

Усилитель для головных телефонов с бинауральным эффектом

(правка №4)

Бинауральный эффект (от лат. *bini* – пара, два и *auris* – ухо), способность человека и животных определять, в каком направлении от них находится звучащее тело, обусловленная наличием у них 2 звукоприёмников — ушей.

Большая советская энциклопедия

Введение

Авторы поставили перед собой задачу разработать схему усилителя для головных телефонов, который с одной стороны обладает высоким качеством воспроизведения музыкального материала, с другой стороны позволяет приблизить звуковую картину к той, которую создают акустические системы.

Для достижения поставленной цели было решено синтезировать схему на базе ОУ без общей петли ООС, введя бинауральный преобразователь стерео-сигнала для эмуляции окружающего пространства.

Теория

Базирующаяся на взаимном влиянии каналов эмуляция окружающего пространства была описана на сайте Meier Audio (статья Corda-NA1, автор Jan Meier) [2]. Эмуляция необходима для того, чтобы слушатель, использующий головные телефоны, не терял три важных механизма, вполне обычных для слушателя АС:

- каждое ухо получает звуковую информацию от обеих стерео АС (и от левой, и от правой), причем сигнал от «противоположной» АС достигает уха с задержкой;
- звуковые волны частично отражаются и частично поглощаются головой (в частности ушной раковиной) слушателя, что придает звуку «окраску»;
- звуковые волны, отраженные от стен помещения, также достигают уха слушателя.

В результате, звуковая сцена для слушателя АС складывается из разниц в уровнях звука, временах задержки (для стерео систем), окраски.

Для локализации источника звука человеческий мозг использует частоты до 3 кГц, поэтому при разработке бинаурального преобразователя допустимо реализовать частотнозависимую задержку «противоположного» канала.

Задержка может быть получена введением параллельно соединенных конденсатора и резистора в прямой тракт звукового сигнала. Так как такое

решение искажает АЧХ «противоположного» канала, желательно добавить параллельный RCR-фильтр для субъективного улучшения передачи НЧ.

Выбор элементной базы

В настоящее время идея построения схемы усилителя для наушников на базе мощных ОУ не нова и достаточно подробно рассматривается как в литературе, так и в открытых источниках в сети Интернет.

Современная промышленность предлагает широкий выбор приборов для построения подобных схем, в частности, отдельного внимания заслуживают широкополосные драйверы линий. Например, это приборы AD815 (от *Analog Devices*), LT1210 (от *Linear Technology*) и THS6012 (от *Texas Instruments*).

К сожалению, несмотря на впечатляющие параметры, приведенные в технической документации, прибор AD815 не показал удовлетворительных результатов при прослушивании: звук достаточно детальный, но холодный, причем результат повторяется вне зависимости от схемотехнических решений. Приборы от *Linear Technology* и от *Texas Instruments* имеют сходные паспортные характеристики, однако THS6012 обладает большей широкополосностью и высокой линейностью вплоть до частот мегагерцового диапазона. Выбор, сделанный в пользу этого прибора, полностью оправдался при прослушивании. Можно уверенно охарактеризовать звучание THS6012 как мягкое, тёплое, без потери детализации.

Описание принципа функционирования

Схема электрическая принципиальная усилителя головных телефонов с бинауральным преобразователем приведена на *рис. 1*.

Выходной каскад устройства выполнен на широкополосном высокоскоростном ОУ THS6012 с токовой обратной связью в неинвертирующем включении. Местная обратная связь обеспечивает коэффициент усиления равный единице. Каскад предварительного усиления выполнен на высоколинейном ОУ AD823 с полевым входом, он же определяет общий коэффициент усиления схемы, равный примерно 15 дБ, что на практике более чем достаточно для большинства головных телефонов.

Резисторы R9(3) совместно с R10(4) задают коэффициент усиления первого каскада по переменному току. Отрицательная обратная связь по постоянному току замыкается через R8(11) и охватывает все каскады усиления. Сверху номинал этих резисторов ограничен входным током AD823; входной ток помноженный на номинал даст итоговое смещение на выходе. Ввиду того, что в данной схеме применён операционный усилитель с полевым входом, можно использовать значение порядка 1 Мом. Номиналы неполярных конденсаторов C3(4) определяются также, как для

случая обычного усилителя, но в расчетах необходимо оперировать не сопротивлением R_9 , а R_8 , т.е. $F_{\text{нижн}} = 1/(2\pi R_8 C_3)$. Следовательно, принимая во внимание $R_{11} = 1 \text{ МОм}$, можем заключить, что два встречно включенных конденсатора по 10 мкФ (или 4.7 мкФ неполярный) в данном применении прекрасно подойдут. При этом переменное напряжение на обкладках конденсатора в области звуковых частот измеряется милливольтами. А значит, влияние этого конденсатора очень мало, не обязательно использовать элитный электролитический конденсатор. В авторском макете прекрасно зарекомендовали себя конденсаторы Rifa PHE426 емкостью 1 мкФ. Однако стоит отметить, что применение неполярных электролитических конденсаторов (4.7 мкФ) не показало ощутимой деградации звука.

Бинауральный преобразователь, состоящий из звеньев C_5 , R_{14} , R_{15} (C_8 , R_{18} , R_{19}) и звена C_6 , R_{12} , R_{16} , функционирует таким образом, что задержанный сигнал частично попадает в основной канал из «противоположного». Разделение петель ООС по постоянному и переменному току позволило разместить схему смешения каналов между предусилителем и выходным каскадом, тем самым изолировав ее от цепей регулятора громкости со стороны источника сигнала и от низкоомной нагрузки — со стороны выхода. Общая линейность схемы от этого практически не пострадала, благодаря высокой линейности и перегрузочной способности выходного каскада на THS6012.

В качестве регулятора громкости рекомендуется использовать переменный резистор ALPS серии RK18. Входные и выходные цепи устройства защищены фильтрами нижних частот для подавления высокочастотных помех.

Для питания входного и выходного каскадов устройства необходимо постоянное напряжение 13-15 вольт. Такой диапазон выбран не случайно. Нижняя граница соответствует наиболее мягкому тепловому режиму, при котором выходной ОУ прекрасно работает без радиатора. Верхняя граница (вблизи максимального напряжения для выбранного ОУ) позволяет немного улучшить качество звучания, однако требует наличия грамотно сконструированного теплоотвода.

Для получения указанных напряжений можно предложить вариант блока питания, использованный в авторском экземпляре, схема которого представлена на *рис. 2*.

Схема построена на базе малошумящего стабилизатора напряжения M5230L фирмы Mitsubishi, после которого установлены умощняющие транзисторы 2sc4793 и 2sa1837 в изолированных корпусах. Напряжение на положительном выходе стабилизатора будет вычисляться по формуле:

$$+V_{\text{out}} = V_5 * (1 + (R_{35}/R_{36})),$$

где V_5 - это напряжение на 5 выводе стабилизатора M5230L, определяемое резистивным делителем.

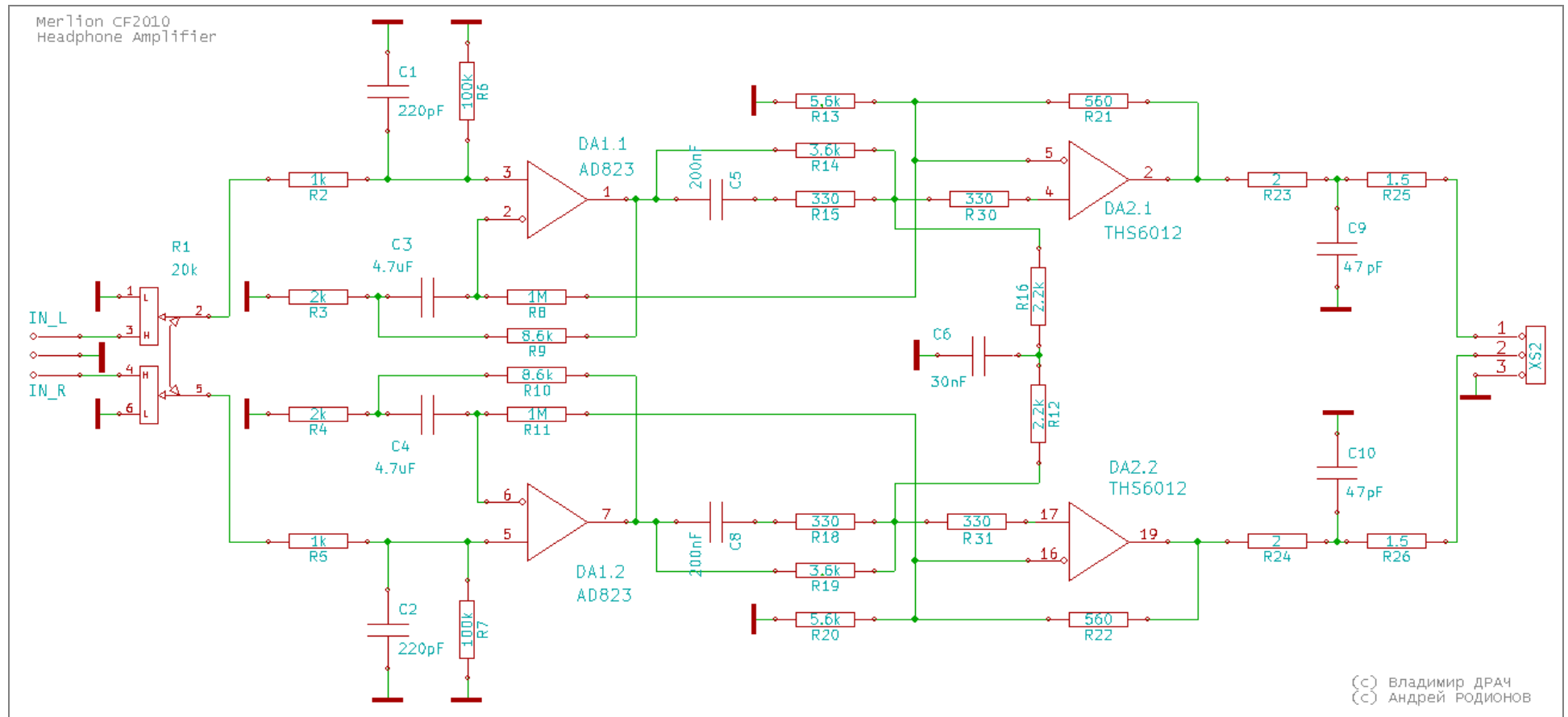


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная усилителя



Тогда для приведенного на *рис. 2* варианта:

- $R_{35} = 10 \text{ k}$
- $R_{36} = 1,8 \text{ k}$
- $+V_{\text{out}} = +11,8 \text{ V}$

Если требуется поднять напряжение питания до $+V_{\text{out}} = +13,8 \text{ V}$, то следует принять:

- $R_{35} = 10 \text{ k}$
- $R_{36} = 1,5 \text{ k}$.

Питание на предварительный каскад подается через низкоомные резисторы для снижения возможных помех.

Выпрямитель построен на быстродействующих диодах Шоттки, имеющих низкое время переключения, что благоприятно сказывается на спектре генерируемых помех. Для разрыва «земляной петли» запитывать указанный блок питания рекомендуется от трансформатора, имеющего две независимые обмотки – такие несложные меры весьма ощутимо сказываются на качестве звучания всей системы в целом. Например, в авторском макете был применён трансформатор ТП-114-K65, изготовленный компанией ТрансЛед, который позволяет получить $\sim 14\text{V}$ на вторичных обмотках.

В качестве альтернативного варианта можно рекомендовать построение блока питания на базе стандартных стабилизаторов LM317/LM337.

Типы элементов

Примененные типы элементов и возможные замены приведены в *таблице 1*.

Таблица 1

Позиционное обозначение	Рекомендуемый тип и номинал	Возможная замена
DA1	AD823	AD8620 (два AD8610), AD8066, OPA2134
DA2	THS6012	TPA6120
VT1, VT2	2SC4793 и 2SA1837	BD139 и ИВ140
C1, C2, C9, C10	Wima FKP2	NP0
C3, C4	1..10 μF , Rifa PHE426	МКР, Неполярный электролитический
C5, C6, C8	Wima SMD-PET, SMD-PET	K73-17
C16-21	Nichicon KZ	Panasonic Pureism, Elna Cerafine и под.
C22-27	0,1 мкФ, NP0	От 0,01 мкФ
R1	ALPS RK18	ALPS RK20

Все типы элементов являются рекомендуемыми и могут быть заменены по желанию на аналогичные. Тем не менее, при выборе аналогов стоит придерживаться некоторых общих рекомендаций.

Замена DA2 на микросхему TPA6120 возможна ввиду того, что кристаллы данных микросхем изготавливаются в едином технологическом цикле, после чего разбраковываются согласно полученным параметрам. TPA6120 менее быстродействующая и позиционируется как прибор для аудио-применений.

Замена DA1 предполагает выбор среди немногочисленных ОУ с полевым входом. Это обусловлено тем, что сопротивление в цепи ООС по постоянному току должно быть как минимум на порядок, а лучше - на два

прядка выше, чем соответствующее сопротивление по переменному. В противном случае петли ООС не будут строго разделяться и ООС начнёт вмешиваться в работу бинаурального преобразователя. С другой стороны, входное сопротивление первого ОУ должно также значительно превышать этот резистор, иначе возникнет паразитный делитель, уменьшающий глубину ООС на постоянном токе. Более того, смещение со стороны входа при этом начнёт усиливаться. С третьей стороны входные токи смещения ОУ будут выделяться на резисторе ООС и образовывать неустраняемое постоянное смещение. В итоге, комплексу предъявляемых требований удовлетворяют только ОУ со входом на полевых транзисторах. Возможно, в ассортименте современных ОУ есть подходящие и с входом.

Переменный резистор можно выбирать любой в диапазоне 5 .. 20 кОм. Хорошо себя зарекомендовали изделия Bourns.

При выборе шунтирующих конденсаторов С22-27 следует выбирать быстродействующие конденсаторы с минимальными собственными искажениями, имеющие максимальную доступную ёмкость – 0,1 мкФ или более. Например, можно рекомендовать конденсаторы NP0 фирмы Murata, серия GRM31.

Авторский вклад

Отличительной особенностью предложенного схемотехнического решения — является использование мощного телекоммуникационного ОУ на выходе, охваченного петлей ООС по постоянному току, которая в то же время разорвана по переменному. Это позволяет защитить входной каскад от проникновения помех, наводимых на длинный телефонный провод, сохранив хорошие параметры по постоянному току. Кроме того, расположение бинаурального преобразователя после главного каскада усиления по напряжению снижает долю вносимых преобразователем шумов и искажений, т.к. они уже не усиливаются. В то же время, стабильное низкое выходное сопротивление первого каскада на ОУ изолирует бинауральный преобразователь от регулятора громкости, что позволило применить схему преобразователя полностью на пассивных элементах.

Отличие примененной схемы бинаурального преобразователя [2] от других известных решений [1], в том, что вносимая задержка сигнала плавно спадает при росте частоты. Это несколько снижает реализм звучания, но позволяет избежать эффекта гребенчатого фильтра, который свойственен схемам с постоянной задержкой. Примененные для внесения задержки фильтры первого порядка по определению фазолинейны, что также положительно влияет на восприятие музыки. В этом смысле, по мнению авторов, лучше частично пожертвовать иллюзией бинаурального звука, чем слышать в наушниках артефакты.

На наш взгляд, задача истинного бинаурального прослушивания в телефонах, при наличии только двух каналов в исходной стерео-записи, не решена, и вряд ли будет решена в обозримом будущем, слишком много параметров отвечает за пространственное представление звука. Одним из вариантов создания реалистичного бинаурального эффекта является

запись музыкального материала в специальных условиях, которые сразу учитывают особенности человеческого восприятия (но в нашей статье подобные материалы не рассматриваются ввиду их исключительной редкости). Однако, на наш взгляд, в предложенном усилителе достигнут разумный компромисс между отсутствием окраски, вносимой преобразователем и снижением утомляемости при прослушивании, эффекта "музыкальной шляпы". В то же время, предложенная конфигурация обратных связей в усилителе позволяет без ущерба адаптировать схему к другому бинауральному преобразователю, как на активных, так и на пассивных элементах.

И, наконец, можно добавить, что предложенную схему можно рассматривать и как обычный усилитель для наушников (без бинауральной компоненты), тогда можно смело утверждать, что полученное устройство великолепно передаёт музыкальный материал, превосходя по качеству известные схмотехнические решения с общей ООС, с двумя петлями ООС [4] и с серво-цепочкой установки нуля, оказалось, что данное решение, незначительно проигрывая в прозрачности звучания, выигрывает по многим параметрам, из которых основными можно назвать теплоту звучания и музыкальность.

Обсуждение

Тестовое прослушивание проводилось с несколькими источниками и несколькими парами головных телефонов. В частности, использовались Beyerdynamic DT 770 (сопротивление 250 Ом) и Sennheiser HD280 pro (сопротивление 64 Ом). Во всех случаях представленное устройство продемонстрировало ожидаемый результат, его звукопередачу с большой степенью уверенности можно охарактеризовать как прозрачную.

Устройство вполне уверенно управляет низкоомной нагрузкой.

Рекомендуемые номиналы сопротивлений в обвязке мощного ОУ варьируются в зависимости от сопротивления применяемых головных телефонов; так, для нагрузки R_n порядка 100 Ом и ниже можно рекомендовать $R_{21}=R_{22}=820$ Ом, для R_n более 100 Ом $R_{21}=R_{22}=1$ кОм.

Введение взаимного влияния каналов приближает звуковую картину, передаваемую головными телефонами к звуковой картине, которую создают АС в помещении. Звучание головных телефонов перестает раздражать, гораздо комфортнее становится длительное прослушивание. Более того, источники звука локализуются в пространстве, появляется «сцена». Иногда авторы ловили себя на том, что крутили головой (в головных телефонах!) для более точного определения источника звука.

Для иллюстрации принципа функционирования взаимного влияния каналов были построены в симуляторе графики ГВЗ для простого Т-фильтра (рис. 3) и графики выходного напряжения (рис. 4). Напряжение специально представлено в вольтах, для наглядности.

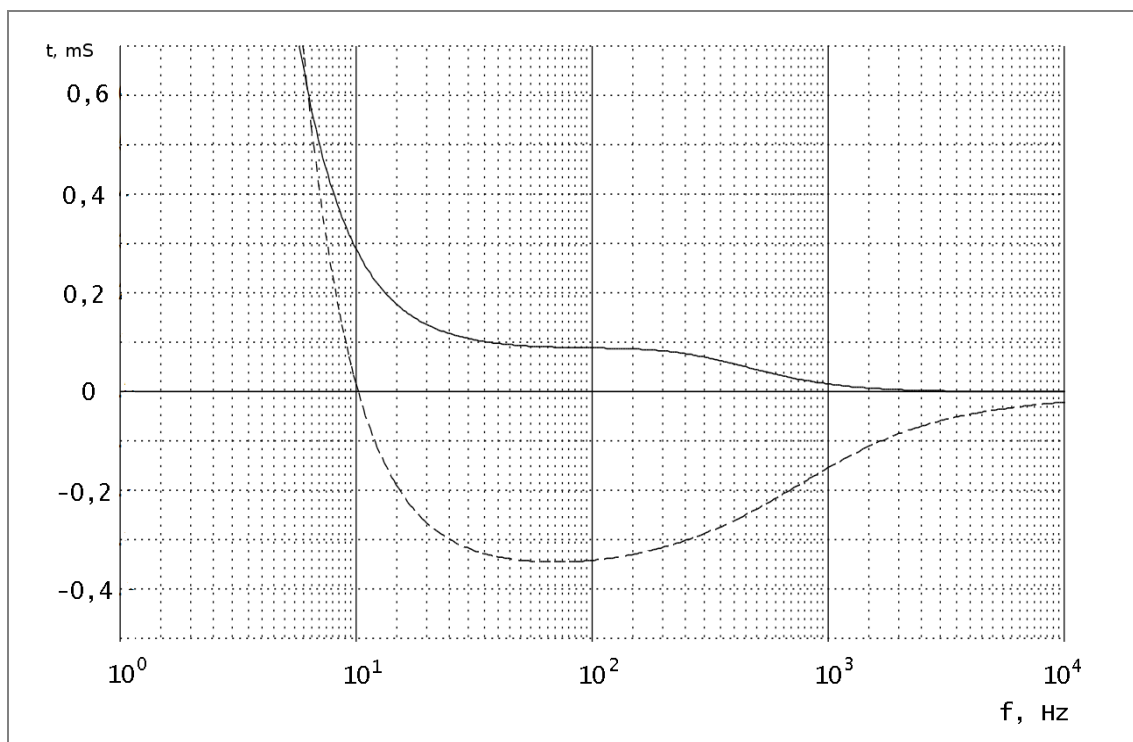


Рис. 3. График ГВЗ для основного и противоположного каналов.

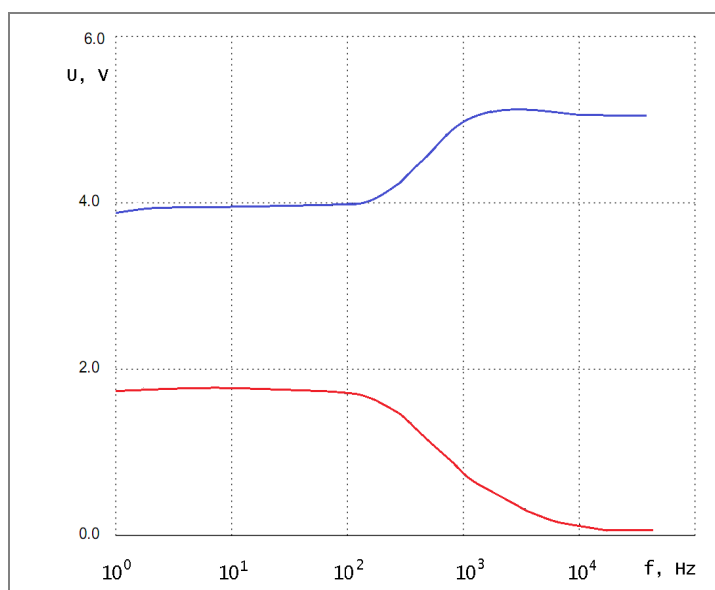
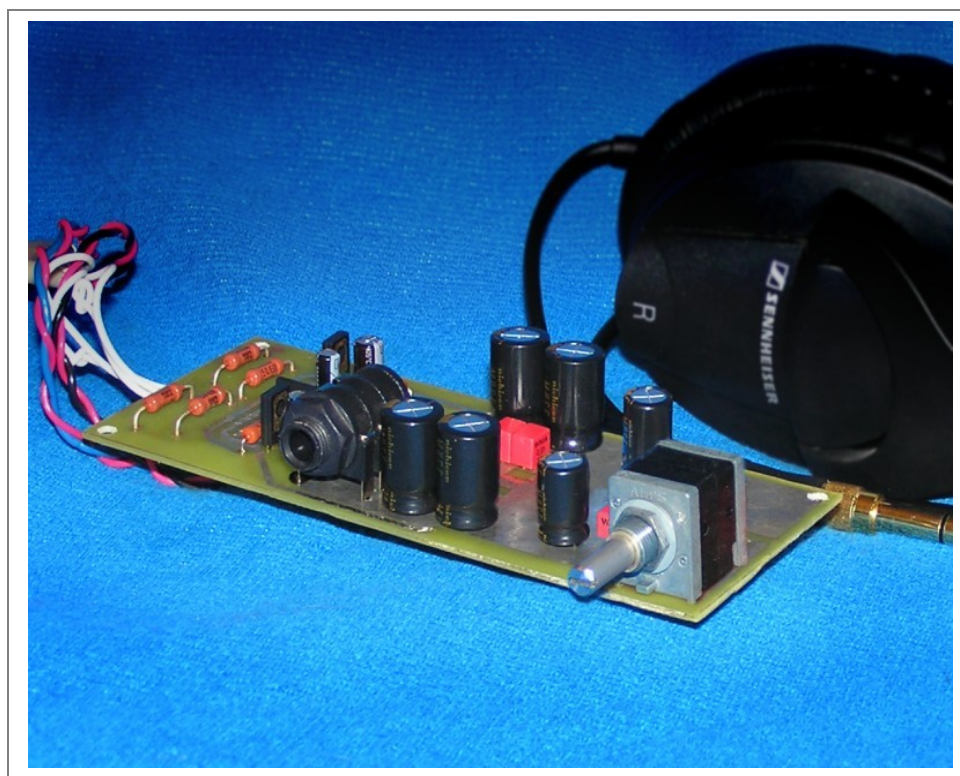


Рис. 4. График напряжения (синим – основной канал, красным – противоположный).

Из графиков можно сделать вывод, что на частотах до ~600Гц, выходной сигнал формируется из 80% основного канала и 40% «противоположного», причем основной канал оказывается сдвинут вперед на 100 мкс, а побочный опаздывает на 350мкс. Итоговая разница составляет 450 мкс. Согласно информации с сайта Meier Audio, такая задержка примерно соответствует АС, расставленным на 30 градусов от центральной оси, на которой находится слушатель. По задержке (450 мкс) и скорости звука в воздушной среде около 340 м/с несложные вычисления показывают, что два канала виртуального источника (виртуальные АС) сдвинуты на расстояние примерно 0.15 м относительно одного приемника звука (одного уха слушателя). Субъективно, виртуальный источник находится на расстоянии 1,5 – 3 м от слушателя. Но в любом случае он «выносится» из головы слушателя на комфортное расстояние.

В авторском макете в качестве С5, С6 и С8 применены бескорпусные конденсаторы для SMD-монтажа фирмы Wima. Однако, были опробованы отечественные выводные конденсаторы типа К73-17, которые показали незначительное субъективное изменение звучания. В настоящее время авторы не готовы давать однозначные рекомендации.



*Рис. 5. Слушать подано!
Внешний вид авторского макета усилителя*

Опыт прослушивания позволил сделать вывод, что, по-видимому, выбор номиналов С5, С8 и С6 является субъективным вопросом. В общем случае, значения С5 (С8) лежат в диапазоне 100-200 нФ, причем увеличение емкости соответствует ослаблению связи между каналами. Однако, это может потребовать пересчета R14, R19.

Номинал С6 лежит в диапазоне 20-50 нФ и определяет частотозависимую связь каналов. При выборе значения С6 не следует ожидать увеличения баса, необходимо обращать внимание только на субъективную натуральность передачи НЧ при использовании бинаурального преобразователя.

Внешний вид платы печатной усилителя в сборе представлен на рис. 5.

Рекомендации по воспроизведению музыки

Бинауральный эффект, реализуемый представленным устройством, будет наблюдаться на любых музыкальных записях. Однако, необходимо отметить, что наиболее полно пространственный эффект будет проявляться в том случае, если учтены две составляющие:

- используется достоверный источник сигнала
- высококачественная запись, на которой видна хорошая работа звукорежиссера.

Для выполнения первого пункта, авторы рекомендуют в качестве источника хороший проигрыватель компакт-дисков, а если музыка хранится на компьютере, то внешний ЦАП и формат исходного файла со сжатием без потери качества (например, FLAC или APE).

Что касается второго пункта, необходимы стерео-записи, в которых содержится не только два канала, но и изначально хорошо показана «сцена».

Авторы могли бы порекомендовать некоторые музыкальные композиции из разных музыкальных стилей, позволяющие в полной мере оценить работу бинауральной цепочки.

- Dire Straits - Private Investigations (альбом Love Over Gold) [Vertigo Records]
- Pink Floyd - Time (альбом The Dark Side Of The Moon (Black Triangle)) [Harvest, EMI]
- Yello – The Race (альбом Flag) [Fontana]
- Enigma – Mea Culpa (альбом MCMXC a.D.) [Virgin]
- Scorpions - Are You The One? (альбом Pure instinct) [EastWest Records]
- Scorpions – Eye II Eye (альбом Eye II Eye) [EastWest Records]
- Nightwish - Beauty Of The Beast (альбом Century Child) [Spinefarm]
- Vivaldi - Recitative and Aria from Cantata RV 679 - Che giova il sospirar, povero core - [2L Audiophile Reference Recordings, 192 кГц / 24бит]

Последний пример интересен ещё и тем, что распространяется в Интернете свободно [3].

Творчество Pink Floyd и Dire Straits настолько хорошо подходит в качестве иллюстрации из-за сложности музыкального материала и высочайшего качества записи, что действительно затруднительно выбрать только одну композицию.

Удивительным образом бинауральный эффект проявляется на композиции Scorpions – Born To Touch Your Feelings. Вторая часть указанной композиции является оригинально прописанным проигрышем, в который вплетаются несколько женских голосов. Включение и отключение бинауральной цепочки на данном музыкальном фрагменте позволяет почувствовать всю многогранность описываемого явления.

К сожалению, приходится констатировать факт, что современные стерео-записи вряд ли можно назвать пригодными для демонстрации бинаурального эффекта. Зачастую, звукорежиссеры гонятся за уровнем звукового давления, чрезмерно применяя компрессию, и не обращают внимания на другие аспекты.

Выводы

Макет представленного устройства продемонстрировал великолепное звучание. Без звеньев взаимного влияния каналов устройство может быть использовано как обычный усилитель головных телефонов высокой достоверности с комфортным звучанием. Применение звеньев взаимного влияния каналов позволяет «выдвинуть» звуковую сцену из центра головы вперед, практически приближая построение звуковой картины головными телефонами к звуковой картине помещения с АС. Таким образом гарантировано снимается проблема усталости при прослушивании музыки через головные телефоны.

В заключение хотелось бы поблагодарить наших родных и близких за поддержку и терпение, а также всех, кто помогал и советами, и критикой.

Приятного прослушивания!

Литература

1. Функциональные узлы усилителей высококачественного звуковоспроизведения / Д. И. Атаев, В. А. Болотников. - М. : Радио и связь, 1989. - 144 с
2. Интернет-страница Jan Meier
<http://www.meier-audio.homepage.t-online.de/headamp.htm>
3. Интернет-страница Lindberg Lyd
<http://www.2l.no/>
4. Jung W. Composite Line Driver With Low Distortion // Electronic Design Analog Application – 1996. – P.78-80