

# Электрическое демпфирование акустической системы для воспроизведения оркестровой музыки

А.В. Крамаренко

*Для успеха любого дела: знать в десять раз больше, чем нужно в настоящий момент, и никогда не пренебрегать мелочами.*

*Академик Юлий Харитон.*

К настоящему времени, насколько я могу судить, в области звуковоспроизведения сложилась парадоксальная ситуация. При очень хороших характеристиках усилителей и акустических систем даже средней ценовой категории есть немалое количество потребителей, которые не удовлетворены результатом. Причем всех пользователей можно условно разделить на четыре группы.

Первая: «Не морочьте голову: если установка прекрасно воспроизводит электронную музыку, современные эстрадные и вокальные исполнения, то какого черта вам еще нужно? Симфонический оркестр ничем не отличается от других источников музыкального сигнала, и если вам не нравится его звучание, то предъявляйте претензии звукорежиссерам, а не производителям акустических систем и усилителей».

Вторая группа «свидетелей теплого лампового звука» убеждена, что кроме ламповой техники, ничто не может приблизиться к идеалу, причем идеал недостижим в принципе.

Третьи убеждены, что только посеребренные провода, соединяющие усилитель с колонками, могут спасти положение. При этом источники питания должны быть по определению шедевром, монтаж усилителя должен быть навесным, а его цена должна начинаться от десяти тысяч долларов.

Четвертые небрежно замечают: «Нужен ламповый звук, хорошая сцена и высокая верность тембра инструментов? Подключи последовательно с динамиками резисторы в 2 Ома и получи то, что тебе хотелось. Недостаточно? Включи обратную связь через трансформатор».

Есть еще и многочисленная пятая супергруппа с неубиенным аргументом типа «на западе не дураки, и если у тебя продвинутая техника, а ты недоволен, то прочисть уши».

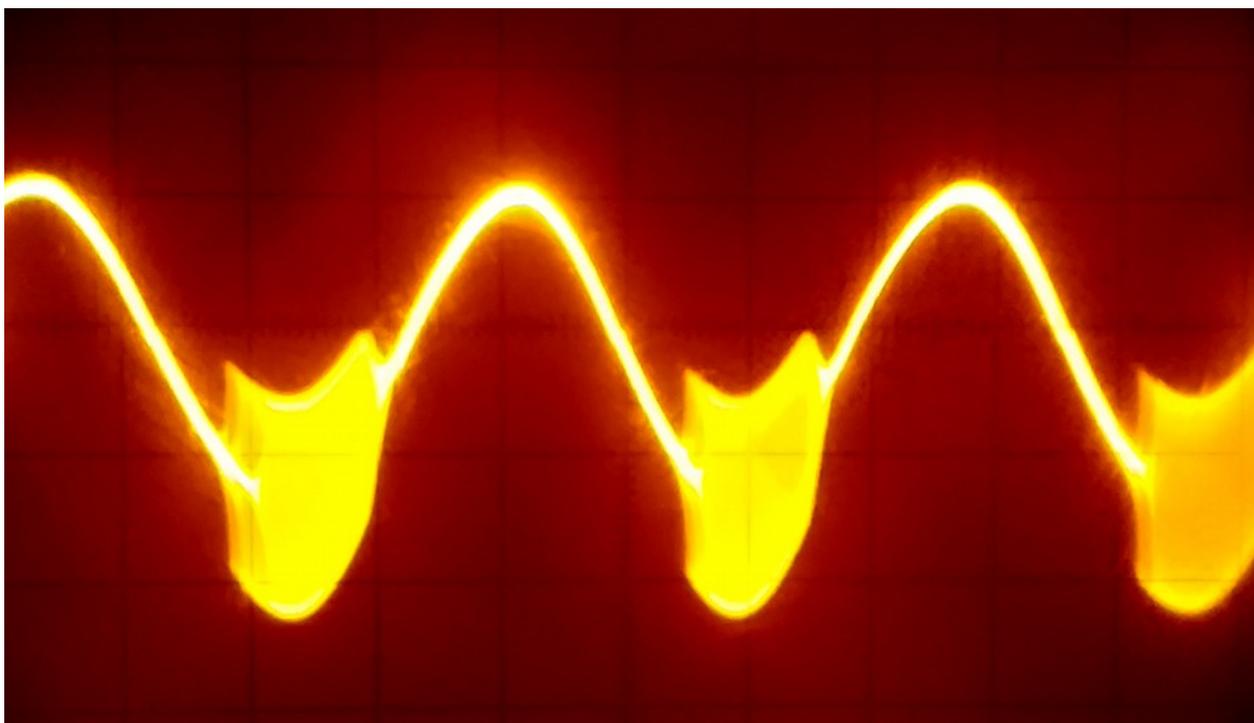
Возможно, все эти рассуждения есть обычная флуктуация в социальных структурах вроде поклонников только «Ягуара», и ни каком случае не «Мерседеса». Или наоборот. Но если для разнообразия поинтересоваться мнением профессиональных музыкантов, то замечания к современной звуковоспроизводящей аппаратуре у них все-таки есть, причем недостатки отмечаются при воспроизведении оркестровой музыки, чаще именно симфонического или камерного оркестра. Предпочтение ламповых усилителей тоже встречаются среди профессионалов с абсолютным слухом и большим опытом. Но музыканты, увы, не могут формализовать свои возражения, и обычно замечания выглядят так: «...а вот в этом фрагменте что-то не то» или «тускло звучит первая скрипка». Разумеется, перевести эти замечания на язык, понятный инженеру, практически невозможно...

Попробуем, однако, решить задачу верности воспроизведения оркестровой музыки не эмпирическим радиолюбительством, а методом, который применяется для работы в условиях дефицита информации и высокой неопределенности входных данных. Т.е. каждую гипотезу, соответствующую критерию Оккама, будем подтверждать экспериментально. И двигаться шаг за шагом, не пытаясь получить все и сразу.

Итак, для начала возьмем аппаратуру бюджетного класса и начнем проверку. Все работает, АЧХ близка к заявленной, мощность тоже, но есть какое-то непонятное всхлипывание в области высоких частот. Если использовать как «бумбокс», то вроде бы,

даже и неплохо, а вот с оркестром явный дискомфорт. Разбираем, критически оглядываем китайскую сборку, и видим: на высокочастотных головках висят электролитические конденсаторы. В количестве одной штуки на один динамик (!). Оказывается, рационализаторы водятся не только у нас, и китайский оптимизатор себестоимости тоже не теряет времени даром. Заменяем конденсаторы на неполярные.

Похрюкивание на высоких частотах, понятное дело, исчезает. Но все равно остается какая-то грязь, непонятная муть в среднечастотном диапазоне. Продолжаем проверку и записываем осциллограммы на выходе усилителя при работе на активную нагрузку – все в порядке, монохроматический сигнал пристойно выглядит во всем частотном диапазоне и при всех уровнях мощности. Включаем штатные акустические системы, и... ненормативная лексика льется свободным потоком, перемежаясь полной нецензурщиной. Смотрим: на осциллограмме явное ультразвуковое возбуждение усилителя, обусловленное работой обратной связи.



*Рис.1. Осциллограмма сигнала на выходе УМЗЧ. Возбуждение на ультразвуке.*

Очевидно, что реактивные компоненты полного сопротивления акустических систем обуславливают импульсы обратного тока, длительность которых сопоставима со временем задержки ООС. Таким образом, имеется классическое фазовое запаздывание в контуре управления, ну и, как следствие, возбуждение. Так как весь процесс идет на ультразвуковых частотах, то его не слышно, но искажения на средних и низких звуковых частотах тоже появляются – именно они и создают акустический дискомфорт.

Устраняем безобразие и проверяем весь комплект «на слух». Получаем типичный стандартный непрозрачный «транзисторный» звук с полностью «потерянной» сценой. Причем, как и ожидалось, эстрадная фонограмма воспроизводится вполне пристойно, а вот с камерным и симфоническим оркестрами - проблемы.

Попробуем выяснить причину. Примем также к сведению, что существуют специальные программы для оценки качества усилителей. В результате их работы получается весьма детализированный спектр с высоким разрешением по частоте и обнаружением паразитных составляющих до -100дБ и менее. Но при этом нередко усилитель с формально худшими параметрами звучит субъективно лучше. В таком случае проверка аппаратуры только с помощью характеристикографа и/или спектроанализатора может быть бесперспективной. Так как система заведомо лучше работает с монохромными, чем с музыкальными сигналами.

Оценим звук оркестра, который необходимо воспроизводить. Это широкополосный сигнал (покрытие по частоте до трех порядков), модулированный по частоте и амплитуде (до 80дБ и более), и представляющий собой аддитивную смесь опять же модулированных сигналов множества различных музыкальных инструментов. Так как инструменты работают синхронизировано, то сумма их звуков представляет собой очень сложную суперпозицию, дающую выбросы, огибающая которых может иметь практически любую форму.

Однако для анализа звуковоспроизводящей аппаратуры, в качестве зондирующего, необходим сигнал априори известный. Но, как уже упоминалось, медленно меняющийся синусоидальный сигнал характеристикиста будет недопустимым упрощением, и можно предполагать, что часть дефектов воспроизведения будет пропущена. Например: фиксируем нормальную передачу синусоидальных сигналов во всем частотном диапазоне при максимально допустимом значении сигнала от пика до пика. Но замена синусоиды, скажем, на трапецию, понизит пик-фактор сигнала, и потребная мощность питания возрастет обратно пропорционально его величине. В результате возможны искажения, которые будут гарантированно не замечены при тестировании с монохроматическим сигналом.

Очевидно также, что выбор для локации дельта-импульса или белого ограниченного в полосе гауссова шума потребует корреляционной и спектральной оценки, а это сильно усложнит процедуру исследования. Поэтому хорошим вариантом может оказаться функция Хевисайда – она позволит наблюдать процесс в реальном времени на осциллограмме.

Будем использовать в качестве зондирующего сигнала меандр и выберем реализацию, меньшую длительности его периода. Очевидно, должна наблюдаться картина быстрого подъема луча с последующим экспоненциальным спадом, обусловленным разрядом конденсаторов. Спад может быть не совсем экспонентой, т.к. он зависит еще и от других дифференцирующих цепей в предварительных каскадах, но гладкое асимптотическое приближение к нулю должно быть обязательно.

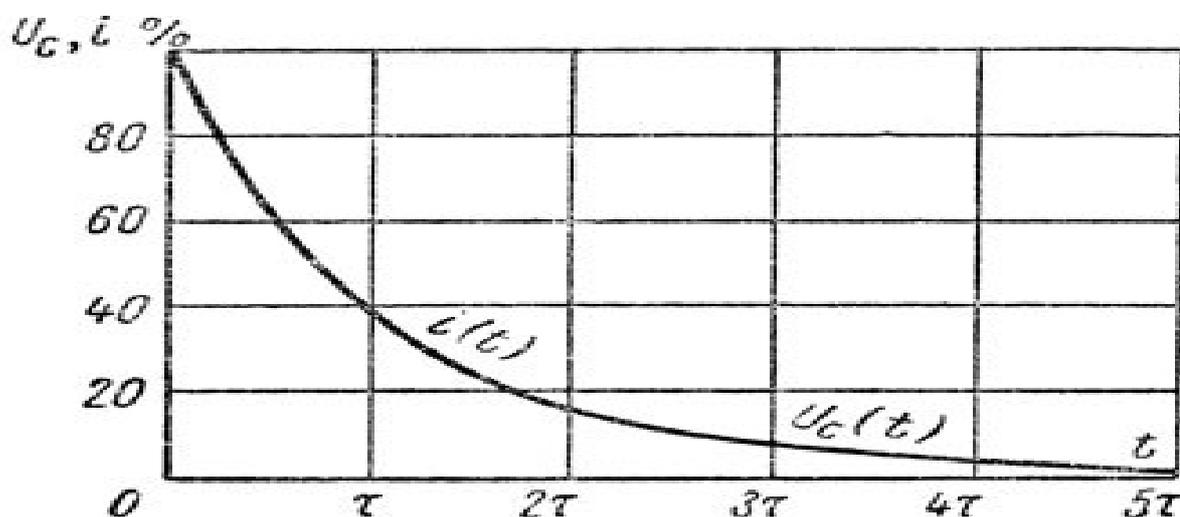


Рис. 2. Ток и напряжение при разряде конденсатора

Теперь проведем эксперимент: подадим меандр на вход усилителя, синхронизируем осциллограф, на верхний луч будем подавать напряжение с входа акустической системы, на нижний луч в инвертированном включении – ток. Такая схема удобна своей наглядностью – получается фактически глазковая диаграмма, в которой расстояние между лучами по оси ординат пропорционально квадратному корню из мгновенной мощности.

Полосу пропускания усилителя ограничим сверху. В соответствии с теорией следует ожидать относительно быстрого подъема, как тока, так и напряжения, а также близкого к экспоненте гладкого спада.

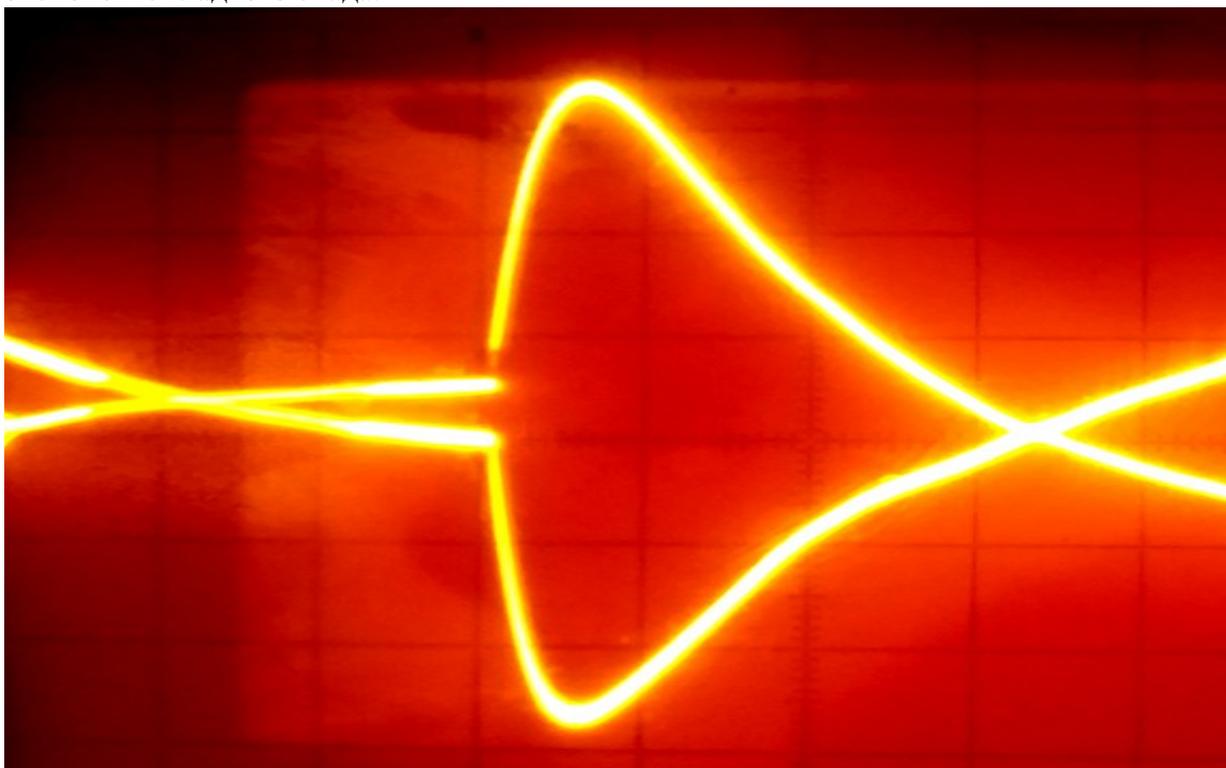


Рис.3. Диаграмма ток/напряжение на входе АС. Нижний луч (ток в цепи) явно отклоняется от гладкого спада. Динамик в штатной АС (NB!).

Предположим, что такое поведение графика тока обусловлено прямым и обратным преобразованием энергии вследствие движения диффузора и катушки. Для проверки этой гипотезы принудительно остановим диффузор и повторим эксперимент.

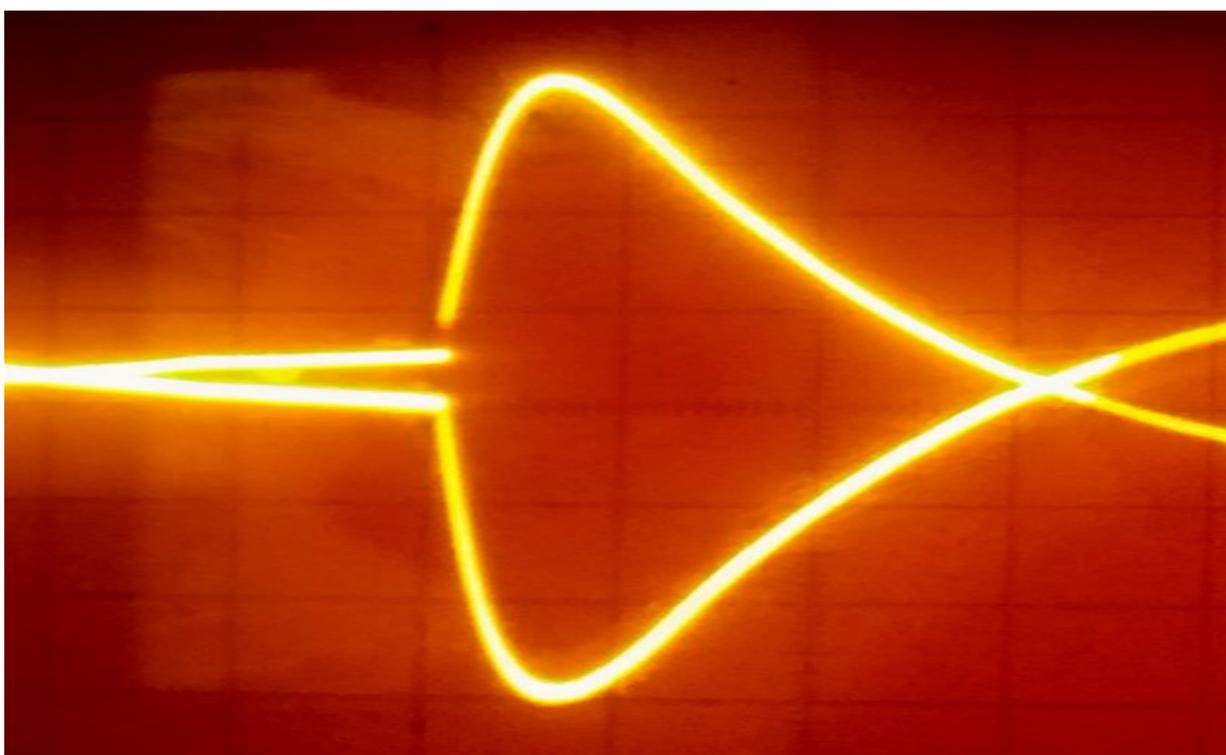


Рис.4. Диффузор остановлен, обратите внимание на график тока

Проведем дополнительное измерение при открытой полосе пропускания усилителя и сравним диаграмму тока/напряжения при свободном и заторможенном диффузоре.

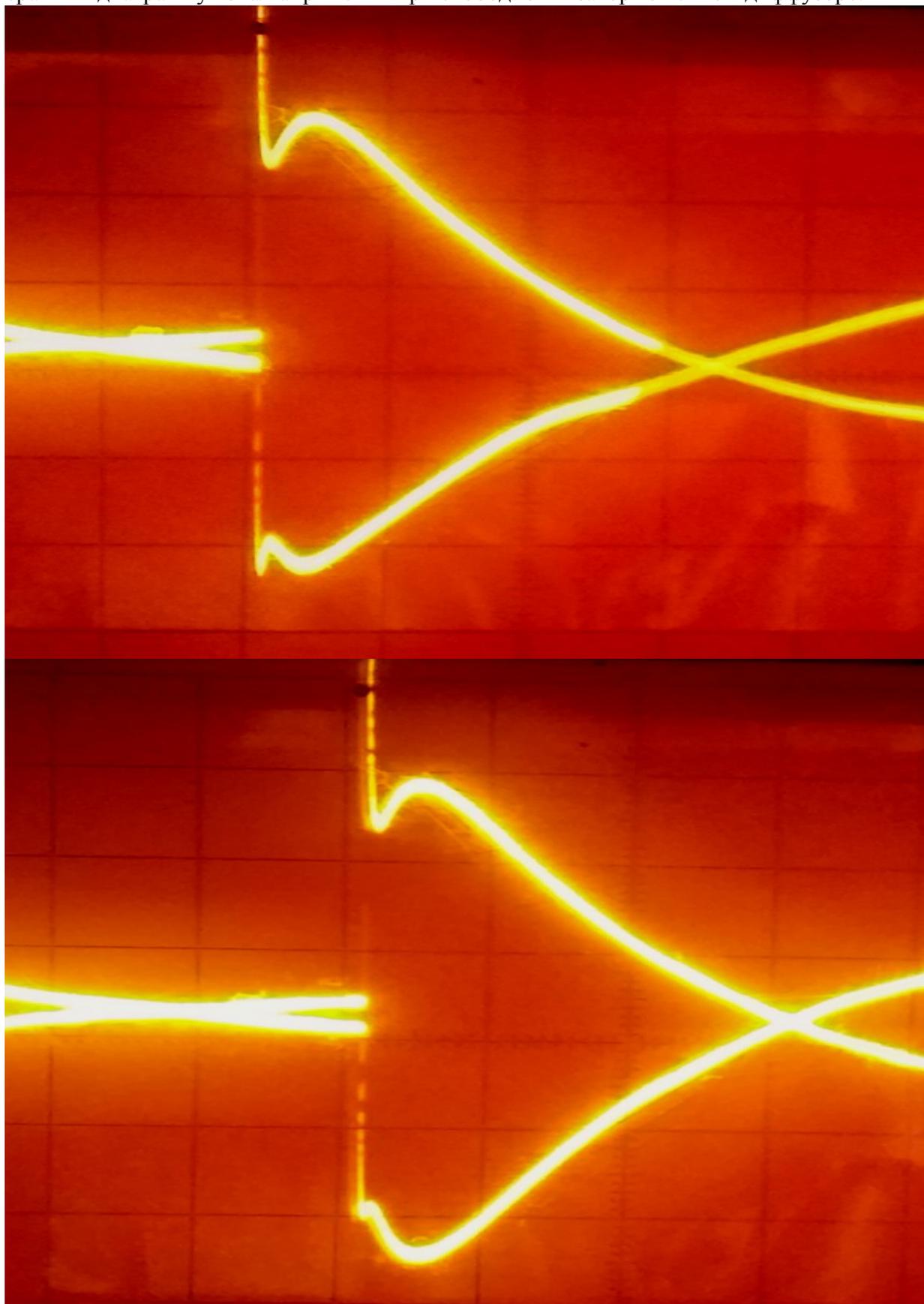


Рис.5. Диаграммы для свободного (вверху) и заторможенного диффузора (внизу) при открытой полосе пропускания усилителя (есть дополнительный подъем ВЧ).

Как видно, теперь искажения формы тока появились и в области малых времен, т.е. высоких и средних звуковых частот. При этом уже нет сомнений, что обнаруживаемый эффект обусловлен именно прямым и обратным преобразованием электрической энергии в механическую. Также обратим особое внимание, что график напряжения остается неизменным во всех случаях, т.е. система отрицательной обратной связи усилителя корректно обрабатывает форму входного сигнала. Но мгновенная мощность (квадрат расстояния между лучами) изменяется не пропорционально напряжению, и это неизбежно должно привести к искажениям при воспроизведении звука.

Естественно, возникает вопрос: а почему этот эффект не обнаруживается при спектральном оценивании качества работы звуковоспроизводящей аппаратуры? Проблема в том, что при подаче монохроматических сигналов он проявится очень слабо и только на фазовом спектре, который сам по себе будет достаточно немонокотонен вследствие наличия в усилителе дифференцирующих и интегрирующих цепей и/или различных эквалайзеров.

При использовании несинусоидальных сигналов обнаружение наблюдаемого эффекта в частотной области также будет затруднено, т.к. он сосредоточен во времени, и в соответствии с базовым принципом неопределенности, распределен по всему спектру. А если спектр подаваемого негармонического сигнала сложный, то ловить мелкие отличия самых разных спектральных компонент – дело трудное и бесперспективное. Необходима спектрограмма с ультракороткими перекрывающимися реализациями, но при этом плакало наше разрешение в частотной области. Т.е. в данном случае предпочтительна работа во временной области, а не в частотной.

Если говорить о количественной оценке вносимых искажений, то измерения послесверточного лепестка последовательности Баркера, как мне кажется, могут быть наилучшим решением. Впрочем, такие измерения требуют разработки специальной методики.

Таким образом, можно считать подавление наблюдаемого эффекта совершенно необходимым для качественного воспроизведения сложных музыкальных композиций. Ведь пока он не подавлен, усилитель вместе с акустической системой представляют собой фактически музыкальный инструмент со своими обертонами: входная музыкальная композиция – это сигнал возбуждения (что-то типа скрипичного смычка), а мультипликативный (NB!) компонент показанного эффекта обеспечивает акустическую картину в виде отклика на возбуждение. Результирующие искажения, конечно невелики, но на сложных сигналах оркестровой музыки, они улавливаются музыкальным слухом.

Пусть необходимо добиться подавления нежелательного эффекта на 10...12 дБ. Более глубокое подавление желательно, но вряд ли достижимо практически. Пути решения задачи могут быть разными: например, обеспечить эффективную отрицательную обратную связь, которая будет следить за мгновенной мощностью. Впрочем, это уже было – системы ЭМОС, ЭДОС (электромеханической и электродинамической обратной связи). Быстрого и хорошего результата ожидать не приходится; любая такая ООС тоже будет иметь фазовое запаздывание, а для эффективной работы должна либо использовать нелинейную аппроксимацию вперед, т.е. предсказание значений сигнала, либо хотя бы работать по изменениям первой производной, что сразу повысит чувствительность к шумам и паразитным высокочастотным компонентам.

Другим вариантом, который кажется более практичным, будет решение подать на АС «правильную» мгновенную мощность, и пусть она делает с ней, что хочет. Ведь хорошая акустическая система – плод большого труда профессионалов, которые ее разрабатывали, доводили и испытывали. Вот пусть и покажет себя во всей красе.

Для реализации такого подхода нужно согласовать полное сопротивление АС с активным сопротивлением демпфера, а выходной сигнал усилителя подать на активную нагрузку, которая часть энергии передает на тот же демпфер. Таким образом, прямая связь

усилителя с АС через активные нагрузки будет относительно мала. Усилитель будет работать на почти чисто активную нагрузку. Акустическая же система будет максимально электрически демпфирована, а ее питание будет обеспечиваться источником, имеющим преимущественно активный компонент сопротивления. Но коэффициентом полезного действия придется пожертвовать, а выходное сопротивление усилителя поднять до величины, по меньшей мере, вдвое превышающей сопротивление АС.

Итоговая электрическая схема будет очень проста и сводима к резистивному делителю.

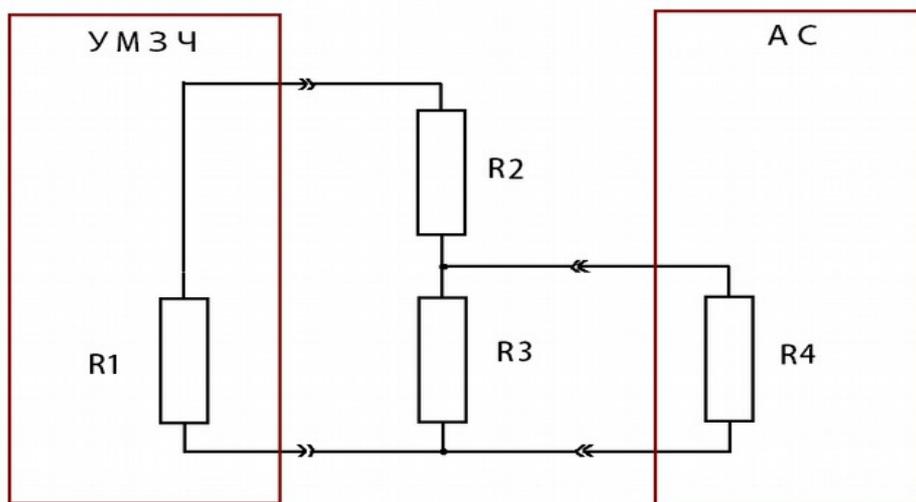


Рис.6. Подключение акустической системы через резистивный делитель

Проверим результат на аппаратуре, с которой и начали. Приличным изделием этот уродец отнюдь не стал, но «прозрачный» звук получен, и «сцена» появилась... Т.е. прослушивание музыки (и не только попсы) стало возможно.

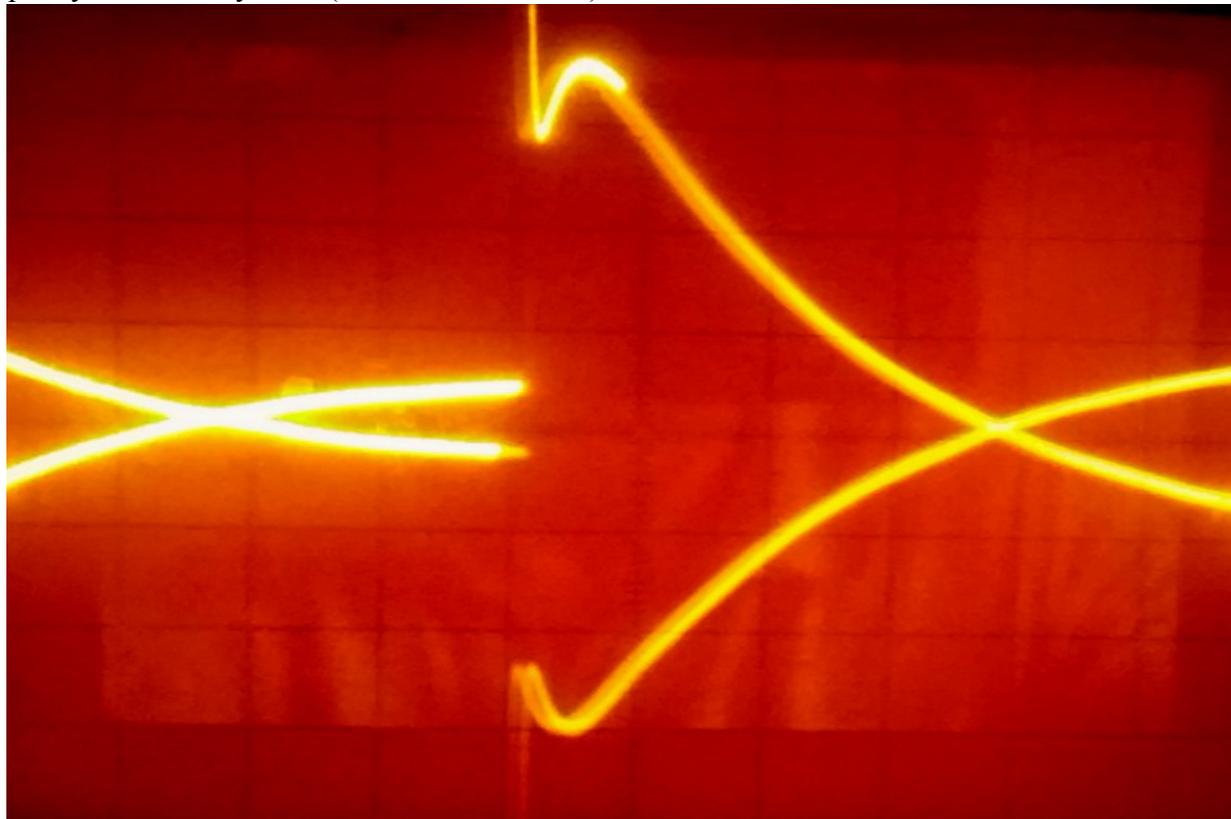


Рис.7 Диаграмма на входе акустической системы. Цель достигнута, картина радует глаз.  $R_2=7\text{ Ом}$ ,  $R_3=5\text{ Ом}$ ,  $R_4$  (акустической системы)= $4\text{ Ом}$ .

Расчет резисторов несложен: полагаем R1 и R4 чисто активными, а сопротивления на входе и выходе резистивного делителя должны быть соответственно равны R1 и R4. Если есть возможность подстраивать R2 и R3, то имеет смысл сделать окончательную регулировку резисторов «по звуку» в пределах  $\pm 20\%$  относительно расчетных значений, т.к. творческий процесс всегда продуктивнее любой догмы. В случае заведомо низкоомного выхода усилителя можно предварительно попробовать R2=7 Ом, R3= 5 Ом, но это паллиатив. Резисторы желательно использовать с минимальной индуктивностью, а их мощность выбирается с учетом мощности усилителя (хорошо подходят обрезки нагревательных элементов от тостера).

#### Выводы:

1. Эффект аддитивной и мультипликативной помехи, вызванный механическими процессами в акустической системе может быть обнаружен при анализе априорно известных сигналов во временной области.
2. Активная нагрузка усилителя совместно с эффективным электрическим демпфированием акустической системы позволяют добиться подавления описанного эффекта и приемлемого звучания сложных музыкальных композиций.
3. Неизбежные энергетические потери предлагаемого решения потенциально не представляют серьезной проблемы, хотя, скорее всего, принципиальная схема высокоомных выходных каскадов усилителя должна разрабатываться по-новому.
4. Опыт применения описанного метода также был произведен на личной самодельной аппаратуре. Отзывы профессиональных музыкантов отнюдь не вызвали у автора чувства стыда.

*P.S. И для любителей что-то делать самостоятельно: некоторые мои дополнительные соображения после 40 лет работы*

*1. Творческие споры типа: «мы слушаем не усилитель или акустику, а конденсаторы источника питания (либо другие элементы по произволу авторов) – по определению ошибочны. Если уж говорить на эту тему, то слушаем мы интерференционную картину в помещении. Именно поэтому точная ориентация АС по азимуту и углу места очень важна, а экспериментальная работа обязательно окупится хорошим стереоэффектом. Важность правильного волнового фронта пары акустических систем огромна.*

*2. Цифровые источники сигнала имеют скверное обыкновение подавать в линию побочные продукты работы ЦАП. А перемножение на нелинейностях вольтамперной характеристики усилителей никто отменить не может... Поэтому пассивный RC (19КГц, не менее -6дБ) фильтр на входе усилителя совершенно необходим при воспроизведении оркестровой музыки.*

*3. Экранировка усилителя от ВЧ помех необходима – если при работе телефона стандарта GSM слышны характерные фреймы, то можно ожидать, что и другие источники ВЧ сигнала влияют на Вашу аппаратуру как по пути непосредственного детектирования, так и вследствие других более сложных процессов.*

*4. Все цифровые эквалайзеры – зло. А если они выполнены на всепропускающих фильтрах, то это абсолютное зло. Всякое пространственное восприятие будет потеряно. Все регуляторы тембра должны иметь линейную фазочастотную характеристику.*

5. Акустика для музыки в стиле «бумбокс» и для симфонической музыки по определению разная: вторая пригодна для первого варианта тоже, а вот первая для второго непригодна в принципе.
6. Непонятно почему, скорее в угоду эстетике, производители не покрывают акустические системы звукопоглощающим материалом **снаружи**. Если игнорировать требования красоты (и супруги) и покрыть, кроме того, части стены в непосредственной близости от АС, то результатом будет существенное улучшение «сцены».
7. С тех пор, как "Technics" начал установку противовесов на магнит НЧ динамика, прошло много модернизаций корпусов акустики. Самым правильным для оркестровой музыки остается требование авиаконструктора Ильюшина: «Всегда пускай силу по кратчайшему пути». Т.е. стяжка передней и задней плоскостей АС. От себя добавлю: конструкция должна быть предварительно напряженной, т.е. передняя и задняя стенки постоянно стягиваются с усилием.