Реферат N° 1 (редакция v1.2)

О возможностях воспроизведения акустическими системами современных музыкальных записей

ЧЕСЛОВАС ПАПЛАУСКАС

«CP AUDIO PROJECTS»,
Каунас, 2012 г.

Резюме

Качественное воспроизведение звука является комплексной задачей, а акустические системы (АС) являются важнейшим звеном в системах воспроизведения музыки.

В реферате раскрывается важность совокупности параметров громкоговорителей и влияние их на конечный результат. Конкретными примерами иллюстрируются возможности современных методов анализа, позволяющих детально исследовать работу АС в области низких частот.

Основное внимание сосредоточено на возможности воспроизведения современных музыкальных записей небольшими акустическими системами. Для этой цели выбран популярнейший класс современных «полочных» АС, в которых использованы электродинамические громкоговорители низких частот (НЧ), диаметром 6,5". Приведены сравнительные оценки АС с маленькими и большими НЧ-громкоговорителями PRO-класса. Наиболее эффективно низкие частоты воспроизводят АС с фазоинверторами – именно такие здесь и обсуждаются.

Обзор не включает в себя всех аспектов действия электродинамического громкоговорителя или подробных данных конкретных АС. Поэтому в конце приводятся только обобщенные выводы.

Реферат предназначен для читателей, интересующихся качественным воспроизведением музыки. Для более глубоких теоретических объяснений акустических процессов, в конце реферата прилагается список литературы.

В тексте использованы термины – «громкоговоритель» и «драйвер», суть которых одинаковая.

Начнем со студийных мониторов ближнего поля, так как они лучше всего раскрывают возможности небольших систем и позволяют оценить достоинства и недостатки небольших бытовых АС.

Первым кандидатом может быть 2-полосная система «Westlake audio» LC6.75. Эти мониторы ближнего поля широко используются в студиях звукозаписи. Аналогичную конструкцию имеет бытовая реализация этих же мониторов, название которых также LC6.75. Отличается лишь отделка корпуса: студийные АС окрашены в черный цвет, а бытовые – фанерованные. Мониторы LC6.75 участвовали в отборе лучших изделий TEC (Technical Excellence & Creativity Awards) 1996 года, в категории «Studio Monitor Technology», поэтому законченность конструкции этой системы не должна вызывать сомнений.

1 рис. Акустическая система бытового назначения «Westlake audio» LC6.75. Это классическая конструкция АС с фазоинвертором, в которой выполнена настройка положения НЧ и ВЧ драйверов.

Производитель приводит такие технические данные:

SPECIFICATIONS	
Lc6.75F 2-Way Loudspeaker System	
Woofer	1 x 6.5"
Midrange	
Tweeter	1 x 3/4"
Frequency Response (+/- 3dB)	60Hz-20kHz
Power IEC Short/Long	80W / 200W
Sensitivity @ 1m/2.83V	88dB
Crossover Frequency	4kHz
Impedance Nominal/Minimum	7/5
Inputs	Single, Dual Banana 5-Way Binding Posts
Dimensions: H x W x D (ins.)	16 x 8 x 10
Dimensions: H x W x D (cms.)	40.6 x 20.3 x 25.4
Weight: Lbs. / Kg.	22 lbs. / 10 kgs.

LC6.75 имеет небольшой внутренний объем (приблизительно 14л), но весит сравнительно много – 10кг. Мониторы относительно высокой чувствительности – после пересчета декларированной чувствительности на dB/W/m, фактическая чувствительность будет составлять приблизительно 87dB/W/m. Когда низкочастотным 6,5” драйвером не стремятся воспроизводить сигналы нижней музыкальной октавы, то система с фазоинвертором может воспроизводить низкие частоты с небольшими искажениями.

Фильтрами низкочастотному драйверу выделяются 6 низких октав музыкального сигнала, а небольшому (0,75”) высокочастотному громкоговорителю остается воспроизведение 2,5 верхних октав – в техническом отношении такое решение рациональное!

Теоретически система может создавать акустическое давление до 110dB, однако такая мощность вызовет большие искажения. Если говорить о качественном воспроизведении музыки, максимальная акустическая мощность должна составлять примерно 100dB, или приблизительно 20W электрической мощности.

Попробуем сравнить LC6.75 с другими студийными мониторами.

«Genelec» является одним из лидеров на рынке студийных мониторов, производящих мониторы ближнего поля различного размера. Так как низкочастотный драйвер размером 6,5“ применяется только в студийных мониторах 8040A, остановимся именно на нем.

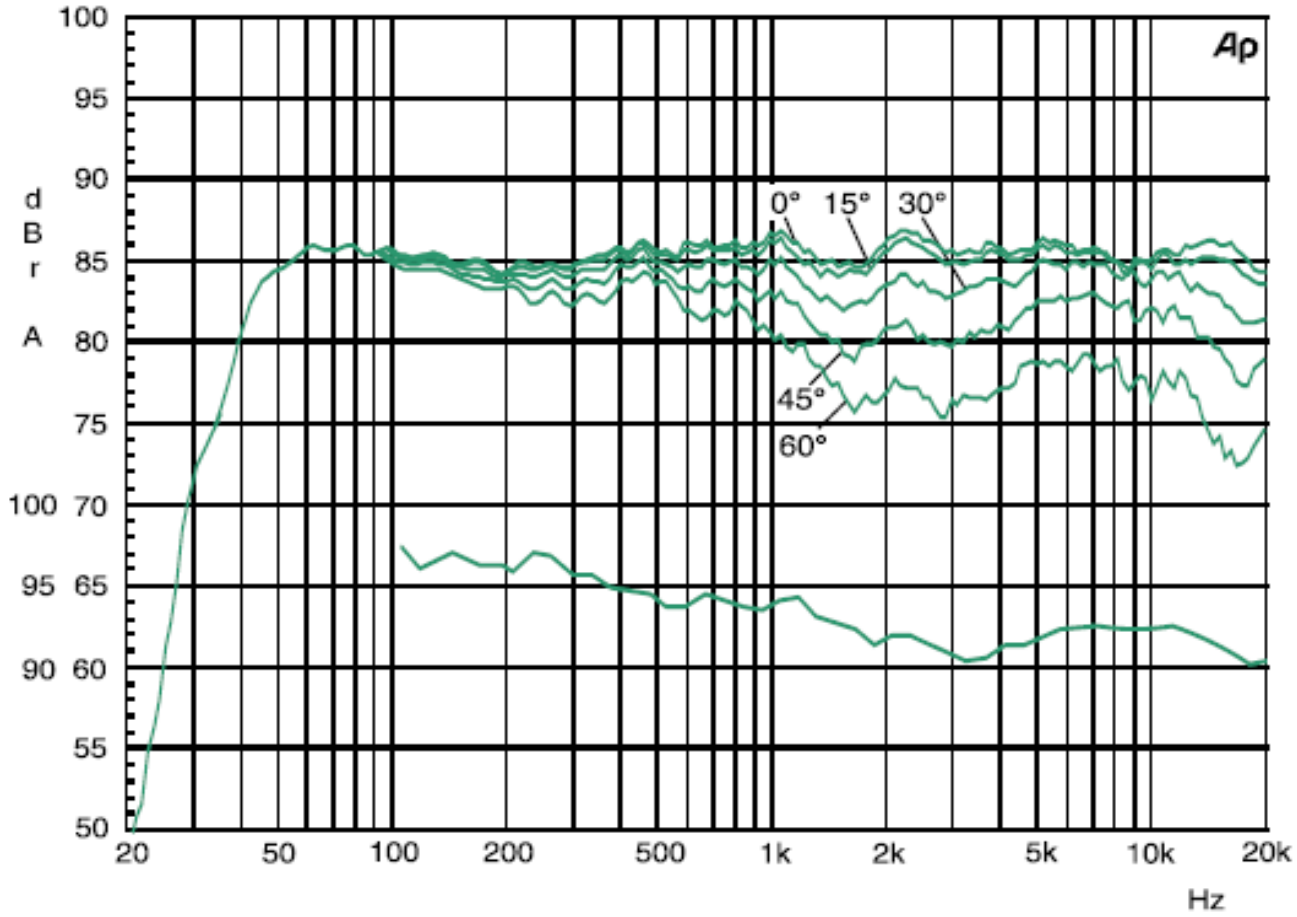
2 рис. Монитор ближнего поля с фазоинвертором «Genelec» 8040A.
Внутри смонтированы отдельные усилители мощностью 90ватт и активный фильтр (кроссовер).
Настройка фаз реализовано путем использования акустической панели для ВЧ драйвера.
Такой способ повышает нагрузку ВЧ драйвера и позволяет снизить разделительную частоту ВЧ.
Также примерно на 2dB повышает эффективность воспроизведения.

«Genelec» приводит следующие технические характеристики 8040A:

Громкоговорители:	НЧ:6.5", *ВЧ:*3/4" с металлическим диффузором
Частота разделения:	3kHz
Частотная характеристика:	48Hz – 20kHz (± 2dB)
Мощность усилителей/на канал:	*НЧ:* 90W, *ВЧ:* 90W
SPL:	105dB – максимальная кратковременная акустическая мощность синусного сигнала в полосе частот 100 – 3000Hz, на расстоянии 1м в ВЧ оси, когда ВЧ работает в режиме «половины акустического поля». 115dB SPL @ 1м – максимальная кратковременная эффективная акустическая мощность для музыкального сигнала двух АС.
Габариты (В х Ш х Г):	350 х 237 х 223мм
Вес:	8.6кг

Все корпусы мониторов ближнего поля «Genelec» отлиты из алюминиевого сплава, очень упругие и не резонирующие. В конструкции корпуса приняты меры борьбы с вторичными дифракциями, проведена настройка взаимного положения драйверов. Так как эта АС активная, потерь в кроссовере нет, используется вся эффективность системы.

«Westlake audio» и «Genelec» сами не производят громкоговорители, однако отбирают их по параметрам. Конструкция мониторов «Genelec» 8040A является очень удачной, здесь полностью используются возможности низкочастотного драйвера.



3 рис. Частотная характеристика и зависимость излучения «Genelec» 8040A, когда направленность измеряется на расстоянии 1м (пучок верхних кривых). Нижняя кривая показывает зависимость максимальной акустической мощности системы от частоты.

Рабочие полосы для этих мониторов выбраны таким образом, чтобы НЧ драйвер воспроизводил 6 октав. ВЧ драйверу выделяется воспроизведение почти 3 верхних октав. Чувствительность 8040A составляет приблизительно 86dB/W/m, а максимальная продолжительная акустическая мощность – 99dB. «Genelec» приводит величину искажений, которая для 90dB SPL@1m составляет 2% в полосе частот 50–100Hz. В полосе более высоких частот искажения снижаются до 0,5%.

Как видим, параметры обеих АС с одинаковыми по размеру НЧ и ВЧ драйверами являются очень похожими.

Зависимость параметров от размера НЧ-громкоговорителей, а тем самым и от размера АС иллюстрирует приводимая «Westlake audio» сравнительная таблица (4 рис.).

Нетрудно сделать следующие выводы:

- по мере увеличения диаметра НЧ-громкоговорителей, повышается эффективность воспроизведения низких частот системы;
- большие АС отличаются большей чувствительностью и меньшими искажениями[2].
- АС с большей чувствительностью и с той же граничной частотой воспроизведения НЧ всегда будет больше, тяжелее и дороже. Однако, такова цена качественного воспроизведения музыки.

Lc Series

Model	System Type	Woofer	Midrange	Tweeter	Frequency Response +/- 3dB	Power IEC Long/Short	Sensitivity @1m/2.83V	Crossover Frequency	Impedance nom/min	Inputs	Dimensions H x W x D in. H x W x D cm.	Weight Lbs. Kg.
Lc4.75F	2-Way BR	1 x 4″		1 x 3/4″	60Hz-20kHz	60/180W	85dB	4.5kHz	7/4	BP	12 x 5.5 x 7.25 30.4 x 13.9 x 18.4	12 5.4
Lc5.75F	2-Way BR	1 x 5″		1 x 3/4″	60Hz-20kHz	80/200W	86dB	4.5kHz	7/4	BP	14 x 6.5 x 9 35.6 x 16.5 x 22.9	18 8.2
Lc6.75F	2-Way BR	1 x 6 1/2″		1 x 3/4″	60Hz-20kHz	80/200W	88dB	4kHz	7/5	BP	16 x 8 x 10 40.6 x 20.3 x 25.4	22 10
Lc8.1F	2-Way BR	1 x 8″		1 x 1″	55Hz-20kHz	85/225W	90.5dB	3.6kHz	7/5	BP	18 x 10 x 11.6 45.7 x 25.4 x 29.5	31 14
Lc8.1SW	Passive Subwoofer	2 x 10″			34Hz-20kHz	160/450W	90.5dB	68Hz	5/2.5	BA/BW	26.8 x 13.7 x 14.7 68.1 x 38.8 x 37.3	100 45.4.
Lc3w10VF	3-Way BR	1 x 10″	1 x 5″	1 x 3/4″	42Hz-20kHz	100/300W	88dB	150/4.5kHz	5/3	BA/BW	24.25 x 12 x 14 61.5 x 30.5 x 35.6	71 32.2
Lc3w12VF	3-Way BR	1 x 12″	1 x 6 1/2″	1 x 1″	40Hz-20kHz	110/300W	91dB	160/4.5kHz	5/3	BA/BW	29.5 x 14.5 x 15.5 38.1 x 63.5 x 38.1	102 47.6
Lc265.1F	3-Way BR	2 x 6 1/2″	1 x 5″	1 x 1″	48Hz-20kHz	125/400W	91dB	180/4kHz	5/3	BA/BW	8 x 22 x 11 20.3 x 55.9 x 27.9	42 19

BBSM Series

Model	System Type	Woofer	Midrange	Tweeter	Frequency Response +/- 3dB	Power IEC Long/Short	Sensitivity @1m/2.83V	Crossover Frequency	Impedance nom/min	Inputs	Dimensions H x W x D in. H x W x D cm.	Weight Lbs. Kg.
BBSM-4F	2-Way BR	2 x 4″		1 x 3/4″	65Hz-20kHz	80/200W	89dB	1.5kHz	4/2	BA/BW	8 x 15 x 10 20.3 x 38.1 x 25.4	25 11.3
BBSM-5F	2-Way BR	2 x 5″		1 x 1″	55Hz-20kHz	80/200W	90dB	1.2kHz	4/2	BA/BW	10 x 18 x 11.75 25.4 x 45.7 x 29.8	42 19
BBSM-10F	3-Way BR	2 x 10″	1 x 6 1/2″	1 x 1 1/4″	45Hz-20kHz	115/360W	94dB	600/4kHz	4/2	BA/BW	16 x 30 x 20 40.6 x 76.2 x 50.8	150 68

4 рис. Технические данные акустических систем «Westlake audio» серий LC и BBSM.

Коротко остановимся на бытовых АС с НЧ драйверами аналогичного размера.

«Talon» Hawk (5 рис.) может стать примером двухполосной АС с низкочастотными драйверами 6,5“.

5 рис. «Talon» Hawk, в которой использован «керамический» низкочастотный драйвер «Accuton» 6,5“.

Производитель приводит следующие параметры Hawk:

Frequency Response	**40Hz – 40kHz**
Nominal Impedance	**8 ohms**
Minimum Impedance	**6 ohms**
Efficiency	**88 db**
Driver complement	**7" ceramic midrange + 1" ceramic tweeter**
Dimensions	**18.5 x 13.75 x 11 inches (H,W,D)**
Weight	**20.4 kg (per speaker)**

Для того, чтобы избежать недоразумений, рекламное описание производителя приводится на языке оригинала.

The Talon Hawk is our reference grade monitor. Every detail of speaker design and manufacturing is meticulously examined. The finest drivers from Accuton used. From our proprietary acoustical suspension to solderless point to point wiring, nothing is left to chance. What is so amazing about the Hawk is its convincing bass out of such a small cabinet.

Для тех, кто ищет исключительного дизайна, производители бытовых АС могут предложить конструкции АС экзотического внешнего вида, замысловатых форм. Однако они не всегда правильно сконструированы в инженерном отношении.

6 рис. Акустическая система «Metal Sound Design» Moon II

Поскольку стандарты каждого производителя АС различаются, а у нас нет фактических результатов измерения, мы не сможем осуществить точного сравнения громкоговорителей. Поэтому придется воспользоваться наукой акустика, позволяющей сделать правильные выводы – именно это и является целью данного реферата.

Воспроизведение низких частот хорошо исследовано с научной стороны, у нас имеются точные математические модели анализируемых драйверов, поэтому мы можем провести анализ работы громкоговорителей в конкретной АС. Даже в том случае, когда производитель не приводит ни максимальной мощности, ни максимального SPL (случай «Talon» Hawk), мы можем понять, почему это делается и какими свойствами обладает конкретная система. Еще шире рассматривать бытовые АС с драйверами 6,5“ не имеет смысла, так как основные закономерности проектирования для всех подобных систем являются одинаковыми.

Для тех, кто хочет подробнее узнать о низкочастотных громкоговорителях, рекомендуется прочитать 1 приложение к настоящему реферату.

Во 2-ом приложении к реферату приводится пример теоретического моделирования АС в рамках программного пакета «LinearX» LEAP, а результаты, отражающие работу громкоговорителя на участке воспроизведения предельно низких частот, изображены на рисунках 15 и 16.

Выводы

1. В соответствии с законами акустики существует зависимость размера, веса и чувствительности АС, преодолеть которую невозможно никакими способами. Качественной является такая АС, в конструкции которой сочетается максимально равномерная частотная характеристика, максимальная чувствительность и минимальные искажения[2,3]. Эффективность воспроизведения низких частот акустических систем зависит от размера АС, а, говоря об АС с громкоговорителями размером 6,5“, оптимальная максимально низкая частота воспроизведения составляет приблизительно 60Hz. Ниже данной частоты и в случае повышенной мощности, амплитуда колебания мембраны 6,5“ непропорционально увеличивается, она перестает создавать пропорциональную акустическую мощность звука.

Технические данные студийных мониторов ближнего поля подтверждают, что системы с НЧ драйверами размером 6,5“ не могут качественно воспроизводить самую низкую музыкальную октаву.

2. В тех случаях, когда небольшими громкоговорителями стремятся воспроизводить самую низкую музыкальную октаву, конструкторы вынуждены увеличивать ход диффузора громкоговорителя и использовать более мощные магнитные системы Ценой такого решения является деградация параметров АС: ухудшается импульсная характеристика, увеличивается искажения вследствие нелинейности подвески мембран, появляются модуляционные искажения частот Доплера, увеличиваются термоискажения из-за разницы давлений воздуха внутри и снаружи АС, появляются искажения из-за больших пульсаций магнитной индукции, повышаются шумы мембраной из за воздушной турбуленции, а также компрессионные искажения, вследствие большего воздействия магнита на создаваемый мембраной поток воздуха.

3. В более дешевых бытовых АС используется НЧ-громкоговорители с меньшими катушками и небольшими магнитами. В этих случаях производители выбирают «психоакустический» путь компенсации, когда конструируются АС с «горбом» в частотной характеристики НЧ области. Такие АС не полностью воспроизводит самые низкие частоты, однако на более высоких частотах нижней октавы ход мембраны уже позволяет воспроизводить звук на достаточно высоком акустическом уровне. Такие конструкции приводят к результату, называемому – «системы одной ноты». Психоакустически такие системы воспринимаются как хорошо воспроизводящие НЧ, однако музыкальный тембр таких систем становится искаженным. Проблема возрастает и вследствие того, что большинство комнат для прослушивания музыки акустически не оборудованы. В таких комнатах основные резонансы проявляются также на самых низких частотах в диапазоне 20 – 100Hz, поэтому резонансы АС и комнаты могут суммироваться. Вот почему АС с не ровной частотной характеристикой являются особенно чувствительными к помещению. Общий результат является трудно прогнозируемым и практически неразрешимым.

4. Сконструированные правильно в инженерном отношении большие акустические системы по всем аспектам качественного воспроизведения музыки побеждают небольшие АС. Поэтому при выборе АС, преимущество нужно отдавать большим акустическим системам.

Литература и ссылки

1. „Handbook for Sound Engineers“. The New Audio Cyclopedia, editor Glen Ballou. Howard W.Sams&Company, 1991.
2. Philip Newell, Keith Holland „Loudspeakers for music recording and reproduction“, ISBN: 978-0-240-52014-8
3. Joseph D‘Appolito „Testing loudspeakers“, ISBN: 1-882580-17-6
4. Филип Нъюэл – «Великий низкочастотный обман»: http://www.sound-consulting.net/ru/?page_id=1420
5. „Westlake audio“ Hi-Fi системы серии LC: http://www.westlakeaudio.com/Speakers/Hi_Fi_Series/lc_series2.html
6. Мониторы „Genelec“ 8040A: http://www.genelec.com/products/8040a/
7. Низкочастотные громкоговорители “Accuton”: http://www.accuton.de/drivers/list.php?PHPSESSID=0dde51f7fa6d7514d95f4d0f03b74324&m1=2&m2=4&m3=0&matID=4&appID=3
8. Громкоговорители „Seas“ W18E001: http://www.seas.no/index.php?option=com_content&view=article&id=358:e0018-08s-w18e001&catid=49:excel-woofers&Itemid=359

1 приложение.

Параметры НЧ-громкоговорителей и их оценка

Начнем с популярных в настоящее время низкочастотных 6,5“ «Accutone», которые широко применяются в более дорогих бытовых АС.

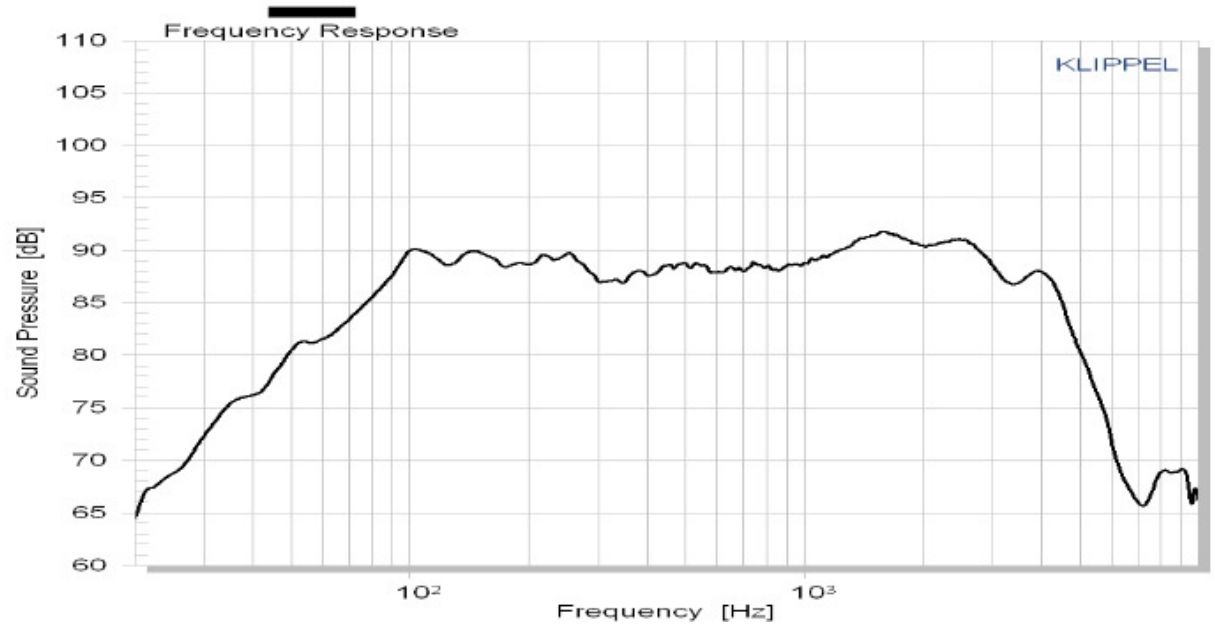
Громкоговорители «Accuton» этой серии называют «керамическими», хотя в действительности мембраны штампуются из алюминиевой ленты и по специальной технологии покрываются слоями композитного оксида. Производитель утверждает, что данная технология позволяет изготовить особенно упругие мембраны, а громкоговоритель отличается меньшими искажениями. «Керамические» мембраны являются хрупкими, их легко повредить, поэтому громкоговорители комплектуются с защитными сетками. Для повышения прочности производители иногда покрывают поверхность мембран тканью.

«Accutone» C173-6-191E

7 рис. Громкоговорители «Accuton» 6,5“ с «керамическими» мембранами

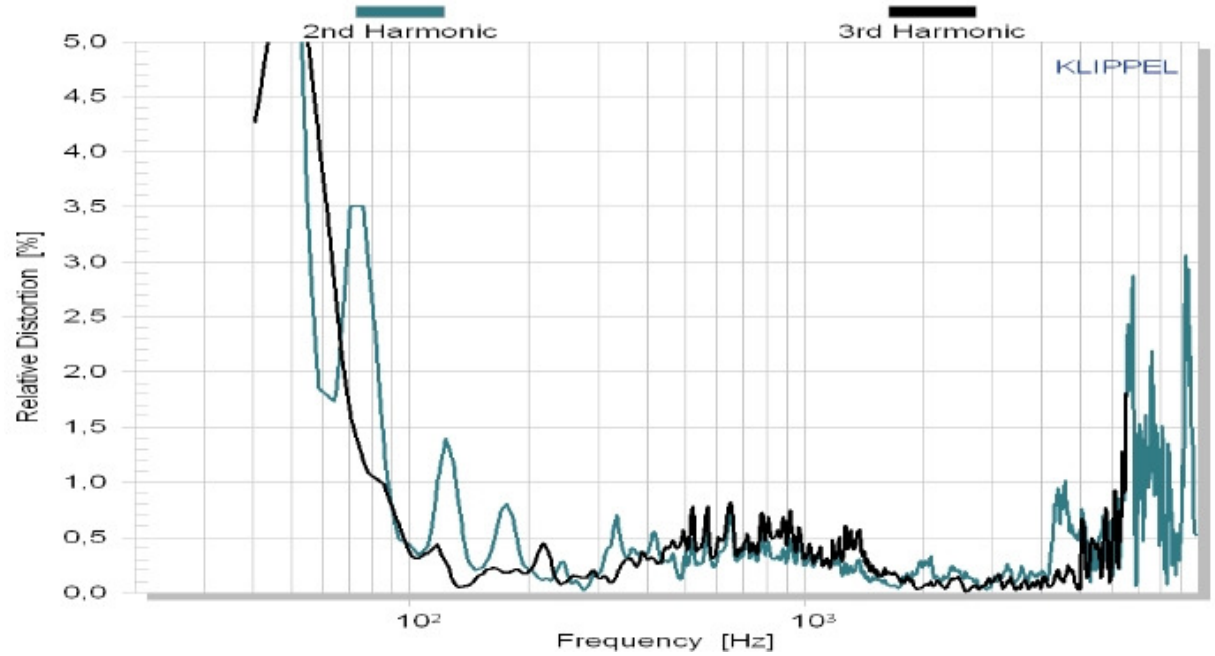
Производитель декларирует следующие параметры:

Thiele/Small Parameters			
Sensitivity (2.83V / 1m)	Lp	88	dB
DC-resistance	Re	5.8	Ohm
Resonance frequency	Fs	32	Hz
Equivalent volume of air	Vas	33	L
Mechanical Q	Qms	4.9	
Electrical Q	Qes	0.29	
Total Q	Qts	0.27	
Effective piston area	Sd	130	cm²
Moving mass	Mms	17.5	g
Suspension compliance	Cms	1.37	mm/N
Mechanical resistance	Rms	0.75	kg * s
Voice Coil Data			
Power handling	P	120	Watt
Linear excursion	Xmax	+/- 5	mm
Voice coil diameter		38	mm
Voice coil former material		Ti	
Voice coil material		Cu	
Voice coil inductance	Le	0.7	mH
Force factor	Bl	8.5	N/A
Motor type		Overhung	
Ferrofluid filling		no	



8 рис. Приводимая производителем частотная характеристика.

В характеристике не отражены паразитные резонансы в области более высоких частот, которые являются неизбежными для НЧ-громкоговорителей с твердыми мембранами (см. данные искажений на 9 рис.). Инженеры «Accuton» предприняли меры по уменьшению искажений (два демпфирующих отверстия в мембране), но это только подтверждает существование проблемы. Более надежным способом борьбы с резонансами является ограничение воспроизведения высших частот фильтрами. Вот почему производители студийных мониторов все еще используют громкоговорители с мембранами из бумажной массы - такие меньше резонируют и гарантируют лучшие общие параметры АС.



9 рис. Приводимая производителем характеристика искажений.

«Accuton» измеряет искажения при малой мощности (1W). Видно, что искажения начинают резко увеличиваться ниже 100Hz, а также свыше 4000Hz. Поэтому такой громкоговоритель можно применять в системах, где высшая частота разделения составляет приблизительно 3000Hz - так и поступает большинство производителей бытовых АС.

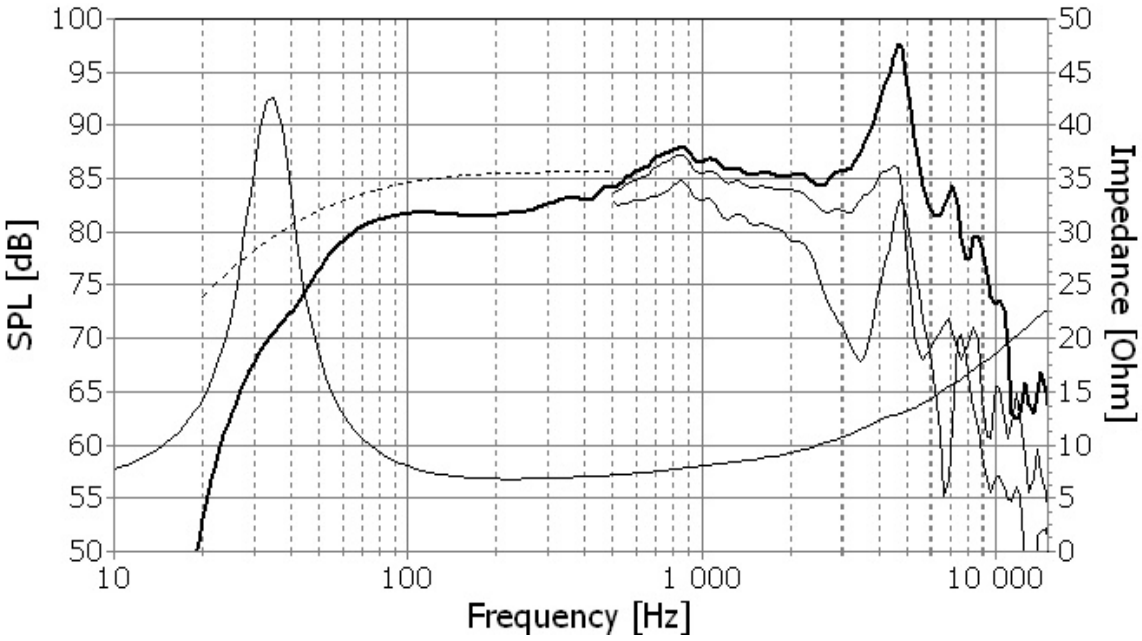
Искажения самых низких частот мы можем контролировать только путем уменьшения мощности, подаваемой в АС.

«Seas» Excel W18E-001

«Seas» Excel W18E-001 также является низкочастотным громкоговорителем 6,5“, используемым в более дорогих АС бытового назначения. Аналогично «Accuton», мембрана этого громкоговорителя укреплена специальным слоем магния. Также применяется подвижная подвеска мембраны из натуральной резины. Для уменьшения искажений использовано медное кольцо. По мнению производителя, такая мембрана с особенно подвижной подвеской и большим ходом позволяет качественно воспроизводить весь спектр музыки.

10 рис. «Seas» Excel W18E-001.

Стремясь к лучшему воспроизведению НЧ, подвижность мембраны небольшого громкоговорителя должна быть очень большой, однако это снижает чувствительность, максимальную акустическую мощность, а также демпфирование переходных процессов АС.



11 рис. Частотная характеристика производителя, на которой виден преобладающий резонанс на участке 4500Hz и большая неравномерность в области высоких частот.
Это признак упругой мембраны, имеющей недостаточное поглощение паразитных колебаний.

Производитель приводит следующие параметры W18E-001:

Nominal Impedance	8 Ohms	Voice Coil Resistance	6.1 Ohms
Recommended Frequency Range	40 - 2500 Hz	Voice Coil Inductance	0.65 mH
Short Term Power Handling *	250 W	Force Factor	6.6 N/A
Long Term Power Handling *	100 W	Free Air Resonance	34 Hz
Characteristic Sensitivity (2,83V, 1m)	86 dB	Moving Mass	15.5 g
Voice Coil Diameter	39 mm	Air Load Mass In IEC Baffle	0.82 g
Voice Coil Height	16 mm	Suspension Compliance	1.4 mm/N
Air Gap Height	6 mm	Suspension Mechanical Resistance	1.20 Ns/m
Linear Coil Travel (p-p)	10 mm	Effective Piston Area	126 cm²
Maximum Coil Travel (p-p)	19 mm	VAS	30 Litres
Magnetic Gap Flux Density	0.88 T	QMS	2.91
Magnet Weight	0.42 kg	QES	0.49
Total Weight	1.75 kg	QTS	0.42

Оценивая параметры, необходимо отметить, что производители бытовых громкоговорителей и АС чаще всего не указывают условия измерения параметров или они бывают недостаточно определены. Частично это можно оправдать технологическими разбросами в производстве, но конструкторы АС должны знать, что многие производителей приводят улучшенные параметры. Проверить параметры и узнать все нужные, позволяют специализированные программы проектирования АС (об этом читайте во втором приложении). Результаты будут еще точнее, если существующие в программах модели громкоговорителей будут подкорректированы измеренными Thiele-Small параметрами конкретного драйвера.

Громкоговорители размером 6,5“ будет легче оценивать, если мы сравним их с параметрами больших НЧ-громкоговорителей.

В конструкции НЧ-громкоговорителя профессионального применения «TAD» TL-1102 отражено больше требований акустики. Поэтому это подходящий пример и для сравнений, и для выводов. Практическое применение этих громкоговорителей мы можем увидеть в студийных мониторах среднего поля «TAD» Exclusive 2251 и 2252 (http://audio-database.com/PIONEER-EXCLUSIVE/speaker/model2251-e.html).

12 рис. Низкочастотный драйвер «TAD» профессионального назначения TL-1102.
Основные особенности конструкции: композитная мембрана из бумажной массы с кольцами упругости, катушка диаметром 65мм, намотанная прямоугольным проводом, магнитная система Alnico с системой охлаждения катушки, упругая подвеска большого хода типа «аккордеон», литой корпус.

Технические характеристики всех низкочастотных громкоговорителей «TAD», в том числе и TL-1102, приведены в таблице ниже:

■Low Frequency Loudspeaker仕様一覧

	TL-1601a	TL-1601b	TL-1801	TL-1102
General				
Nominal Impedance	8 Ohm	8 Ohm	8 Ohm	8 Ohm
Lowest Resonance Frequency (Fo)	28 Hz	28 Hz	26 Hz	31 Hz
Frequency Range	28-2000 Hz	28-2000 Hz	26-2600 Hz	31-3000 Hz
Rated Input Power	150 Watt	200 Watt	200 Watt	125 Watt
Maximum Input Power	300 Watt	500 Watt	800 Watt	500 Watt
Sound Pressure Level	97 dB/W (1m)	97.5 dB/W (1m)	96.5 dB/W (1m)	94 dB/W (1m)
Total Magnetic Flux	260.000 Mx	277.000 Mx	282.200 Mx	148.000 Mx
Magnetic Flux Density	11.800 G	12.400 G	11.200 G	12.800 G
Highest Recommended Crossover	1.200 Hz	1.200 Hz	800 Hz	1.800 Hz
Recommended Enclosure	113 - 307 liter	113 - 304 liter	170 - 500 liter	170 - 500 liter
Effective Piston Diameter	335.0 mm	335.0 mm	394.0 mm	216.0 mm
Baffle Opening	352.0 mm	352.0 mm	426.0 mm	237.0 mm
Mounting Dimensions	370.0 mm	370.0 mm	441.0 mm	255.0 mm
Weight	11 kg	13 kg	12.6 kg	6.3 kg
Dimensions (diameter x depth)	400 x 167 mm	400 x 167 mm	464 x 176 mm	276 x 140 mm
Theile-Small Parameters				
sd - Piston Area	0.0881 Sq M	0.0881 Sq M	0.122 Sq M	0.0366 Sq M
Revc - DV Voice Coil Resistance	7 Ohm	7 Ohm	7 Ohm	7 Ohm
Levc - Voice Coil Inductance 1kHz (mH)	1.6	1.7	2	1.1
BL - Flux Density (TM)	19.5	20.5	21	13.5
Vas - Equivalent Acoustic Volume (Liter)	307 liter	304 liter	500 liter	121 liter
Cms - Mechanical Suspension Compliance (x 10^{-4} m/N)	2785	2761	2372	6332
Mms - Mechanical Mass of Cone and Free Air Load	116 g	117 g	158 g	41 g
Mmd	85 g	86 g	114 g	34 g
Fs - Free Air Resonance Frequency	28 Hz	28 Hz	26 Hz	31 Hz
Qms - Mechanical Q Factor	6.8	6.8	7.94	4.35
Qes - Electrical Q Factor	0.36	0.32	0.39	0.32
Qts - Total Q factor	0.34	0.31	0.37	0.3
Xmax - Max Linear Peak Excursion (O-P)	8.0 mm	8.0 mm	7.5 mm	6.2 mm
Pmax - RMS Thermal power Limit	300 Watt	500 Watt	800 Watt	500 Watt
no - Relative Efficiency	1.82%	2.00%	2.20%	1.10%
Vd (cm^2)	705	705	914	227
Max. Excursion Before Damage (P-P)	36.0 mm	36.0 mm	40.0 mm	32.0 mm

Сейчас попробуем оценить природу искажений малых драйверов на самых низких частотах и ответить на вопрос – почему «Accuton» измеряет увеличение искажений ниже 100Hz (см. 9 рис.), какова природа этих искажений?

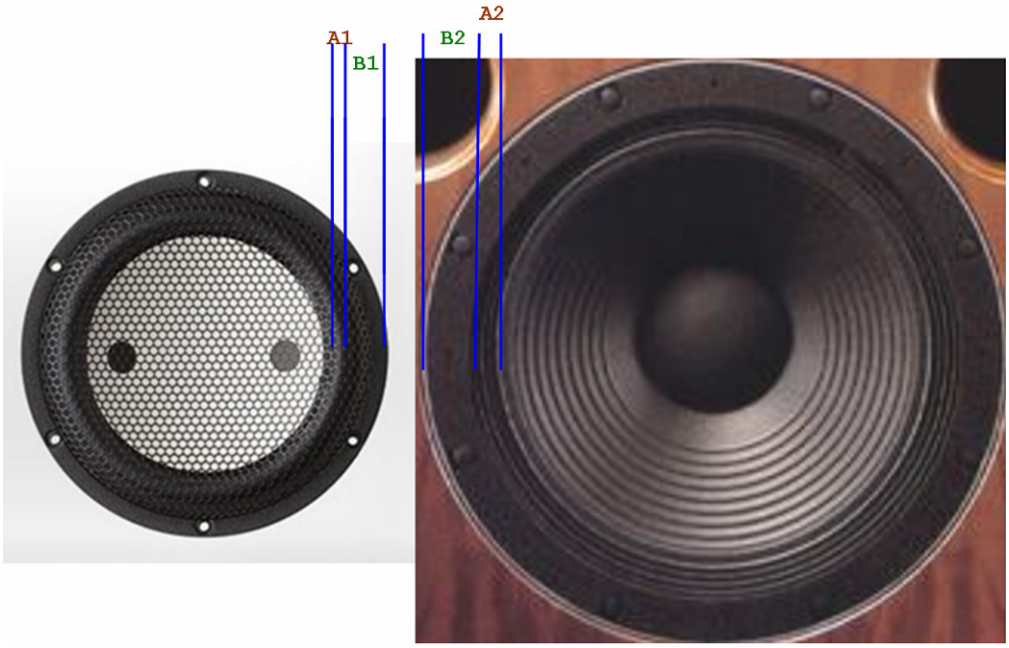
На 13 рис. мы видим громкоговорители 6,5“ и 11“, изображенные в одном масштабе. Видно, что ширина подвески **A1** мембраны 6,5” громкоговорителя намного меньше ширины подвески большего громкоговорителя **A2**: ширина подвески TL-1102 составляет приблизительно 17мм, а C173-6-191E – приблизительно 10мм.

Мы можем сравнить это с длиной пружины: более длинная пружина обладает большим диапазоном равномерной работы, по сравнению с более короткой. На графике искажений громкоговорителя C173-6-191E (16 рис.) отражены искажения на самых низких частотах именно вследствие увеличившегося хода мембраны (см. 2 приложение к реферату). Подвеска динамика TL-1102 позволяет мембране двигаться равномернее и с большими амплитудами.

Улучшение подвески приводит к нестандартным размерам НЧ-громкоговорителей, но оценивая с акустической точки зрения, нестандартные 11“ или 16“ громкоговорители соответствуют громкоговорителям размеров 10“ или 15“.

Важнейшими ограничениями меньших громкоговорителей в отношении конструкции подвески могут быть следующие:

- ход катушки не может быть увеличен значительно, так как это увеличивает общую массу мембраны и снижает чувствительность громкоговорителя;
- увеличить ширину подвески мембран было бы трудно, так как такая подвеска будет хуже контролировать мембрану, имеющую большую подвижность (увеличится Cms). Также нужно было бы увеличивать ширину магнитной щели, что снизит магнитную индукцию. Этот путь также приводит к снижению чувствительности громкоговорителя…



13 рис. Подвески мембран бытового 6.5“ и профессионального 11“ низкочастотных громкоговорителей очень отличаются.

Попробуем более детально ответить на вопрос – почему в больших громкоговорителях можно увеличить ширину подвески, и тем самым улучшить линейность работы?

Ответ станет понятным, когда мы оценим важность еще одного параметра – Cms подвески, именуемого «подвижностью подвески громкоговорителя».

Как мы видели вначале, частотная характеристика студийных мониторов с 6,5“ драйверами не охватывает самую низкую музыкальную октаву. Равномерное воспроизведение частот начинается приблизительно с 50 или 60Hz. В инженерном отношении такой выбор является рациональным. Отображенные на 16 рис. второго приложения к реферату кривые показывают, что мощность 50W и частоты ниже 80Hz заставляют мембраны 6,5“ драйверов двигаться с максимально допустимой амплитудой 5мм. Физика акустики показывает, что воспроизведение более высоких частот не заставляет мембрану громкоговорителя вибрировать с большими амплитудами, поэтому может быть увеличен максимальный SPL (громкость) АС. Когда АС не предназначена для воспроизведения самой низкой музыкальной октавы – значительно легче сконструировать сам громкоговоритель, АС будет обладать большей чувствительностью, меньшими искажениями и более равномерной частотной характеристикой. Нужно сказать, что данные проблемы возникли тогда, когда производители бытовых АС решили воспроизводить меньшими громкоговорителями самую низкую часть музыкального спектра. Физика указывает единственный путь к такой цели – мы должны увеличивать подвижность подвески. Иными словами, висящая только на тонкой и подвижной пружине масса будет обладать низким резонансом. Вот почему параметр Cms подвижности НЧ драйверов 6,5“ с пониженным резонансом значительно выше: у «Accuton» – 1,37mm/N, «Seas» – 1,4mm/N, а у большего «TAD» – только 0,64mm/N.

Охарактеризуем подвижность мембраны, используя пример пружины.

Пружина с меньшей подвижностью (более упругая) с большей силой действует на подвешенное тело и быстрее возвращает его в начальное положение. И мембрану громкоговорителей в начальное положение быстрее возвратить может более упругая подвеска. Поэтому переходный процесс больших громкоговорителей с меньшим значением параметра Cms является более коротким по сравнению с НЧ-громкоговорителями небольших габаритов. Можно привести практический пример, когда большие НЧ-громкоговорители с упругими подвесками типа «аккордеон» точнее воспроизводят записи контрабаса или ударных. Увязывая воспроизведение музыки с понятиями физики, можно сказать, что переходные процессы НЧ-громкоговорителя должны быть короче переходных процессов любых музыкальных инструментов. Только тогда АС не продлевают звучание музыкальных инструментов и записи звучат естественно и натурально.

Мембрана является важнейшим элементом любого громкоговорителя. Она должна оставаться упругой во всем частотном диапазоне работы АС и хорошо гасить внутренние вибрации самой мембраны. От массы мембраны зависит чувствительность. С целью достижения большей чувствительности «Accuton» и «Seas» изготовили очень легкие и упругие мембраны НЧ драйверов. К сожалению, такие мембраны хуже гасят внутренние резонансы и отличаются большими искажениями в области высоких частот.

На 14 рис. мы видим толстую, изготовленную из нескольких слоев бумаги, часть мембраны низкочастотного громкоговорителя с дополнительным ламинированием

поверхности и кольцами упругости. НЧ драйверы с такими мембранами чаще всего используются в больших студийных мониторах контроля музыкальных записей.

14 рис. Вырезка мембраны 16“ НЧ драйвера «TAD».

Диаметр катушки этих громкоговорителей 100мм, а толщина мембраны колеблется от 1,5 до 2мм. Такая мембрана с катушкой весит 85г, однако, мощная магнитная система и специальная конструкция катушки позволяют достичь чувствительности 97,5dB/W/м. Понятно, что сделав мембрану более легкой, чувствительность громкоговорителя еще повысится, однако это увеличит искажения – для контрольных мониторов это очень важно. По сравнению с небольшими и тонкими мембранами, мембраны большего размера обычно конструируются после оценки большего числа требований к качеству. Большие габариты громкоговорителя создают для этого более благоприятные условия.

Попробуем оценить популярную в последнее время конструкцию бытовых АС, когда НЧ воспроизводит не один, а два или больше драйверов. Почему выбран именно такой путь и куда он ведет?

Величина искажений в области НЧ значительно зависит от максимально допустимого хода мембраны Xmax, а маленькие громкоговорители достигают этот Xmax быстрее. Естественно, что у конструкторов АС возникает желание решить проблему, применяя несколько НЧ драйверов и таким образом уменьшить амплитуду движения мембран. Допустим, в каждой АС монтируются два, четыре или еще больше НЧ-громкоговорителей. Вот откуда появилась реализация бытовых систем, именуемая «башней» (tower). Акустическая ось АС-башен расположена на желаемой высоте, поэтому для них не нужны стойки. К сожалению, в акустическом отношении, такая конструкция не является оптимальной.

Акустически два 6,5“ громкоговорителя почти эквивалентны одному 8“ громкоговорителю, которому также необходим соответственно больший объем корпуса (аналогично двум 6,5“). Попытаемся детальнее проанализировать такое решение и начнем с популярного решения – два НЧ-громкоговорителя в одном корпусе.

Поскольку на рынке преобладают громкоговорители 8 ом, два НЧ драйвера снижают номинальное сопротивление АС до 4 ом. После снижения сопротивления, токи в фильтрах увеличиваются, и АС начинает работать в более сложном режиме. Более важным является то, что и для ламповых, и транзисторных усилителей такая нагрузка нежелательна. Одно данное обстоятельство заставляет хорошо подумать, стоит ли приобретать АС-башни с двумя НЧ драйверами, и номинальным сопротивлением 4 ома. Я не отвечу на вопрос, почему два НЧ драйвера не соединяются последовательно и не конструируются АС с сопротивлением 16 ом. Вероятно, что это только вопрос времени, так как в акустическом отношении такой вариант стал бы более рациональным.

Использование четырех НЧ дайверов в одной АС снова позволяет получить оптимальное сопротивление 8 ом, и еще большую допустимую мощность АС. Анализируя данный вариант, не будем обращать внимание на увеличение объема корпуса или

цены. Допустим, все 4 громкоговорителя смонтированы согласно законам акустики рациональнейшим способом: все в одной компактной группе, а не в узком корпусе друг над другом. Такая группа 6,5“ громкоговорителей акустически соответствует одному 12“ НЧ драйверу. Каковы преимущества по сравнению с одним драйвером 12“? Какой вариант АС – с одним большим, или с четырьмя меньшими лучше выбирать?

Эффективная площадь мембраны четырех 6,5“ драйверов составляет приблизительно 520см². Примерно такая площадь и у одного 12“ «Fostex» W300AII, с которым попробуем сравнить. Параметры W300AII вы найдете: http://www.europe-audio.com/document.asp?document_id=2228&link=datasheets\fostex\w300a2.pdf.

Эквивалентная чувствительность АС с четырьмя 6,5“ драйверами «Accuton» увеличится с 87,7 до 93,7 dB/W/m и сравнится с одним «Fostex» W300AII. Максимальный ход 6,5“ мембран останется неизменным (5мм) и будет меньше, чем W300AII (6,5мм). Искажения подвески мембран маленьких драйверов останутся неизменными, и они будут больше «Fostex», имеющего лучшую подвеску. Поскольку у «большого» частота резонанса 25Hz, самые низкие частоты более качественно также воспроизведет W300AII. И другие искажения, о которых было написано выше, будут меньшими для большего драйвера по сравнению с эквивалентным драйвером, состоящим из четырех меньших (см. 2 приложение).

Не редко утверждают, что АС с несколькими меньшими драйверами могут более качественно воспроизводить высокие частоты, а частоту разделения можно выбирать выше. К сожалению, это утверждение также необоснованно, так как налицо противоположное: наука акустика говорит, что частота разделения АС с четырьмя 6,5“ драйверами должна быть снижена с 3000Hz до 800Hz. Даже у АС с двумя 6,5“ драйверами мы должны снизить максимальную частоту разделения до 1000Hz. В противном случае, система воспроизведения звука не будет соответствовать критериям синфазного излучения. Поэтому, больший «Fostex» с эффективным диаметром мембраны 26см выигрывает и здесь, так как может работать до максимальной частоты 1300Hz.

Вывод ясен: когда используются четыре 6,5“ громкоговорителя, такой выбор ведет к конструированию трехполосной акустической системы.

Возможно, существуют другие преимущества, когда несколько одинаковых НЧ драйверов используются в одной АС?

Можно упомянуть преимущество, использование которого в бытовых системах еще не приходилось видеть: половину низкочастотных драйверов нужно смонтировать с противоположной стороны панели АС. Это может снизить искажения из-за разной рабочей среды мембран, находящихся внутри и снаружи АС. В следующем приложении мы подробнее обсудим это, но коротко могу сказать, что при движении мембраны внутрь корпуса, нагрузка становится различной, по сравнению с нагрузкой, когда мембрана движется наружу. Вследствие этого возникают искажения, которые могут быть компенсированы путем монтирования половины драйверов с противоположной стороны. К сожалению, это преимущество не является существенным.

У читателя может возникнуть вопрос – почему так значительно увеличивается эффективный диаметр громкоговорителя, когда используются четыре 6,5“ драйвера?

Снова обратимся к 13 рисунку, на котором отмечены акустически ненужные детали корпуса **B1** и **B2**. При монтировании нескольких громкоговорителей, эти части суммируются, и дополнительно еще появляется конструктивный промежуток. Поэтому мы и получаем сильно увеличившийся эквивалентный диаметр. Именно от эффективного диаметра излучателя зависит частота разделения АС.

Мы также должны оценивать другие достоинства конструкции большего громкоговорителя: один магнит пропорционально меньше закрывает вторую половину мембраны, для большего громкоговорителя мы можем использовать более мощный магнит, в щели которого помещается катушка большего диаметра, большие катушки можно намотать прямоугольным проводом.… Это подтверждает упомянутый пример – у «Fostex» W300AII имеется катушка диаметром 80мм с большим ходом и более совершенная подвеска мембраны. Все это ведет к меньшим искажениям и большей эффективности.

Мы не обсудили особенности популярных узких и высоких корпусов бытовых АС – башен, однако такие корпусы никогда не имеют акустически оптимальных пропорций. Поэтому в корпусах АС – башен наблюдаются большие внутренние отражения, обуславливающие увеличение неравномерности частотной характеристики.

Ниже в таблице приведены параметры, связанные с акустической мощностью, и силой магнитных систем, действующей на мембраны громкоговорителей. Акустическую эффективность необходимо оценивать одновременно с размером мембраны, поэтому эффективность больших громкоговорителей больше, чем меньших. Именно это и отражает чувствительность, когда каждое увеличение на 3dB означает двойную эффективность громкоговорителя и всей АС.

Сравнение эффективности магнитных систем в сравнении с C173-6-191E

	Accutone C173-6-191E	Accutone C173-6-096E	SEAS Excel W18E-001	TAD TL-1102	TAD TL-1601
Диаметр громкоговорителя, см	17.3	17.3	17.6	27.6	40.0
Диаметр мембраны, см	12.96	12.86	12.66	21.58	33.49
Диаметр катушки, см	38	55	39	65	100
Чувствительность, dB/W/m	86.6	91	84.9	92.4	97
Максимальная мощность, W	120	120	100	500	500
Сила магнитного поля, T*m	8.5	11.5	6.6	13.5	20.5
Сила, действующая на мембрану при токе 1A	8.5	11.5	6.6	13.5	20.5
Относительная сила на мембрану	1	1.15	0.776	1.59	2.41

Сейчас попытаюсь ответить на несколько взаимосвязанных вопросов.

Какой максимально допустимый размер НЧ-громкоговорителя подходит для двухполосных систем?

Ответ совершенно несложный и конкретный: двухполосная система с одним 15“ НЧ драйвером может обладать равномерной частотной характеристикой, очень небольшими искажениями и воспроизводить весь динамический диапазон современных музыкальных записей. Для такой системы со специализированными НЧ и ВЧ драйверами оптимальная частота разделения находящейся в области 1000Hz. В этом случае оба громкоговорителя будут воспроизводить равные части музыкального спектра, каждая из которых будет составить по 5 музыкальных октав.

Какой может быть максимальная частота разделения такой системы?

Эффективный диаметр мембраны 15“ драйвера составляет приблизительно 30см, поэтому максимальная частота разделения двухполосной АС может быть 1200Hz.

По каким критериям выбирается частота разделения АС?

Частота разделения зависит от типа используемых громкоговорителей и выбирается конструктором. Частоту разделения АС не следует увязывать с особенностями слуха или музыки.

Можно ли улучшить воспроизведение не оптимально сконструированной двухполосной АС в НЧ или ВЧ областях?

Мы знаем, что недостатки воспроизведения высоких или низких частот иногда пытаются компенсировать дополнительными ВЧ громкоговорителями и сабвуферами, однако такие «улучшения» обычно приводят к другим деградациям стереозвучания. АС необходимо проектировать, учитывая все требования и возможные последствия, поэтому они должны быть сконструированы как единое целое. Если двухполосная система не соответствует техническому заданию, нужно конструировать трехполосную, разделяя музыкальный спектр на пропорциональные части.

Какие драйверы подходят для воспроизведения высокочастотных музыкальных октав высокочувствительной АС?

Поскольку чувствительность системы с большими низкочастотными драйверами достигает 98dB/W/m, для воспроизведения высоких частот лучше всего подходят компрессионные драйверы с рупорами или ленточные громкоговорители высокой чувствительности.

Каковы возможные варианты выбора НЧ драйверов при конструирования двухполосных систем?

Один 15“ драйвер можно заменить двумя меньшими. Тогда рационально применять так называемое расположение НЧ-ВЧ-НЧ громкоговорителей по так называемой схеме D‘Appolito, которое также отвечает требованиям синфазности. Правда, такая система будет обладать более узким рассеиванием в вертикальной плоскости и более широким – в горизонтальной плоскости.

Для небольших помещений также подходят двухполосные системы с одним 12“ или двумя 10“ драйверами. Такие системы могут качественно воспроизводить любые музыкальные записи, для них проще подобрать высокочастотные громкоговорители. Понятно, что чувствительность меньших систем будет меньше, а искажения – больше.

Если в двухполосной системе будут использованы 18“ или два НЧ по 15“ драйвера, то такая система не сможет обеспечивать нужное рассеивание звука. Или необходимо понизить частоту разделения, что значительно затрудняет выбор ВЧ драйвера. В действительности, при выборе 18“ драйверов, нужно конструировать трехполосные системы.

Нужны ли большие, дорогие системы высокой чувствительности, когда речь идет о бытовых системах воспроизведения музыки?

К сожалению, только большие системы могут максимально качественно воспроизводить современные музыкальные записи. Это показывает теория акустики и подтверждает практика. Большими системами также осуществляется основной контроль звука в студиях звукозаписей.

Когда качество воспроизведения не является главным, или нет места для больших АС, любители музыки выбирают более дешевые маленькие АС.

Могут ли большие системы воспроизводить музыку в небольшом помещении лучше, чем меньшие?

Большие системы могут выявить недостатки помещений, но они воспроизведут музыку более качественно, нежели меньшие АС.

Каковы преимущества и недостатки активных систем по сравнению с пассивными?

Основным преимуществом активных систем является то, что фильтры работают в режиме малых токов. В инженерном отношении такие фильтры более совершенны. Качество улучшается и вследствие того, что в активных системах используются отдельные усилители мощности, усилители могут быть оптимизированы в отношении класса работы и мощности. Активные системы легче адаптировать в среде прослушивания, поэтому такие системы являются самыми лучшими в техническом смысле.

Единственный недостаток – активные системы более сложные и дорогие.

Какими примерами можно подтвердить вышесказанное?

Максимальные требования качества предъявляются к основным студийным мониторам контроля звукозаписи. Рекомендую посетить ниже перечисленные сайты ведущих изготовителей контрольных мониторов и бытовых систем высокой чувствительности:

- все мониторы «Kinoshita» являются двухполосными – от RM-11BC до самых больших RM-7VC: http://www.reyaudio.com/index.html;
- мониторы дальнего поля «TAD» Exclusive model 2401 и 2402: http://www.thevintageknob.org/AJW/TAD88/TAD88.html;
- мониторы «Meyer sound» X10: http://www.meyersound.com/products/studioseries/x-10/;
- «JMF audio» HPM-400, HPM-500 и HPM-1000: http://www.jmf-audio.com/speakerhome_en.htm;
- «Westlake audio» Tower-12: http://www.westlakeaudio.com/Speakers/Hi_Fi_Series/tower-12.html.

Двухполосные АС с 15“ драйверами являются старым изобретением. Более 50 лет назад «Altec lansing» начали производить АС серии А7 разных модификаций, которые продолжает иметь большой успех. Бытовых АС с 15“ драйверами не очень много, а из самых удачных можно упомянуть «Altec lansing» Model-19. Эти АС также использовались в небольших студиях. Конструкция Model-19 признана одной из лучших бытовых двухполосных АС [1]. Можно также упомянуть коаксиальные 15“ двухполосные громкоговорители студийного назначения, которые производились «Altec lansing», «UREI» и «TANNOY».

Выводы

1. Современные низкочастотные громкоговорители бытового назначения небольших габаритов по сравнению с НЧ-громкоговорителями классической конструкции имеют некоторые преимущества, но в акустическом отношении они не могут сравниться с большими НЧ драйверами.

2. Используемые в студийных мониторах ближнего поля, а также в бытовых системах НЧ драйверы классических конструкций сохраняют позиции и являются оптимальными в отношении цены и качества.

2 приложение.

Математическое моделирование работы НЧ громкоговорителей

В данном приложении рассматриваются преимущества математического моделирования громкоговорителей, а также те особенности работы НЧ-громкоговорителей, на которые конструкторы АС должны обратить особое внимание.

Пакет программ «Linear-X» LEAP позволяет уточнить приводимые производителями параметры громкоговорителей и подробнее рассмотреть работу в выбранном корпусе. В данном обозрении показаны только некоторые применения пакета LEAP, позволяющие понять важность математических методов, а результаты нужно оценивать только как иллюстрации, но не конкретные проекты.

Выше рассмотрен 6,5“ «керамический» драйвер «Accuton» является близким аналогом громкоговорителю того же производителя C95-T6. В базу данных LEAP C95-T6 включен, поэтому можем сравнить параметры.

Производитель указывает следующие основные данные этого громкоговорителя:

Znom	6 ohm	Sd	133 cm 2
Re	5.9 ohm	BL	8.32 N/A
Le@1kHz	0.73 mH	Vas	34.2 ltrs
fs	32 Hz	Xmax	5.0 mm peak
Qms	4.0	VC Ø	38 mm
Qes	0.30	Sensitivity 1W/1m	89.1 dB
Qts	0.279	Nom. Power	130 W
Mms	13.8 g	Net weight	2450 g
Cms	1.36 mm/N		

LEAP приводит данные, аналогичные данным производителя, однако чувствиительность отличается (LEAP подсчитывает меньшую чувствительность – 87,75dB/W/m). Для подсчета чувствительности используются следующие формулы:

$$\eta(\omega) = \frac{Wa_(\omega)}{We} \quad (approx\ efficiency\ definition)$$

$$We = \frac{Eg^2}{Revc} \quad (blocked\ electrical\ input\ power)$$

$$Wa_(\omega) = Rar_(\omega) \cdot \left|Uas_(\omega)^2\right| \quad (approx\ acoustic\ power)$$

$$\eta(\omega) = \frac{\rho \cdot \omega^2}{Revc \cdot 2\pi c} \cdot \left(\frac{BL}{Sd}\right)^2 \cdot \left(\frac{\frac{\omega}{Mas}}{\left|\frac{1}{Mas \cdot Cas} - \omega^2 + \frac{j\omega \cdot (Ravc + Ras))}{Mas}\right|}\right)^2$$

$$\eta(\omega) = \frac{\rho}{2\pi c \cdot Revc} \cdot \left(\frac{BL \cdot Sd}{Mms}\right)^2 \cdot \left(\frac{Mas \cdot Cas \cdot \omega^2}{\left|1 - Mas \cdot Cas \cdot \omega^2 + j\omega \cdot (Ravc + Ras) \cdot Cas\right|}\right)^2$$

$$\eta(\omega) = \eta_o \cdot H(\omega)^2$$

$$\eta_o = \frac{\rho}{2\pi c \cdot Revc} \cdot \left(\frac{BL \cdot Sd}{Mms}\right)^2 \quad (half\ space\ reference\ efficiency)$$

$$dBspl_o = 10 \cdot \log\left(\frac{\eta_o}{2\pi \cdot Wa}\right) \quad (half\ space\ reference\ sensitivity @ 1W / 1Meter)$$

Для любой программы анализа необходима математическая модель изучаемого громкоговорителя. LEAP чаще всего использует TSL (Transducer Speaker Library) модель громкоговорителей. Она фактически похожа на модель STD (Standard), только является более точной. Программа LEAP позволяет использовать еще одну модель – LTD (Leap Transducer Data), однако сейчас это не так важно. Главное, что сравнения мы должны производить по какой-либо одной методике. Естественно, из-за различия измерения чувствительности и методик подсчета чувствительность может несколько различаться.

Вернемся к моделированию параметров громкоговорителей.

Важно то, что программа LEAP позволяет узнать другие важные параметры громкоговорителей, производитель которых может и не приводить. Параметры исследуемых в обзоре громкоговорителей отражены ниже в виде таблиц.

Данные «Accuton» C95-T6, которые подсчитывает программа LEAP:

Transducer Parameters

Name	Levc Motor	Model	Shape	Fmd KA	Flp KA	Mms Kg	Qms				
Accuton C*95-T6		TSL TSL	Round	3.000	8.000	17.5000m	4.0000				
Note	SPL Mech	Domain	Profile	Qmd	Qlp	Cms M/N	Qes				
Motor constants approximated by Levc		FreeAir	Cone	1.000	2.000	1.3600m	0.3000				
Znom Ω	Xgap M	Krm Ω	Kxm H	Krs N·S/M	Kcs M/N	Vas M³	Qts				
6.000	6.000m	5.05200m	15.15700m	896.78757m	1.36000m	34.2000m	0.2790				
Revc Ω	Xcoil M	Frm Hz	Fxm Hz	Xrs M	Xcs M	Rms N·S/M	Levc H				
5.900	16.000m	1.00000K	1.00000	10.00000m	10.00000m	896.7876m	709.987u				
Sd M²	Xmax M	Drm	Dxm	Drs	Dcs	Fo Hz	SPLo dB				
13.300m	5.000m	0.65000	0.65000	0.00000	0.00000	32.0000	87.748				
Mmd Kg	Xfrg M	Erm	Exm	Ers	Ecs	BL T·M	No %				
16.618m	1.000m	0.65000	0.65000	0.00000	0.00000	8.3200	0.3741				
Pmax Watt	Efrg	Vrm	Vxm	Grs	Gcs	Vs V	Ta °C				
130.000	1.00000	0.00000	0.00000	0.80000	0.80000	1.0000	25.00				
Rtvc C°/W	BLo T·M	Trm Δ/°C	Txm Δ/°C	Trs Δ/°C	Tcs Δ/°C						
1.923	8.3200	0.000	0.000	0.000	0.000						

Ok | Cancel | Help

Copy as Text | Copy as Binary | Paste From Text | Paste From Binary | Check Params | Auto Check | Show Graph

Параметры «Seas» Excel W18E-001:

Transducer Parameters

Name	Levc Motor	Model	Shape	Fmd KA	Flp KA	Mms Kg	Qms				
Seas W18E001 b VC		TSL TSL	Round	3.000	8.000	20.3104m	3.2988				
Note	SPL Mech	Domain	Profile	Qmd	Qlp	Cms M/N	Qes				
Vance Dickason - Voice Coil Magazine		FreeAir	Cone	1.000	1.000	1.0641m	0.5013				
Znom Ω	Xgap M	Krm Ω	Kxm H	Krs N·S/M	Kcs M/N	Vas M³	Qts				
8.000	6.000m	2.57631m	8.35489m	1.32440	1.06407m	25.1666m	0.4351				
Revc Ω	Xcoil M	Frm Hz	Fxm Hz	Xrs M	Xcs M	Rms N·S/M	Levc H				
6.050	16.000m	159.15494m	159.15494m	10.00000m	10.00000m	1.3244	392.218u				
Sd M²	Xmax M	Drm	Dxm	Drs	Dcs	Fo Hz	SPLo dB				
12.868m	5.000m	0.72119	0.65025	0.00000	0.00000	34.2349	84.877				
Mmd Kg	Xfrg M	Erm	Exm	Ers	Ecs	BL T·M	No %				
19.472m	1.000m	0.72119	0.65025	0.00000	0.00000	7.2616	0.1931				
Pmax Watt	Efrg	Vrm	Vxm	Grs	Gcs	Vs V	Ta °C				
100.000	1.00000	0.00000	0.00000	0.80000	0.80000	2.8284	25.00				
Rtvc C°/W	BLo T·M	Trm Δ/°C	Txm Δ/°C	Trs Δ/°C	Tcs Δ/°C						
2.500	7.2616	0.000	0.000	0.000	0.000						

Ok | Cancel | Help

Copy as Text | Copy as Binary | Paste From Text | Paste From Binary | Check Params | Auto Check | Show Graph

А вот такими являются параметры большего драйвера «TAD» TL-1102:

Transducer Parameters

Name	Levc Motor	Model	Shape	Fmd KA	Flp KA	Mms Kg	Qms				
L-1102		TSL TSL	Round	3.000	8.000	41.3000m	4.3500				
Note	SPL Mech	Domain	Profile	Qmd	Qlp	Cms M/N	Qes				
Motor constants approximated by Levc		FreeAir	Cone	1.000	2.000	638.2000u	0.3200				
Znom Ω	Xgap M	Krm Ω	Kxm H	Krs N·S/M	Kcs M/N	Vas M³	Qts				
8.000	8.000m	7.82800m	23.48300m	1.84930	638.20000u	121.0000m	0.3000				
Revc Ω	Xcoil M	Frm Hz	Fxm Hz	Xrs M	Xcs M	Rms N·S/M	Levc H				
7.200	20.400m	1.00000K	1.00000	10.00000m	10.00000m	1.8493	1.100m				
Sd M²	Xmax M	Drm	Dxm	Drs	Dcs	Fo Hz	SPLo dB				
36.600m	6.200m	0.65000	0.65000	0.00000	0.00000	31.0000	92.422				
Mmd Kg	Xfrg M	Erm	Exm	Ers	Ecs	BL T·M	No %				
37.274m	1.000m	0.65000	0.65000	0.00000	0.00000	13.5000	1.0974				
Pmax Watt	Efrg	Vrm	Vxm	Grs	Gcs	Vs V	Ta °C				
500.000	1.00000	0.00000	0.00000	0.80000	0.80000	2.8284	25.00				
Rtvc C°/W	BLo T·M	Trm Δ/°C	Txm Δ/°C	Trs Δ/°C	Tcs Δ/°C						
500.000m	13.5000	0.000	0.000	0.000	0.000						

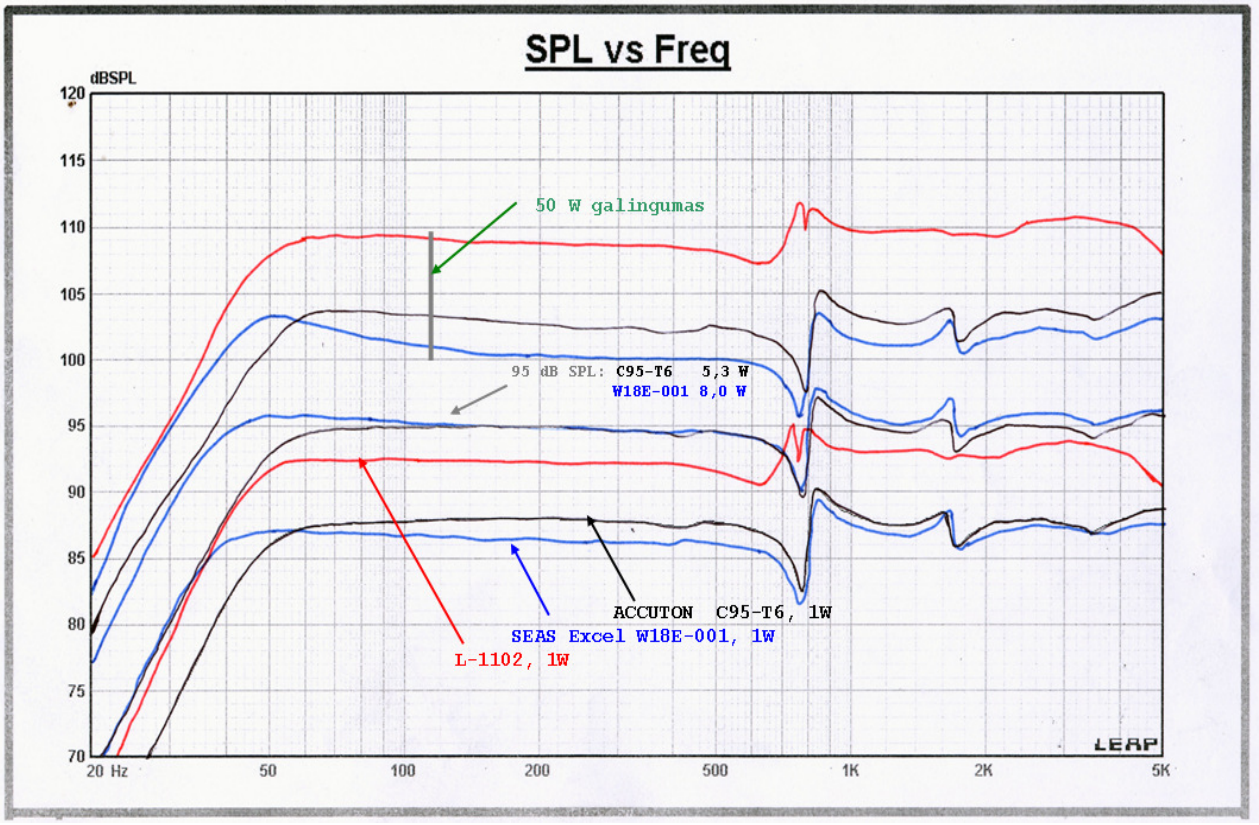
Ok | Cancel | Help

Copy as Text | Copy as Binary | Paste From Text | Paste From Binary | Check Params | Auto Check | Show Graph

Выбрав модель громкоговорителя, размер АС и конструктивные параметры корпуса, программа подсчитывает частотную и другие характеристики. Нас больше всего интересует зависимость чувствительности громкоговорителя от мощности и зависимость хода мембраны от частоты и подаваемой мощности.

Для удобства, SPL кривые всех громкоговорителей на 15 рис. размещены в одной диаграмме: черным цветом – “Accuton” C95-T6, 6.5”, синим – “Seas” Excel W18E-001, 6.5”, красным – “TAD” TL-1102.

Три нижние кривые отражают частотную характеристику, когда подается 1 ватт, а три верхние – 50 ватт. Две средние показывают, какую мощность нужно подавать на 6,5” драйвера, чтобы они излучали 95 dB SPL.



15 рис. Зависимость чувствительности громкоговорителей от частоты и мощности. Нас больше всего интересует зона частот от самых низких до 500Hz, поэтому мы не будем обращать внимание на неравномерности выше данной частоты.

Рассмотрение начнем с акустических систем с 6,5” НЧ драйверами.

После подачи мощности 1W в анализируемые громкоговорители мы получаем кривые чувствительности и узнаем об их зависимости от частоты (три нижние кривые). По сравнению с «Accuton» (черная кривая), громкоговоритель «Seas» менее чувствительный (нижняя синяя кривая), однако АС с этим громкоговорителем лучше воспроизводит самые низкие частоты. Программа позволяет узнать, какую мощность нужно подать, чтобы акустическая отдача АС с этими громкоговорителями (SPL), к примеру, была 95dB: в данном случае, для громкоговорителя «Accuton» нужна мощность 5,3W, а для «Seas» – 8W. При такой мощности частотные характеристики обеих громкоговорителей почти не изменяют форму.

После повышения мощности до 50W наблюдаем, что в данном случае кривые не только поднимаются вверх, но и меняется форма. Особенно изменяется воспроизведение самых низких частот, когда по сравнению с более высокими частотами, амплитуда условно увеличивается. Это происходит из-за компрессии громкоговорителей, когда пропорциональное увеличение мощности уже не заставляет мембрану двигаться с пропорционально большей амплитудой. Наверно все мы замечаем, что, увеличив громкость небольших АС с фазоинверторами, «появляется» больше низких частот. Это происходит из-за того, что отдача фазоинвертора АС увеличивается пропорционально, а из-за увеличения сопротивления громкоговорителя (нагревания катушки) громкоговоритель при большей мощности уже не может воспроизводить пропорциональную акустическую мощность. Эта нелинейность маленьких АС выражается в том, что мы слышим сравнительно большое изменение тембра, когда слушаем тихо или громко. Здесь нужно заметить, что АС закрытого типа перегружаются еще быстрее, и мы должны слушать их еще тише.

LEAP показывает, что АС с 6,5“ драйверами в случае воспроизведения самих низких частот, сохраняют линейность только приблизительно до 10W. К сожалению, все АС компрессируют звук, что значительно ухудшает воспроизведение музыки. Разница в том, что компрессия больших АС выражается при очень больших SPL, когда наш слух также становится очень нелинейным и где происходит частичная маскировка искажений. С другой стороны, все маленькие АС обладают большой компрессией, поэтому мы можем слушать музыку только с небольшой мощностью.

Теперь рассмотрим работу большего громкоговорителя TL-1102.

Программа выдает результаты, которые на том же рисунке отражены красным цветом:

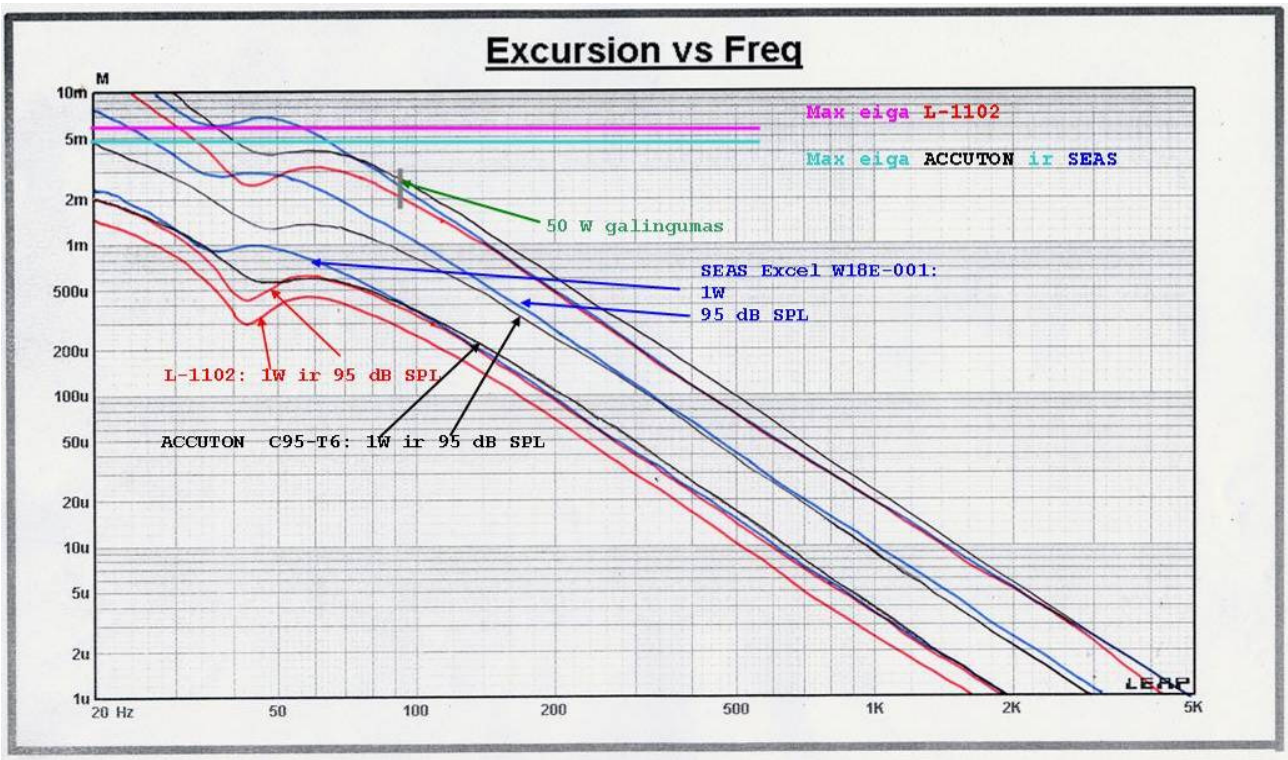
- чувствительность 92,4dB/W/m;
- SPL 95dB достигается после подачи мощность 2W;
- мощность 50W не вызывает компрессии, а SPL при такой мощности составляет 107dB. Ход мембраны сохраняется небольшим – 3мм (50Hz). Правда, при частоте 28Hz, уже достигается максимальный ход мембраны – 6,2мм;
- когда подается максимальная мощность 500W, SPL увеличивается до 114dB. При такой мощности возникает компрессия приблизительно 4dB, однако, даже при такой мощности громкоговоритель без значительных искажений будет воспроизводить частоты выше 80Hz.

Данное сравнение позволяет сделать выводы:

- маленькие громкоговорители воспроизводят сравнительно небольшие SPL, поэтому подходят для прослушивания тихой музыки;
- когда воспроизводится самая низкая октава музыки, нелинейные искажения АС с маленькими громкоговорителями сильно увеличиваются;
- маленькие громкоговорители отличаются большим компрессированием сигнала. Это выражается в том, что при сравнительно небольшом 100dB SPL (мощность 30W), катушка нагревается так, что увеличение ее сопротивления снижает динамический диапазон воспроизведения музыки.

Рассмотрим, как ход мембран громкоговорителей зависит от подаваемой мощности.

На 16 рис. вверху начерчены две горизонтальные линии, показывающие допустимые значения максимального хода каждого громкоговорителя. Эти линии показывает максимально допустимый ход мембран для TL-1102 (фиолетовый цвет), и 6,5” драйверов (зеленый). Превысив указанный предел хода мембран, возникают большие нелинейные искажения.



16 рис. Зависимость хода мембран громкоговорителей от частоты и от мощностию
Красный цвет: TL-1102 (1W, 95dB и 50W), черный: C95-T6 (1W, 95dB b 50W),
синий: W18E-001 (1W, 95dB и 50W)

Видим, что при мощности 1W и частоте 50Hz, ход мембраны драйвера «Accuton» составляет 0,7мм. Увеличив мощность до 5,3W (SPL 95dB), ход мембраны на той же частоте увеличился до 1,4мм. После подачи еще большей мощности – 50W, ход составляет 3,8мм, а максимальный предел хода мембраны достигается на частоте 38Hz. Теоретически такая мощность должна давать SPL 105dB, однако LEAP показывает меньший SPL – 102,5dB. Снижение на 2,5dB (в 1,8 раза) происходит из-за компрессии. Фактически, дальнейшее увеличение сигнала до максимально допустимой мощности 130W не позволит достичь SPL 105dB. Это происходит вследствие особенностей «мотора» громкоговорителя: маленькая катушка, большое увеличение сопротивления катушки от температуры (значение Rtvc сравнительно высокое – 1,923C/W), ограничения хода подвески мембран и другие проблемы, о которых мы уже говорили.

Проанализируем, какими параметрами будет обладать АС, в которой будет использован громкоговоритель «Seas».

С этим громкоговорителем АС – фазоинвертор, настроенный на 36Hz, и имеющий объем 40л, будет иметь чувствительностью приблизительно 86dB/W/m. Повысив уровень SPL до 95dB, ход мембраны будет составлять 2,6мм (50Hz), а при 26Hz мембрана уже достигнет максимального хода 5мм. Увеличив мощность до 50W, максимальный ход достигается уже при частоте 60Hz и ниже.

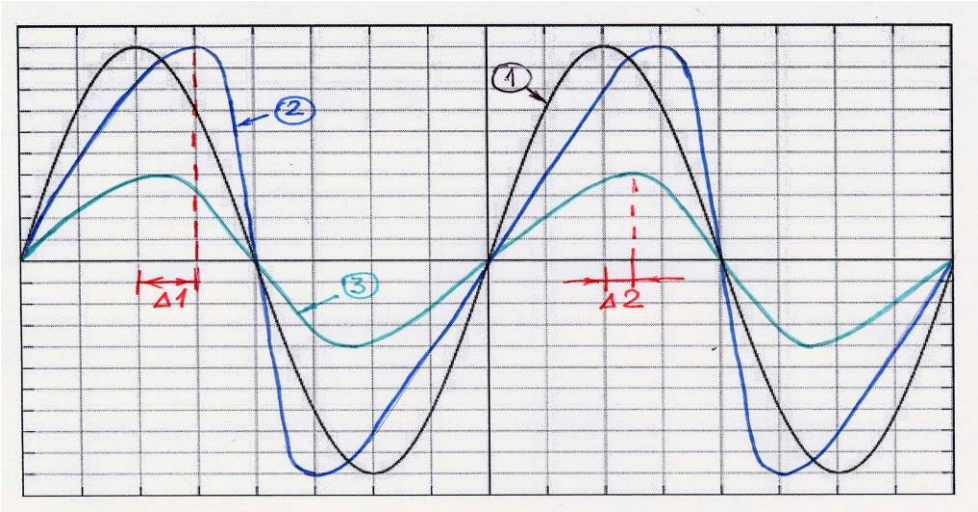
Сравнивая оба громкоговорителя 6,5“, «Accuton» C95-T6 имеет определенные преимущества: он может использоваться в меньшем корпусе, а конструкция лучше выдерживает перегрузки. В свою очередь, «Seas» Excel W18E-001 может лучше воспроизводить самые низкие частоты. Конечно, только при небольшой громкости. В действительности, возможности воспроизведения низких частот у обоих громкоговорителей похожи.

Для обзора выбраны оба 6,5“ драйвера обладают сравнительно большим, максимальным ходом мембраны (5мм). Драйверы с меньшим ходом попросту не смогут воспроизводить самую низкую музыкальную октаву. Программа анализа позволяет узнать, что АС с фазоинверторами и 6,5“ драйверами, воспроизводящая от 30Hz, имеет максимальную мощность всего 15W. Тогда АС с громкоговорителем «Accuton» будет иметь максимальный SPL 99dB и сравнительно маленькую компрессию, а с «Seas» – 97dB и 1,5dB компрессию.

Больший громкоговоритель TL-1102 может воспроизводить весь спектр музыки от максимально низких частот и обеспечивать приблизительно в 10 раз большую акустическую мощность. В акустической системе с большим драйвером искажения всех видов будут меньше. Анализ показывает, что скорость движения мембраны TL-1102 при одинаковом SPL (99dB) и такой же частоте (60Hz) является в 2,2 раза меньше (0,12м/сек), по сравнению со скоростью мембраны любого 6,5” драйвера (0,27м/сек). Очень важно то, что медленнее движущаяся мембрана образует меньшие воздушные колебания, меньше нагревает воздух, находящийся внутри АС, и меньше деформирует стенки корпуса АС[2].

Последний тезис может быть непонятным для читателей, поэтому объясню более детально.

Кроме электромеханических искажений, все АС также имеют и другие искажения. Периметр мембраны вызывает специфические искажения, которые слышны во время большого хода мембраны. Искажения также возникают вследствие различного давления воздуха внутри и снаружи АС, вследствие разницы аэродинамических свойств (форма воронки) мембран, вследствие разной работы мембраны, когда конструкция фасада громкоговорителя отличается от торцевой конструкции... Я перечислил здесь не все искажения, но это не меняет сути. Громкоговорители являются несимметричными механическими системами, работающими в режимах несимметричной нагрузки. Вот почему, подав в АС синусный сигнал, громкоговоритель искажает синусоиду так, что она становится похожей на «зубья пилы». Результат таких асимметричных искажений изображен на 17 рис.



17 рис. Вследствие асимметричных нагрузок на мембраны, синусный сигнал искажается. Черным цветом изображен входной сигнал, синим – сигнал быстро и с большой амплитудой движущейся мембраны (случай для маленьких драйверов), зеленым – сигнал большой мембраны, когда амплитуда меньшая и движется в 2,2 раза медленнее (работа больших драйверов)

Когда небольшие громкоговорители конструируются с очень большими магнитами, заслоняющими свободное движение мембраны, вышеупомянутые искажения еще увеличиваются. Поскольку большие мембраны движутся медленнее, искажения больших громкоговорителей этого вида будут меньшими. Надеюсь всем понятно, что мембрана большего и более чувствительного громкоговорителя движется с меньшими амплитудами, но образует такой же SPL, как и маленькие мембраны, движущиеся с большей амплитудой. Для любой частоты, увеличение амплитуды движения мембраны означает увеличение скорости. Как сейчас выяснили, эта скорость увеличивает искажения и ухудшает воспроизведение музыки.

Выводы

1. Ход низкочастотного громкоговорителя для АС одинакового типа зависит от размера мембраны (излучателя), от подаваемой мощности, и от воспроизводимой частоты. Это означает, что ход мембраны всех меньших громкоговорителей при определенной частоте будет больше, чем ход больших. Если ход мембраны ограничивается неважно, какими причинами, в частотной характеристике будет наблюдаться соответствующая неравномерность. Это является одним из важнейших законов электроакустики.

2. Фазоинверторы являются резонаторами, которые усиливают звуковые волны только определенных частот. Поскольку на резонансной частоте звуковые волны с фазоинвертора суммируется с волнами НЧ драйверов, это уменьшает ход мембран, искажения и улучшает воспроизведение НЧ. По сравнению с АС закрытого типа, правильно сконструированная АС с фазоинвертором низкие частоты воспроизводит более эффективно. К сожалению, таким способом нельзя повысить эффективность АС во всей рабочей полосе НЧ-громкоговорителя.

3. Большие АС являются более чувствительными, поэтому при таком же SPL мембраны громкоговорителей движутся с меньшей амплитудой и медленнее. Вследствие этого, искажения больших систем всегда меньше.

© CP AUDIO PROJECTS

www.cpaudioprojects.com