

Звучание конденсаторов в фильтрах акустических систем

Опубликовано в "Радио" №№ 8, 9, 10 за 2009 год

Современная аудиотехника класса Hi End усилиями рекламы, обслуживающей интересы соответствующих компаний, оказалась мифологизирована до такой степени, что кажется уже невозможно отличить правду от вымысла, а реальность от самовнушения.

Работа аудиотракта оценивается потребителем по личным слуховым ощущениям. Сложность и неоднозначность связи между объективными параметрами звукового сигнала и субъективными ощущениями слушателя и зависимость этой связи от множества посторонних факторов создает благоприятные условия для недобросовестного бизнеса. Потребителю «на слух» приходится оценивать, насколько свойства того, за что он заплатил иногда весьма солидную сумму, соответствуют обещанному рекламой. А разобраться в этом непросто. Как заметил в одном из интервью директор по экспорту компании MONITOR AUDIO Д. Хоббс: «Многие, купив кабели за 5000 долларов, уже подсознательно настроены на то, что система зазвучит лучше. Так ли это в реальности - большой вопрос. Более того, потратив столько денег, никто даже себе самому не признается, что остался в дураках» [1].

Довольно характерное высказывание профессионала, не занятого в «кабельном» бизнесе. Разумеется, многочисленные эксперты из аудиожурналов излагают совсем иную точку зрения.

Если у абсолютного большинства технически образованных людей сложилось вполне адекватное представление о «полезности» «суперкабелей», то в отношении других аудиофильских компонентов подобного единодушия нет. Вот уже много лет предметом острых споров остается целесообразность применения аудиофильских резисторов, дросселей и конденсаторов в кроссоверах акустических систем (АС). Здесь все не так очевидно. С одной стороны нельзя отрицать объективность различий некоторых технических характеристик аудиофильских и обычных компонентов, а с другой, величина этих различий в большинстве случаев не дает оснований считать, что их можно зафиксировать «на слух».

Одни компании комплектуют кроссоверы АС аудиофильскими компонентами, не преминув, разумеется, сообщить об этом в рекламных проспектах. Другие не менее авторитетные производители аппаратуры, в том числе и профессиональной, применяют в своих АС электролитические конденсаторы и дроссели с ферромагнитными сердечниками, что по аудиофильским меркам считается абсолютно неприемлемым.

Еще радикальнее расходятся мнения радиолюбителей. Одни публикуют обширные отчеты о прослушивании конденсаторов, констатируя существенные отличия в их «звучании» [2]. Другие вообще отрицают какое-либо положительное влияние дорогих аудиофильских компонентов на звук.

«Дорогостоящие компоненты для кроссоверов - напрасная трата денег, не улучшающая звук» - категорично заявляет Дж. Крутке - известный не только среди любителей, но и среди профессионалов DIY-конструктор АС [3].

Какие элементы выбрать для кроссовера самодельной АС: обычные или аудиофильские - вопрос не простой. Пассивный кроссовер состоит из резисторов, конденсаторов и дросселей.

С резисторами - все просто. Чаще всего, доказывая необходимость применения специальных аудиофильских резисторов, ссылаются на наличие индуктивности у недорогих проволочных аналогов. При этом преднамеренно замалчивается тот факт, что величина этой паразитной индуктивности ничтожно мала, и ее влияние на полное сопротивление резистора начинает сказываться на частотах свыше 200 кГц. Этим исчерпываются технические аргументы, а остальные, вроде «плохого звучания высокоомного материала проволоки» - из области фантазий.

С катушками индуктивности ситуация не столь очевидна. Если наличие ферромагнитных сердечников действительно может повлиять на звук не лучшим образом, то применение проводов из сверхчистой меди или серебра с добавлением 1% золота «аргумент» того же ряда, что и «кабельный». Стоимость такой катушки может достигать нескольких тысяч долларов за штуку. Ленточные (фольговые) катушки индуктивности обладают некоторыми преимуществами, но стоят намного дороже обычных проволочных, поэтому имеют гораздо худшее соотношение цена/качество. Однако подробное их рассмотрение выходит за рамки настоящей статьи.

С выбором конденсаторов ситуация не проще. Их объективные характеристики зависят от конструкции и материала корпуса (металл, пластик, компаунд), обкладок (специальная фольга, обычная алюминиевая фольга, металлизация), от типа диэлектрика (полипропилен, лавсан, бумага, керамика, оксид) и, наконец, от качества изготовления (аудиофильские элементы могут иметь как лучшее качество изготовления, так и такое же, как у элементов общего применения).

Даже, если оставить за скобками рекламную шелуху вроде «натуральности звучания благодаря применению натуральных материалов», то список требований к аудиофильскому конденсатору окажется довольно солидным:

- корпус - из металла или массивного пластика для обеспечения акустической развязки.
- обкладки из тяжелой фольги для исключения вибраций, причем желательно серебряной или с добавлением серебра для снижения сопротивления;
- «правильный» диэлектрик;
- высокое качество изготовления, гарантируемое принадлежностью аудиофильскому бренду.

Такой конденсатор обойдется в \$30-50 (конденсатор с серебрянными обкладками – несколько сотен, а из «натуральных материалов» - несколько тысяч долларов). Но, может, прав Дж. Крутке, и все это напрасная трата денег? И десятирублевый конденсатор К73-17 на самом деле «сыграет» не хуже? Настоящая статья - попытка разобраться в этом вопросе.

Наличие в конденсаторе обкладок из фольги, особенно медной, серебряной или с добавлением золота, обычно воспринимается аудиофилами как признак элитарности. С технической точки зрения использование фольги в конденсаторах для АС не дает существенных объективных преимуществ, но заметно сказывается на себестоимости. Поэтому в большинстве даже очень дорогих конденсаторов «для аудио», кроме фольговых масляно-бумажных, вместо фольги используют в действительности металлизированную полимерную пленку. При этом, некоторые производители в маркетинговых целях при описании конструкции

конденсатора идут на некорректную подмену понятий, называя полипропиленовую пленку «полипропиленовой фольгой» (polypropylene capacitor foil), как, например, в описании конденсатора Mundorf MCap RXF.

Другой важнейший признак аудиофильского конденсатора - применение диэлектрика «правильного» типа. Самым каноническим диэлектриком считается полипропилен (ПП, англ. PP). Большинство современных специализированных конденсаторов «для аудио» (далее для краткости аудиоконденсаторы) использует именно его. По объективным характеристикам ПП почти идеальный материал, обладающий высокой стабильностью, малыми диэлектрическими потерями и абсорбцией. Другой канонический аудиофильский диэлектрик - пропитанная маслом бумага - полная противоположность ПП. Масляно-бумажные (МБ) конденсаторы по тангенсу угла потерь и, особенно, по диэлектрической абсорбции заметно проигрывают всем видам пленочных конденсаторов. По этой причине они сегодня применяются, в основном, только в низкочастотной силовой электротехнике и в небольших объемах в аудиофильской аппаратуре: ламповых усилителях и кроссоверах АС.

Оксидные неполярные конденсаторы - самые «не аудиофильские» из применяемых в кроссоверах. По тангенсу угла потерь и абсорбции они уступают даже МБ конденсаторам. С другой стороны, по величине удельной емкости оксидные конденсаторы вне конкуренции, и поэтому вопреки расхожему мнению используются не только в дешевых мультимедийных колонках, но и в профессиональных АС и в дорогих АС класса Hi-Fi - везде, где требуется высокая емкость.

Еще один часто применяемый в кроссоверах АС тип конденсаторов использует в качестве диэлектрика пленку из полиэтилентерефталата (ПЭТ, ПЭТФ, англ. PET). Коммерческие названия полимера: лавсан, полиэстер, майлар и др. Являясь дешевой и доступной альтернативой специализированным ПП и МБ аудиоконденсаторам, ПЭТ конденсаторы общего применения очень популярны как у профессионалов, так и у радиолюбителей из-за хорошего соотношения качество-цена. В то же время, ни один другой тип конденсаторов не вызывает таких резко негативных оценок со стороны аудиофилов за «плохое звучание». Подобное мнение укоренилось настолько прочно, что ПЭТ конденсаторы, в прайс-листах отечественных продавцов аудиокомплектов называются полистирольными, хотя полистирол и полиэстер при некоторой схожести названий абсолютно разные полимеры. Все это послужило причиной особого внимания, уделенного этому типу конденсаторов в настоящей статье.

Результаты сравнительной субъективной экспертизы ПЭТ, ПП и МБ конденсаторов приведены в третьей части статьи, а здесь остановимся на технической стороне вопроса.

Первый из приводимых обычно аргументов в пользу отказа от применения ПЭТ конденсаторов в кроссоверах - повышенные тангенс угла потерь и коэффициент абсорбции. В табл. 1 приведены характеристики некоторых типов конденсаторов (по материалам [4]), которые могут использоваться в АС.

Таблица 1

Типы конденсаторов по виду диэлектрика	Коэффициент абсорбции, %	Тангенс угла потерь, %	Снижение емкости на частоте 10 кГц относительно 100 Гц, %	Обозначения конденсаторов
				российских
Полипропиленовые	0,1 - 0,2	< 0,5	< 0,1	К78
Полиэтилентерефталатные	0,2 - 0,8	0,4 - 1,5	1,2 - 1,5	К73
Бумажные фольговые	0,2 - 1,0	0,4 - 1,0	1,5 - 2,5	К40, К41
Металло-бумажные	0,5 - 5,0	0,5 - 3,0	2,0 - 4,5	ОМБГ, МБМ, МБГО, К42
Металло-бумажные ВЧ	0,5 - 5,0	0,5 - 1,5	1,5 - 2,0	МБГЧ
Оксидные неполярные	1,0 - 5,0	до 30	20 - 30	К50-6, К50-15, К53-7

Из таблицы видно, что параметры ПЭТ конденсаторов действительно заметно хуже, чем у ПП, но несколько лучше, чем у МБ. Кроме того, емкость ПЭТ конденсаторов не постоянна и снижается примерно на 1,5-2% на самых верхних частотах звукового диапазона. Однако у МБ конденсаторов изменение емкости в диапазоне звуковых частот больше 2%.

На рис. 1 приведены зависимости тангенса угла потерь от частоты для ПП (КР, МКР), ПЭТ (КТ, МКТ) и МБ конденсаторов (для ПП и ПЭТ - по материалам [5], для МБ конденсаторов измерено).

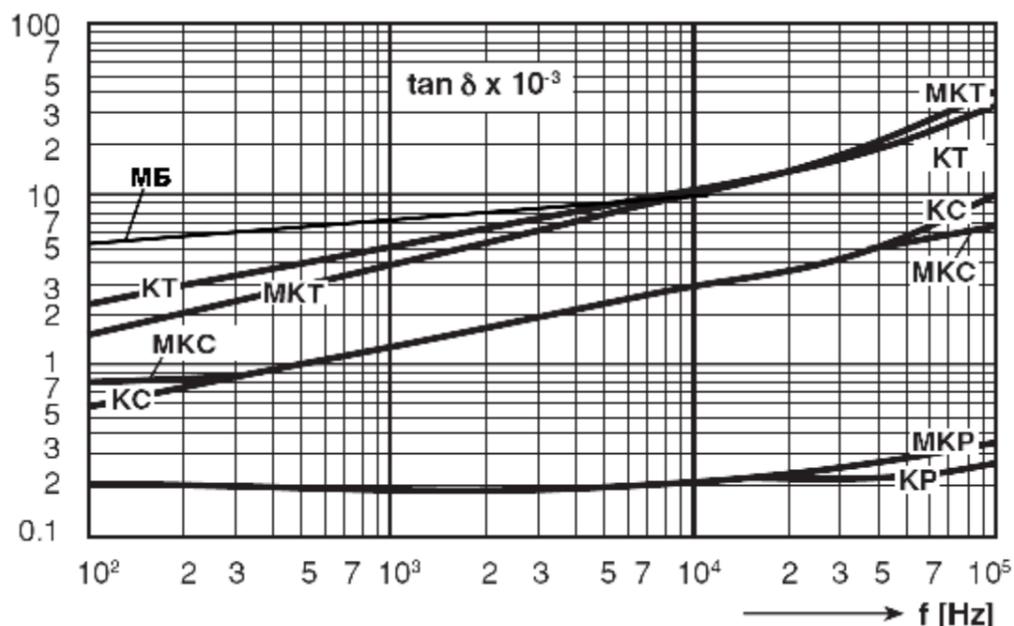


Рис.1.

Выбирая тот или иной компонент для кроссовера, нужно четко понимать, что цифры технических параметров важны не сами по себе, а лишь как факторы, которые могут повлиять или не повлиять на качество звучания АС. При установке ПЭТ или МБ конденсаторов в ФВЧ второго порядка, изменение величины их емкости и тангенса угла потерь в полосе пропускания фильтра может привести к отклонению реальной АЧХ кроссовера от расчетной на величину до 0,3 дБ. Это означает, что установка в один и тот же кроссовер конденсаторов формально одинаковой емкости, но разного типа, действительно может создавать некоторые отличия в тональном балансе АС, однако эти отличия будут не более тех, что возникают из-за разброса параметров динамических головок одного типа или разброса характеристик других компонентов кроссовера, имеющих пяти- или десятипроцентный допуск

на номинал. И даже если искусственному слушателю удастся уловить эту микроскопическую разницу в тональном балансе, то совсем не обязательно, что он предпочтет звучание дорогих ПП или МБ аудиоконденсаторов, а не дешевого ПЭТ, если не будет знать заранее, какой конденсатор установлен в кроссовере.

Влияние эффекта абсорбции заряда в конденсаторах на сигналы звуковых частот обычно сильно преувеличивают. Согласно отечественному стандарту измерение диэлектрической абсорбции производится после трехминутного пребывания конденсатора под напряжением неизменной величины и полярности, - в режиме, не имеющем ничего общего с работой конденсатора в кроссовере АС. При знакопеременном напряжении звуковой частоты абсорбция оказывается во много раз меньше величин, приводимых в соответствующих справочниках и указанных выше в табл.1. В частности, для ПЭТ конденсаторов диэлектрическая абсорбция за время равное 20мс составляет всего 0,1% [6], [7]. Согласно данным компании National Semiconductor [7], влияние абсорбции можно учесть введением в схему замещения конденсатора высокоомных RC -цепей. На рис. 2 показан пример такой эквивалентной схемы для ПЭТ конденсатора емкостью 1мкФ [7]. Эта схема замещения пригодна не только для широкого диапазона частот, но и в интеграторах и устройствах выборки-хранения АЦП – там, где важна задержка сигнала. Даже беглого взгляда на нее достаточно, чтобы понять, что влияние абсорбции в пленочных конденсаторах на АЧХ и ФЧХ кроссовера АС всегда пренебрежимо мало, а распространенное среди аудиофилов мнение о том, что будто бы повышенная (в сравнении с ПП) абсорбция ПЭТ конденсаторов ухудшает звук – аудиомиф.

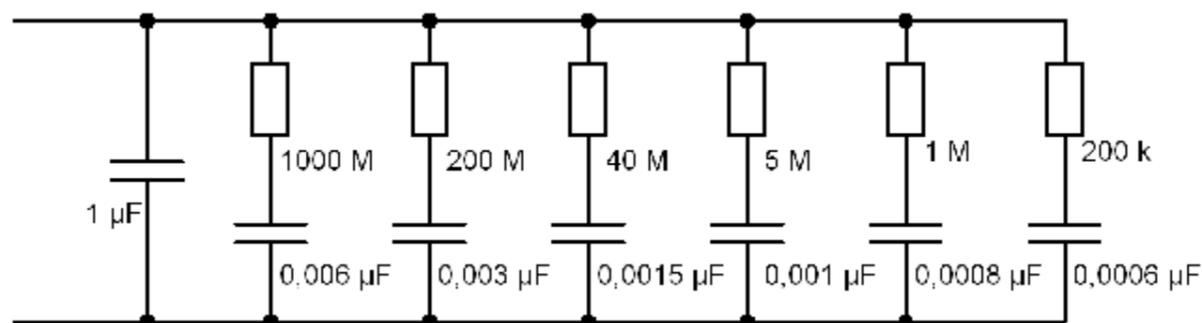


Рис.2.

Вот и все объективные причины, по которым конденсаторы теоретически могли бы вносить дополнительные (т.е. не учитываемые при расчете) линейные искажения в звуковой сигнал. Их величина при использовании ПЭТ и МБ конденсаторов, не выходит за рамки отклонений из-за технологического разброса номиналов конденсаторов и других компонентов кроссовера. Следует особо подчеркнуть, что по уровню вносимых линейных искажений ПЭТ конденсаторы ничем не выделяются на фоне аудиоконденсаторов, занимая промежуточное положение между ПП и МБ.

Но раз линейные искажения конденсаторов настолько малы, что не могут объяснить существенных различий в звучании АС, то, значит, причину надо искать в нелинейных искажениях. В качественно изготовленном конденсаторе нелинейные искажения могут возникать только вследствие зависимости его емкости от приложенного напряжения, т.е. целиком определяются свойствами диэлектрика. Этот эффект сильно выражен у оксидно-полупроводниковых танталовых и некоторых разновидностей керамических конденсаторов [8],[9],[10]. Поэтому их не следует применять в сигнальных цепях. В частности, высокую нелинейность имеют отечественные конденсаторы из керамики типа П (НЧ керамики), имеющие ТКЕ: Н20, Н30, Н50, Н70, Н90 и оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы К53-7.

Что касается пленочных конденсаторов вообще и ПЭТ конденсаторов в частности, то их нелинейность очень мала [8], что вызывает серьезные методические трудности при измерении искажений. Заслуживающих доверия результатов подобных измерений мало. В качестве примера можно привести статью [9] компании Maxim/Dallas. Испытывались электролитические (танталовые и алюминиевые) и ПЭТ конденсаторы. На рис.3 показан шум и гармонические искажения, полученные на выходе усилителя для телефонов до и после установки ФВЧ с ПЭТ конденсатором, с частотой среза 1кГц. В полосе пропускания ФВЧ искажения ПЭТ конденсатора фактически не были зафиксированы: их уровень оказался ниже порога измерения, примерно равного 0,0003-0,0005%. Рост же относительного уровня шумов и гармоник ниже частоты среза фильтра - следствие уменьшения амплитуды основного тона при его прохождении через ФВЧ, а отнюдь не роста уровня самих шумов и гармоник из-за установки конденсатора.

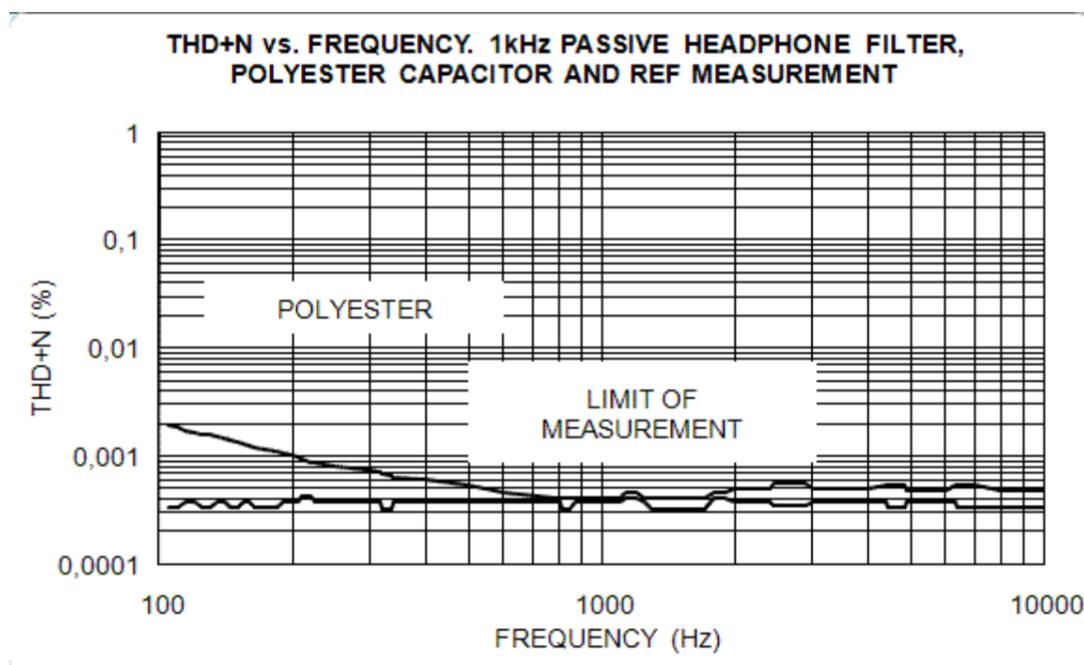


Рис.3.

Попытки измерения коэффициента гармоник (Кг) конденсаторов, в том числе и пленочных, предпринимались неоднократно. При традиционном способе измерения пороговая чувствительность метода определяется собственными искажениями измерительного стенда, и, как следует из [9], для тестирования пленочных конденсаторов, величина Кг стенда должен быть существенно ниже

0,0005%. Применительно к решаемой задаче - исследованию искажений конденсаторов в кросоверах АС - это требует наличия специального сверхлинейного усилителя мощности. Попытки обойти эту проблему путем вычитания искажений усилителя из общих искажений дают ненадежные результаты.

Чтобы избежать применения аппаратуры со сверхмалыми нелинейными искажениями, решено было измерять не гармонические, а интермодуляционные искажения. Тестируемый конденсатор включался в одну из типовых схем - фильтр второго порядка для ВЧ головки. Такой режим позволяет наиболее полно оценить качество конденсатора при соответствующем выборе тестовых частот. На фильтр с тестируемым конденсатором одновременно подавались два синусоидальных сигнала каждый напряжением 10В (эфф.), с частотами 70 Гц и 3кГц от двух разных усилителей мощности через специальный сумматор, развязывающий выходы усилителей. Это позволило полностью исключить интермодуляцию в самих усилителях. Полезный сигнал и искажения измерялись с помощью датчика тока в цепи резистора нагрузки, имитирующего ВЧ головку. Недостаток журнального места позволяет лишь очень выборочно ознакомить читателей с полученными результатами измерений.

Уровни максимальных интермодуляционных гармоник, полученных при тестировании, приведены в табл.2, а на рис.4 показаны наиболее характерные спектры искажений. Места локализации интермодуляционных гармоник отмечены маркерами, указывающими уровень и порядок гармоник, а числа, имеющие размерность процентов, - относительный уровень наиболее значимых из них.

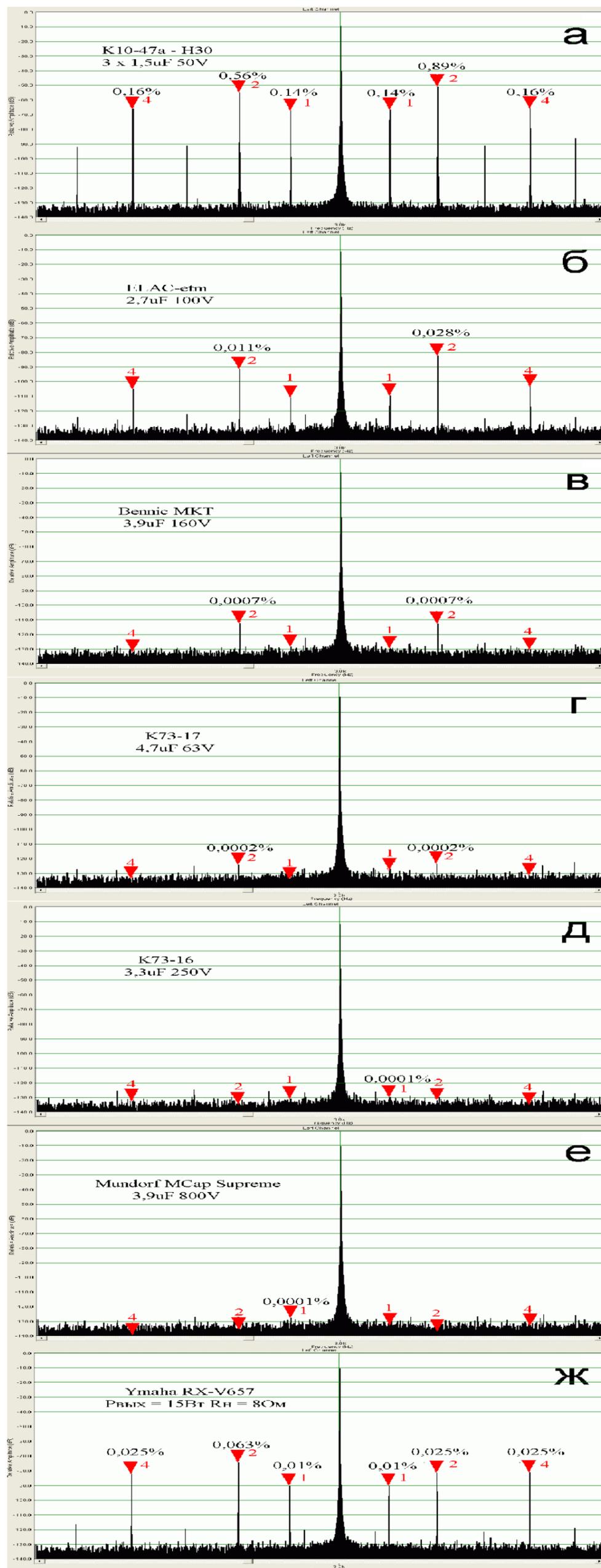


Рис.4.

Как и ожидалось, наибольшие искажения были зафиксированы у танталовых электролитических и керамических конденсаторов, что в очередной раз подтвердило неприемлемость их использования в АС.

Извлеченные из кроссовера компании ELAC алюминиевые оксидные неполярные конденсаторы продемонстрировали довольно высокую нелинейность - на уровне усилителей мощности среднего класса. Для сравнения спектр искажений такого усилителя показан на рис.4ж.

У остальных типов конденсаторов уровень искажений оказался примерно в десять и более раз ниже, чем искажения усилителя, и, по крайней мере, в сто раз ниже, чем искажения лучших современных динамических головок в аналогичном режиме тестирования. При этом количество значимых интермодуляционных гармоник в спектре конденсаторов очень мало - только первого и второго порядка. Гармоники более высоких порядков у всех конденсаторов, кроме оксидных и керамических, оказались ниже порога измерения (0,0001%).

Полученные уровни искажений пленочных конденсаторов представляют скорее академический интерес. Они не могут быть услышаны в реальном звуковом тракте. Тем не менее, стоит прокомментировать полученные результаты. Уровень искажений отечественного K73-16 (3,3мкФ, 250В) и всех аудиофильских конденсаторов, кроме Jantzen Cross cap, ввиду их малости зафиксировать не удалось. У двух других отечественных ПЭТ конденсаторов искажения лишь чуть превысили порог измерения, что явилось следствием их относительной низковольтности (63В). Неожиданно высокую линейность продемонстрировала связка из отечественных конденсаторов МБМ, лишь немного уступив датскому МБ суперконденсатору Jensen. И это несмотря на самый большой тангенс угла потерь среди всех пленочных и бумажных конденсаторов в данном тесте. Китайские ПЭТ конденсаторы MMD показали наихудший результат, по видимому, из-за некачественного контакта выводов с обкладками, на что указывает наличие в их спектре нетипичной для нелинейности диэлектрика интермодуляции первого порядка.

Таблица 2

Конденсатор	Назначение	Материал корпуса	Тип обкладки	Тип диэлектрика	Тангенс угла потерь (1кГц), %	Амплитуда максимальной интермодуляционной гармоники, %	Акустический шум, дБ	Ориентировочная цена
ELAC etm 2,7мкФ-100В	О	М	-	О	5,4	0,028	-	
ELAC etm 4,7мкФ-100В	О	М		О	3,9	0,016	-	
K53-7-4,7мкФ-30В	О	М	-	О	6,8	0,1	-	300 руб.
K10-47a H30 1,5мкФ-50В (3шт.)	О	П	-	К	1,3	0,89	35	400 руб.
МБМ составной 4,1 мкФ	О	М	М	МБ	0,97	0,0002	3	20 руб.
ОМБГ-2 10&10мкФ-200В	О	М	М	МБ	0,81	0,002	15	20 руб.
Jensen Cap 3,9мкФ-100В	А	М	АФ	МБ	0,54	<0,0001	0	2000 руб.
MMD 2,2мкФ-250В	О	К	М	ПЭТ	0,51	0,01	37	
K73-17-4,7мкФ-63В	О	К	М	ПЭТ	0,48	0,0002	25	10-25 руб.
K73-16-4,7мкФ-63В	О	М	М	ПЭТ	0,45	0,0004	-	10-25 руб.
K73-16-3,3мкФ-250В	О	М	М	ПЭТ	0,43	<0,0001	4	20-25 руб.
Bennic MKT 4,7мкФ-160В	О	П	М	ПЭТ	0,41	0,0006	40	50 руб.
Bennic MKT 3,9мкФ-160В	О	П	М	ПЭТ	0,39	0,0007	-	50 руб.
Jantzen Audio Cross cap 3,9 мкФ	А	П	М	ПП	0,003	0,0002	23	110 руб.

-400 В								
Mundorf M Cap Audiophile 3,9 мкФ -400 В	А	П	М	ПП	0,002	<0,0001	10	170 руб.
Mundorf M Cap Supreme 3,9 мкФ -800 В	А	П	М	ПП	0,002	<0,0001	0	1000 руб.

- Назначение: А - для аудио, О - общего применения
- Материал корпуса: М - металл, П - полимер, К - компаунд
- Тип обкладок: М - металлизация, АФ - алюминиевая фольга
- Тип диэлектрика: ПП - полипропилен, ПЭТ - лавсан, МБ - бумага, О - оксид, К - керамика.
- Акустический шум: «-» – не измерялся, 0 (0дБ) –уровень шумового фона измерительного бокса (шум конденсатора не зафиксирован)

Результаты измерений наглядно показали, что связь нелинейных искажений с тангенсом угла потерь и диэлектрической абсорбцией - миф, заботливо культивируемый заинтересованными компаниями. Ни эти параметры, ни «не кошерный» тип диэлектрика ни «плебейское» происхождение конденсатора сами по себе не являются причинами нелинейных искажений. Дешевые отечественные МБМ и ПЭТ конденсаторы показали себя не хуже европейских аудиоконденсаторов с трех-четырёхзначными ценниками и однозначно лучше «одноклассников» из Китая и Тайваня. Однако среди дешевых конденсаторов попадались и некачественные образцы. Среди протестированных конденсаторов МБМ один экземпляр имел очень высокую нелинейность. У одного из китайских ПЭТ конденсаторов тангенс угла потерь оказался в пять раз выше типового для данного вида диэлектрика. Отечественные конденсаторы К73-17 при общем очень неплохом качестве показали довольно большой разброс по нелинейности. Правда, несмотря на это, все имевшиеся К73-17 оказались лучше тайваньских Bennis MKT. Стабильно высокое качество изготовления показали конденсаторы К73-16.

Для исследования качества акустической развязки, обеспечиваемой конструкцией конденсаторов, был проведен еще один тест. Измерялась АЧХ звукового давления, создаваемого конденсатором в ближней зоне при подаче на него напряжения 10В (эфф.) через ограничительный резистор сопротивлением 3,9 Ом. АЧХ снималась в диапазоне частот 500 Гц - 20 кГц.

Все конденсаторы в металлических корпусах, кроме ОМБГ-2, а также аудиофильский MCap Supreme в массивном корпусе из пластика продемонстрировали отличную акустическую развязку. Пресловутый «микрофонный» эффект им явно не грозит. Несколько хуже обстоят дела у MCap Audiophile, еще хуже у К73-17 и Jantzen Cross cap. Китайские MMD и тайваньские Bennis вообще провалились в этом тесте. В табл.2 приведены результаты теста, а на рис.5 - АЧХ акустического излучения некоторых конденсаторов. Красная линия – первая гармоника, голубая линия – вторая гармоника.

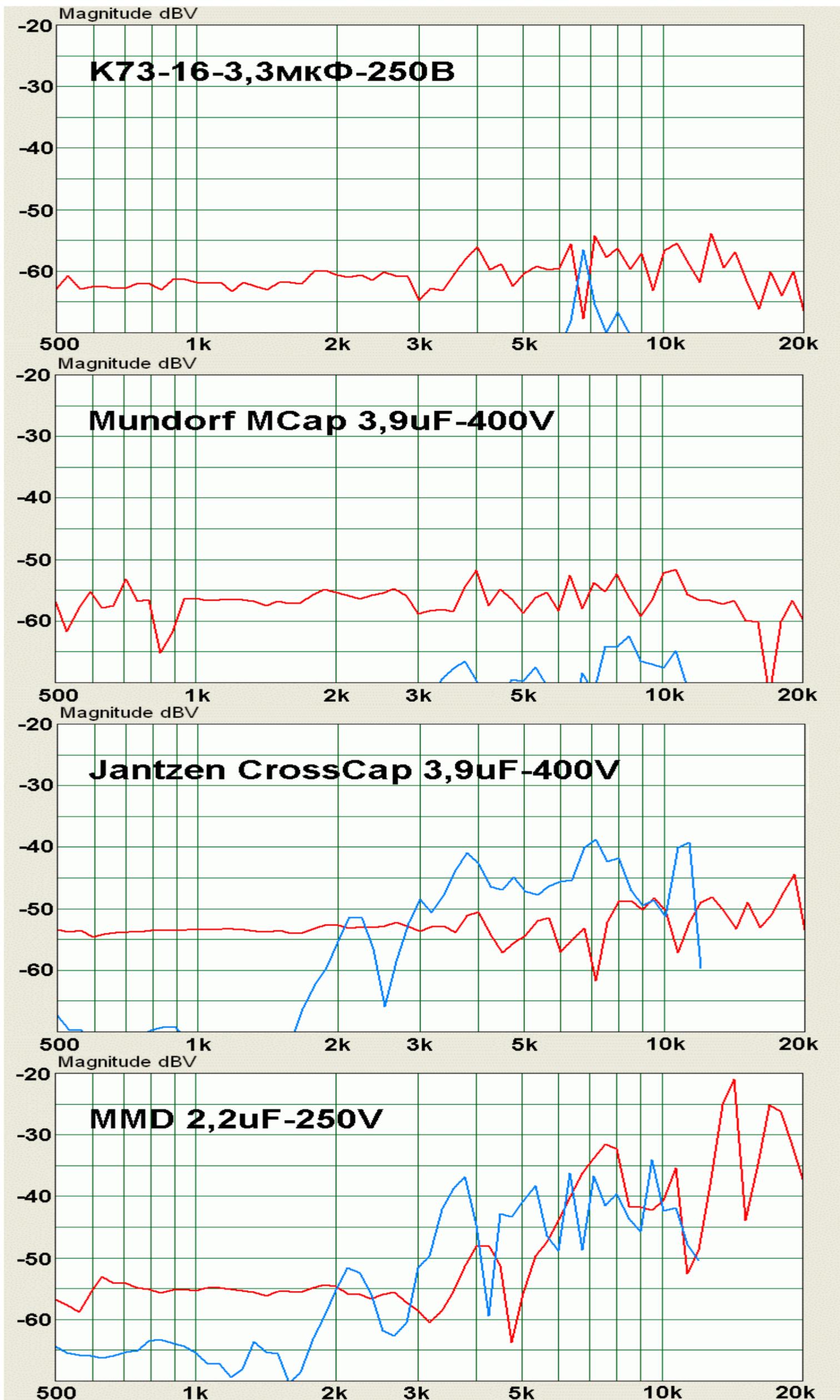


Рис.5.

Данный тест наглядно показал, что успешно решать проблемы акустического шума и «микрофонного» эффекта в конденсаторах можно и без применения обкладок из тяжелой фольги, как это делают некоторые производители аудиофильских компонентов. Применение обкладок из олова или других тяжелых металлов это не инженерное, а маркетинговое решение проблемы, позволяющее оправдать высокую цену продукта.

Получается, что дорогим аудиофильским конденсаторам объективно нечего предъявить в оправдание своей цены, кроме гарантированного качества изготовления и меньшего допуска на номинальную емкость.

Возвращаясь к свойствам ПЭТ конденсаторов можно утверждать, что имеющиеся на сегодняшний день объективные данные об их характеристиках не дают оснований утверждать, что их применение в кроссоверах АС может привести к снижению качества звука. Однако этот вывод противоречит утверждениям любителей высококачественного звучания, ссылающихся на свои субъективные ощущения. Объективные данные их не убеждают. В подобных случаях единственным способом выяснения истины остается проведение публичной субъективной экспертизы. Для того, чтобы результат экспертизы можно было считать объективным, она должна быть проведена с максимально возможным соблюдением правил, принятых для подобных мероприятий.

Для прояснения этого вопроса было решено провести собственный тест. 4-5 октября 2008 года в одном из московских аудиосалонов состоялась встреча радиолюбителей (рис. 6), главной целью которой было оценить, какой вклад оказывает проходной конденсатор, включенный последовательно с ВЧ головкой (тогда он оказывает наибольшее влияние на звук) в общее звучание системы. И действительно ли отечественные и доступные конденсаторы типа К73-16 настолько хуже дорогих аудиофильских, как про это говорят.



Рис.6.

Методика сравнения была следующей. В кроссовере (рис. 7) каждой из АС стереосистемы меняли конденсатор, включенный последовательно с ВЧ головкой. Для этого было собрано 2 коробочки, содержащих высококачественные переключатели. Для подключения конденсаторов были выведены 3 пары коротких проводов с зажимами «крокодил», маркированными разными цветами. Переключатели имели 6 положений (рис. 8). Таким образом, каждый из конденсаторов, подключенный к своему «крокодилу», участвовал в работе 2 раза. Сам кроссовер был сделан из высококачественных деталей и хорошо отстроен. Конденсаторы, участвовавшие в тесте, были подобраны по емкости с высокой точностью.

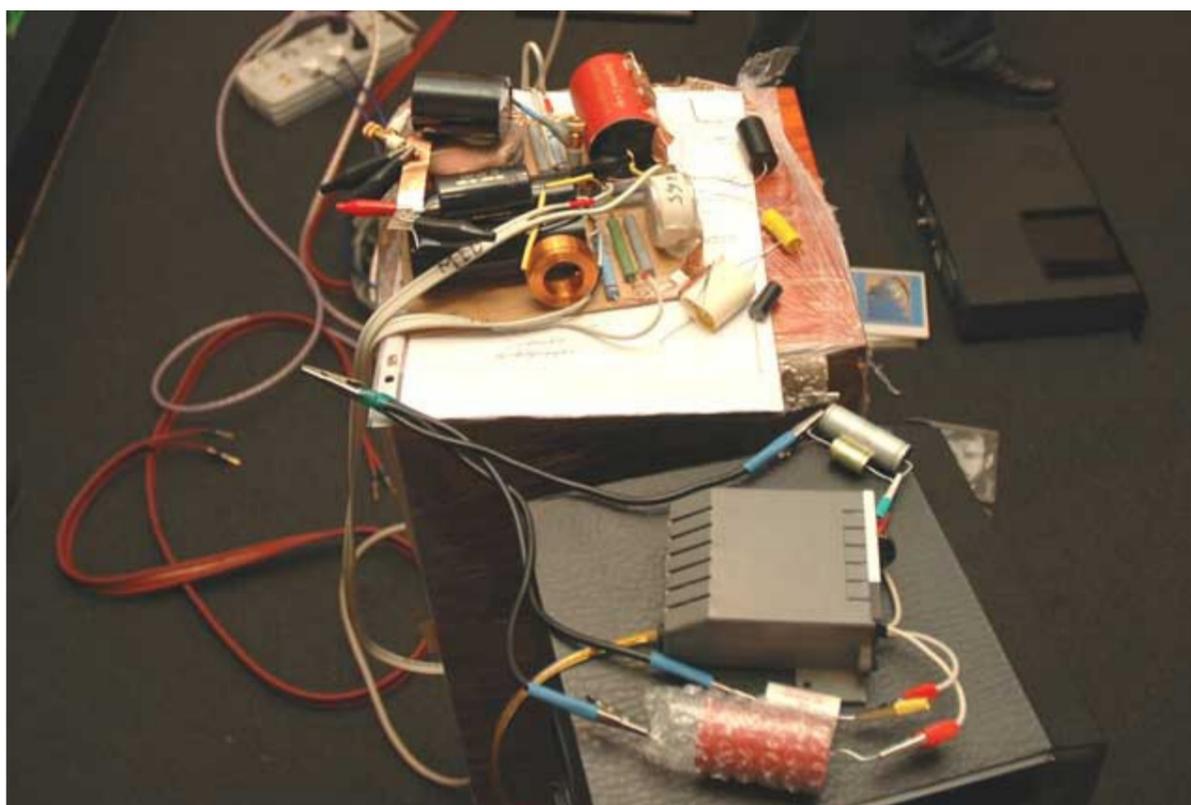


Рис.7.

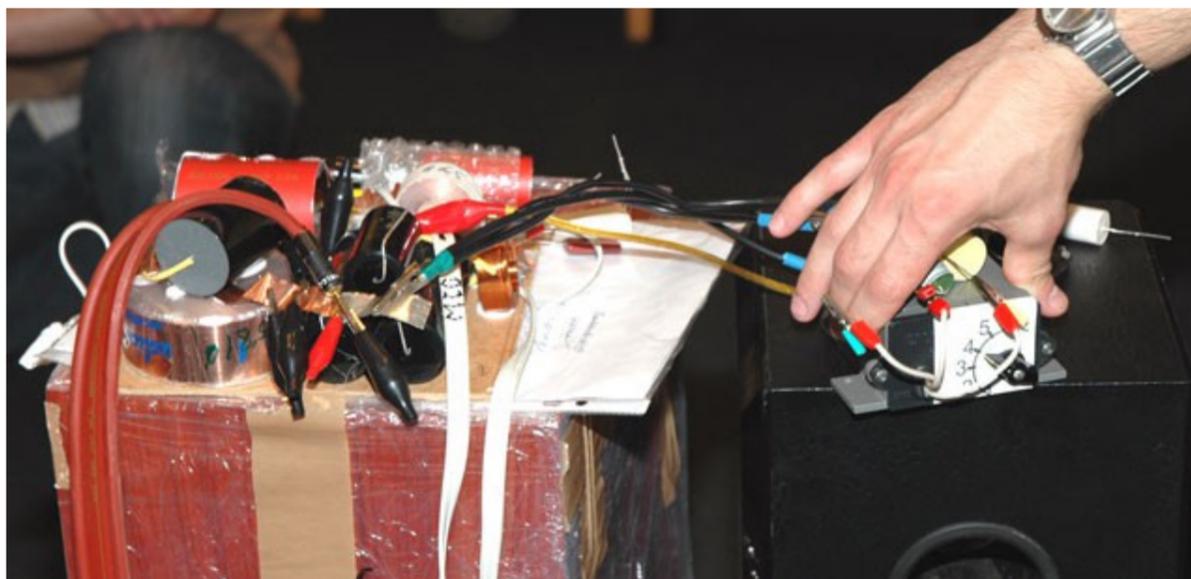


Рис.8.

Все тесты были двойными слепыми – не только слушатели не знали, какой из конденсаторов в данный момент включен в цепь, этого не знали и операторы, переключавшие конденсаторы (чтобы даже неосознанно не подать слушателям какой-либо сигнал). Только после того, как были собраны и записаны в бланки все мнения, проверялось какому номеру соответствует какой из конденсаторов. Тестов было несколько, между ними слушатели отдыхали. На рис. 9 показан рабочий момент одного из тестов.



Рис.9.

В первом тесте сравнивали между собой три конденсатора:

1. К 73-16
2. Jantzen Superior Z-cap
3. Mundorf MCap MKP Audiophile

Сначала в качестве «нулевого отсчета» включили один из них, чтобы слушатели привыкли к звуку. Этот вариант не оценивался. Потом пошел зачет. Поочередно включались конденсаторы, и качество (достоверность) звучания оценивалось по 10-ти бальной шкале. Длительность прослушивания каждого из них составляла несколько минут. После чего переключатель устанавливали в следующее положение и прослушивали тот же фрагмент записи. После теста все подписанные протоколы были сведены в одну общую ведомость. Протоколы писали 12 человек, по 2 раза слушали каждый конденсатор. Итого получилось по 24 оценки для каждого конденсатора.

Результат теста оказался очевидным – никто из собравшихся (их было порядка двадцати человек: не все из слушателей заполняли протоколы) не выделил какой-либо конденсатор как выдающийся или провальный по звучанию. Однако возникают вопросы:

1. Насколько адекватна субъективная оценка, сделанная не профессиональными экспертами, а «простыми», пусть и подготовленными, слушателями?
2. Не были ли результаты случайны?

Для ответа на первый вопрос обратимся к [11]: «на протяжении нескольких лет ведутся работы по изучению влияния выбора экспертов и степени их тренированности на качество оценок аудиоаппаратуры, а также на совпадение мнений тренированных профессиональных экспертов с мнением "нетренированных" (массовых слушателей). Результаты таких работ, выполняемых довольно длительное время в компании Harman, были продемонстрированы на 114-й конференции AES: субъективные оценки, которые дают квалифицированные эксперты, совпадают со шкалой предпочтений для неквалифицированных слушателей».

Для оценки значимости результатов теста был проведен их статистический анализ (аналогичный описанному в [11]). На рис. 10 показан средний балл для каждого конденсатора (красная черта) от которого вверх и вниз отложена дисперсия разброса оценок. Наивысший балл получил К73-16, причем разброс оценок минимальный, это означает, что слушатели были единодушны в своих мнениях. У конденсатора Jantzen оценка ниже, а дисперсия максимальна. Это означает наибольший разброс мнений по его поводу. Mundorf получил минимальный балл и его оценки легли сравнительно «кучно».

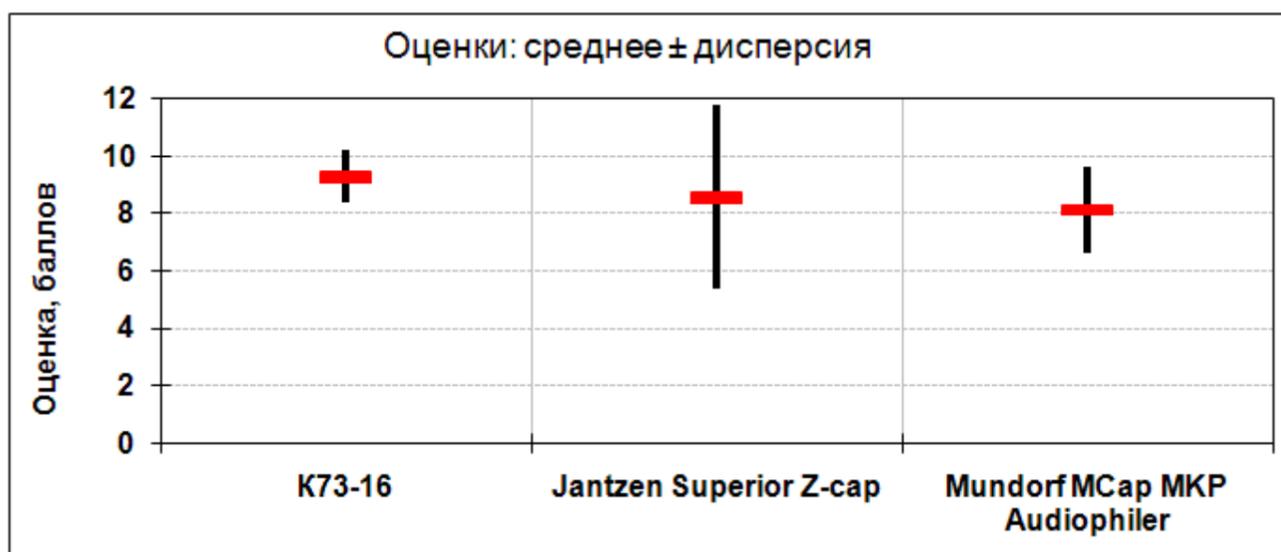


Рис.10.

Несмотря на то, что приведенные результаты выглядят достаточно убедительно, есть шанс, что наблюдаемая разница случайна. Поэтому была проверена статистическая значимость сравнения по критерию Стьюдента.

Пара Mundorf – K73-16 оказалась статистически значимой на уровне 0,02. Это означает, что вероятность того, что наблюдаемая разница в конденсаторах не случайна, а закономерна, равна 98%. Поскольку с точки зрения математики достаточно 90...95% достоверности, можно сделать вывод о действительном предпочтении конденсатора K73-16.

Пары Jantzen – Mundorf и Jantzen – K73-16 оказались статистически незначимы на уровне 0,1. Т.е. вероятность закономерности их различий меньше 90%. Причем если для пары Jantzen – K73-16 вероятность закономерности порядка 80% (с точки зрения математики закономерности тут уже нет), то пара Jantzen – Mundorf абсолютно статистически незначима и разница между ними совершенно случайна.

И последний момент: «а судьи кто?» Не получилось ли так, что измерения, достоверность которых доказывалась выше, сделаны «измерительными приборами очень низкой точности» – неквалифицированными экспертами? Для этого вычислялось значение $1/F_{stat}$ для каждого из слушателей (в тестах компании Harman использовалось F_{stat} - отношение среднеквадратичного значения оценки к среднеквадратичному значению разбросов в оценках, т.е. к среднему значению погрешности), рис. 11. Можно считать, что на рисунке показана погрешность слушателя, как измерительного прибора, и эта погрешность в своем большинстве невелика. Если отбросить мнения пятого эксперта, то разрыв между конденсаторами увеличивается, что еще раз подтверждает достоверность результатов. Но, по мнению авторов, в результаты экспертизы должны быть включены оценки всех экспертов, хотя бы потому, что это мнение массового слушателя – потребителя аудиопродукции, именно того, кому придется платить деньги за аппаратуру, звучащую так или иначе.

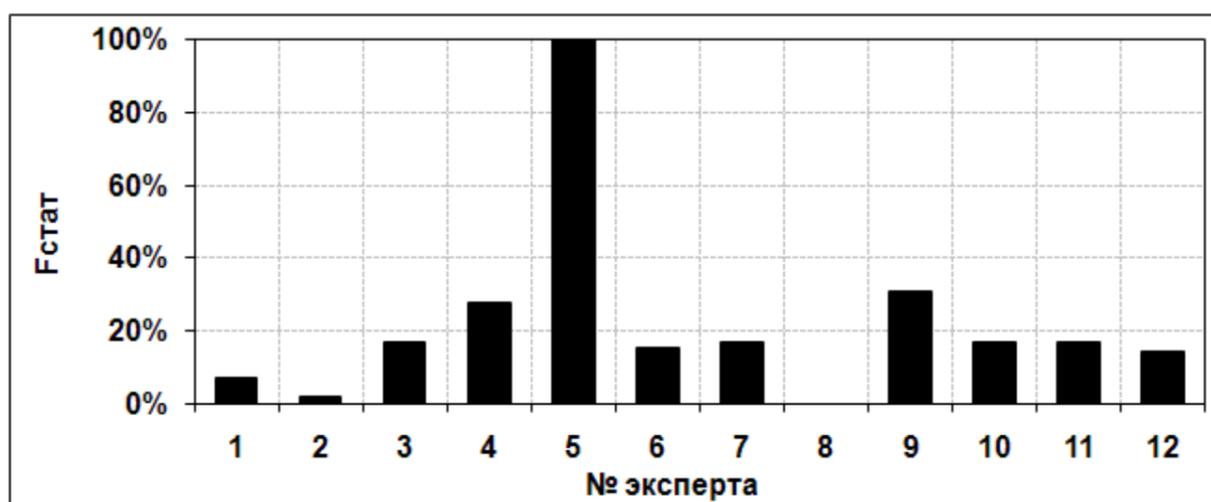


Рис.11.

Во втором тесте сравнивались попарно с K73-16 некоторые другие конденсаторы (тест был также двойной слепой).

K73-16 vs Jantzen Superior . На вопрос, «какой из них вы бы использовали для себя?» все единогласно ответили: 1-й (второй звучит звонче, а первый глуше, но натуральнее).

K73-16 vs Jensen (бумага, масло, фольга из алюминия). 60% выбрали первый, 40% – второй.

K73-16 vs MultiCap фольговый . На тот же вопрос все, кроме одного человека ответили «без разницы (разница мизерная)», один человек предпочел K73-16.

Осталось ответить на последний вопрос: насколько условия прослушивания отвечали современным требованиям к их организации? Аппаратура была очень высокого качества, помещение достаточно подготовленное для аудиотестов. В том же, что касается таких аспектов организации экспертизы как отбор экспертов и тестовых фонограмм, а также количество прослушиваний, то тут, конечно, с профессиональной точки зрения далеко не все было безупречно, что вполне объяснимо.

Кроме того, в сторону организаторов были сделаны упреки, что количество экспертов было слишком велико и это «размыло картину теста». Обратимся к [11]: «*учитывая, что разброс в оценках у опытных экспертов гораздо меньше, для того, чтобы получить статистически значимые субъективные оценки аппаратуры, можно приглашать небольшое количество экспертов (5...6 человек, как требует стандарт МЭК), в то же время при использовании в качестве экспертов неопытных и неквалифицированных слушателей требуется большое количество экспертопоказаний, поэтому, когда в журналах помещают мнение одного автора, то это не имеет отношения к технике*». Таким образом, полученные результаты заслуживают гораздо большего доверия, чем многие публикации о «явно слышимых преимуществах аудиофильских конденсаторов».

Выводы .

1. Аудиофильский миф о том, что дорогие специализированные аудиоконденсаторы «звучат хорошо», а обычные дешевые, и в особенности отечественные, всегда «звучат плохо» не имеет под собой объективных оснований и не подтвердился субъективной экспертизой.

К реальным преимуществам специализированных аудиоконденсаторов можно отнести более предсказуемое качество изготовления и иногда меньший допуск на величину номинальной емкости. Остальные преимущества носят рекламный характер. Часто упоминаемый в аудиопрессе высокий уровень акустической развязки, исключая возникновение микрофонного эффекта, имеет и целый ряд конденсаторов общего назначения, не использующих ни экзотических материалов, ни дорогостоящих конструктивных решений.

2. Не нашло своего подтверждения мнение, что полиэтилентерефталат (лавсан, полиэстер, майлар) как диэлектрик «противопоказан хорошему звуку». Можно с уверенностью утверждать, что отечественные лавсановые конденсаторы не хуже по звучанию гораздо более дорогих специализированных аудиоконденсаторов, поскольку при субъективной экспертизе вообще никто из достаточно подготовленных слушателей не отнес их к «плохо звучащим».

Отечественные лавсановые конденсаторы К73-16, продемонстрировавшие отличные результаты, как при объективных измерениях, так и при субъективной экспертизе, можно смело рекомендовать в качестве недорогой и качественной альтернативы специализированным аудиоконденсаторам. В то же время популярные конденсаторы К73-17, имеющие в целом аналогичные электрические характеристики, но отличающиеся по конструкции, перед использованием желательно дополнительно контролировать, поскольку их конструкция не гарантирует должного качества изготовления.

3. Результаты проведенной субъективной экспертизы не означают ни то, что К73-16 – самые лучшие конденсаторы, ни то, что любые конденсаторы «звучат» одинаково, а лишь в очередной раз подтверждают очевидный факт: слышимые отличия определяются объективными параметрами. В данном случае различия характеристик конденсаторов тестируемых типов (полипропиленовые, лавсановые и масляно-бумажные) могут вызывать лишь очень незначительную разницу, лежащую для подавляющего большинства слушателей около порога слышимости. Те же, кто в состоянии эти различия услышать, в конкретной аудиосистеме могут отдать предпочтение любому из рассмотренных выше типов конденсаторов.

Авторы выражают благодарность всем членам форума Vegalab.ru, как непосредственно участвовавшим в подготовке и проведении субъективного тестирования, так и обсуждавшим его результаты на страницах форума. Особую благодарность авторы выражают известному разработчику акустических систем [Георгию Крылову](#), без решающего участия которого подобное мероприятие не смогло бы состояться.

Фото - Луханин Виктор Владимирович.

Литература

1. <http://www.salonav.com/arch/2006/11/088-089.html>
2. <http://www.humblehomemadehifi.com/Cap.html>
3. <http://www.zaphaudio.com/aboutme.html>
4. Конденсаторы. Руководство по применению. ОСТ 11 0518-87.
5. Каталог компании Vishay «Film capacitors».
6. J. Curl, W. Jung «A real-time signal test for capacitor quality» The Audio Amateur 4/85, p.22-24
7. <http://www.national.com/rap/Application/0,1570,28,00.html>
8. J. Smith «Capacitance Change with Applied Voltage; or "when is a 0.1uF capacitor not a 0.1uF capacitor» http://www.cliftonlaboratories.com/capacitor_voltage_change.htm
9. Do Passive Components Degrade Audio Quality in Your Portable Device? <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN3171.pdf>
10. Сравнение: конденсаторы для усилителей . <http://www.electroclub.info/other/conders1.htm>
11. И. Алдошина, Субъективная оценка акустических систем. «Звукорежиссер» №9, 2003 г , <http://rus.625net.ru/audioproducer/2003/09/aldo.htm>

05.10.2008 - 24.11.2009