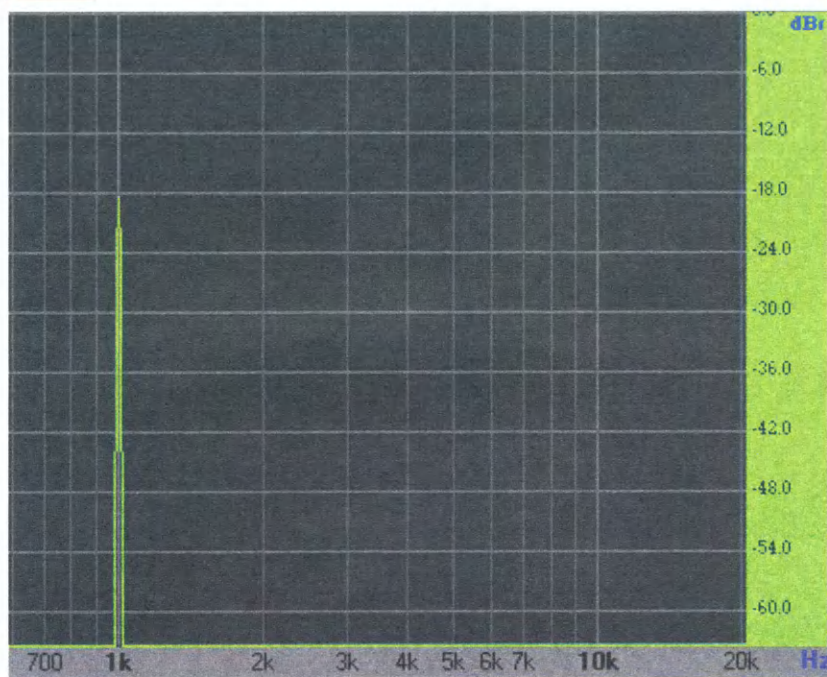


Рис. 10

при $U_a = 150$ В, $I_a = 7$ мА, $R_k = 300$ Ом, $U_c = -2$ В имеет коэффициент усиления 50...60 и КНИ менее 0,5 % при выходном напряжении 10 В, но уходит в ограничение при 35 В с КНИ = 3,5 %, поэтому в результирующем списке эта лампа отсутствует. Следует отметить, что, в целом, тетроды и пентоды в триодном включении весьма перспективны для использования в драйверных каскадах в силу высокой линейности ВАХ.

Рассмотрим принципиальную схему УМЗЧ (рис. 15). Поскольку оба канала выполнены по одинаковой схеме, она приводится только для левого канала с

общими для обоих каналов блоками и элементами. Как было отмечено ранее, драйвер выполнен на переключаемых лампах 6НЗП-ЕВ (VL1.1) или 6Э5П (VL2) и по схеме с автосмещением и динамической нагрузкой. Динамическая нагрузка реализована на транзисторе VT1 и сопутствующих элементах. При прочих равных условиях сравнительно большие значения сопротивления и ёмкости в цепи базы транзистора VT1 способствуют плавному возрастанию анодного напряжения (в течение нескольких секунд). Коммутация анодной цепи ламп драйвера осуществляется с помо-

щью переключателя SA2.1. Выключатель SA3 предназначен для изменения анодного напряжения при переключении ламп. Входной сигнал поступает одновременно на управляющие сетки обеих ламп через разделительные конденсаторы C2, C3 без дополнительных цепей коммутации. Регулировка громкости и тембра не предусмотрена, эти функции полностью возложены на источник сигнала. Резисторы R6 и R7 в цепях обеих сеток тетрода VL2 — "антизвонные", они предотвращают возможное мягкое возбуждение каскада на ВЧ. Сигнал с эмиттера транзистора VT1 через разделительный конденсатор C7 и резистор R12 поступает на сетку лампы окончательного каскада VL3.

В катодную цепь выходной лампы VL3 включён генератор тока на транзисторе VT3, определяющий режим работы выходной лампы по постоянному току. Ток покоя каскада определяется сопротивлением резистором R16 в цепи эмиттера этого транзистора. При указанном на схеме номинале он составляет около 150 мА. Соответствующее току напряжение смещения на сетке триода устанавливается автоматически, его значение зависит от ВАХ конкретного экземпляра лампы и находится в пределах -75...85 В. Генератор тока управляется напряжением, поступающим на базу транзистора VT3 с параметрического стабилизатора на стабилитроне VD14, общего для обоих каналов. Следует отметить, что при таком техническом решении обрыв в цепи нагрузки (коллектора) одного канала приведёт к падению напряжения на катоде VD14 до значения менее 1 В из-за прямого смещения перехода база—эмиттер и отсутствия тока коллектора и, соответственно, к закрыванию лампы другого канала с возрастанием её напряжения на сетке до -140...160 В.

По переменному току транзистор VT3 зашунтирован конденсаторами C8 и C9, поэтому влияния на усилительные свойства лампы в диапазоне звуковых частот он не оказывает.

Выходной трансформатор T1 включён в анодную цепь лампы VL3. Коэффициент трансформации T1 — около 12, приведённое сопротивление анодной нагрузки — около 550 Ом. Нагрузкой УМЗЧ является АС с номинальным сопротивлением 4 Ом, которую подключают к разъёму XS2.

Питание анодных цепей усилителя осуществляется через общий для обоих каналов бестрансформаторный блок питания (БП). Он содержит мостовой двухполупериодный выпрямитель на диодах VD2—VD5 и П-образный фильтр питания на конденсаторах C11—C13 и трансформаторе T2, который выполняет функцию дросселя. Здесь использованы последовательно включённые вторичные обмотки трансформатора. Большая ёмкость конденсаторов фильтра и отсутствие трансформатора питания накладывают требование ограничения зарядного тока при включении в сеть. Для этого предназначен резистор R17. На элементах VT4, VD15, K1 и сопутствующих элементах собрано устройство контроля напряжения питания (УКН). В момент включения конденсато-

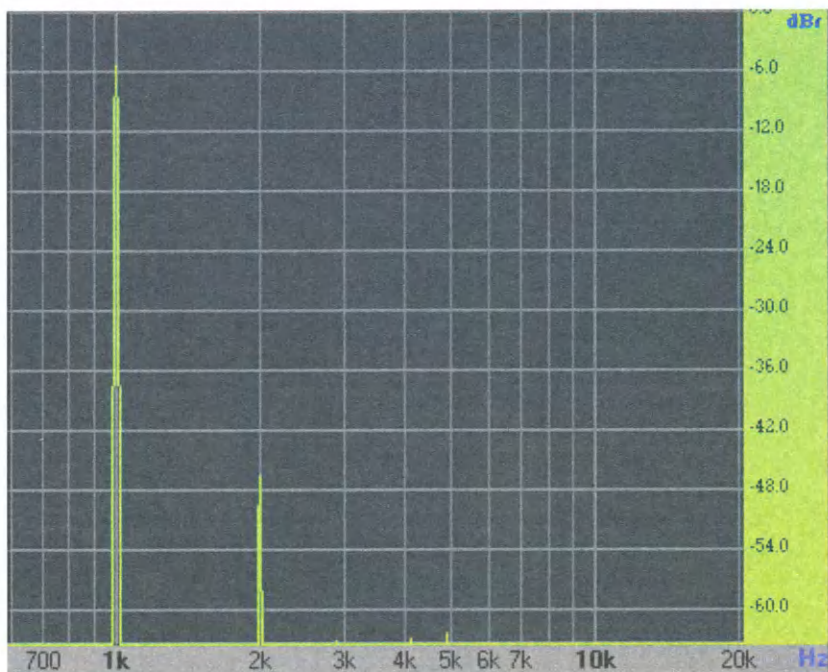


Рис. 11

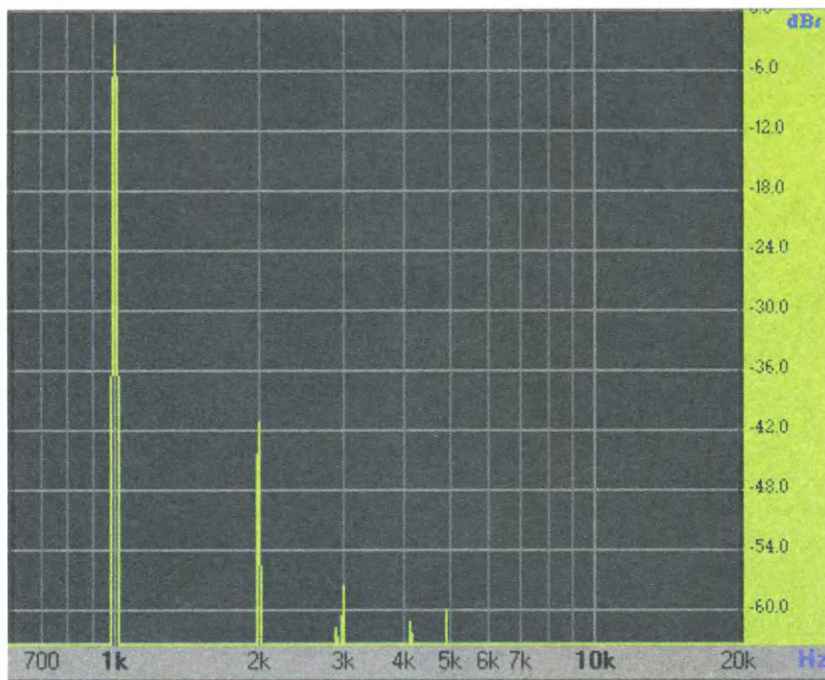


Рис. 12

ры C11—C13 начинают заряжаться через резистор R17. Транзистор VT4 закрыт, контакты K1.1 реле разомкнуты. По мере возрастания напряжения на конденсаторах C11—C13 напряжение в точке соединения резисторов R19, R20 и базы транзистора VT4 увеличивается, и при достижении порогового значения транзистора VT4 открывается, реле срабатывает и контактами K1.1 замыкает резистор R17. Пороговое напряжение определяется суммой напряжений стабилизации стабилитрона VD15 и прямого падения напряжения на эмиттерном переходе транзистора VT4, а

также соотношения сопротивлений резисторов R19 и R20. При указанных на схеме номиналах элементов оно равно около 160 В. Время зарядки конденсаторов C11—C13 до этого напряжения — 4...5 с. При этом обеспечивается плавное возрастание анодного напряжения выходных ламп.

Питание драйверов обоих каналов осуществляется через усовершенствованный "электронный дроссель" на транзисторе VT2. Особенности его реализации приведены в [7]. Его использование обеспечивает низкий уровень фона входных каскадов и позволяет

установить точное значение напряжения питания. Выходное напряжение регулируется с помощью резистивного делителя R14R15. Уменьшенное сопротивление R13 в цепи затвора способствует устранению характерных игольчатых выбросов в начале полупериодов. Резистор R11 обеспечивает поддержание режима в отсутствие нагрузки.

Напряжение накала всех ламп усилителя поступает с вторичных обмоток трансформатора T3. Оно равно 12,6 В для лампы VL3 (выв. 7—10 трансформатора T3) и 6,3 В для ламп VL1, VL2 (выв. 14—16 трансформатора T3). Вторая группа обмоток также используется для питания УНЧ и базовых цепей генераторов тока. Переменное напряжение 12,6 В с выв. 11—16 поступает на мостовые выпрямители на диодах VD6—VD9 и VD10—VD13. От первого получает питание параметрический стабилизатор VD14R18C15, а ко второму подключено УНЧ.

Уровень фона с применёнными схемотехническими решениями и типами ламп находится на уровне шумов, поэтому нет необходимости в принятии дополнительных мер по его уменьшению (например, не используется "подпорка" цепей накала постоянным напряжением). Самовосстанавливающиеся предохранители F1, F2 (PPTC) разрывают цепь питания при аварийном повышении потребляемого тока.

Рассмотрим несколько подробнее вопрос фильтрации пульсаций напряжения питания. Следует помнить, что при использовании трансформатора в качестве дросселя на первичной обмотке присутствует напряжение в десятки вольт в зависимости от схемы включения обмоток и величины пульсаций. Поэтому все выводы трансформатора необходимо изолировать. Недостатком можно считать также некоторое увеличение габаритов. Однако трансформаторы серии ТПП или ТН, например, имеют несколько вторичных обмоток с достаточной индуктивностью и большим током нагрузки, а также компенсационные вторичные обмотки (ТПП) или компенсационные отводы (ТН). Комбинируя способы их включения, можно добиться оптимального результата для конкретной схемы. Например, при конструировании этого УМЗЧ было проведено изучение особенностей и возможности практического применения компенсационной схемы включения фильтра питания [8]. На рис. 16 показана схема такого фильтра. В теории ЭДС, наводимая основной обмоткой L1 в компенсационной обмотке L2, может быть сделана равной по величине и противоположной по фазе переменному напряжению на конденсаторе C1. При этом переменная составляющая на конденсаторе C2 будет отсутствовать. Так как комплексные сопротивления реактивных элементов фильтра зависят от частоты, компенсация возможна только при одном её значении. Для основной гармоники оптимальный коэффициент трансформации $K_{tr} = 1/(w^2 L1 C1)$.

На практике оказывают влияние ток намагничивания и ёмкость конденсатора C2. Практических рекомендаций по выбору его ёмкости нет, и часто его

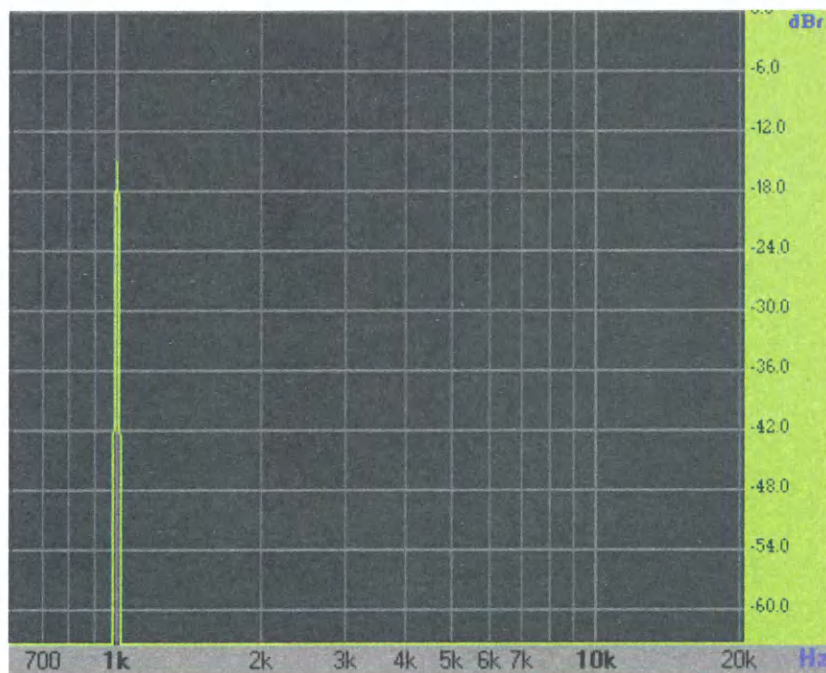


Рис. 13

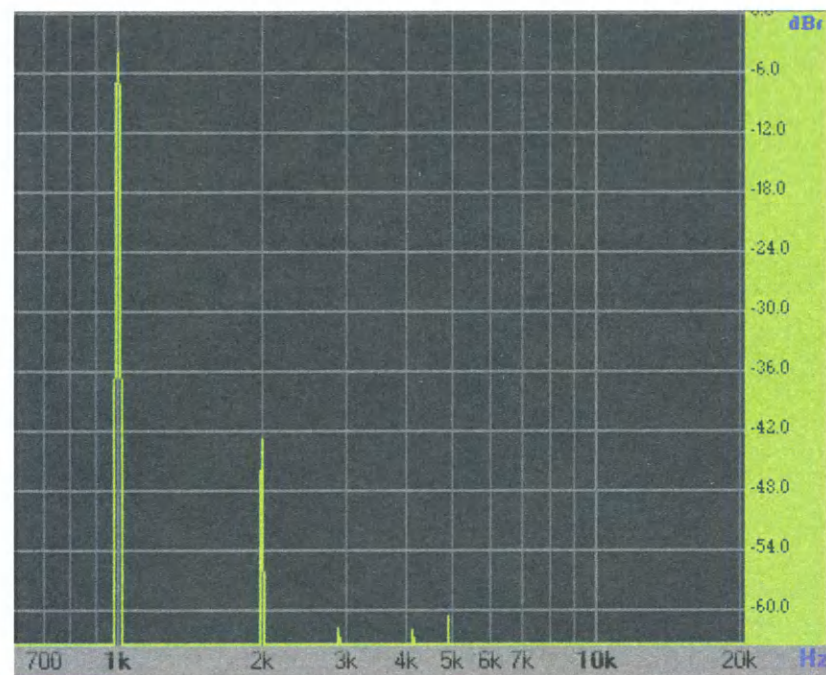


Рис. 14

вообще не устанавливают. Реальный выигрыш в подавлении фона может составлять от 3 дБ и более на основной частоте по сравнению с обычным включением дросселя с индуктивностью L1. Поскольку измерения уровня фона ранее проводились преимущественно с помощью селективных вольтметров, трактовка результатов была однозначной. В реальности зачастую наблюдается рост уровня гармоник. После появления современных конденсаторов с большой удельной ёмкостью при номинальных напряжениях более 300 В компенсационные схемы уступили место

предсказуемым классическим. Тем не менее промышленностью выпускалась обширная номенклатура дросселей с компенсационными обмотками. Типовое значение коэффициента трансформации — для дросселей Д1-Д69 — 1/10 или 1/20 (для точной подстройки имеются дополнительные отводы). Комбинируя обмотки трансформаторов, можно получить сходные параметры. В качестве примера приведены спектрограммы напряжений для трансформатора ТН-46 при пульсирующем входном напряжении с частотой 100 Гц, амплитудой 300 В и током намагничи-

вания 0,3 А при ёмкости конденсатора $C1 = 1000$ мкФ и $C2 = 0$ в следующих вариантах включения:

а) с компенсационной обмоткой и $K_{тр} = 1/15$. Вход фильтра — вывод 7, соединены выводы 8 и 9, 10 и 11, 13 и 16, выход — вывод 15. Конденсатор С1 подключён к выводам 13 и 16. Уровень основной гармоники — 43 дБ (рис. 17);

б) с компенсационной обмоткой и $K_{тр} = 1/10$. Вход фильтра — вывод 7, соединены выводы 8 и 9, 10 и 13, выход — вывод 12. Конденсатор С1 подключён к выводам 10 и 13. Уровень основной гармоники — 41 дБ (рис. 18);

в) с последовательным полным включением всех вторичных обмоток. Вход фильтра — вывод 7, соединены выводы 8 и 9, 10 и 11, 13 и 14, выход — вывод 16. Конденсатор С1 подключён к выводу 16. Уровень основной гармоники — 42 дБ (рис. 19);

г) с последовательным полным включением трёх вторичных обмоток. Вход фильтра — вывод 7, соединены выводы 8 и 9, 10 и 11, выход — вывод 13. Конденсатор С1 подключён к выводу 13. Уровень основной гармоники — 39 дБ (рис. 20).

Видно, что схема с компенсационной обмоткой даёт небольшое преимущество по уровню основной гармоники, но при этом в спектре присутствуют гармоники вплоть до пятой. Вряд ли можно рекомендовать схему с такими непредсказуемыми результатами для практического применения, разве только для намеренного изменения спектрального состава фона (рис. 21).

Различные варианты включения компенсационных обмоток трансформатора ТПП-282 не дали очевидных преимуществ по сравнению с классическим вариантом П-образного фильтра с последовательным включением основных вторичных обмоток. Показанное на рис. 15 включение обмоток обеспечивает уровень фона не более -63 дБ (на уровне шумов). При этом падение напряжения питания на обмотках трансформатора ТПП-282 — не более 2 В. Применение ТН-46 в аналогичном включении даёт на 10—12 дБ худший результат. В отсутствие дросселя уровень фона — не более -48 дБ. (Уровень -24 дБ на иллюстрациях соответствует уровню сигнала 0 дБ).

На рис. 22 и рис. 23 приведены соответственно спектрограмма выходного сигнала частотой 1 кГц и АЧХ УМЗЧ при номинальной мощности. Видно, что уровень гармоник монотонно падает с ростом их порядка. КНИ определяется в основном уровнем второй гармоники. Вклад в КНИ третьей гармоники не превышает 0,4 %.

Конструкция. Основой УМЗЧ служит штампованное шасси из стали толщиной 1 мм размерами 195×150×45 мм от стабилизатора военного назначения производства СССР. Тип его, к сожалению, неизвестен. На рис. 24 показан внешний вид на шасси сверху. На нём имеются три штатные панели для девятиштырьковых ламп и две — для ламп 6С3ЗС. Также предусмотрены крепления для монтажных стоек для установки конденсаторов МБМ и резисторов ПЭВ. Основная часть компонентов размеще-

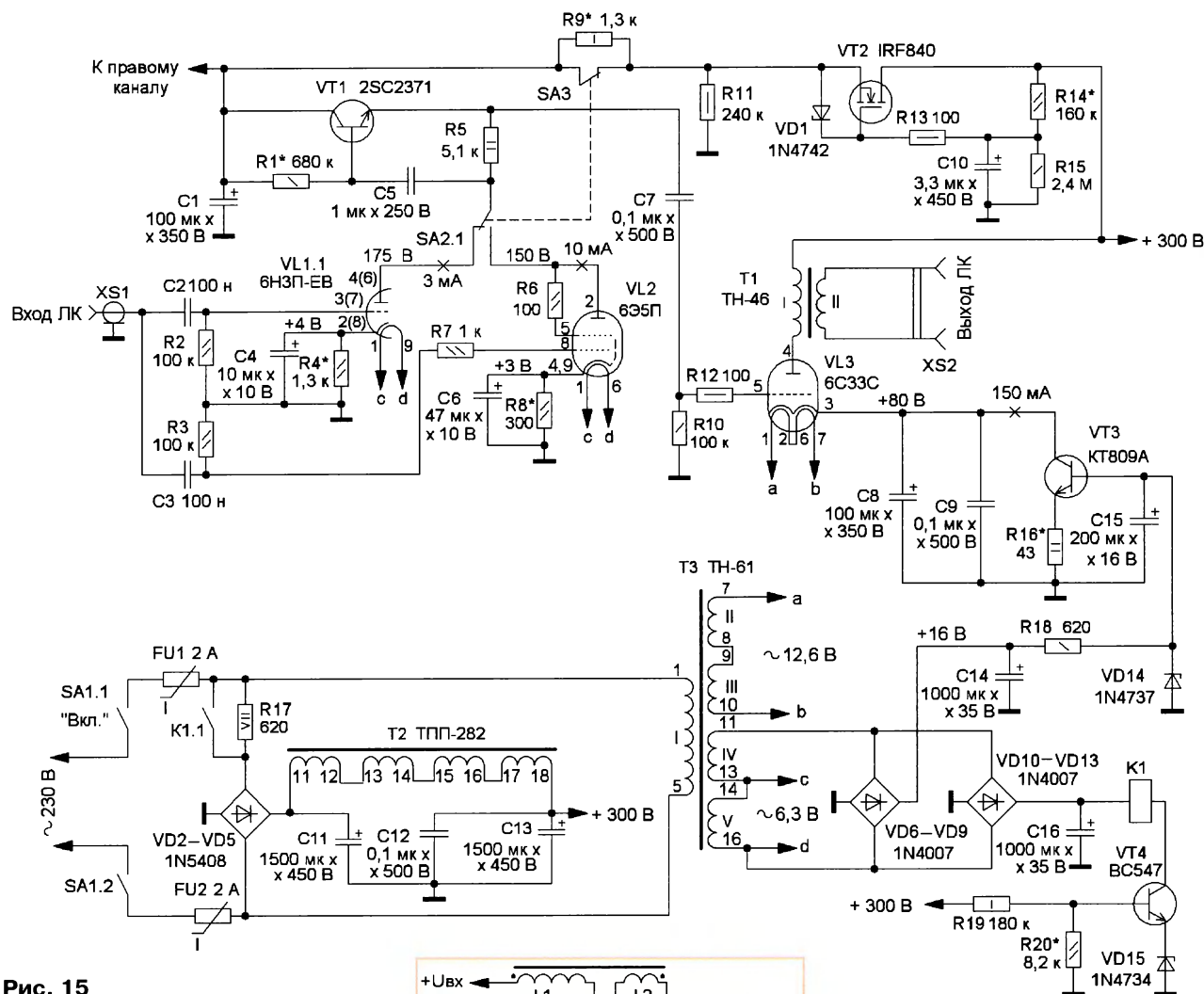


Рис. 15

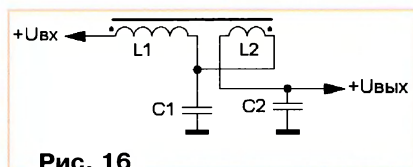


Рис. 16

на на шасси навесным монтажом. На рис. 25 показан вид на монтаж с указанием основных элементов. Транзистор VT2 в пластиковом корпусе TO-220F(P) закреплён на боковой стороне шасси с целью удобства монтажа и эффективного отведения тепла, хотя мощность, рассеиваемая на этом транзисторе, невелика. Транзисторы VT1 обоих каналов расположены на общем П-образном теплоотводе размерами 25(д)×20(в)×15(ш) мм с площадью поверхности около 15 см². Теплоотвод закреплён с помощью резьбового соединения M3 и электрически изолирован от шасси.

УКН в составе VT4, VD10—VD13, C16, VD15, R19, R20, K1 и источник напряжения смещения (ИНС) для генераторов тока (VD6—VD9, VD14, R18, C14, C15) собраны на отдельных монтажных платах с размерами 40×30 мм и 35×30 мм из перфорированного текстолита с шагом отверстий 2,54 мм. Ввиду простоты схем печатные платы не разрабатывались, все соединения выполнены посредством выводов радиодеталей или проводом МГТФ-0,12.

Вдоль длинных сторон шасси снизу смонтированы две изолирующие панели из ДВП толщиной 5 мм (или гетинакса толщиной 1,5 мм) размерами 193×35 мм,

которые служат для крепления теплоотводов мощных транзисторов. Размеры теплоотводов — 100×60×17 мм, толщина основания — 5 мм, число рёбер — 7 (толщиной 1 мм), общая площадь охлаждения каждого теплоотвода — около 300 см². Температура транзистора VT3 при продолжительной работе — 60...70 °C. Все транзисторы установлены на теплоотводы без изолирующих прокладок, с нанесением термопасты.

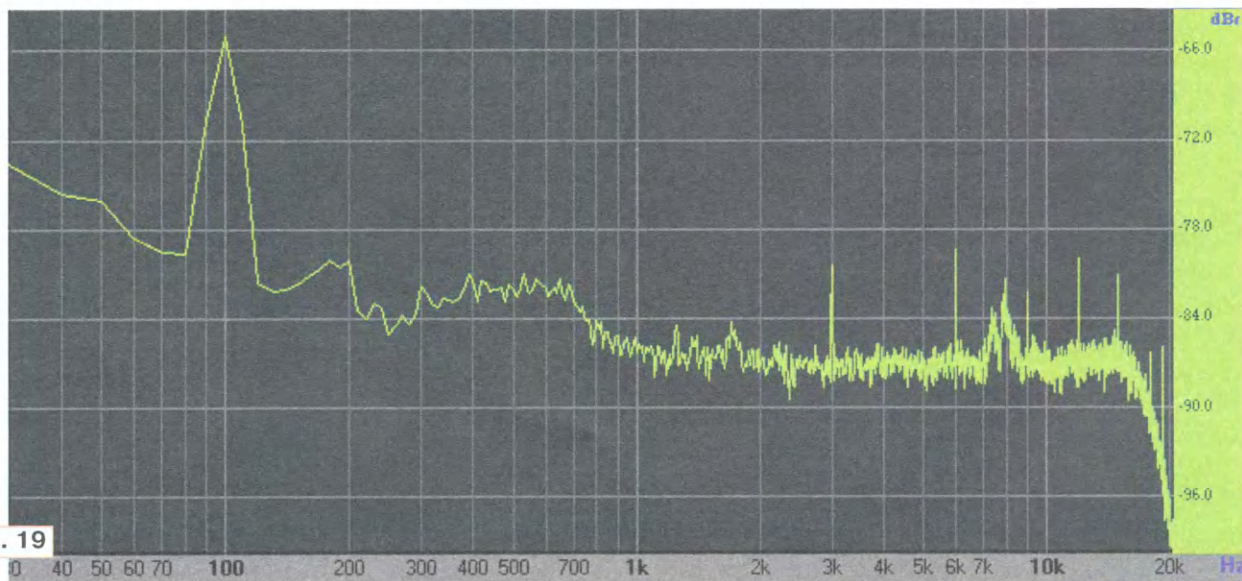
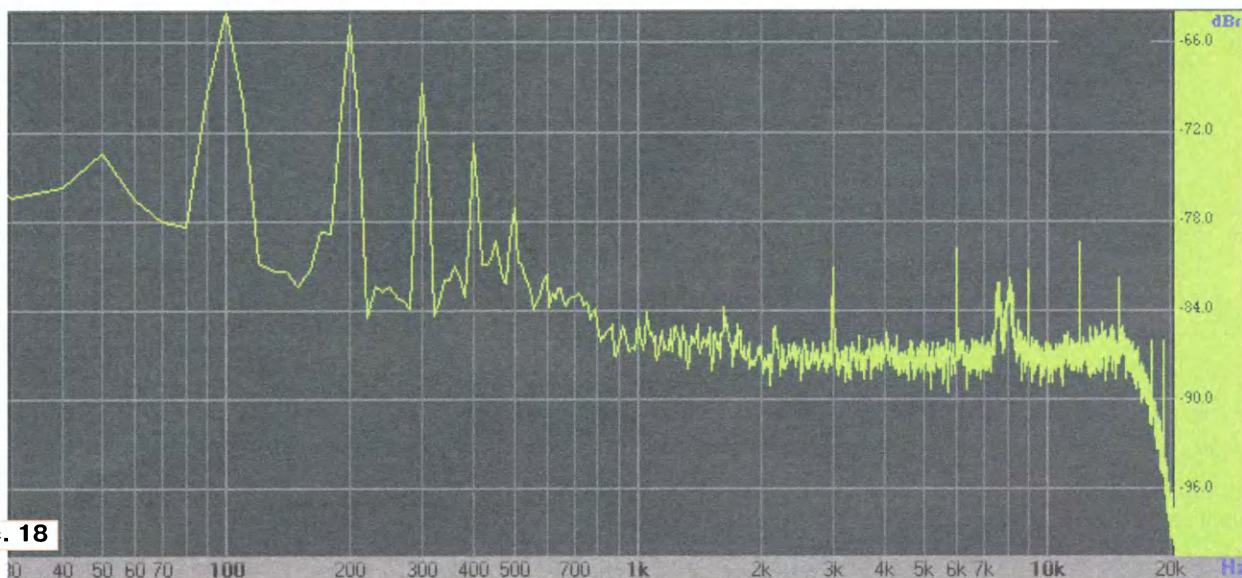
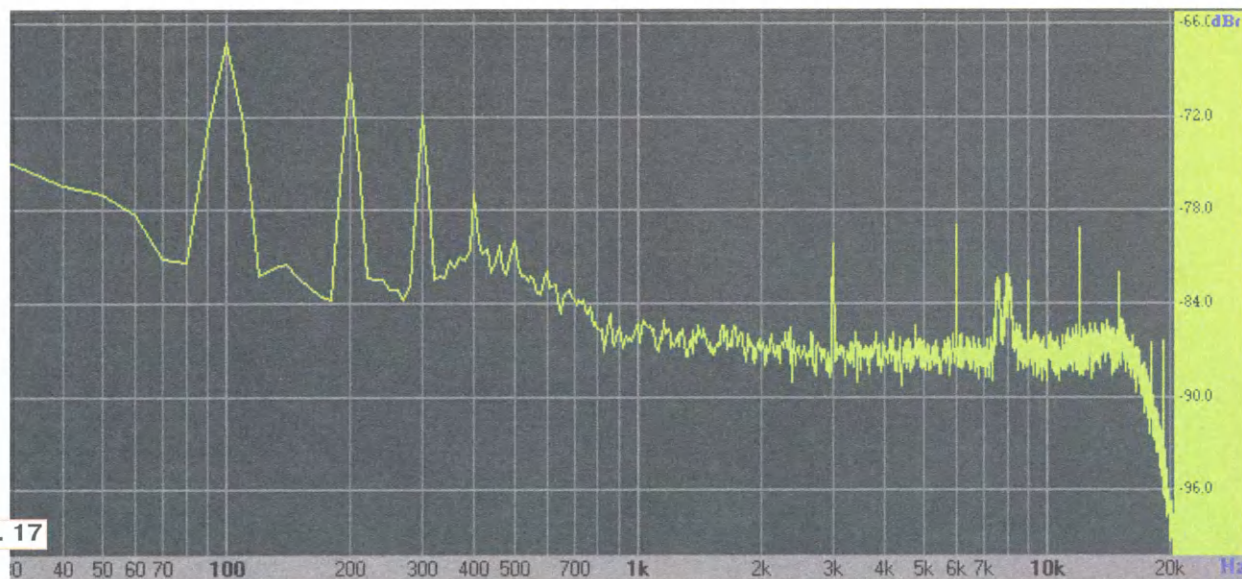
На фронтальной и тыльной сторонах шасси с помощью резьбовых соединений закреплёны декоративно-защитные панели из гетинакса толщиной 1 мм размерами 148×110 мм. Фронтальная панель служит для монтажа плат УКН и ИНС, тыльная — для выключателя питания и разъёмов подключения АС. Входные разъёмы расположены на верхней панели.

Конденсаторы C5 обоих каналов закреплёны на шасси с верхней стороны с помощью стальных хомутов. Резистор R17 — изнутри с помощью винта M4×50. Переключатели SA2, SA3 установлены

на верхней панели шасси и служат основанием для монтажа резисторов R5 и R9. Их актуаторы ("рычажки") изолированы отрезками термоусаживаемой трубки диаметром 2 и длиной 9...10 мм. Рекомендуется механически связать их между собой пластмассовой или изолированной металлической планкой для синхронного переключения.

Шасси в сборе размещено на пластине из гетинакса толщиной 8 мм и размерами 300×300 мм. Теплоотводы мощных транзисторов выполняют роль опор и закреплёны на основании с помощью винтовых соединений M3×20. Под шасси находятся конденсаторы фильтра питания. Трансформаторы серии ТН располагаются выводами вторичных обмоток наружу, серии ТПП — наружу выводами первичных обмоток. У трансформаторов серии ТПП должны отсутствовать соединения между выводами первичных обмоток, и все выводы должны быть изолированы. Внешний вид готового усилителя и взаимное размещение его частей и компонентов показаны на рис. 26.

Все слаботочные высоковольтные соединения выполнены проводом



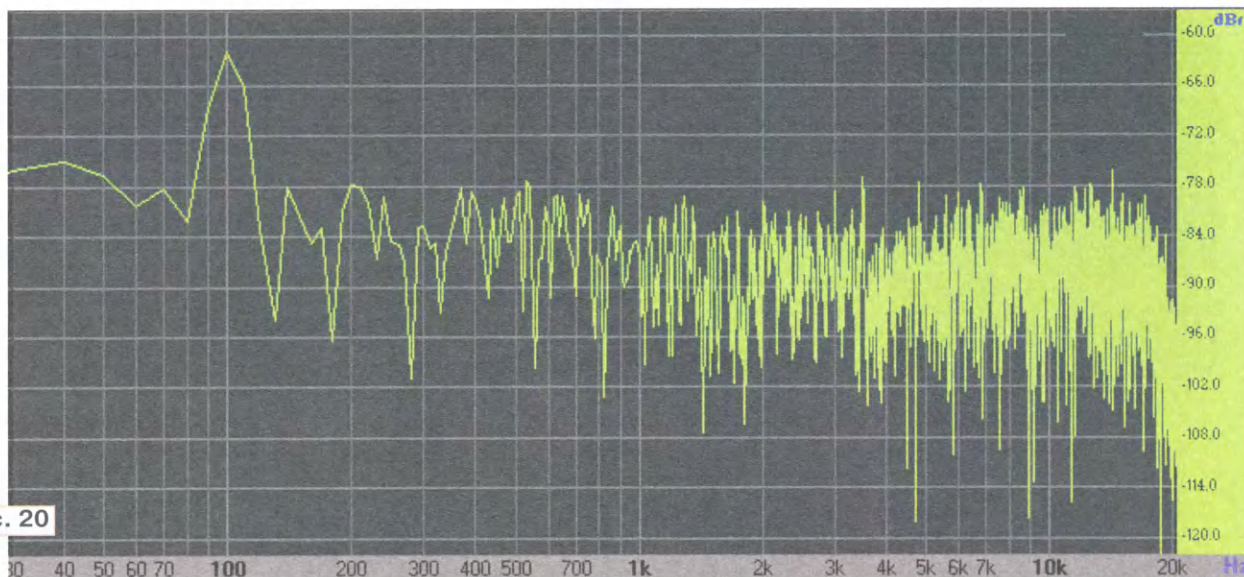


Рис. 20

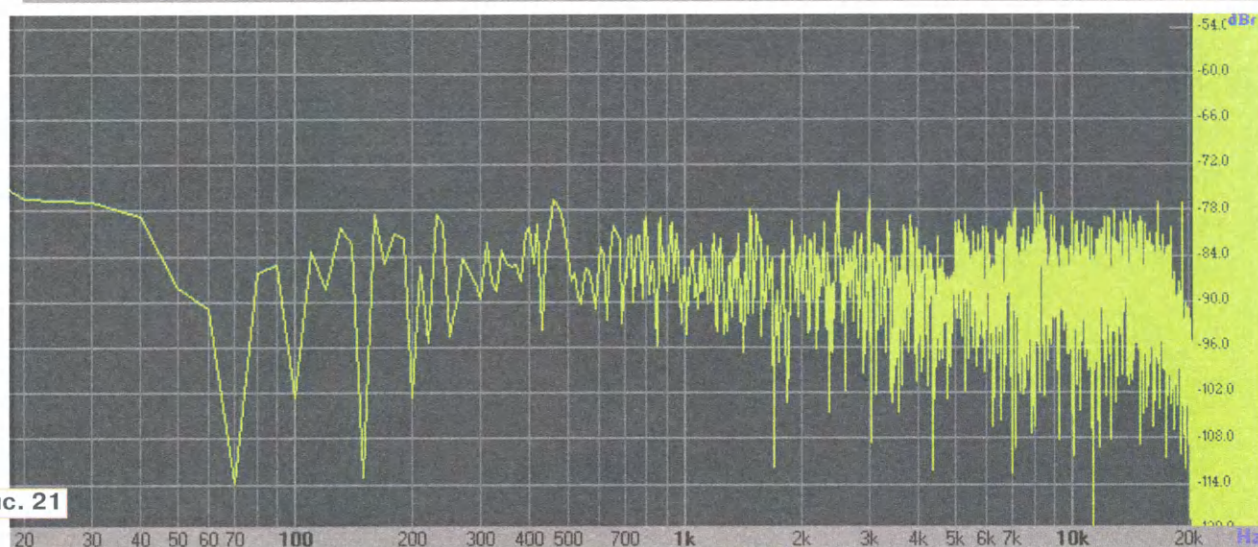


Рис. 21

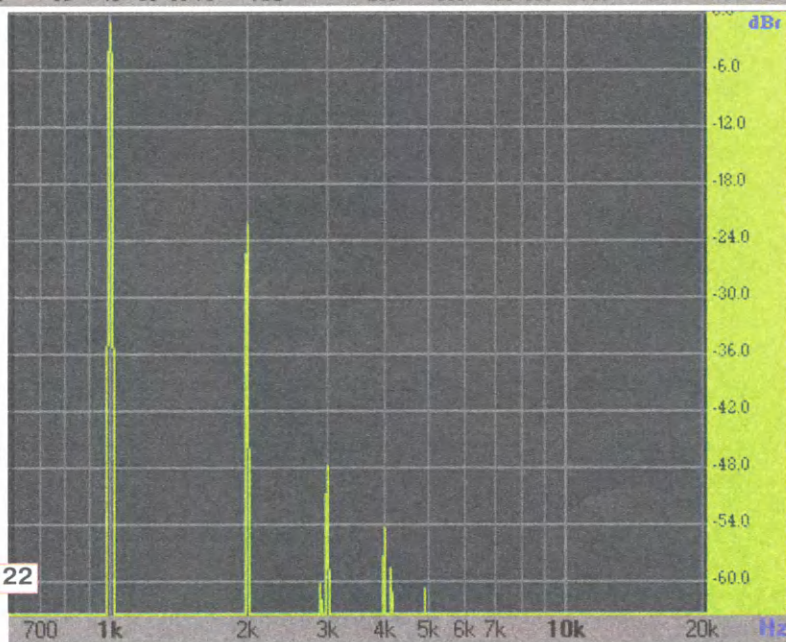


Рис. 22

МГТФ-0,2 или МГТФ-0,35. В цепи накала мощных ламп использован витой провод ПВ-3 (ПуГВ) сечением $1 \times 2,5 \text{ мм}^2$, для остальных ламп и ввода питания от сети — провод сечением $0,75 \text{ мм}^2$. Разъёмы АС подключены к трансформатору Т1 кабелем ПВС $2 \times 1,5 \text{ мм}^2$. Все места подключений и паяк цепей с напряжением +75 В и более, находящиеся в доступных местах, должны быть изолированы.

Внешние и визуально открытые элементы конструкции перед монтажом дважды окрашиваются аэрозольной нитроэмалью в желаемый цвет (в авторском исполнении — чёрный цвет № 39). Перед покраской следует принять меры по предотвращению попадания краски на панели радиоламп и выводы трансформаторов. Покраска теплоотводов и корпусов мощных транзисторов выполняет также функцию их электрической изоляции. Следует помнить, что на них может присутствовать постоянное напряжение до +85 В и в условиях повышенной влажности может стать причиной поражения электрическим током.

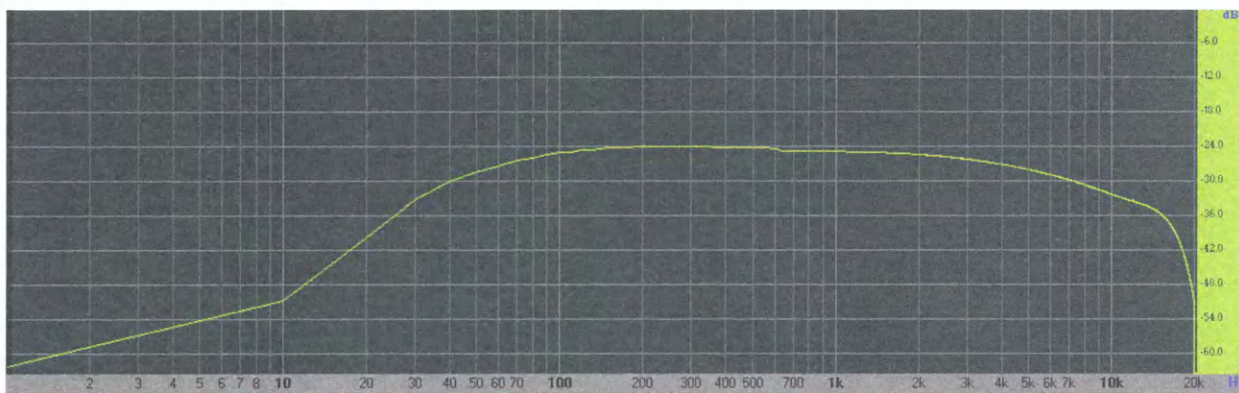


Рис. 23

Налаживание проводят в следующей последовательности (для одного канала и БП). Сначала при извлечённых лампах и отключённых базах транзистора VT3 обоим каналам с помощью вольтметра проверяют наличие всех напряжений питания БП на конденсаторах C11—C16. Также проверяют работоспособность УЧН. Напряжение на конденсаторе C13 должно плавно увеличиваться до 160...170 В в течение 4...5 с, затем при срабатывании реле K1 напряжение скачком увеличится до 290...310 В. При необходимости значение порогового напряжения корректируют подборкой резистора R20. Затем измеряют напряжение на истоке транзистора VT2. Оно должно примерно соответствовать значению, указанному на схеме. С точностью до $\pm 20\%$ напряжение питания первого каскада устанавливают подборкой резистора R14. Более точно его настраивают уже при включённых драйверных лампах.

Восстановив подключение баз транзистора VT3 и установив лампу 6С33С, убеждаются в наличии накала и контролируют напряжение на её катодах (коллекторе транзистора VT3). Оно плавно возрастает по мере выхода лампы в рабочий режим и после первичного разогрева (примерно через 1 мин) должно быть +75...80 В. Это свидетельствует о работоспособности каскада. Собственно, к налаживанию следует приступить через 20...30 мин. Из-за большой тепловой инерционности лампы 6С33С и транзисторов генераторов тока с теплоотводами необходим сравнительно продолжительный прогрев для выхода в установившийся режим. В этом режиме напряжение смещения на катоде лампы VL3 должно быть +80...85 В. Падение напряжения на резисторе R16 должно быть около 7 В, что соответствует току катода 150 мА. При значительных отклонениях измеренных напряжений от указанных следует подобрать сопротивления резисторов R16.

Далее мощные триоды для удобства дальнейшей работы можно извлечь и установить миниатюрные лампы. При необходимости корректируют напряжение на истоке транзистора VT2. Налаживание драйверного каскада начинают с лампы, требующей подачи полного напряжения питания (в замкнутом поло-



Рис. 24

жении переключателя SA3). В нашем случае это 6Н3П-ЕВ. Подборкой резисторов R4 устанавливают требуемое напряжение смещения. Затем, изменяя сопротивление R1 в цепи базы транзистора VT1 динамической нагрузки, добиваются нужного напряжения на аноде. Переведя SA2, SA3 в другое положение, подборкой резистора R8 устанавливают напряжение на катоде лампы VL2, а подборкой резистора R9 — анодное напряжение.

При использовании других типов ламп в рекомендованных выше режимах при токах менее 3 мА рекомендуется увеличить также сопротивление резисторов R5 и R1 (например, для 6Н9С — до 20...47 кОм и 1,3 МОм соответственно). При необходи-

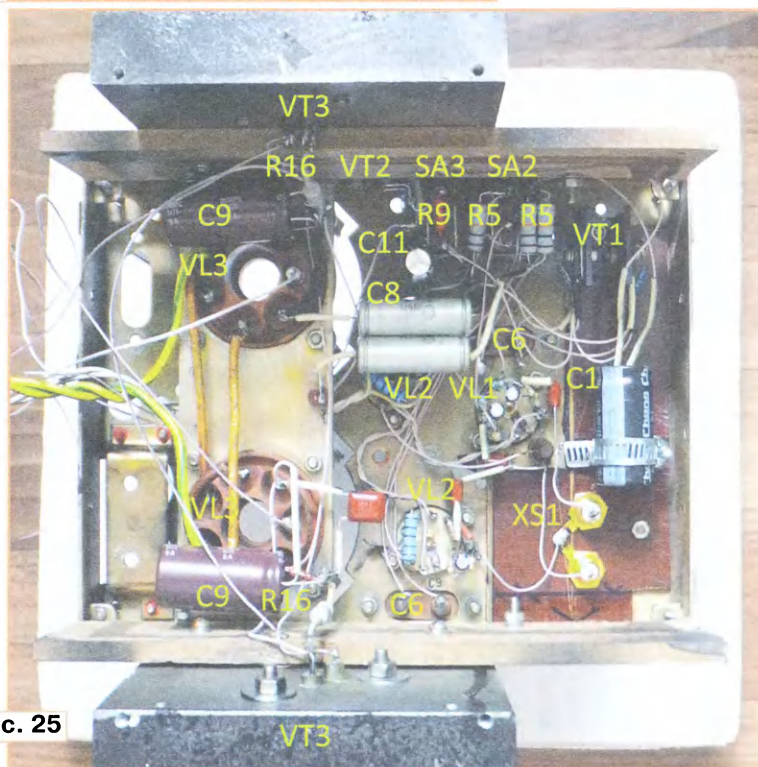


Рис. 25

мости сопротивление R5 корректируют и повторяют цикл налаживания.

Детали. Транзистор 2SC2371 можно заменить отечественным аналогом — транзистором КТ940А с уменьшением сопротивления резистора R1 примерно вдвое. Транзистор VT2 — IRF830, IRF840 в корпусе TO-220F(P), транзистор VT3 — 2N3739, VT4 — BC547 или КТ3102 с любым буквенным индексом. Стабилитрон VD1 может быть 1N4739—1N4744 с напряжением стабилизации 9,1...15 В,

напряжением не менее 600...1000 В, диоды VD6—VD13 — любые из серии 1N400х.

Конденсаторы C2, C3 — серии МБМ на номинальное напряжение 160 В, конденсатор C5 — МБГО-1, МБГО-2 или МБМ на напряжение не менее 160 В, C7, C9, C12 — МБМ на напряжение 500 В, C1, C4, C6, C8, C14—C16 — К50-35, К50-68 или аналогичные импортные, конденсатор C11 — Елсо 3,3—4,7 мкФ на напряжение 450 В. Конденсаторы

Все резисторы, за исключением R17 — МЛТ или С2-33Н соответствующей мощности. Резистор R17 — ПЭВ-7,5 сопротивлением 620...680 Ом. В момент включения на нём рассеивается примерно в десять раз большая импульсная мощность, но вреда резисторам ПЭВ это не наносит. Сопротивление резистора R11 может быть в пределах 200...300 кОм.

Предохранители FU1, FU2 — 250RF-2000 или аналогичные на предельное напряжение 250 В и ток срабатывания 1,8...2,2 А. Выключатель SA1 — П2Т-1, Т3 или аналогичный с напряжением/током коммутации не менее 250 В/3 А, SA2 — МТЗ (сдвоенный), SA3 — МТ1. Можно использовать кнопочные переключатели П2К.

Разъёмы XS1, XS2 — гнездовые RCA ("тольпан") позолоченные. Реле — JZC-32F 012-200 или аналогичное с номинальным напряжением 9...12 В, сопротивлением обмотки 400...700 Ом и допустимым коммутируемым током не менее 3 А.

Возможные для применения в УМЗЧ типы ламп подробно описаны выше. При переборе ламп по приведённому списку наблюдается незначительное ухудшение детализации звучания на ВЧ с одновременным возрастанием жёсткости (это устоявшиеся термины для оценки субъективного восприятия). Лампы VL1 и VL2 целесообразно устанавливать разных типов или с заметными различиями в параметрах. Чем больше отличаются их параметры, тем больше отличий в звучании.

Источником сигнала в авторском варианте служит устройство Bluetooth KN321 с автономным питанием от встроенного аккумулятора [9]. Применение этого приёмника позволяет наиболее просто и эффективно решить вопрос гальванической развязки УМЗЧ с бестрансформаторным питанием.

Автономное питание модуля Bluetooth-модуля решает вопрос устранения помех, характерных для этого типа источника сигнала. Можно использовать практически любой Bluetooth-модуль с выходным напряжением ~1 В. Питание модуля рекомендуется организовать по принципу, изложенному в [10], с применением дроссельного фильтра.

Другим возможным вариантом гальванической развязки являются классические разделительные трансформаторы. Они более доступны, чем трансформаторы питания или ТВЗ и гораздо более просты в изготовлении. Такой трансформатор может быть выполнен на основе кольцевого магнитопровода из феррита М2000НМ типоразмера К28×16×6. Обмотки должны содержать по 345 витков провода ПЭВ-1 0,25, намотанных виток к витку и равномерно распределённых по кольцу. Между обмотками размещают изолирующий слой лакоткани. Индуктивность каждой обмотки такого трансформатора составит около 160 мГн. Вторичную обмотку трансформатора нагружают сопротивлением 32 Ом и подключают ко входу усилителя. К первичной подключают источник сигнала, который в этом случае должен обеспечивать номинальное напряжение сигнала при сопротивлении нагрузки



Рис. 26

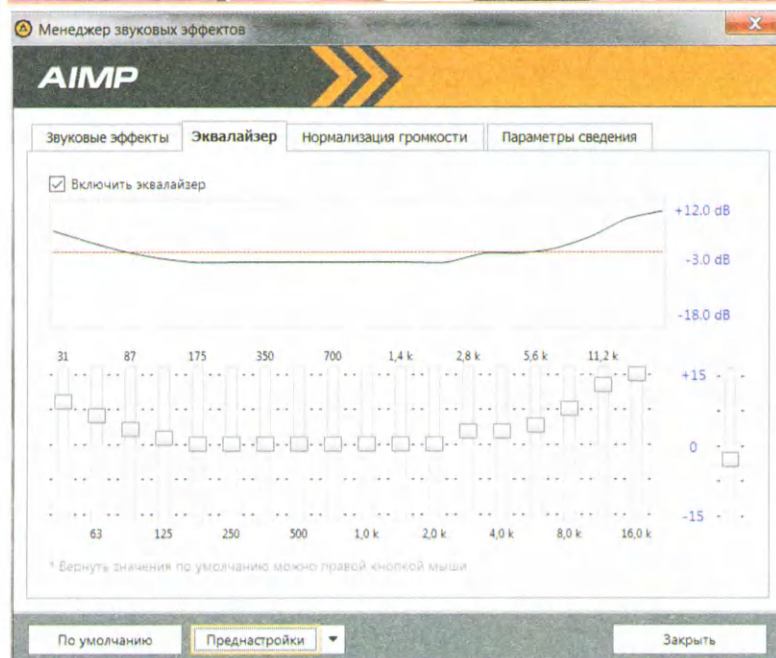


Рис. 27

стабилитрон VD14 — 1N4738 или KC175A, KC182A, стабилитрон VD15 — 1N4733, 1N4734 или KC151A, KC156A.

Диоды VD2—VD5 могут быть 1N5404—1N5408 или аналогичные с допустимым прямым током 3 А и обратным

C11, C13 — Hitachi RMHCG FA, HCG FA 1500 мкФ на напряжение 450 В. Вместо конденсаторов МБМ, МБГО можно использовать конденсаторы К73-17 на напряжение 400...630 В (C2, C3 — на напряжение 160 В).

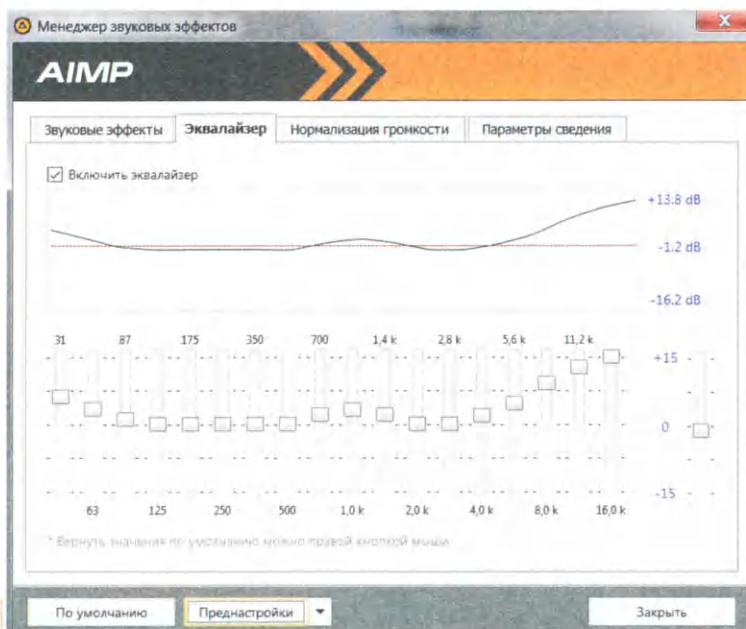


Рис. 28

32 Ом. Стандартный аудиовыход TRS 3.5 мм ("jack") для подключения гарнитуры рассчитан на нагрузку 16...32 Ом.

При использовании трансформатора рекомендуется исключить элементы C2, C3, R2 и R3, подключив вторичную обмотку непосредственно между общим проводом и точкой соединения сетки VL1.1 и левого по схеме вывода R7. Это увеличит линейность звукового тракта в области НЧ. Трансформаторы размещают в непосредственной близости от входных разъёмов XS1 с внутренней стороны шасси.

Можно применить другие типоразмеры ферритовых колцевых магнитопроводов, пересчитав число витков для получения требуемой индуктивности. При этом типоразмер и диаметр провода должны быть не менее указанных выше во избежание роста нелинейных и частотных искажений на НЧ при больших уровнях сигнала. Возможно также использовать готовые согласующие трансформаторы для БРЭА с коэффициентом трансформации $K_{tr} = 0,5...1,4$, индуктивностью первичной обмотки L1 не менее 0,15 Гн, рассчитанных на сопротивление нагрузки $R_0 = 32...3000$ Ом и активным сопротивлением обмоток в 5...10 раз меньше R_0 . Значение R_0 рекомендуется уменьшать примерно втрое относительно справочного для улучшения передаточной характеристики на частотах ниже 100 Гц. При этом не должна быть превышена величина номинальной мощности, и входное сопротивление (R_0 , приведённое к первичной обмотке) должно быть не менее 16 Ом. Например, трансформаторы T2-9 (L1 = 0,22 Гн, $R_0 = 43$ Ом, $K_{tr} = 0,75$), T2-14 (L1 = 0,45 Гн, $R_0 = 82$ Ом, $K_{tr} = 0,53$), T2-15 (L1 = 0,45 Гн, $R_0 = 82$ Ом, $K_{tr} = 0,75$). Для трансформаторов этого типа обмотка I — выводы 1 и 5 (при соединении выводов 3 и 4, обмотка II — выводы 6 и 10 при соединении выводов 8 и 9. Имеющиеся отводы 2 и 7 можно использовать для "подгонки" параметров.

Совместно с этим УМЗЧ используют АС [11]. В целом УМЗЧ формирует достоверную и устойчивую звуковую сцену. В частности, при воспроизведении часто рекомендуемой для испытаний композиции Harnageddon группы Arosalipica наблюдается чёткая локализация кажущихся источников звука. УМЗЧ продемонстрировал хорошее звучание в широком спектре музыкальных жанров, от софт- и блюз-рока (например, Private Investigations — Dire Straits), через хард-рок (Child in Time — Deep Purple) и хеви-металл (многочисленные композиции Black Sabbath, Iron Maiden, Megadeath, Metallica и др.) до дэт-металла (Cannibal Corpse, Death) и даже грайнд-кора (Napalm Death).

Наиболее подходящие, с точки зрения автора, параметры эквалайзера для большинства композиций в жанрах хард-рок и дэт-металл приведены на рис. 27 и рис. 28. Небольшой ранний подъём на частоте 2,8 кГц в первом случае даёт эффект "присутствия" для вокальных партий и подчёркивает "фирменное" звучание электрогитар в инструментальных.

Для дальнейшего улучшения объективных параметров УМЗЧ в смысле расширения полосы частот, снижения КНИ и уменьшения выходного сопротивления можно рекомендовать введение общей ООС по переменному напряжению глубиной 12...15 дБ с помощью резисторов, установленных между верхним по схеме (см. рис. 15) выводом трансформатора T1 и катодами ламп VL1.1, VL2. Конденсаторы C4, C6 при этом исключают. Дополнительный каскад усиления, который понадобится в этом случае для компенсации снижения коэффициента усиления, можно реализовать на триодах 6Н1П, 6Н2П, нувисторах 6С51С или аналогичных, ОУ или полевых транзисторах. Это позволит уменьшить КНИ до 1,5...2 % и расширить полосу воспроизводимых частот по уровню -6 дБ до 18...18000 Гц. Согласно рекомендациям [12], глубину ООС в УМЗЧ с высокоомным выходом, к

которым, в целом, относятся ламповые УМЗЧ, не рекомендуется увеличивать более 20...30 дБ. Кроме того, излишнее увеличение глубины ООС может привести к самовозбуждению усилителя.

При доработке конструкции также возможна установка на задней панели вентилятора охлаждения с направлением потока наружу. Для любителей экстремальных режимов можно рекомендовать использовать предложенное схемное решение для жёсткой стабилизации тока покоя лампы 6С33С и предотвращения её лавинного разогрева.

Некоторые несомненно обратили внимание, что в данной конструкции расположение оксидных конденсаторов обеспечивает их прогрев, что в последнее время считается правилом хорошего тона (в буквальном смысле). Однако очевидно, что тепло человеческих рук способствует наиболее оптимальному режиму работы конденсаторов и накоплению в них положительной жизненной энергии, благодаря чему звучание приобретает настоящую душевную теплоту. Поэтому рекомендуется сделать конденсаторы фильтра питания съёмными и в процессе прослушивания согреть их в ладонях, соблюдая при этом правила эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В.

Читатель, конечно, понял, что предыдущий абзац является шуткой. Но требование выполнения правил электробезопасности при наладивании и эксплуатации отнюдь не шуточное, поскольку элементы усилителя имеют гальваническую связь с сетью переменного тока 230 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Однотактный усилитель на 6С33С. — URL: <https://умзч.рф/?p=690> (13.04.21).
2. Звуковой усилитель для меломанов и аудиофилов от Ульянова. — URL: <http://nauchebe.net/2012/08/zvukovoj-usilitel-dlya-melomanov-i-audiofilov-ot-ulyanova-ili-kak-sdelat-tranzistornyj-usilitel-zvuchnee-lampovogo/> (13.04.21).
3. Ламповый усилитель. Редкий пример хорошего однотакта. — URL: <http://www.paseka24.ru/node/505> (13.04.21).
4. Visual Analyser Project. — URL: <http://www.sillanumsoft.org/> (13.04.21).
5. Кацнельсон Б. В., Ларионов А. С. Отечественные приёмно-усилительные лампы и их зарубежные аналоги (Справочник). — М.: Энергоиздат, 1981, с. 142.
6. Артемьев А. Двойной триод 6Н3П. — Радио, 1955, № 5, с. 47—49. — URL: <http://archive.radio.ru/web/1955/05/052/> (13.04.21).
7. Электронный дроссель для лампового усилителя. — URL: <http://r-lab.narod.ru/drossel01.htm> (13.04.21).
8. Терентьев Б. П., Китаев В. Е. и др. Энергетика предприятий связи. — М: Связь, 1965, 615 с.
9. Беспроводной адаптер KN321. — URL: <https://aliexpress.ru/i/4000297170873.html> (13.04.21).
10. Панкратьев Д. Беспроводные ТДС-4 со встроенным ламповым УЗЧ. — Радио, 2019, № 8, с. 36.
11. Панкратьев Д. Модернизация АС 25АС-109. — Радио, 2019, № 9, с. 9.
12. Сырицо А. Особенности УМЗЧ с высоким выходным сопротивлением. — Радио, 2002, № 2, с. 16—17.