

# Усилитель Hi-Fi класса из Амфитона У-002

Многие любители высококачественного звуковоспроизведения замечали часто встречающееся не соответствие между электрическими характеристиками усилителей и реальным качеством их звучания. Автор этой статьи давно ставил перед собой вопрос, почему экспертные оценки качества звучания усилителей расходятся с их электрическими характеристиками. Попробую, поделиться с читателями теми экспериментами, которые я провел лично, а также сведениями, почерпнутыми мной в литературных источниках. Результатом моих экспериментов явилась модернизация серийного усилителя Амфитон У-002 стерео (базовый усилитель).

Такой измеряемый параметр как коэффициент гармонических искажений определяет качество воспроизведения одно-тонового сигнала. О заметности данного рода искажений можно познакомиться в [1]. Тем не менее, правильно оценить качество звука усилителя по этому параметру нельзя, так как он является, всего на всего, одним из показателей качества звуковоспроизведения. К тому же, коэффициент гармонических искажений не является наиболее информативным показателем качества, так как человеческое ухо своеобразно воспринимает гармонические искажения различного порядка. Всем известно, что ламповые усилители при достаточно больших искажениях фиксируемых приборами звучат, тем не менее, не плохо. Дело ещё усугубляется тем, что многие производители аудиотехники в целях одурачивания покупателей производят замеры коэффициента гармоник на холостом ходу. Более информативный показатель коэффициент интермодуляционных искажений (искажений двух-тонового сигнала), но и он не дает достоверной информации о качестве звучания большинства усилителей. Объясняется это тем, что современные усилители проектируются с использованием общей (за исключением экзотических и дорогостоящих элитных моделей) отрицательной обратной связи (ООС), которая обеспечивает необходимую линейность. Фактически усилитель, охваченный такой ООС, представляет собой классическую систему автоматического регулирования и соответственно для него применимы те же показатели качества.

К этим показателям, в первую очередь, относятся время установления, время восстановления и точность регулирования (рис.1). (Для большей наглядности на рис.1 зона погрешности дана в увеличенном по отношению к сигналу масштабе.) На этом рисунке время установления обозначено как  $T_{уст}$ , время восстановления -  $T_{вос}$ , точность регулирования -  $U_{пог}$ [2]

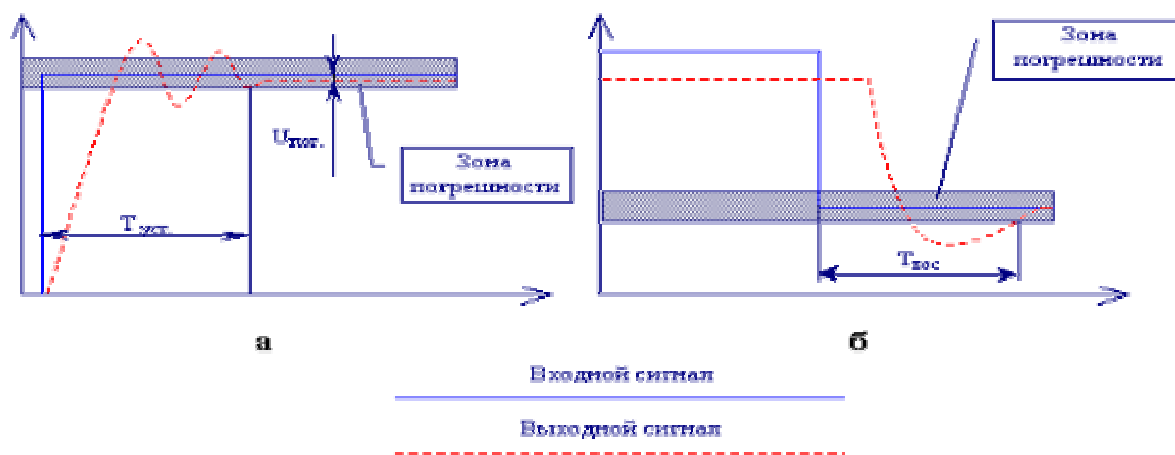


Рис. 1

Время установления и время восстановления очень трудно предсказать из любых других динамических показателей из-за существенной нелинейности передаточных характеристик каскадов во время переходного процесса. При этом очень часто у усилителей с высокой скоростью нарастания и широкой полосой (т.е. с большой глубиной ООС) оказывается более длительное время установления и восстановления, чем у менее широкополосных из-за наличия не запланированных (паразитных) разработчиком полюсов перегиба АЧХ усилителя с разомкнутой цепью ООС [3]. Точность регулирования прямо пропорциональна глубине обратной связи.

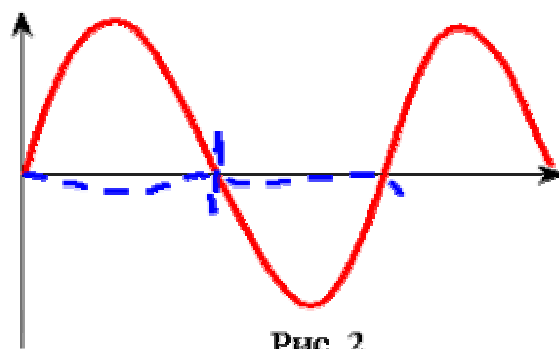
Кроме того, усилители, имеющие широкополосную ООС могут увеличивать время установления за счет наличия реактивностей входного и выходного импедансов, образующих с внешними реактивностями (источником сигнала и нагрузкой) RC, RL и LC - цепи, полюса и нули которых меньше частоты единичного усиления [3]. По моему мнению, именно этим явлением можно объяснить замеченный меломанами эффект влияния межблочных кабелей на качество звука. Здесь необходимо отметить, что чисто активное входное и выходное сопротивление усилителя без ООС становится реактивным при охвате его даже резистивной ООС. При этом в инвертирующем включении входной и выходной импедансы имеют индуктивный характер, а в неинвертирующем входной импеданс имеет ёмкостной характер, а выходной индуктивный. Единственный способ снижения подобных искажений в усилителях охваченных общей ООС заключается в уменьшении частоты единичного усиления.

Обычно, когда разработчики измеряют параметры своих усилителей, они работают в "тепличных" условиях. Это объясняется использованием гармонических сигналов (или в лучшем случае импульсных) измерительных сигналов, а при усилении реальных музыкальных программ эти условия далеки от "тепличных". К факторам, нарушающим устойчивость усилителя, в первую очередь относятся:

- переменное (зависящее от сигнала) сопротивление нагрузки;
- нелинейность используемых усилительных приборов;
- не стабильное напряжение питания;
- мгновенные изменения температуры кристаллов выходных транзисторов, что приводит к значительному изменению петлевого усиления;
- переходные искажения второго рода;
- значительные акустические вибрации.

Так по данным [4], сопротивление электродинамической акустической системы может кратковременно уменьшаться в 6-8 раз. Колебания напряжения питания выходных транзисторов базового усилителя при усилении реальных звуковых сигналов изменялось от 20 до 36 вольт при номинальном напряжении в 31 вольт (33%), что объясняется, по-видимому, резонансом индуктивности вторичной обмотки трансформатора питания с электролитическими конденсаторами фильтра.

В двухтактных каскадах на комплиментарных транзисторах при работе на высоких частотах возникают искажения, которые обусловлены временными свойствами транзисторов - их быстродействием, а также индивидуальными различиями частотных свойств [5]. Временные задержки сигнала, вызванные процессом коммутации, приводят к искажениям в начальной области характеристики (в области перехода через нуль). Эти искажения называются переходными искажениями второго рода (рис.2). Обычно половина эмиттерного повторителя на р-п-р транзисторе, по своим коммутационным свойствам оказывается менее быстродействующей, чем на п-р-п транзисторе. В точке перехода положительной полуволны к отрицательной задержка отпираания р-п-р транзистора вызывает импульсную помеху, которая в свою очередь приводит к кратковременному нарушению устойчивости системы автоматического регулирования.



Необходимо отметить, что многие радиолюбители, да и профессионалы не вполне понимают данное обстоятельство и используют в своих разработках асимметричные элементы для усиления положительной и отрицательной полуволн звуковых сигналов. Ярким примером такого подхода может служить сверхлинейный УМЗЧ С. Агеева [6] где во входном каскаде используется значительно асимметричный операционный усилитель К140УД11. Естественно вряд ли стоит ожидать высокого качества звука от подобных усилителей. Здесь необходимо объяснить резкую деградацию журнала Радио в области звукотехники. Агеев является членом редколлегии журнала и "зарубает" все серьезные статьи авторов по вопросам аудиотехники, очевидно боясь конкуренции.

Уменьшить влияние переходных искажений второго рода можно путем увеличения тока возбуждения р-п-р транзисторов на высоких частотах, а также снижением частоты единичного усиления всего устройства в целом.

Ещё один фактор, который может повлиять на качество воспроизведения реального звукового сигнала был замечен мной во время испытаний усилителя мощности высокой частоты на вибростенде. При воздействии механических вибраций было замечено весьма сильное увеличение уровня шума сопровождающего основной сигнал. Этот шум сильно зависел от качества сильноточных разъёмов стоящих на пути прохождения сигнала. Так при испытании 1 кВт усилителя в статическом режиме уровень шума соответствовал заданному в технических условиях значению, а при испытаниях на вибростенде увеличился на 40-60 дБ. Обнаружить данное явление весьма не просто, так как шумовая ЭДС

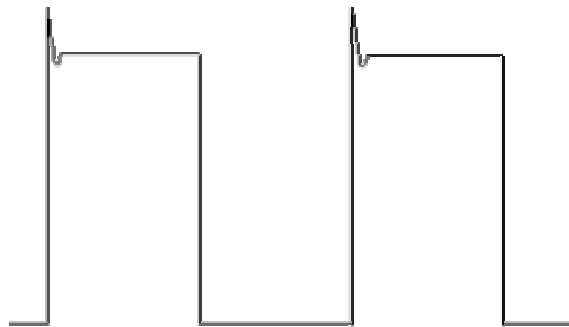
появляется только при наличии полезного сигнала и для её измерения использовался селективный милливольтметр SMV-8 и комплект режекторных фильтров с высокой добротностью, которые подавляли основной сигнал на 35 дБ. Этот эффект может оказать существенное влияние на звучание усилителя, так как при прослушивании музыкальных программ на больших уровнях громкости (а это обычный режим для аппаратуры высокой верности) в комнате прослушивания наблюдаются довольно значительные вибрации мебели и корпуса самого усилителя. Кроме этого на больших уровнях громкости нельзя исключить возможность появления пьезоэлектрических эффектов.

Система автоматического регулирования может устойчиво (без серьезных ухудшений времени установления) работать в таких условиях только в двух случаях:

- при значительном энергетическом запасе (запасе выходной мощности);
- при использовании адаптивной системы автоматического регулирования.

Оба этих подхода не совсем пригодны для массовых моделей усилителей (первый из-за дороговизны, второй - сложности схемотехнической реализации). Пример радиолубительской реализации первого подхода можно найти в [6], где автор использует весьма мощные источники питания и параллельное включение мощных выходных транзисторов. Естественно это благоприятно сказывается на качестве звука, но и приносит дополнительные материальные затраты.

Кроме этого для систем автоматического регулирования с большим петлевым усилением серьезную опасность может представлять перегрузка входных каскадов при усилении сигналов с большой скоростью нарастания. Так на рис.3 приведена осциллограмма напряжения на коллекторе одного из транзисторов дифференциального входного каскада базового усилителя при подаче на его вход прямоугольных импульсов частотой 1 КГц.



**Рис. 3**

Из осциллограмм приведенных на рис.3 видно, что на выходе первого каскада наблюдается значительный выброс напряжения, в то время как на выходе всего усилителя напряжение близко к прямоугольной форме. Такие выбросы приводят к появлению "динамических нелинейных искажений". Обычно считается, что такого рода искажения неизбежны, и в справочной литературе [5] рекомендуют принять ряд мер для уменьшения последствий подобного рода искажений. К этим мерам в первую очередь относятся ограничение спектра входного сигнала и увеличение перегрузочной способности входного каскада.

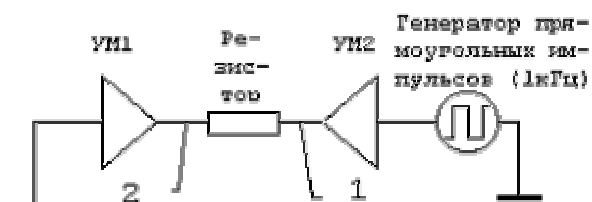
С целью повышения перегрузочной способности рекомендуется увеличить напряжение питания входных каскадов и использовать в них полевые транзисторы, которые в отличие от биполярных не имеют эффекта накопления носителей в режиме насыщения и имеют

больший диапазон допустимого входного дифференциального напряжения (до 1 В против 60 мВ у биполярных).

Подобный подход к устранению перегрузки входных каскадов является борьбой со следствиями, а не с причиной, и помогает избежать выхода системы автоматического регулирования из нормального режима работы, но не позволяет полностью избавиться от динамических нелинейных искажений, а именно они, кроме неточностей регулирования во многом определяют качество звуковоспроизведения. Стандарты МЭК предусматривает измерение подобного рода искажений, а производители аудиотехники приводят их в паспортах своих изделий крайне редко, так как большинство аппаратов, мягко говоря, не блеснут при таких испытаниях. Измерение этих искажений производится анализатором спектра при подаче на вход усилителя одновременно синусоидального сигнала частотой 15 КГц и прямоугольных импульсов частотой 3.18 КГц. Естественно, что для измерений высококачественного усилителя потребуется анализатор спектра с динамическим диапазоном более 90 дБ.

Кроме этих искажений серьезное влияние на качество звука оказывают интерфейсные искажения. Более подробно о них можно прочитать в [7]. Однако в этой статье мало внимания уделяется влиянию этих искажений на устойчивость работы самого усилителя. Известно, что при работе на емкостную нагрузку напряжение на выходе усилителя не может нарастать мгновенно, при условии конечного тока, который способен он отдать в нагрузку. В результате этого к дифференциальным входам усилителя в первый момент времени оказывается, приложена значительная разность потенциалов, приводящая к сбою в работе системы автоматического регулирования.

Для оценки подобных искажений можно рекомендовать собрать схему изображенную на рис.4. О степени этих искажений можно судить по качеству переходного процесса в усилителе, на вход которого не подан сигнал. Также на качество звука существенное влияние оказывают межблочные кабели. В последнем утверждении можно легко убедиться, проделав описанный ниже эксперимент.



Соединить проигрыватель компакт-дисков с усилителем экранированным кабелем длиной 150-160 см в котором экран используется в качестве общего провода и включить на воспроизведение с полной громкостью, какой ни будь диск с мощными ударными инструментами. С помощью осциллоскопа контролировать разность потенциалов на экране межблочного кабеля со стороны проигрывателя и усилителя. Во время проведения этого эксперимента разность потенциалов в двух этих точках в отдельные моменты времени доходила до 3 милливольт (амплитудное значение). Это напряжение, собственно говоря, и является одной из составляющих искажений в межблочных кабелях, появляющееся из-за значительных переменных токов проходящих по корпусу усилителя. Радикально избавиться от этих искажений можно используя дифференциальное подключение усилителя к проигрывателю. При разработке высококачественного усилителя необходимо уделять этим искажениям внимание.

Кроме этих искажений, в усилительной технике присутствуют искажения в пассивных элементах [5]. Нельзя применять в усилителях углеродистые резисторы, которые обладают свойством детектирования, что, приводит к появлению нелинейных искажений величиной до 0,1% при высокоомной нагрузке, и могут сильно превысить эту величину с уменьшением нагрузки. Критичными в отношении искажений являются также конденсаторы, емкость которых изменяется с изменением приложенного напряжения. К ним относятся, прежде всего, полярные электролитические конденсаторы, работающие с напряжением смещения. Наряду с электролитическими конденсаторами, большие нелинейные искажения (до 1%) присущи и керамическим конденсаторам. Наилучшими с этой точки зрения являются конденсаторы с изоляцией из полистирола и тефлона (фторопласт-4). Конденсаторы обоих типов обладают минимальными переходными процессами и нелинейными искажениями.

С учетом выше изложенного, мной был разработан усилитель, обладающий малой частотой единичного усиления (достаточно узкополосный). В тоже время усилитель имеет большую глубину обратной связи (более 140 дБ на низких частотах), что достигается использованием активной нелинейной обратной связи с эталонным регулятором. При этом устойчивость усилителя обеспечивается за счет обхода точки -1 на комплексной плоскости (критерий Найквиста) рис.5.

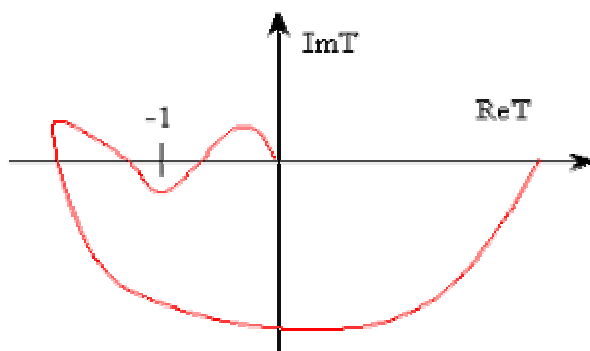


Рис. 5

Кроме этого в усилителе используется только один разделительный конденсатор в сигнальной цепи, а так же предприняты меры для уменьшения интерфейсных искажений как при подключении к нагрузке, так и к источнику сигнала. Следует особо отметить, что подобное построение усилителя позволяет почти полностью устранить такие виды искажений как переходные искажения второго рода и динамические комбинационные искажения, которые являются самыми слабыми местами классических усилителей с общей ООС.

Как уже упоминалось, усилитель выполнен на базе серийного аппарата Амфитон У-002 стерео. Доработка заключается в установке в корпус базового усилителя дополнительно четырёх печатных плат, на двух из которых монтируется новый предварительный усилитель, а на двух других производится усовершенствование усилителя мощности. Кроме этого, необходимо произвести изменения номиналов, добавление и исключение из схемы некоторых элементов базового усилителя. В связи с этим на [рис.6](#) и [рис.7](#) приведены полностью принципиальные электрические схемы предварительного усилителя и усилителя мощности соответственно. На этих рисунках вновь вводимые элементы имеют обычные позиционные обозначения (без добавлений), элементы уже имеющиеся в базовом усилителе имеют следующие добавления:

- \* - не подвергшиеся изменению (например **R1\***);
- - не подвергшиеся изменению (например **R1**);

- " - элементы у которых изменен номинал (например **R1**").

Предварительный усилитель исходного аппарата не выдерживает критики с точки зрения обеспечения высококачественного звука, поэтому мной разработан принципиально новый предварительный усилитель (чертеж печатной платы приведён на [рис.8](#), а саму плату можно заказать у автора). Он собран на операционном усилителе DA1, который для минимизации искажений искусственно переведен в класс А за счет того, что на его выходе установлен эмиттерный повторитель с динамической нагрузкой. Таким образом, ток нагрузки для ОУ DA1 не превышает 10 мкА, что приводит к уменьшению комбинационных искажений этого ОУ более чем в 10 раз (проверенно экспериментально) по сравнению с типовой схемой включения. ОУ DA2 выполняет функцию интегратора, устанавливая на 5<sup>ом</sup> выводе DA2 (вход балансировки ОУ) постоянное напряжение соответствующее нулевому потенциалу на выходе усилителя мощности.

Усилитель мощности базового аппарата (разработки Шушурина, который в настоящее время является хозяином известной Американской компании производящей элитную аудиотехнику), в какой то мере можно похвалить за заботу об уменьшении переходных искажений второго рода и динамических нелинейных искажений. Эта забота в первую очередь заключается во введении местной ООС во входном дифференциальном каскаде и цепи C10, R23, которая обеспечивает на высоких частотах увеличение тока возбуждения более "тихоходных" р-п-р транзисторов выходного каскада. Другими положительными свойствами исходного аппарата являются применение прецизионного дискретного регулятора громкости и использование независимых блоков питания для левого и правого каналов. При проведении экспертных оценок даже не переделанный усилитель звучал лучше, чем такой аппарат как Корвет 50У-068.

Доработка усилителя мощности заключается в установке на его входе дополнительной печатной платы (чертеж печатной платы приведён на [рис.9](#), а саму плату можно заказать у автора). На этой плате установлены два операционных усилителя. DA1 используется для повышения петлевого усиления, а также выполняет функции фильтрации усиливаемого сигнала. Фильтрация происходит за счет различного коэффициента передачи интегратора собранного на ОУ DA1 выше частоты среза (примерно 150 КГц) в прямом и инвертирующем включении. Этот каскад на частотах выше 150 КГц для сигнала обратной связи ведёт себя как повторитель, а для усиливаемого сигнала как фильтр низкой частоты первого порядка. Такое схемотехническое решение позволяет почти на 40 дБ увеличить глубину обратной связи в области максимальной чувствительности слуха (2-4 КГц) без увеличения частоты единичного усиления всего УМ что, несомненно, не приводит к увеличению динамических нелинейных искажений и переходных искажений второго рода характерного для классических способов увеличения петлевого усиления. Более того, происходит даже некоторое уменьшение выше названных искажений за счет лучшего ограничения спектра входного сигнала. Обратная связь на прямой вход ОУ подается непосредственно с выходных разъемов усилителя, что обеспечивает компенсацию нелинейности вносимой контактной группой реле устройства защиты. Этот же каскад формирует спад АЧХ усилителя в районе частот 14-20 КГц примерно на 1 дБ, что как считается у разработчиков HIGH END аппаратуры, несколько снижает жесткость звучания проигрывателей компакт дисков. Благоприятное влияние такого спада можно, по всей видимости, объяснить определенными особенностями цифровой звукозаписи. В первую очередь эти особенности заключаются в том, что при записи и последующем воспроизведении сигналов цифровыми методами, происходит преобразование спектра входного сигнала, при этом сигналы, частота которых выше частоты Найквиста (для ПКД - 22.05 КГц), отражаются от этой частоты и попадают в слышимую область, тем самым происходит подчеркивание и искажение высокочастотных составляющих [8]. Конечно, при записи эти надтональные составляю-



щие пытаются подавить, но представьте себе, какого порядка должен быть фильтр, что бы подавить частоты выше 22.05 КГц хотя бы на 50 дБ и не завалить при этом полезный сигнал на частоте 20 КГц [9].

Кроме каскада на ОУ DA1 введен каскад DA2 предназначенный для компенсации сопротивления кабелей соединяющих акустические системы с усилителем, идея которого позаимствована из [7]. Этот узел выполнен на ОУ DA2, который также как и предварительный усилитель работает в классе А. Данное устройство является абсолютно необходимой частью высококачественного усилителя, если конечно вы не собираетесь покупать соединительные кабели по цене 200\$ за метр. К тому же эффект от этого устройства несколько больше чем от дорогостоящих соединительных кабелей.

При установке печатных плат в корпус усилителя необходимо обратить внимание на то, что изменения необходимо произвести и на штатной плате усилителя мощности:

- необходимо исключить из схемы катушку индуктивности L1, а вместо резистора R40 установить перемычку;
- группа элементов R11-R13, C6 переносится на вновь устанавливаемую печатную плату, при этом конденсатор C5 исключается из схемы;
- база транзистора VT2 отсоединяется от входа усилителя и к ней, дополнительно подключаются элементы C8 и D5, последний из которых необходим для нормального запуска усилителя в момент включения;
- резистор R1 переносится на вновь устанавливаемую печатную плату;
- так как в базовом усилителе абсолютно безграмотно выполнена разводка корпусных проводов, необходимо её выполнить заново в соответствии с рекомендациями, приведенными в [7]. В двух словах все корпусные провода (в том числе и от конденсаторов фильтрующих питание УМ) необходимо соединить в общей точке, за которую я принял монтажный лепесток, находящийся около селектора входов;
- для повышения выходной мощности необходимо изменить номиналы некоторых элементов базового усилителя в соответствии с [рис.6](#) и [рис.7](#) (R11, R12 в ПУ и R2, R24, R25 FU1, FU2, C1, C2 в УМ). При этом конденсаторы C1, C2 устанавливаются вне корпуса усилителя из-за нехватки места;
- для уменьшения искажений возникающих в кабеле соединяющем усилитель с CD проигрывателем, мной был изготовлен специальный кабель из двух отрезков радиочастотного кабеля КБФ-19 длиной около 30 см. Этот кабель при нестандартном включении (используются две центральные жилы для передачи сигнала) имеет такие же значения погонной емкости и индуктивности, как и дорогостоящие "аудиофильские" межблочные кабели. При таком включении экран кабеля соединяется с корпусом проигрывателя, но не подсоединяется к усилителю. Этот же кабель был использован для межблочной коммутации внутри усилителя. Кроме этого, необходимо заменить выходные разъёмы усилителя винтовыми зажимами. Во входном разъёме мной не было обнаружено никаких искажений (за исключением ухудшения разделения каналов на высоких частотах) поэтому они остались прежними.

При доработке усилителя можно использовать резисторы типов МЛТ или С2-33, конденсаторы могут быть любыми с подходящими габаритами, кроме емкости C2 в предварительном усилителе. В качестве C2 лучше всего использовать конденсатор с полистирольным диэлектриком и с возможно большим допустимым напряжением например К71-7. В крайнем случае можно использовать штатный конденсатор который стоял на входе базового усилителя. Все вновь устанавливаемые платы монтируются "вторым этажом" на одноименных платах базового усилителя.



Правильно собранный усилитель практически не нуждается в наладке, так как стабильность его работы обеспечивается схемотехническими решениями. Единственное, что может потребоваться после сборки это подстройка тока покоя транзисторов выходного каскада. Эта подстройка осуществляется с помощью резистора R21\* (рис.7). В авторском варианте усилителя коллекторный ток выходных транзисторов в холодном состоянии равнялся 200 мА, а с прогревом увеличивался до 300-320 мА. Постоянное напряжение на выходе усилителя не превышает 15 мВ при любом разогреве выходных транзисторов. Температура радиаторов установленных на боковых стенках усилителя после 6 часов эксплуатации на предельной громкости, при окружающей температуре 35° С не превышает 80° С. Ещё одной особенностью усилителя является несколько увеличенное время включения, которое составляет 5-7 секунд, при этом на вход усилителя не должен поступать звуковой сигнал, иначе усилитель не выйдет в штатный режим.

После доработки усилителя мной был произведен ряд тестов:

- измерены комбинационные искажения; при подаче на вход усилителя двухтонового сигнала с частотами тонов 19 и 20 КГц при пиковой выходной мощности 70 Вт на нагрузке в 4 Ома оказались менее 0,01% (предел чувствительности примененной измерительной аппаратуры);
- проведены испытания реакции усилителя на комплексную нагрузку по схеме изображенной на рис 4; результаты этих испытаний показаны на рис.10 и рис.11. На рис.10 изображен сигнал в точке 1, а на рис.11 – в точке 2. Как видно из рисунков, усилитель имеет идеальную реакцию на скачок нагрузки;
- проведена экспертная оценка качества звучания.

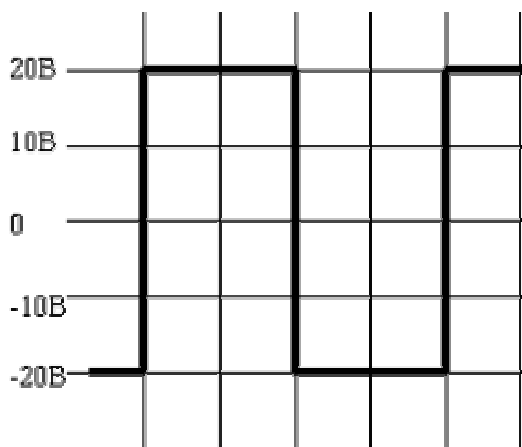


Рис. 10

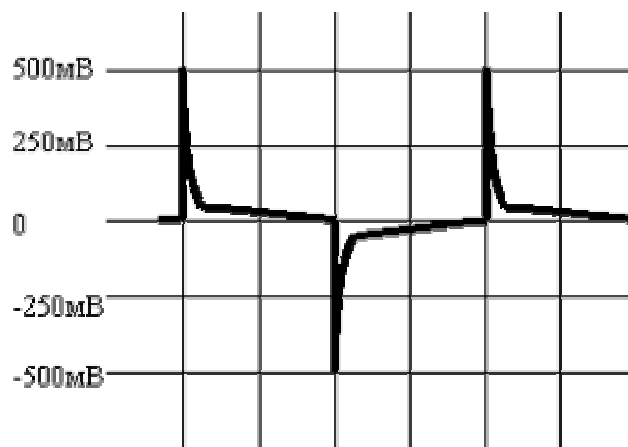


Рис. 11

О последней оценке во избежание субъективного подхода необходимо поговорить подробнее. Сразу следует сказать, что не стоит ожидать, что все ваши диски после переделки усилителя будут звучать идеально. Многое зависит от мастерства звукорежиссёра. Этим обстоятельством пользуются многие производители High End усилителей, разрабатывая его так, чтобы он вносил в звук гармонические искажения четных порядков, при этом на записях не слишком высокого качества улучшается проработка отдельных инструментов, голосов заднего плана и увеличивается глубина сцены. Если же запись произведена высокопрофессиональным звукорежиссёром, то на подобном усилителе она звучит бледно и убого. Поэтому я бы рекомендовал любителям "улучшения звука" использовать не подобные усилители, а специальный прибор - эксайтер, который совместно с обычным высококачественным усилителем выполняет те же функции, но в отличие от усилителя-эксайтера, эксайтер всегда можно отключить. Любителям использования эксайтеров можно также порекомендовать обработать не достаточно качественные записи с помощью

персонального компьютера, и после окончания обработки записать компакт-диск, который в последствии и будет прослушиваться. Такой подход позволяет получить наилучшие результаты, так как программная реализация эксайтера позволяет варьировать уровнем вносимых искажений и их спектральным распределением.

Вернемся к проблеме оценки качества усилителя. Тестирование радиоэлектронной аппаратуры категорий HI-FI и High End теснейшим образом связано с проблемами метрологического обеспечения. Качество этой аппаратуры, в отличие от обычной, определяется значительно большим числом параметров и характеристик, подлежащих контролю объективными методами. Современная широко распространенная измерительная техника позволяет производить оценку аппаратуры всех классов кроме HI-FI и High End. Для аппаратуры этих категорий необходимо применять более информационные технологии затраты на которые значительно превосходят стоимость самой аппаратуры. Поэтому до сих пор наиболее достоверными методами оценки качества звучания аппаратуры данных классов является экспертная оценка [10].

Совершенствованию методов и средств субъективной экспертизы уделяется большое внимание всеми ведущими производителями аудиоаппаратуры мира. В настоящее время существуют специальные центры и лаборатории прослушивания, такие как: лаборатория корпорации BBC, исследовательский центр FTC в США (университет г. Ватерлоо), специального исследовательского центра (Канада), лаборатория при Каролинском институте (Швеция) и др. Развитию субъективных экспертиз в значительной степени способствовала разработка рекомендаций международного электротехнического комитета (МЭК 581-7 и МЭК 268-5) к основным факторам, влияющим на полученные результаты. К этим факторам относятся: выбор помещения для прослушивания, вид звукового материала, подбор экспертов, метод экспертной оценки, характеристики эталонного тракта. Вот эти рекомендации:

**Выбор помещения для прослушивания.** Фактором, способным коренным образом повлиять на результаты экспертной оценки качества звучания, является выбор и акустическая обработка помещения для проведения испытаний. Поскольку помещение должно минимально влиять на результаты прослушивания, оно должно иметь, прежде всего, минимальное время послезвучания (время реверберации). В рекомендациях МЭК даны требования к построению специализированных помещений прослушивания: комната должна быть прямоугольной формы, с площадью около 30 м<sup>2</sup>, с полной акустической и геометрической симметрией; уровень внешних шумов не более 30 дБ; время реверберации от 0.3 до 0.6 с. в диапазоне частот от 250 до 4000 Гц.

**Выбор звукового материала.** Отбор звукового материала для проведения экспертной оценки качества звучания является одним из важнейших и наиболее трудоемких этапов подготовки испытаний. Поскольку оценки различных звеньев звукового тракта существенно зависят от содержания программы, ведущие центры прослушивания уделяют ее подбору значительное внимание: чаще всего используются отдельные фрагменты музыкальных произведений, при этом существенное влияние оказывают условия записи (для прослушивания аппаратуры HI-FI и High End важным является отсутствие в записях специальных эффектов). Звуковой материал, из которого составляется тестовая фонограмма, должна содержать разноплановые музыкальные и речевые отрывки, чтобы можно было выявить в ходе прослушивания различные аспекты и особенности звучания.

Рекомендация МЭК № 268 предусматривает составление тестовой фонограммы из следующих фрагментов: дикторская речь; симфонический оркестр; рояль; скрипка и виолончель; деревянные духовые и струнные инструменты; медные духовые инструменты; хоро-

вое пение без музыкального сопровождения; сольное пение с инструментальным сопровождением; джазовый оркестр; рок-группа. Соотношение звуковых фрагментов и пауз представлено на рис.12

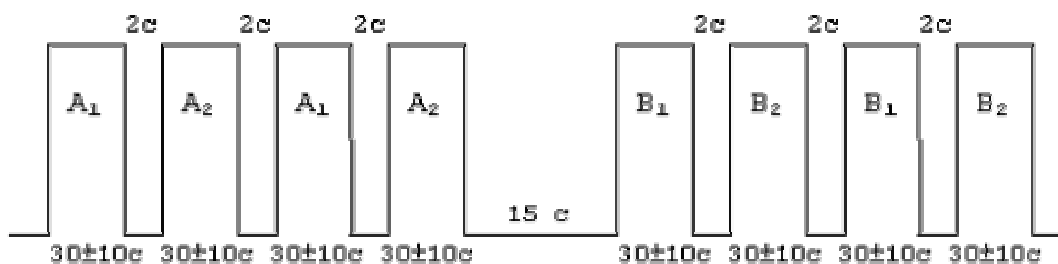


Рис. 12. Продолжительность фрагментов и пауз в тестовой фонограмме: A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> один фрагмент тестовой программы воспроизводимый через образец по качеству звучания и испытуемое изделие; B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> - следующий фрагмент тестовой программы.

Следует также отметить, что уровни прослушиваемых программ также существенно влияют на восприятие качества звучания. Для систем категорий HI-FI и High End уровень громкости звука для прослушивания фрагментов должен быть близок к уровню громкости живой речи и музыки для типичного расположения слушателя при живом исполнении. Для аппаратуры более низких классов допускается прослушивание на более низких уровнях. Поэтому в рекомендации МЭК указываются уровни 60 дБ, 75 дБ и 80...90 дБ.

**Подбор экспертов.** Надежность современных методов слуховых экспертиз в значительной степени определяется составом и степенью подготовленности экспертов. Эксперт - это подготовленный слушатель, не имеющий дефектов слуха, способный оценить звучание с разумной точностью и в объективных выражениях (упругие низы и божественные верхи объективными выражениями не являются).

Требования к экспертам в публикации МЭК: порог слышимости у них должен быть не более 20 дБ в диапазоне частот от 125 до 8000 Гц, дифференциальный порог слуха к изменению сигнала частотой 1000 Гц - не более 3 дБ. Выбор слушателей для проведения конкретных экспертиз зависит от целей испытаний и должен проводиться из тех групп, на которые рассчитана данная аппаратура.

Соотношения между способностью правильно оценивать качество воспроизводимого звука и количеством факторов, обуславливающих эту способность достаточно сложны. В этой ситуации единственным надежным руководством при составлении групп является предварительный отборочный эксперимент. Существует комплекс тестов для проверки разрешающей способности экспертов к оценке нелинейных и частотных искажений, их кратковременная музыкальная память и т.д. В исследовательском центре университета штата Теннесси США разработана методика обучения экспертов.

В конечном итоге от степени подготовленности экспертов, их опыта и музыкальных вкусов во многом зависит достоверность тестирования.

Выбор метода экспертной оценки качества звучания. В подготовке и проведении экспертных оценок выбор метода является одним из самых ответственных этапов. Методы проведения прослушивания могут быть разделены на группы, в зависимости от применяемого звукового образца:

- сравнение с "живым" звуком;
- сравнение со звуком, "эквивалентным живому";
- сравнение со звучанием источника, принятым за образцовый;
- сравнение с изображением звука в памяти эксперта.

Для аппаратуры высокой верности воспроизведения метод сравнения с живым звуком является наиболее информативным, однако, его реализация на практике чрезвычайно трудоемка и дорогостояща (требует привлечения музыкантов, использования концертных залов или студий и т.д.). Поэтому более часто используется заменяющий его метод сравнения со звуком, "эквивалентным живому", который при относительной технической простоте сохраняет достоинства последнего. Метод сравнения с изображением звука в памяти эксперта является достаточно простым и довольно широко распространенным. Он также носит названия "метод абсолютного прослушивания". Основным его недостатком является необходимость привлечения экспертов высокой квалификации (звукорежиссеров, слушателей с большим опытом проведения прослушиваний, хорошо знакомых с "живым" звуком натуральных источников - имеющих прочно закрепленный в памяти звуковой образ "живого" звука) и недостаточно высокая достоверность экспертопоказаний. Наиболее распространенным с хорошо разработанной методологией является метод сравнения со звучанием источника, принятый за образцовый (метод парных сравнений), который закреплен многими рекомендациями МЭК. Для бытовой звуковоспроизводящей аппаратуры в них предусматривается проведение парных сравнений с использованием шкалы оценок (в баллах): "плохо" (0-2); "посредственно" (2-4); "удовлетворительно" (4-6); "хорошо" (6-8); "превосходно" (8-10). Процедура парных сравнений предусматривает поочередную подачу одного и того же музыкального фрагмента на испытуемое изделие и образец. При этом каждому звучанию эксперты дают оценку по десятибалльной шкале.

Для профессиональной аппаратуры основной критерий оценки - отсутствие и или незаметность ухудшения звучания испытуемым изделием. При этом возможно использование пятибалльной шкалы оценки ухудшения качества звучания:

Качество	Ухудшение
5. Превосходное	5. Незаметное
4. Хорошее	4. Заметное, но не раздражает
3. Посредственное	3. Слегка раздражает
2. Низкое	2. Раздражает
1. Плохое	1. Очень раздражает

Также используется семибалльная шкала сравнительных оценок: +3 - значительно лучше, +2 - лучше, +1 - незначительно лучше, 0 - равноценно, -1 - незначительно хуже, -2 - хуже, -3 - значительно хуже. Прослушивание ведется по аналогичной схеме: используются повторяющиеся фрагменты тестовой программы, которые подаются через испытуемое изделие или в обход его (то есть сигнал проходит "ухудшение" или подается в исходном виде).

Серьезное внимание необходимо также уделять методам обработки экспертопоказаний (на основе методов корреляционного, факторного и кластерного анализа), что позволяет увеличить статистическую достоверность и значимость результатов.

**Требования к эталонному звуковоспроизводящему тракту.** Аппаратура, входящая в эталонный звуковоспроизводящий тракт, должна иметь параметры, обеспечивающие возможность прослушивания испытуемого изделия во всем диапазоне частот с максимальным динамическим диапазоном и минимально возможными искажениями. Аппаратура должна включаться в тракт через автоматическое коммутирующее устройство, обеспечи-

вающее коммутацию тестируемого и эталонного источника как минимум на четыре различных усилителя мощности с четырьмя парами акустических систем в любой последовательности в ручном и автоматическом режиме при использовании любого источника программ.

Последнее требование необходимо, чтобы минимизировать влияние интерфейсных искажений между усилителем мощности и акустической системой.

Мной была проведена экспертная оценка доработанного усилителя методом абсолютного прослушивания в специально подготовленной комнате с привлечением двух профессиональных музыкантов и трех подготовленных слушателей, часто посещающих симфонические концерты и выставки аудиоаппаратуры в Москве. Все они дружно отметили необычайно точное воспроизведение всех типов инструментов приведенных в рекомендации МЭК № 268, и великолепное пространственное впечатление от их звучания очень похожее на живое исполнение. Единственным замечанием была недостаточная громкость звучания больших ударных инструментов, что объясняется не достаточной выходной мощностью усилителя (120 Вт в пике на нагрузке 4 Ома).

Так же мной проведена экспертиза методом парных сравнений, при этом использовались такие усилители как NVA AP30, Harman-Kardon HK 610, Sony TA-FA50ES. При этом почти все привлеченные эксперты отдали предпочтение описываемому усилителю, а их привлекалось более 20 человек.

В заключении хотелось бы отметить, что подготовленный радиолобитель, руководствуясь данной статьей, вполне в состоянии собрать себе усилитель, по качеству звучания не уступающий лучшим зарубежным образцам в стоимостной группе до 1000-1200\$, затратив на его изготовление всего 40\$ (20\$ из них уйдут на покупку Амфитона У-002 и 20\$ на детали) и две недели работы. При этом усилитель не критичен к регулировке и не требует подбора элементов. Также возможно дальнейшее совершенствование описанного усилителя за счет использования более современной элементной базы, увеличения мощности источников питания, повышение линейности усилителя напряжения. Также учитывая дешевизну усилителя, возможно построение многополосного усилителя с использованием активных фазолинейных разделительных фильтров на входе и без фильтров в акустических системах, что, несомненно, благоприятно скажется на качестве звучания, так как будут почти исключены искажения группового времени запаздывания, возникающие во всех акустических системах.

## Список литературы

1. Суров. М. А. Исследование слухового восприятия и процессов обработки звуковых сигналов в слуховой системе человека с целью создания объективных методов оценки искажений АРЭБ. Техн. Отчет ВНИИРПА им. А. С. Попова № 81/79, гл. 1.
2. Справочник. Интегральные схемы: операционные усилители. Том 1. - М.: Физматлит, 1993, 240с.
3. Аксёнинко А. Г., Коломбет Е. А., Стародуб Г. И. Применение прецизионных аналоговых ИС.- М.: Сов. Радио, 1980.-244 с.
4. Colloms M. The sound of Amplifiers -HI-FI.- News & Record Review, 1985, № 5, p. 39-49.
5. П. Шритек. Справочное руководство по звуковой схемотехнике. Пер. с нем. - М.: Мир, 1991.-446с.
6. Агеев С. Сверхлинейный УМЗЧ с глубокой ООС. - Радио, 1999, №10 с. 15-17.

7. Сухов Н. К вопросу об оценке нелинейных искажений УМЗЧ. - Радио, 1989, №6 с. 54-57.
8. Bennett W. Spectra of Quantized Signals. Bell System Techn. Journal. 1948, n.3.
9. А. Абрамов, Н. А. Цыбина. Искажения при цифроаналоговом преобразовании звуковых сигналов - "Техника средств связи" сер. Техника радиовещательного приема и акустики, 1983 г. вып 1
10. Алдошин И. А, Мельберг Д. А. Задачи отраслевого центра экспертной оценки качества звучания в развитии современной звуковоспроизводящей аппаратуры. - "Техника средств связи" сер. Техника радиовещательного приема и акустики, 1986 г. вып 1.

Мне хотелось бы знать мнение читателей об описанном усилителе. Все желающие получить консультацию по регулировке усилителя, могут связаться с автором статьи по e-mail: [m\\_v\\_a@mail.ru](mailto:m_v_a@mail.ru)

**Автор:** Владимир Мещеряков