

Ирина АЛДОШИНА, Константин НИКИТИН, Собачка ЛУША

# Там, где живут басы

Так как интерес читателей к работе низкочастотных звеньев акустических систем не ослабевает никогда, я (К. К.) с М. А. Сергеевым, а затем **ис.Д. И. Ланским** не раз позволял себе углубляться в разные аспекты этой темы. Как и было обещано ранее, для сегодняшнего повествования мы призвали редакцию известного специалиста в области электроакустики доктора наук профессора Ирину Аркадьевну **Алдошину**.

И. А. Если допустить, что аббревиатуры hi-fi и high end хоть как-то связаны с натуральностью звучания системы и степенью совпадения этого звучания с реальным, то низкочастотное **звено** АС может оказаться тем самым „узким местом“, в которое не впишутся замыслы, воплощенные в источнике сигнала, усилителе и ненизкочастотных звеньях акустических систем.

**С. Луша.** Если это „узкое место“ порой занимает половину жилплощади, **что** же говорить о местах прочих...

И. А. **Вы, подруга**, затронули лишь один из вопросов, волнующих разработчиков низкочастотных звеньев. Действительно, наряду с выбором либо проектированием громкоговорителей („головок электродинамических“, как любят говорить многие) для разработчика важным до чрезвычайности оказывается выбор типа и проектирование корпуса АС где главную роль играет выбор акустического **оформления**.

К. К. То есть вы хотите сказать, что добиться от скрипки контрабасового звучания одним лишь ослаблением натяжения струн весьма и весьма проблематично?..

**С. Луша.** Сдается мне, что и обратная **процедура**, основанная на натягивании контрабаса, тоже сомнительна.

И. А. Это понятно. Гриф сломается...

А впрочем, о чем **ЭТО**?

Так вот, сегодня, а может быть, и в последующих публикациях, нас будет интересовать именно тип акустического оформления **АС**. Начнем **мы** с самых простых оформлений, но постепенно доберемся и **до тех**, что заметно сложнее.

**Итак**, корпус АС, базирующийся на той или иной идее акустического оформления, выполняет две основные функции.

Первая функция — это блокирование эффекта акустического „короткого замыкания“, возникающего **из-за** сложения в пространстве акустических колебаний, возбуждаемых передней и задней поверхностями диффузора и, естественно, противофазных (см. рис. 1).

**Луша.** Догодаваясь, что изоляция „враждей стороны“ диффузора способна дать очень многое. Вот хозяйка **моя** с завязанным ртом собирает ягод раз в шесть больше... А развяжешь — бац!.. Короткое замыкание.

И. А. Вторая функция чуть сложнее. Для знакомства **С** нами прежде всего придется **вспомнить**, что из себя представляет динамик

**Луша.** Магнит и моя миска на пружине...

И. А. Образное мышление. Так вот, наличие упругой возвращающей силы, обеспечиваемой пружинами подвесом, предопределяет для динамика возможность лишь возвратно-поступательных движений миски, то есть, простите, диффузора.



**Луша.** Я так понимаю, что движения диффузора могут быть и просто поступательными...

И. А. Но только один раз.

Характер вынужденных колебаний диффузора при подаче сигнала теперь будет зависеть от многого. Во-первых, как и у грузика на пружинке, от массы подвижной системы и упругости подвеса. А во-вторых, от того, что вмешивается в работу „пружинки“. При характерных для низкочастотных звеньев скоростях движения диффузора воздух, его окружающий, способен оказать двойное действие.

Это **диссипативное** действие, гасящее, демпфирующее колебание подобно амортизатору в автомобиле. Такое действие характерно для любых **ситуаций**, когда диффузор окружен воздухом. И **упругое** действие, когда воздух, сжимаемый той или иной стороной диффузора, оказывает на него воздействие, аналогичное воздействию подвеса. Это характерно для тех случаев, когда воздух заключен в закрытый объем, а в более общем случае каким-то образом оформлен. Это и означает „акустическое оформление“.

**Собачка.** А нельзя ли перед тем, как приступить к изучению наиболее известных оформлений, их хотя бы перечислить?

И. А. Наиболее широко применяются:

- бесконечный экран (infinite baffle) и его разновидности;
- закрытый корпус (closed box, acoustical suspension, sealed box);

↑ Учитывая разнообразие терминологических обозначений в зарубежной литературе, мы приводим **английское** название оформления, но только самое известное.

— корпус с **фазоинвертором** (bass reflex, **vented box**, ported box) и его многочисленные собраты;

— лабиринт (labyrinth);

— трансмиссионная линия (**transmission line**);

— корпус с симметричной нагрузкой (**band-pass**)<sup>2</sup>.

**Луша.** Итак, приступим...

**И. А. Бесконечный экран.**

Это устройство должно удовлетворять двум основным требованиям.

**Луша.** Быть экраном и быть бесконечным. Как **„Санта-Барбара“**.

**И. А.** То есть (рис. 1), помимо наличия „разделителя“ надвое акустического **пространства**, препятствующего акустическому короткому замыканию, „задний объем“ в корпусе тоже должен **быть** немалым, хотя бы настолько, чтобы головка не ощущала на себе упругого воздействия содержащегося в этом объеме воздуха. **Те** аудиобютилы, воспаленные воображением которых уже посетила мысль вмонтировать головку в стену между **комнатами**, наиболее близки к идее infinite baffle. **Ведь** на заре электроакустики широко применялись свернутые **„бесконечные“** экраны, то есть коробки без задней стенки. Если их габариты соизмеримы с четвертьволновым **отрезком**, то короткое замыкание они устраняют вполне приемлемо, хотя **уже**, конечно, не полностью. Итак, запомним две особенности бесконечного экрана: полное предотвращение акустического короткого замыкания и полное отсутствие акустического демпфирования, то есть ситуация, при которой диффузор не чувствует за собой замкнутого **объема**.

Отсутствие акустического демпфирования может привести к появлению недопустимо большой амплитуды колебаний диффузора вблизи частоты механического резонанса, особенно это характерно для головок с мощным подвесом и тяжелым диффузором. В неаварийных случаях это явление сопровождается очень резким ростом искажений — до десятков процентов, нередко проявляющихся в откровенном похрюкивании АС.

**К. К.** Наверное, заднюю стенку комнаты вовсе не обязательно закладывать кирпичом.

Закрывать корпус с воздушным подвесом (ранее употреблялось название **„закрывать“** корпус компрессионного типа).

Повиду ничем не отличается от закрытого корпуса, выполняющего лишь функцию бесконечного **экрана**. Но теперь объем корпуса выбирается таким, что упругость содержащегося в нем воздуха активно вмешивается в процесс колебательного движения диффузора. **Этот** тип оформления запатентован в 1949 году Олсоном (H. Olsson) и впервые использован в модели **„AR-3“** фирмой **„Acoustic Research“**.

В начале 70-х Смолл (**R. Small**) опубликовал серию статей, в которых описал методику расчета подобных **АС**, что способствовало их широчайшему распространению.

Закрывать корпус предьявляет специальные требования и к излучающим головкам. Как правило, это выражается в требовании большой гибкости подвеса<sup>3</sup>, немалой массы подвижной системы (то есть, в совокупности, низкой резонансной частоты)

и наличия магнитной системы, допускающей значительный ход. Такие головки имеют, как правило, сравнительно низкую чувствительность и заметные ограничения по воспроизведению верхней части звукового диапазона. Отсюда vyplывают всем нам хорошо знакомые требования повышенной мощности усилителя и хорошо развитого среднечастотного звена. Тот факт, что основным **„упругим“** звеном в закрытом ящике оказывается **воздух**, то есть почти идеальный газ, свидетельствует о высокой линейности воздушного подвеса.

**К. К.** Гарантом здесь, как я понимаю, выступают то ли Гей-Люссак, то ли Бойль — **Мариотт...**

**Луша.** То ли Менделеев — Клапейрон. Кстати, о Люссаке никогда бы такого не **подумала...**

**К. К. Ты**, подруга, всегда обращаешь внимание на частности. От пытливой же мысли наших ученых коллег не могут спрятаться и куда более общие вопросы. Например, в последнее время стало весьма популярным заострять внимание на характере газодинамических процессов в АС. Дискуссия идет **о том**, каким **второй или иной** системе является процесс сжатия-расширения **воздуха**, изотермическим или адиабатическим.

**И. А.** Обратить внимание читателя на то, что нас интересует лишь быстрый процесс, развивающийся с частотой подводимого к АС сигнала. Именно он, а не медленный процесс газа за счет тепла, выделяемого по многим **причинам** (главная — тепловыделение в катушке), способен существенно повлиять на характеристики АС.

**К. К.** Итак, сжимает диффузор воздух в корпусе — температура растет. Растеивает — падает. Это — чистойшей воды адиабата.

**Адиабатичность** процесса, при которой закон Бойля — **Мариотта**, обеспечивающий линейность акустического подвеса, нарушается, свидетельствует о необходимости учета двух **явлений**, особенно если объем акустической системы **мал**, а площадь и ход диффузора — велики. **Первое**: большее, чем оговорено законом **Бойля** — **Мариотта**, изменение давления адекватно снижению гибкости подвеса. Второе: значительная нелинейность газовой среды должна учитываться, она ведет к искажениям.

**И. А.** Сразу успокойم разволновавшихся читателей. В реальных АС, изменение объема которых в связи с ходом диффузора не превышает единиц процентов, рассмотренные процессы не могут сколько-нибудь серьезно нарушить привычный ход событий

**Луша.** И за **Allegro** в симфонии, как и ранее, последуют **Andante** и **Scherzo**?

**К. К.** Но, однако, в последнее время появилось немало работ, изучающих влияние присутствующего в корпусе АС **„заполнения“** на характер газодинамических **процессов**<sup>4</sup>. Если это заполнение достаточно плотное (около 1% по объему вещества, что составит около 5 кг минеральной ваты для среднего размера АС), теплопроводящее, а волокна тонкие и распределены равномерно, то скорость теплообмена воздух — заполнение может оказаться очень высокой и во всем диапазоне низших частот, когда ход диффузора особенно велик, процесс сохранит изотермичность: сжатие — газ греется, а заполнение его **охлаждает**; растяжение — газ остывает, заполнение его греет. При частоте на **относительно** герц выше **процесс** станет смешанным, а на более высоких частотах — опять чисто адиабатическим.

**Луша.** Что характерно, случаев глубокого **аудиофильно-научного** анализа влияния указанных процессов **на звук** нами не обнаружено.

<sup>2</sup>Первая экскурсия в классификацию **НЧ-формаций** АС в нашем журнале была сделана В. Зуевым (см. **„АМ“ № 3 (8) 96, с. 55-57**). — *Ред.*

<sup>3</sup>Нетрудно показать, что для упругого воздуха в корпусе тоже может быть введено понятие гибкости. Так вот, гибкость подвеса должна в **3-4** раза эту гибкость воздуха превышать.

<sup>4</sup> См., например, **Gavin R. Holland** Thermal Time Constants and Dynamic Compressibility of Air in Fiber-Filled Loudspeaker Enclosures. **JAES**, Vol. **46**, **№ 3**, 1998.

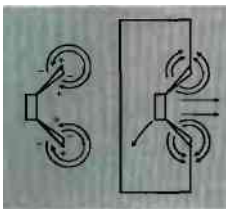


Рис. 1

К. К. Тем не менее, если появятся читатели, заинтересованные в дальнейшем изучении этого, безусловно интересного, момента, мы сможем удовлетворить их любопытство.

И. А. Разработанная Смоллом и Тиле (Thiele) методика проектирования АС с закрытым компрессионным низкочастотным оформлением ныне реализуется в ряде компьютерных программ (например, LEAP 4). Подобные методики позволяют, задав параметры головки (резонансную частоту в открытом пространстве  $f_{\text{об}}$ , общую добротность  $Q_{\text{об}}$ , эквивалентный объем  $V_{\text{об}}$ , эффективную площадь диффузора  $S_{\text{д}}$ , максимальное смещение подвижной системы  $X_{\text{мд}}$  и другие, см. например, ГОСТ 16122-88<sup>5</sup>), рассчитать необходимый объем корпуса и затем параметры АС (добротность, резонансную частоту, частоту среза), то есть определить ее АЧХ.

К. К. Внимательный читатель может заметить, что в аудио-

С. Луша (заметно оживившись). Так-так, пожалуйста, подробнее...

К. К. Закрытый корпус создает такой бас в случае недодемпфированности ( $Q > 0,707$ ), а все или почти все остальные системы — в меру своих сил и возможностей. И все же наиболее продаваемыми, коммерчески значимыми оказываются другие типы акустического оформления, например фазоинверторы, разговор о которых мы начнем в следующей части нашего исследования.

В последние годы получили распространение, хотя тоже ограниченное, другие разновидности закрытого НЧ-оформления: Push-pull (рис. 2а, б) и Isobarik (рис. 2в-е). При первом типе оформления удается снизить нелинейные искажения, в основном за счет избавления от четных гармоник; при втором — вдвое снизить объем корпуса АС. Последняя конструкция была предложена Олсоном еще в 1950 году, но широкое применение получила только сейчас в составе сабвуферов.

Кстати, изобарическая конструкция в последнее время становится все более и более популярной. И дело не только в сокращении габаритов — рассматриваемая конфигурация позволяет эффективно просуммировать энергию двух головок, что актуально при использовании мощных усилителей.

И. А. В современных моделях Isobarik используется 4 основных конфигурации. Корпус типа tunnel, когда две головки установлены друг за другом или тыльной стороной друг к другу (рис. 2а, з); конструкция типа clamshell (рис. 2д) и planar

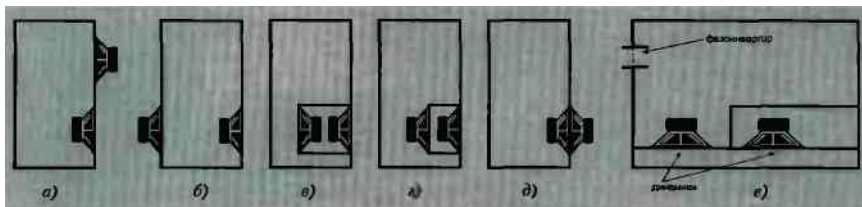


Рис. 2

магазинах АС с НЧ-оформлением „закрытый корпус“ встречаются нечасто. Может, позволим себе маленькое лирическое отступление на эту тему?

И. А. Действительно, с точки зрения коммерчески привлекательных характеристик закрытый корпус может показаться средоточием недостатков. Частота среза — не низкая, чувствительность — не выдающаяся, объем — излишний. Все бы так, если бы не одно достоинство — звучит эти АС лучше всех. Лучше — в смысле „натуральнее“. В тех случаях, когда добротность АС близка к оптимальной ( $Q \approx 0,707$ ), а совокупная АЧХ — к наиболее плоской, closed box обеспечивает сухой, цельный, незатянутый бас. Лучшими ценителями такого баса оказываются те, кто нередко слышал оригинал — музыканты, „симфоникомеломаны“ и т. п. Аудиофилы, не отяготившие свой слух посещением акустических концертов, либо специализирующиеся на электронной музыке, частенько предпочитают другой бас — более сочный, „смачный“, иногда уже даже гулкий. У звукорежиссеров для его описания есть даже устоявшийся термин „наличие мяса в басах“, — профессионалы всегда вводят свои термины.

(рис. 2а). В последнем случае головки установлены рядом на одной панели и нагружены на общую узкую воздушную камеру. При этом одна головка установлена в малый закрытый объем, вторая излучает в общий корпус АС с фазоинвертором.

Подробный анализ особенностей работы подобных систем выходит за рамки сегодняшнего повествования, поэтому отметим лишь некоторые важные моменты. В идеале диффузоры головок у Isobarik должны двигаться как единое целое, однако этому мешает ряд обстоятельств. Например, наличие закрытой камеры вносит дополнительную жесткость и дополнительную присоединенную массу, то есть добавочную „пружину“ между головками. Снижает идеальность взаимодействия головок также тот факт, что условия охлаждения магнитных систем оказываются различными: возможен перегрев узлов, находящихся в малом объеме, равно как и заполняющего этот объем воздуха. В этой связи clamshell нередко оказывается предпочтительнее.

К. К. Наверное, не надо всякий раз акцентировать внимание на том, что электрическая схема подключения головок к усилителю должна обеспечивать движение диффузоров в одном направлении. В зависимости от конфигурации этому будет способствовать либо синфазное, либо противофазное подключение.

Продолжение следует

<sup>5</sup> Из всех перечисленных параметров, наверное, лишь „эквивалентный объем“ требует дополнительных пояснений.  $V_{\text{об}}$  — это такой объем воздуха, который, будучи заключенным в замкнутое пространство, обладает тем же упругим воздействием на диффузор, что и подвес

## Там, где живут басы-2

### Корпус с фазоинвертором

И. А. Хотя Турсом (A. Thuras) еще в 1932 году была запатентована идея фазоинвертора, **детальное** исследование и теория его проектирования **ПОЯВИЛИСЬ** тридцатью годами позже благодаря Смолду и Тиле (Small, Thiele). Типичная конструкция корпуса с фазоинвертором проста: отличие от закрытого ящика заключается в наличии дополнительного отверстия, нередко снабженного трубой. При этом в корпусе появляется вторая колебательная система, связанная своим происхождением упругости воздуха в корпусе („пружина“) и массе воздуха в трубе („грузик“).

К. К. Теперь, когда на резонансной частоте диффузор головки желал бы раскататься до полного **изумления**, ему что есть силы мешает труба фазоинвертора.

Луша. Это как? Она же не к нему крепится?

И. А. Представим, что диффузор „летит“ внутрь корпуса. Но и труба фазоинвертора в это время всасывает воздух, подобно слону, увидевшему мышь. Давление в корпусе становится заметно больше, чем оно было в отсутствие **фазоинвертора**, и демпфирует диффузор гораздо сильнее<sup>1</sup>.

Луша. Вот как я раньше **не** понимала профессоров, так и теперь не понимаю. Ну и что с того? Если раньше на резонансе диффузор ходил ходуном, то теперь ему мешают и он ходит меньше, то есть басит слабее. Или я не права?

К. К. Права, права. Но на резонансе во всю басит труба **фазоинвертора**, а диффузор лишь подкачивает в этот процесс энергию.

И. А. А колеблющаяся масса воздуха в трубе — это не диффузор на механическом подвесе. То есть не надо бояться, что, натянувшись как следует, что-то станет **ислинейным** либо вовсе оторвется...

К. К. А так — гляди-ка, как здорово все **получилось!** Там, где громче всего басим, — меньше всего искажений. Диффузор<sup>2</sup> почти на месте стоит.

И. А. Хотелось бы так, конечно. Но удовольствия никаких не бывает без последствий.

Луша. Да-да, конечно... Вот, помню, костей обкушалась как-то...

К. К. Прежде всего, воздух — среда далеко не идеальная. По-хорошему, так тек бы он и тек через трубу или другое **фазоинверсное** приспособление. Но возникают в газовых потоках всевозможные вихри, турбулентность и прочие очаги локальной **неустойчивости**.



Луша. Не **такой** ли процесс я наблюдаю, когда ожидаю **конфетки**, сидя недалеко от кипящего чайника? Пар из носика вылетает совсем не так, как фарш из мясорубки, — он вихрится, клубится, **свистит**...

И. А. Это заставляет искать оптимум при проектировании **фазоинверторов**, исходя из большого числа приводящих...

Известно, например, что если **фазоинвертор** — просто отверстие, то для снижения частоты настройки надо уменьшать его площадь. Скорость воздушных потоков, и **следовательно**, **вихреобразование** будут расти. Поэтому и вводят еще одну степень свободы, используя не просто отверстие, а отверстие с трубой, у которой можно менять как диаметр, так и длину.

Труба фазоинвертора имеет немало преимуществ перед просто отверстием. Как мы увидим позже, **одна** и та же частота настройки может быть получена при различных длинах и площадях, что позволяет решать массу других задач. К тому же и „ручная“ настройка становится технологичнее: обрезать (укорачивать) пластмассовую трубу легче, чем менять площадь отверстия в панели.

Но, к сожалению, проблема в **вихреобразовании**, несмотря на появившуюся возможность снизить скорость воздушных потоков, решается не полностью. Ток газа по трубам — процесс тоже непростой, и в трубе может возникнуть все — от вихрей до стоячих волн. И с тем, и с другим можно и нужно бороться. Тем, кто умеет, конечно.

<sup>1</sup>Мы неоднократно использовали это словечко: „демпфирование“. Замечу, что с ним в электротехнике **связана** известная **доля** неразберихи. Хотя в „официальной“ академической электротехнике все точно **над** **его** **новому** давно развешены, кое-кто (к **нередко**) своими высказываниями **уводит** читателя с пути истинного. Действительно, и в электротехнике, и в механике, и в электротехнике демпфер — устройство, препятствующее колебательному процессу. В автомобиле это амортизатор, мешающий раскачиваться рессоры. В **колебательном** контуре — **нараэитное** (или **непаразитное**) омическое сопротивление. Кстати, если часть энергии контура (например, антенного) отлучается, этот процесс **тоже** **носит** демпфирующий характер. Также **и** **АС**: демпфер — это то, что мешает диффузору **колебаться**, **потери** на всякого рода трение и **процесс** акустического излучения. Но никак не упругий **подвес** и не **упругий** **воздух** в **АС**, **очень** **дерзко** **пишут** **наши** **коллеги**. а мы, увы, корой подкачиваем их терминологию. — **КК**.

Луша. Наверное, чем длиннее труба, тем ниже резонанс...

К. К. Итак, как мне думается, если снижать частоту сигнала, подаваемого на АС, то по мере приближения к резонансу «отдача» диффузора будет падать, а трубы — расти (рис. 1).

И. А. О резонансе мы уже побеседовали; замечу, что АС с фазоинвертором при прочих равных создаст на частоте настройки фазоинвертора  $f_B$  звуковое давление на 3 дБ выше, чем АС с закрытым корпусом<sup>2</sup>.

К. К. Нередко приходится слышать о том, что причина этого явления в «сложении акустических волн, излученных передней и задней поверхностями диффузора». Кстати, как раз получается 3 дБ. Утверждение это дважды неверно. Во-первых, никаких волн там нет. Волны есть там, где  $L > \lambda/2$ , то есть на ВЧ и СЧ. А во-вторых (как видно из рис. 1), на резонансе диффузор почти стоит, излучение его передней стороны мизерно, и говорить о каком-то «сложении», конечно, не приходится.

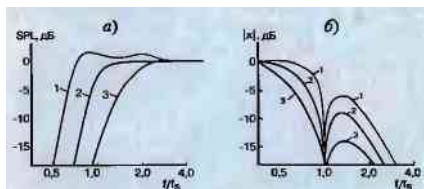


Рис. 1. Типичные АЧХ фазоинверсной системы при реализации аппроксимаций по Чебышеву (1), Баттерворту (2) и квартервейву (3) (рис. а) и соответствующие им нормированные амплитуды колебаний диффузора (рис. б). Ясно, что там, где у диффузора «провал», у трубы — пик, тем более острый, чем острее провал у диффузора ( $f_B$  — собственная резонансная частота головки в отсутствие акустического оформления)

Процессы в фазоинверторе не то чтобы сложнее, они просто не такие, как многие привыкли считать.

Луша. Но, если я все поняла верно, по мере того как мы будем и дальше снижать частоту сигнала, между колебаниями диффузора и массы воздуха в трубе будет увеличиваться фазовый сдвиг, который весьма быстро приблизится к  $180^\circ$ .

И. А. Случится *то самое* акустическое короткое замыкание, о котором мы упоминали в предыдущем номере.

К. К. И вот этот эффект будет воспринят головкой как практически полное отсутствие корпуса. А она на это совсем не рассчитана.

Луша. О, сколько нам открытий чудных!..

Теперь я понимаю, почему звуковая катушка «Колы 7» во время измерения АЧХ на большом уровне мощности оказалась на кухне...

К. К. А ты-то что на кухню делала, лохматая?

Кстати, если ниже частоты основного резонанса что-то (а именно — постепенно становящийся противofазным фазоинвертор) мешает созданию звукового давления, оно должно падать слева от  $f_B$  быстрее, чем 12 дБ на октаву, характерные для закрытого корпуса.

И. А. Так оно и происходит, и децибел оказывается 24.

<sup>2</sup> Это так, если «прочие равны» — это объем и нижняя граничная частота. Если же «равные» — КПД и граничная, то можно обойтись меньшим объемом. Кстати, именно к этому почти все и стремится.

Но об этом мы поговорим в разделе «недостатки». Пока же продолжим перечисление достоинств.

Дополнительное демпфирование головки на частоте резонанса позволяет обойтись меньшей массой и меньшим допустимым ходом подвижной системы. Это дает возможность повысить как чувствительность головки, так и ее верхнюю граничную частоту: системы с фазоинвертором сделать двух-, а не трехполосными легче, чем АС с закрытым корпусом.

К. К. Но все же, мне *кажется*, главное преимущество фазоинвертора заключается в резком снижении искажения в низкочастотной области, достигаемом за счет уменьшения амплитуды колебаний нелинейного звена — диффузора на подвесе.

Луша. Вас слушают, коллеги, так просто диву даешься! Ну и велича фазоинвертор — один преимущества.

И. А. Стоя на твоей позиции, лохматая, фазоинвертор можно сравнить с котом: он имеет лишь один недостаток, но зато серьезный.

Луша. Он что же, по деревням лазает?

И. А. Он крутит фазу. Чем больше децибел на октаву, тем больше накручивается фаза. Помните, К. К., «минимальнофазовые», «нормальнофазовые»...

К. К. С трудом<sup>3</sup>.

И. А. Большой набег фазы — и бас уже не тот. Вязкий, гулкий. Отсюда, *кстати*, и название «boombox». Так что, рассчитывая, изготавливая или приобретая фазоинвертор — будьте бдительны.

Луша. Faza ne dremlet!

Это не по-нашему, вам не понять. Как, впрочем, и мне не понять, как это коты крутят фазу.

И. А. Ну, быть может, лучше поймешь следующее. Радиотехники очень любят говорить про фазу. Акустики же чаще оперируют понятием «переходные характеристики», вам же, К. К., я знаю, ближе понятие «импульсный отклик».

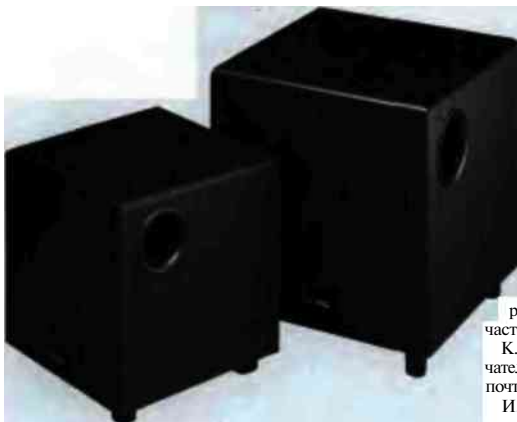
Действительно, чем меньше отклонения от линейной ФЧХ обеспечивает система вблизи частоты раздела, тем лучше передается форма сигнала. Особенно четко это выражается при импульсной его форме — отсюда и название «импульсный отклик».

К. К. Кстати, нельзя сказать, что 24 дБ у фазоинвертора однозначно хуже, чем 12 у закрытого ящика с акустическим подвесом. Фазоинвертор — это, наверное, та золотая середина, когда уже и достоинств нажито немало, и импульсный отклик еще не столь безобразен, как, скажем, у какого-нибудь полосового резонатора, свойства которого мы обсудим позже.

Луша. Ох, ничего себе реклама полосовому резонатору... А стоит ли после этого бумагу на него переводить?..

К. К. Удачно выполненный фазоинвертор еще обладает звуком, который можно назвать и высоковерным, и аудиофильным. *Кстати*, рутая фазоинвертор за его единственный недостаток, многие лукавят, представляя его достоинством как чисто количественные. Рассуждая так и имея 30-процентный запас по объему корпуса, можно вообще забыть об идее фазоинвертора. Но напомним еще раз, главное преимущество фазоинвертора заключается не в его эффективности, а в снижении искажений на частоте резонанса.

<sup>3</sup> Лукавит. Уходит от разговора. С первого курса помню, что все пассивные линейные цепи — минимальнофазовые, то есть АЧХ и ФЧХ связаны в них однозначно. Просто не получается, что из большого счёту с точки зрения эквивалентности АС — устройство не минимальнофазовое, и боится попасть впрок. Полноту, *кстати*, замечу, хоть и де-юре это событие де-юре, и на природе, ни на бумаге настоящая И. А. до жаргона вроде «крутит фазу» никогда не снижает. Так ведь и собачки в этой самоприроде редко беседуют об электротехнике.



нанса. Л за это кое-кто не откажется заплатить **ухудшению** импульсного отклика.

И. А. И все-таки не удержусь **еще** от одной реплики по существу. Дело не только в **„минимальнофазовости“**. Если бы АС была хотя бы **линейна**, то, измерив АЧХ и ФЧХ и воспользовавшись аппаратом Фурье (в обобщенном смысле), можно было бы однозначно судить о переходной характеристике. Так, **кстати**, и поступают цифровые станции, то есть специализированные устройства для электроакустических измерений на базе ЭВМ (например, „Мелисса“). Штука эта измеряет именно импульсную характеристику и уже по ней рассчитывает АЧХ и ФЧХ.

Ценность таких процедур для науки и общества весьма и весьма сомнительна: все измерения проводятся на очень малом уровне громкости, где нелинейность процессов сказывается в слабой степени. Поэтому более любознательные и терпеливые экспериментаторы..

Луша. М. А. что ли?

И. А. ...оказываются вынуждены **измерять** спектральные и временные характеристики процессов в АС отдельно. Еще одна древность — пассивный излучатель. Патент Олсона 1935 года. Относительно широкое коммерческое применение началось в 70-х годах. Впервые в коммерческом издании конструкцию такого типа применила фирма „Celestion“.

Луша. А не „Электроника“ в одной из моделей „35 АС-015“, больше известной как „130АС“?

И. А. В принципе, пассивный излучатель — разновидность **фазоинвертора**. У него имеются те же три степени свободы при настройке — площадь, масса подвижной системы и упругость подвеса. Помимо очевидного недостатка — заметно более высокой стоимости, чем у трубы **фазоинвертора**..

Луша. И уж подвадно, чем у дырки.

И. А. ...пассивный излучатель имеет немало преимуществ, главное из которых — отсутствие тех самых **вихрей** и побочных **резонансов** в трубе.

К. К. Звук систем с пассивным излучателем чище, **менее окрашен**, хотя вообще об окраске на базах можно говорить лишь с большой **иятяжкой**. Между прочим, нередко главным доводом в пользу „**пассивника**“ служит то, что трубу, даже свернутую, как шланг, поместить в корпус некрупной АС просто негде.

Луша. Вот на даче у нас труба из крыши наружу торчит. И ничего... Пока снегом, конечно, на засыплет.

И. А. С помощью несложных доводов, которые мы здесь не приводим, можно показать, что спад АЧХ у системы с пассивным излучателем будет на низких частотах несколько круче, чем у фазоинвертора. а импульсный отклик — несколько хуже.

К. К. И еще одно. Так как теперь система может быть сделана совершенно симметричной, появится частота, на которой с огромной амплитудой, но в **противофазе**, будут гулять два диффузора.

Луша. Это, наверное, там, где об обычном диффузоре вы писали про 180°?

К. К. Догадываюсь, что излучать АС в этот момент будет все что **удочно**, только не основной тон.

Луша. Я, кажется, готова изобрести способ измерения нелинейных искажений. Но только для одной частоты.

К. К. А на АЧХ акустических систем с пассивным излучателем на этой частоте красуется великолепный провал почти до нуля.

И. А. Нельзя сказать, что в области фазоинверторов и пассивных излучателей в **напе** время ничего не изобретается и все, что известно, придумано в тридцатые.

Луша (*осторожно, но лукаво*). А **ваше** время это когда?

К. К. Кыш, лохматая. Совсем расшоясалась.

И. А. Напротив, придумывают, и очень немало. Только вот в коммерческом смысле приживается далеко не все.

Например, некто Госсбах (Е. Hossbach) всего лет двадцать пять назад придумал любопытную вещьцу, изображенную на рис. 1а. Корпус АС состоит из двух отсеков и использует два сочлененных неравных по площади пассивных излучателя.

Луша. (*рассматривая рисунок*). Один из них смотрит мордой туда же, куда и активная **головка**, а другой — в задний закрытый объем.

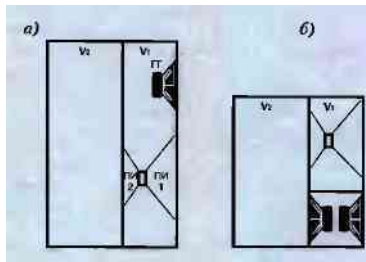


Рис.2

И. А. Помимо роста КПД, по сравнению с обычной системой с пассивным излучателем, такая АС характеризуется заметным сдвигом влево основных характерных частот (частоты среза, например). А это в ряде случаев радикально улучшает импульсный **отклик**, так как область частот, где наблюдаются резкие скачки фазы, попросту выходит за пределы частотного диапазона остальных устройств (носителя, источника, УНЧ).

Своего рода экзотику представляет корпус, использующий **сдвоенный** пассивный излучатель и две активные головки, установленные по типу **изобарической** нагрузки (рис. 2б). Такая конструкция объединяет все преимущества „**изобарика**“ и пассивного излучателя, но чрезвычайно сложна в настройке.



К. М. Мы бы и еще, наверное, набросали в статью фазоинверторов и пассивных излучателей, но сдерживает то, что в продаже такой экзотики не сыскать.

Луша. Помню, была такая „Книга о вкусной и здоровой пище“. Кто-то считал ее учебником, а кто-то — музеем...

К. К. Здесь, уважаемый читатель, воспользовавшись намеком на гастрономическую тематику, мы предлагаем тебе сделать **обеденный перерыв** или заменить его иным **душеприятным времяпрепровождением**.

Иначе наше творчество неизбежно покажется тебе излишне навязчивым и в чем-то даже назидательным.

\*\*\*

К. К. К сожалению, столь простое объяснение принципа работы фазоинвертора, которым ограничились мы в основной части нашего повествования, не может не грешить неточностями и недоговоренностями. Чем сильнее наше стремление упростить изложение, тем больше вероятность навлечь на себя гнев образованных коллег.

Луша. А как же популярные версии с анистом и капустой?

К. К. Более или менее складное и достоверное изложение теории фазоинвертора может получиться, если использовать метод электроакустических аналогов. В этом случае эквивалентная схема устройства вырисовывается в виде двух связанных контуров. АЧХ такой системы, содержащей четыре реактивных элемента, описывается дробно-рациональным соотношением

$$H(s) = 20 \lg \left| s^4 T_{04} / (s^4 T_{04} + a_1 s^3 T_{03} + a_2 s^2 T_{02} + a_3 s T_{01} + 1) \right|,$$

и числитель и знаменатель которого — полиномы четвертой (а не второй, как у закрытого ящика) степени. Все коэффициенты о, оказываются при этом функциями номиналов элементов эквивалентной схемы (рис. 3), а те в свою очередь **определяются** главными „переменными“ фазоинвертора: добротностью головки  $Q_{TS}$ , эквивалентным объемом  $V_{AS}$ , частотой резонанса головки в воздухе (без оформления)  $f_0^4$ .

И. А. Стратегия выбора перечисленных **переменных**, как правило, бывает нацелена на получение наиболее гладкой АЧХ. Отправной точкой служит полная добротность  $Q_{TS}$ . При очень низких добротностях  $Q_{TS} < 0,3$ , наиболее гладкими из реализуемых АЧХ **оказываются** кривые квазитретьего порядка. Частота настройки фазоинвертора  $f_R$  при этом получается в 1,4–1,8 раза выше, чем  $f_0$ , а частота среза АЧХ  $f_{3\text{дБ}}$  — еще выше (кривая 3, рис. 1). При средних добротностях ( $Q_{TS} \approx 0,4$ ) наиболее гладкими оказываются батарейворотские кривые, для которых характерно **совпадение**  $f_{3\text{дБ}}$  и  $f_{3\text{дБ}}$ . Дальнейший рост добротности ( $Q_{TS} > 0,5$ ) для сохранения максимальной гладкости требует допущения **колебаний** АЧХ в пределах прозрачности кривая получается чебышевская. Как  $f_B$ , так и  $f_{3\text{дБ}}$   $< f_B$  получаются заметно меньше  $f_0$ .

Следует отметить, что „степеней свободы“ у разработчика в его стремлении создать устройство с максимально гладкой АЧХ может и не хватить. На практике это означает, что величины **объема ящика**  $V_B$ , значения КПД устройства  $\eta$  и (или) максимального создаваемого звукового давления  $P_{\text{макс}}$  оказываются неприемлемыми.

К. К. Это как у американцев. Лечат человека от одной болезни, а умирает он от другой.

Луша. Дикий народ! У нас — от чего лечат, от того и умирают!

И. А. Как-то вы **жмуро**, коллеги, отреагировали. Радости, конечно, мало. Приходится отказываться от макси-

<sup>4</sup> При более детальном рассмотрении **приходится** учитывать еще и добротность потерь в корпусе  $Q_{\text{кор}}$ , определяемую главным образом утечками.

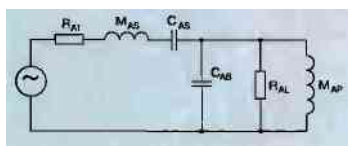


Рис. 3. Эквивалентная схема фазоинвертора: типичная пара связанных контуров



Рис. 4. Зависимость модуля полного сопротивления АС от частоты. Максимум или минимум вовсе не означает пик АЧХ

мальной гладкости и все пересчитывать. Объем и КПД становятся приемлемыми, но АЧХ получает выброс.

К. К. Замечу, кстати, что „капризность“ фазоинвертора, заключающаяся в его достаточно высокой чувствительности к изменению исходных параметров  $Q_{TS}$ ,  $f_0$  и  $V_{AS}$ , нередко приводит к ошибкам проектирования, выбросам в АЧХ и, как следствие, к **бубнению**. Основой для бытующего мнения о гулкости и бубнении фазоинвертора являются случаи неправильного расчета, а **не** сама суть устройства. Хорошо выполненный фазоинвертор по натуральности баса не уступает закрытому ящику.

Пример расчета, как и многое другое, не поместившееся в эту статью, ищите в следующем номере „АМ“.

Между прочим, эквивалентная схема (рис. 3) как нельзя лучше трактует и зависимость модуля комплексного сопротивления фазоинвертора от частоты. Действительно, из общего курса электротехники известно, что система связанных контуров<sup>4</sup> может иметь двуробую характеристику, хотя оба контура настраиваются на одну и ту же частоту (батарейворотский случай). В той точке характеристики...

Луша. Где обычно сидят верхом на верблюде? (Рис. 4.)

К. К. ...сопротивление имеет минимум (частота  $f_R$ ). Здесь головка и фазоинверсное отверстие излучают в фазе, ход диффузора минимален. Выше и ниже частоты  $f_B = f_{3\text{дБ}}$  и  $f_{3\text{дБ}}$  располагаются два резонанса-максимума сопротивления. Радиотехники называют частоты этих резонансов частотами связи. На этих частотах наблюдается явление компенсации собственной реактивности одного из контуров **реактивностью**, вносимой соседним контуром. Чем сильнее связь — тем больше максимумы разнесены по частоте. В случае батарейворотской аппроксимации горбы не приводят к выбросам АЧХ, в чебышевском случае — все гораздо сложнее, и на палых уже ничего не объяснить.

Луша. Как их ни **распознавай**.

*Продолжение в следующем номере*

<sup>5</sup> В нашем случае один колебательный контур — это **головка**, а другой — масса воздуха в трубе плюс упругость воздуха в ящике. Понятно, что связь, то есть взаимная перекачка энергии в этих контурах, велика.

# Там, где живут басы (3)

К. К. Достаточно обширная читательская корреспонденция, преподносящая нам отклики на статьи о басах, свидетельствует о том, что многие наши читатели имеют каждый номер журнала и получают, таким образом, возможность суммировать статьи, размещение которых в одном номере разом было бы невозможно. Это отрадно для редакции и вдвойне радостно для авторов. **Корреспондентов** наших, кстати, можно разделить на две группы. Первую из них возглавляет наш старый друг Игорь Хайруллин из Москвы, как всегда выступающий со справедливой и обоснованной критикой. Вторая группа настойчиво требует, чтобы мы вооружились лобзиками, клеем, фанерой и прочим и **создали** так что-либо басовое в качестве примера. У меня по этому поводу созревает крамольная мысль. пропустить одну плановую публикацию и целиком отдать наши четыре страницы ответам на вопросы...

Для тех читателей, которые присоединились к нам с нынешнего номера, вкратце сообщим следующее.

Пока что мы рассмотрели два типа **акустического оформления** динамических головок: закрытый ящик и фазоинвертор, а также их разновидности.

Мы показали, что главным достоинством закрытого ящика является его великолепная переходная характеристика (импульсный отклик), обеспечивающая получение натурального, упругого, несжатого баса, а недостатком — большие искажения вблизи резонансной частоты оформленной головки.

Недостаток легко исправляется в **ящике-фазоинверторе**, но последний капризен в настройке...

И-А. Те, кто всю жизнь настраивали, скажем, **полосовые** резонаторы, сейчас тихонько ухмыляются... Мол, вам бы, коллеги, попасть наших коров, и настройка фазоинвертора покажется кормлением аквариумных рыбок...

К. К. ...и к тому же отвратительно ведет себя ниже частоты среза, полностью раздмпфируясь. Тем не менее...

И. А. Подшло время дать обещанный читателю пример расчета фазоинверсной системы. Так получилось,

что до расчета закрытого корпуса дело не дошло — это слишком уж просто и неинтересно, да и большинство **самодельщиков** предпочитают все же **фазоинверторы**.

Существует множество методик расчета фазоинверторов, основанных на изначальном знании тех или иных параметров головки и преследующих те или иные цели. Учитывая, что наши возможности ограничены, мы представим уважаемому читателю **самую простую** методику, при грамотном использовании которой, однако, можно получить вполне приемлемые результаты.

К. К. Чтобы понять суть методики, кратко опишем принципы, положенные в ее основу.

**Принцип 1.** Исходные параметры **динамической** головки, используемые для расчета, должны быть общепонятными и доступными. В нашем случае это:

- полная добротность головки  $Q_{ts}$ ;
- эквивалентный объем  $V_{as}$  (см. „АМ“ № 1 (24) 99, с. 141);
- собственная резонансная частота головки на открытом воздухе  $f_s$ .

Перечисленные параметры указываются в паспорте головки, в ТУ, либо могут быть измерены согласно ГОСТ 16122-88.

**Принцип 2.** Цель стратегии расчета должна быть одна, и она должна быть проста. Иначе запутаемся.

Наша цель — получить АЧХ, наиболее близкую к идеальной с точки зрения **среднеквадратического отклонения**<sup>1</sup>. Заметим, что в зависимости от  $Q_{ts}$  эти АЧХ могут иметь как **монотонный**, так и колебательный характер.

**Принцип 3.** Нам придется смириться с тем, что у рассчитанной АС может не все оказаться благополучно: и объем получится излишним, и КПД — неважным и т. п.

**Луша.** Будем утешать себя тем, что хоть АЧХ получилась великолепной.

К. К. Но! Это вовсе не означает, что



наша методика расчета плоха. Просто исходный набор параметров головки (то есть численные значения  $Q_{ts}$ ,  $V_{as}$  и  $f_s$ ) может быть не очень удачным для ее использования в оформлении „фазоинвертора“.

**Пуша-** Хватит разглаживать! Методику давай!

К. К. А методика проста. Первое. Существует единственная добротность **головки**,

когда:

— требуемый объем ящика равен присоединенному  $V_B = V_{as}$ ;

— требуемая частота настройки фазоинвертора равна резонансной частоте головки  $f_B = f_s$ ;

— полученная частота среза АЧХ АС тоже равна резонансной частоте головки:  $f_{3dB} = f_s = f_B$ .

**Собачка.** Ох, ничего себе!

И. А. Эта добротность ( $Q_{ts}$ ) примерно равна 0,39. АЧХ в этом случае имеет чисто баттервоговскую ап-

<sup>1</sup> Шапошников, что идеальная ЛНЧ горизонтальна — первое некорректно частоты и имеет спад 24 дБ/окт. выше ее



применимости, а расчет становится тривиальным.

К. К. Второе. Если  $Q_{\text{дз}} \neq 0,39$ , то интересующий читателя расчеты также могут быть вычислены с применением лишь логарифмической линейки:

$$\frac{V_B}{0,26 f_{\text{дз}} V_{\text{дз}}} = \frac{Q_{\text{дз}}^{2,87} \times 15V_{\text{дз}} \times f_{\text{дз}}}{Q_{\text{дз}}^{0,92} \times 0,42 f_{\text{дз}}} = \frac{Q_{\text{дз}}^{1,43} \times 15}{0,42}$$

Нетрудно заметить, что, подставляя в эти формулы  $Q_{\text{дз}} = 0,39$ , получаем предыдущий тривиальный случай.

И. А. Коллега! Но я же взял данные в „Интернете“ и дал вам чуть-чуть другие формулы. Там вместо 1,43 было 1,4, а вместо 0,92 было 0,9! Я, конечно, понимаю, что это блохи, но все же интересно, как было у основоположников?

Луша. Прошу вас, уважаемая, не поминать их всуе. О них вообще можно — либо хорошо, либо ничего.

К. К. О блохах или об основоположниках?

Луша. А по мне так хоть об одних, хоть о других. Вот например: „Или блохи победят социализм, или социализм победит блох!“ Так что уж объясните, пожалуйста, куда дели сотые доли?

К. К. Ну, милая, не надо так волноваться! В „Интернете“ можно еще и не такое увидеть<sup>2</sup>. К тому же надо иметь в виду, что наши формулы не учитывают многих параметров системы. Так, помимо добротности первой колебательной системы — головки ( $Q_{\text{г}}$ ) — немалую роль играет добротность второй, именуемая добротностью потерь

в корпусе  $Q_{\text{к}}$ . На эту добротность наибольшее влияние оказывают так называемые „щелевые потери“. У нас есть основания полагать, что представленные в „Интернете“ формулы даны для  $Q_{\text{к}} \sim 4..6$ , что вполне приемлемо.

И. А. Если читатели будут и далее настойчиво требовать расширения



нашего участия в направлении „следяй сам“, мы готовы двинуться дальше простейших формул.

К. К. А пока обратим внимание на рис. 1, мягко намекающий на возможные последствия ошибок в измерениях и расчетах.

Луша. И в заключение поразмыслим о том, что может получиться на практике, если кто-то начнет делать ящик с фазоинвертором.

К. К. Итак, счастливый обладатель головки громкоговорителя будет вдвойне счастлив, если  $Q_{\text{дз}}$  и  $V_{\text{дз}}$  окажутся подходящими для изготовления фазоинвертора. На радостях он неминуемо допустит ошибку в выборе расчетного значения  $Q_{\text{дз}}$ , не учтя какой-нибудь мелочи, например того, что на электрическом входе низкочастотного звена многополосной АС стоит ФНЧ. Допустив в самом удачном случае 10% ошибки в  $Q_{\text{дз}}$  (например, взяв 0,42 вместо 0,38), автор более чем на 30% просчитается в опре-

делении объема, соорудив, например, 135-литровый комод с динамиком вместо 100-литрового. Конечно, имея природную смекалку и догадываясь о возможной ошибке, наш Кулибин будет лишь постепенно отрезать трубу фазоинвертора...

С. Луша (с садытской ухмылкой). Как хвост у терьера.

К. К. ...настраивая его на все более высокую частоту. Если он грамотно выполнит эту процедуру, ему удастся в известной степени исправить ошибку в определении  $Q_{\text{дз}}$ , скажем, в нашем случае чуть снизив  $f_{\text{дз}}$  по идеальной АЧХ уже не будет.

И. А. И это, заметьте, коллега, наиболее оптимистичный вариант.

Луша. А помнишь, К. К., как мы на даче у соседа-акустика из скворечников скворцов полудохлых на дюжине выпряхивали? Он им случайно организовал „одностороннее движение“, а ошибся-то всего ничего: вместо дырки-летка фазоинверсную трубу по инерции вставил...

И. А. И что же, неправильно ее рассчитал?

Луша. Ну а нам, я так понимаю, как раз это и осталось: обеспечить наш ящик трубой, настраивающей фазоинвертор на выбранную частоту  $f_{\text{дз}}$ .

К. К. Сдается мне, что это „всего ничего“ может оказаться камнем преткновения.

И. А. На первый взгляд все выглядит весьма примитивно. Тиле приводит формулу, однозначно связывающую  $\lambda$  с параметрами фазоинвертора:

$$f_{\text{дз}} = \frac{C_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_V}{L_{\text{дз}} V_B}},$$

где  $C_0 = 340$  м/с — скорость звука в воздухе,  $S_V$  — площадь фазоинверсного отверстия,  $L_{\text{дз}}$  — эффективная длина трубы, состоящая из собственно длины  $L_{\text{дз}}$  и довеска  $L_{\text{дз}} = 0,825 \sqrt{S_V}$  — образующего за счет „краевых эффектов“.

Анализ представленной зависимости показывает, что условию настройки удовлетворяет целое семейство труб, для которых  $S_V / L_{\text{дз}} = \text{const} = V_B (2\pi f_{\text{дз}} / C_0)^2$ .

К. К. Снизу площадь трубы ограничивается площадью воздушного потока в ней, которая не должна превышать 4–5% от скорости звука, ина-

<sup>2</sup> Ленин В. И. Соч. — над 4, т. 30, с. 206 (Речь на VII Съезде Советов. Правда, в оригинале было про вышй, la в общем какса разниа! — С. Л.).

<sup>3</sup> Поднятая нива тема действительно очень популярна в „Интернете“. Вам могут быть представлены многочисленные рекомендации, методики, программы-вычислители. Относится к этому блгу цинизмадан надо весьма осознанно: ошибок там содержится немало, например в нашем случае формулы для  $f_{\text{дз}}$  и  $f_{\text{дз}}$  были просто перепутаны! Кстати, появление в формулах весов сомнительных показателей степеней и прочих констант, не являющихся простой комбинацией 1, 2, 3,  $\sqrt{2}$ , и т. п., говорит о том, что представленные зависимости скорее всего эмпирические, аппроксимирующие кривые, характер которых выяснен другим, более сложным способом. Это дает основания полагать, что данные формулы имеют не слишком уж широкие границы использования, то есть возможно, скажем, что считать по ним для  $Q_{\text{дз}} = 0,1$  или  $Q_{\text{дз}} = 10$  нельзя. Степень же совпадения результатов расчетов по предлагаемой методике с другими (графическими и т. п.) проверяется нами и оказалась достаточно высокой по всем реальному диапазону изменений  $Q_{\text{дз}}$ .

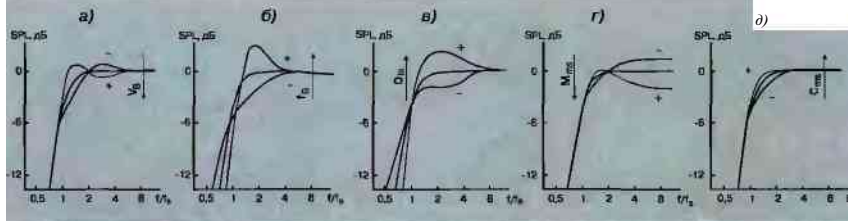


Рис. 1. Изменение характера АЧХ фазоинверсной системы при отклонении от учитываемого в расчетах („оптимального“) значения:

а) расчетного объема  $V_0$  б) расчетной частоты настройки фазоинвертора  $f_0$  в) собственной добротности  $O$ , (ошибки в измерении, например); г) имеющейся массы подвижной системы  $M_{ms}$ ; д) имеющейся гибкости механического подвеса  $C_{ms}$ .

Выбор стратегии построения фазоинверсной АС, нацеленной на получение максимально гладкой АЧХ, еще не гарантирует получения требуемого результата. Некоторые важные параметры могут быть заявлены или измерены недостаточно точно (например, масса подвижной системы). Некоторые параметры, например такие, как объем ящика или частота настройки фазоинвертора, могут быть реализованы с погрешностями. В обоих случаях АЧХ отличается от желаемой. Как отличается — показывают наши рисунки. Естественно, от ожидаемого результата отклонятся и другие параметры, например импульсный отклик

че турбулентность неизбежна<sup>4</sup>. Слишком большие площади могут дать отрицательные значения  $L_V$ .

**Луша.** И труба будет вынуждена торчать наружу!

К. К. Боюсь, что даже не наружу.

И. А. И не торчать?

**Луша.** И не труба?..

К. К. В достаточно широком диапазоне изменений  $S_{VI}$  и  $L_{VE}$  при  $S_V/L_{VE} = \text{const}$  можно считать, что изменения в функционировании фазоинвертора происходят, но не отражаются радикально на звуке, оптимальным же считают вариант, когда  $L_V = 2\sqrt{S_V}$ .

**И.** А. Кстати, при слишком большой длине трубы ( $L_V \geq C/f_0$ ) в ней может зародиться стоячая волна. Это совсем не подарок и радикально портит звук.

**Луша.** А в остальном — все очень легко, и описанные формулы великолепно иллюстрируются номограммой для расчетов.

К. К. Пользоваться номограммой очень просто.

На линии X в логарифмическом масштабе нанесены значения  $V_B$ , на линии Y — в обратном порядке  $f_B$ . Найдите „свои“ точки на линиях и соедините их. Продолжите полученную прямую до пересечения с линией Z и восстановите перпендикуляр к линии Z в этой точке (красная линия на рис. 2). Все варианты у вас в кармане! Понят-

но, что номограмму можно распространить вправо — влево — вверх — вниз, но наиболее здравые соотношения она охватывает. Отобрать из них те, которые удовлетворяют введенным ранее ограничениям и рекомендациям, не составит труда.

И. А. С целью экономии бумаги мы даже не будем приводить числового примера — любой сможет, вооружившись значениями  $Q_{10}$ ,  $V_{00}$ ,  $f_0$ ,  $S_D$ ,  $x$ , произвести необходимые вычисления.

К. К. Будет ли плодотворен конечный результат — покажет время.

**Луша.** По крайней мере обладателем замечательной будки с цилиндрическим лазом вы окажетесь наверняка...

*Продолжение следует*

В ближайших номерах наши авторы познакомят вас с панелью акустического сопротивления, акустическим лабиринтом, трансмиссионной линией и подойдут вплотную к полосовому резонатору. ◀

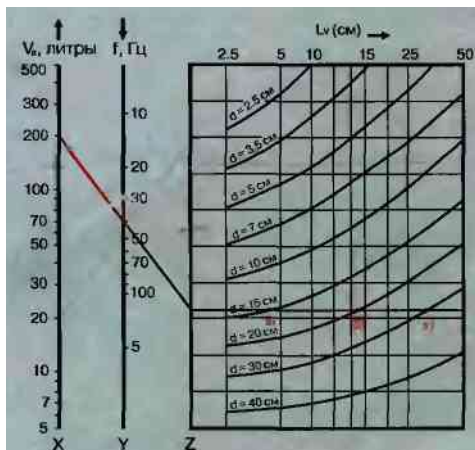


Рис. 2. Номограмма расчета ящика фазоинвертора. Например, если  $V = V_B = 200$  л,  $f = f_B = 40$  Гц, возможные варианты размеров трубы (диаметр  $d$  х длина  $L_V$ ): а) 15 см х 5 см; б) 20 см х 14 см; в) 30 см х 32 см

<sup>4</sup> Иначе говоря, если применяется головка с большой площадью  $S_D$  и большим ходом  $x$ , то есть с большим объемным смещением  $V_B = S_D x$ , то „примочка“ этого объема через  $S_V$  не должна приводить к большим скоростям воздушных потоков, откуда вытекает:  $S_V \geq f_B V_B / (0.04 \cdot 0.05) C_0$ . Заметим, кстати, что большие  $S_V$  могут „проявляться“ только лишь на частотах ниже  $f_B$ ; заметно выше  $f_B$  фазоинверсное отгласение практически не работает, вблизи  $f_B$  Гр-тр-тр-тр стоит на месте.

# Там, где живут басы (4)

Несмотря на то что многие уверены в возможности аналитического либо машинного расчета трансмиссионной линии (существует даже специальная программа TLBOXMOD), на деле проектирование ее - сплошная эмпирика. Впервые подобные конструкции упоминаются в изданиях 30-х годов, известны эксперименты Бэйли (A. R. Bailey) с различными демпфирующими материалами. Так, например, Бэйли выяснил, что лучшими звукопоглощающими материалами являются стопроцентная длинноволокнистая шерсть плотностью около  $10 \text{ кг/м}^3$  (собачка в негодованием ухажит), декон или стекловолокно. Понятно, что сейчас, с появлением сверхновых материалов этот список может быть расширен. Ряд критериев введен Бредбери (A. T. Bradbury) в 1976 г. Эмпирикой пропитаны и измышления по поводу формы трубы. Замечено, что чистота и плотность баса и слухательское ощущение его натуральности в большой степени зависят от этой самой формы. Обычно площадь сечения трубы, несколько превышающая площадь диффузора, уменьшается очень постепенно и лишь за метр до выходного отверстия уменьшается более резко, до 40-75% от начальной. Этот метр, кстати, часто оставляют свободным от заполнения. Если сужать трубу в небольшой степени, подчеркивание басов увеличивается, но с окраской средних регистров бороться становится труднее. Доводка трансмиссионной линии всегда осуществляется на слух и, как показывает наш опыт прослушиваний, далеко не всегда удачно.

сыплются на вас градом. Писали бы лучше о гармонизации трактов путем их настройки на наиболее часто употребляемые композитором ноты...

К. К. Действительно, писем пришлось изрядное количество. Однако в данной статье мы ответим на один-единственный, но главный вопрос.

Что касается остального — листайте этот номер журнала.

И. А. Я так понимаю, что дело дошло до измерения параметров Смолла — Тиле.

Луша. Тем более что в описаниях импортных головок ничего, кроме „The Best Quality and High Resolution“, не вычитать, а в отечественных паспортах частенько можно прочитать „ $Q_{\text{дс}} = 0.5 \pm 0.2$ “ (?!).

И. А. Боюсь, подобная характеристика подойдет любой головке.

Луша. Да разброс изрядный! Как раз для паспорта. Представляете, в пятом пункте будет написано: „Русская борзая“. А в скобках: „Доберман“.

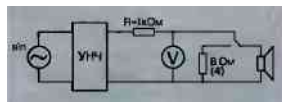


Рис. 1. Измерение модуля полного сопротивления громкоговорителя

К. К. Ну, все обсудили? Можно измерять?

Проще всего измерить  $f_s$  и  $Q_{\text{дс}}$ . Для этого собираем схему рис. 1.

Понятно, что в такой схеме реализуется режим генератора тока, и кривая  $V(f)$  с большой точностью повторит кривую  $|Z_{\text{полн}}(f)|$  (рис. 2).

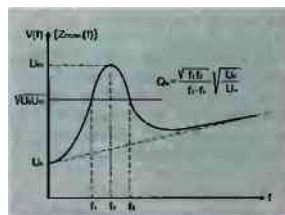


Рис. 2.  $|Z_{\text{полн}}(f)|$  НЧ-головки. На постоянном токе значение модуля полного сопротивления минимально, имеет чисто активный характер и равно омическому сопротивлению звуковой катушки. По мере приближения к резонансной частоте  $f_s$   $|Z_{\text{полн}}(f)|$  заметно возрастает, приближаясь к чисто активному. Это означает, что ЭДС самоиндукции, наведенная в звуковой катушке, колеблющейся в магнитном поле, противодействует приложенному к ее выводам напряжению. Поэтому не следует удивляться, что протекающий в звуковой катушке ток на  $f_s$  минимален: мы имеем дело со структурой, эквивалентной параллельному колебательному контуру



К. К. Почти полгода назад, начиная работу над этой темой, мы никак не могли предположить, что четыре номера спустя все еще будем топтаться вокруг да около фазоинвертора.

Итак, в предыдущих номерах мы рассказали, чем хороши (и чем плохи) закрытый ящик и фазоинвертор, подробно описали расчет фазоинвертора. при этом нашли: требуемый объем ящика  $V_B$ , частоту настройки  $f_B$  (а следовательно, диаметр  $d$  и длину  $L$  трубы) и получаемую частоту среза  $f_{\text{счх}}$ . Все эти параметры (Смолла - Тиле) оказались функциями констант, а именно: резонансной частоты головки в открытом воздухе  $f_0$ , эквивалентного объема, характерного для головки,  $V_{\text{дс}}$  и полкой добротности головки  $Q_{\text{дс}}$ .

Луша. Говорила я вам, что, как только в статье появится первая формула, письма, требующие ответа, по-

<sup>1</sup> Для ленивых напомним:  $V_B = 15V_{\text{дс}}Q_{\text{дс}}^{2.87}/f_{\text{счх}}^3$ ,  $0.26f_0Q_{\text{дс}}^{-1.43}/f_B = 0.42f_0Q_{\text{дс}}^{-0.82}$ . Остальное вычисляется по номограммам



Рис. 3. Измерение эквивалентного объема

И. А. Особенно, если головка не дребезжит, ничего не касается (подвешена) или хотя бы устойчиво укреплена вдали от отражающих поверхностей.

К. К. А уж где резонансная кривая, там и резонансная частота  $f_r$  и добротность  $Q_{ac} = \sqrt{f_1 f_2 U_0 / (f_2 - f_1)} \sqrt{U_m}$ , причем значения  $f_1, f_2, U_0, U_m$  легко определить из рис. 2.

Чуть сложнее дело обстоит с  $V_{ac}$ . Тут понадобится **ящичек**, желательно прочный и не очень маленький, объемом  $V_c$ .

**Луша.** Мы всем рекомендуем такую, со среднего размера дыркой.

К. К. Приладив (просто плотно прислонив) к нему головку (рис. 3), вновь измеряем  $f_{рез} = f_c$ .

Тогда  $V_{ac} = V_c ((f_c/f_r)^2 - 1)$ , однако при условии, что ящик не очень большой и  $f_c > 2f_r$ , то есть  $V_{ac} > V_c$ . Хотя, кстати, это условие не кажется мне столь уж принципиальным.

**Луша.** А я с глубоким удовлетворением готова констатировать, что с фазоинвертором покончено?

**Луша.** Вот изобрести бы им фазоинвертор и остановиться на этом раз и навсегда! Так нет же! И изобретают, и изобретают, и изобретают! А потом пишут: всем, мол, хороша конструкция, но по сравнению с фазоинвертором... и т. д., и т. п..

И. А. Не могу согласиться с тем, что это история исследования и разработок всего того, о чем мы еще не написали — VarioVent, лабиринт, полово-вой резонатор, трансмиссионная линия и т. д., — это история борьбы с недостатками фазоинвертора. Я видела и слышала плохие и хорошие фазоинверторы, плохие и хорошие устройства, представленные в других оформлениях. Невероятно трудно решить комплексную задачу оптимального

выбора акустического оформления (с технической, экономической, контюнктурной точек зрения). Но иметь представление о научных подходах к решению этой задачи необходимо.

**Луша.** То есть мне надо готовиться записывать очередные формулы?..

Люди! Отчего вы живете так скудно?

К. К. VarioVent (по-русски — корпус с панелью акустического сопротивления, ПАС) — первая серьезная попытка избавиться от проблем закрытого ящика, не прибегая к трубе фазоинвертора.

**Луша.** Как я помню, у закрытого ящика есть одна большая проблема. Частота резонанса головки в нем  $f_c$  заметно выше, чем  $f_r$ , так как  $f_c = /V_c + 1)^{0.5}$ , что легко видеть из

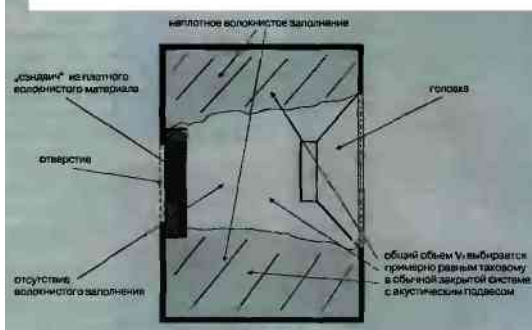


Рис. 4. Корпус с панелью акустического сопротивления

предыдущей формулы, **связывающей** эти параметры. И на этой частоте головка может повести себя весьма недостойно — раскататься в резонанс так, что **потом** проволоку от звуковой катушки будете с ушей сматывать.

И. А. Коллега, где она такого насмотрелась? И потом, **несуеши, ас очков...**

К. К. Вот-вот... Борьбу с ушами или очками можно, только снижая добротность колебательной системы на частоте резонанса. Наиболее целесообразно это делать, внося потери в упругую среду — скажем, плотно заполняя внутренность АС волокнистым материалом.

И. А. Однако существует еще один путь, аналогичным образом отражающий я на эквивалентной схеме устройства. Это панель акустического сопротивления. Она представляет собой плотный «сэндвич» из волокнистого материала толщиной в несколько сантиметров. Он закрывает отверстие в

корпусе, которое теперь уже и не является фазоинверсным.

**Луша (тыкая пальцем).** И не является отверстием...

К. К. Грубо говоря, у воздуха есть возможность просачиваться через войлок ПАС, правда, с большим «напрягом». Этот процесс и обеспечивает внесение в систему столь необходимых потерь (рис. 4).

И. А. Корпус, как и в случае закрытого ящика, заполняется волокнистым материалом, но путь от головки до ПАС остается свободным.

Как правило, ПАС **нерассчитывают**, так как **не** имеют достоверной модели войлочного сэндвича. Объем АС выбирается тот же, что был рассчитан для закрытого ящика.

К. К. Звучание при хорошо выполненной ПАС упругое, сочное, хотя бас далеко не так **увесист**, как при использовании фазоинвертора того же объема.

**Лабиринт** — еще один представитель устройств, созданных в порыве борьбы с резонансным характером закрытого ящика и фазоинвертора. Но с этим «зверем» нам придется познакомиться подробнее. Лабиринт и трансмиссионная линия — это такие акустические устройства, которые не могут быть описаны эквивалентной схемой с сосредоточенными параметрами, как описывается, например, фазоинвертор. Здесь **становятся** важными не только объем, но и линейные размеры устройства.

Для начала рассмотрим трубу, для которой  $L \gg d$  (рис. 5). С левой стороны у трубы есть поршень, правая сторона открыта. Если, начиная с ну-

**20 лет спустя**, что существует масса **других**, причем весьма **примитивных** способов измерения  $Q_{ac}$  и  $V_{ac}$ . Наша задача — **показать**, что эти параметры **нельзя** измерять с высокой **точностью**, я не перечислю все **способы**, которые **добросовестный** читатель может отыскать и сам.

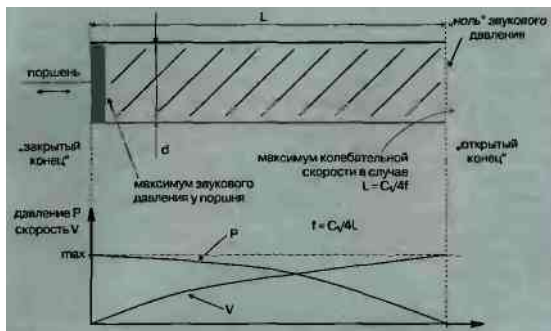


Рис. 5. Излучающая „четвертьволновая“ труба

левой частоты, поршень колеблется все быстрее и быстрее, то отыщется частота  $f = C_0/4L$ , на которой открытый конец трубы начнет активно излучать; здесь  $C_0$  — скорость звука.

И. А. Действительно. Поршень двигается, создавая рядом с собой зону максимума звукового давления. У открытого конца трубы в любом случае давление равно нулю. Но при  $L = C_0/4f$  („четвертьволновая труба“) на открытом конце трубы образуется максимум колебательной скорости воздуха. Этот максимум позволяет устройству успешно отдавать энергию с открытого конца, что на языке акустиков будет означать следующее: диффузор на частоте резонанса ( $f = C_0/4L$ ) будет задемпфирован, задняя его стенка, обращенная к трубе, будет испытывать то же, что и задняя стенка диффузора головки, оформленной в фазоинвертор. Частота  $f$  должна настраиваться на резонанс головки (то есть длина  $L$  выбирается в зависимости от резонансной частоты головки), что, впрочем, характерно и для фазоинвертора<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Несмотря на всевозможные „максимумы“ и „резонансные частоты“ еще раз подчеркнем, что лабиринт (пика чир — наша труба с поршнем) — устройство нерезонансное, в отличие от фазоинвертора. По крайней мере никаких двух связанных резонансных контуров там не наблюдается.

Итак, читатель уже, наверное, понял, что корпус с лабиринтом (рис. 6) на резонансной частоте добивается того же результата, что и фазоинвертор, но другим путем.

К. К. Кстати, на подобном принципе основаны не только АС. Кларнет, например, типичный представитель семейства четвертьволновых резонаторов. Тот конец, в который дуют, можно считать закрытым...

Луша. Так-так. Начало хорошее. Помню, сосед на даче пытался доказать ртом колесо от машины, не вывинтив клапан...

И. А. И что? Ничего?

Луша. „Ничего“ было до тех пор, пока он не догадался клапан вывинтить...

К. К. (продолжает). Тот воздух, который продувают в кларнет, нужен для возбуждения колебаний „язычка“, играющей роль поршня. Дальше все ясно.

Луша. Особенно, если играть на одной ноте.

К. К. Кстати, полная противоположность кларнету — орган. Там есть трубы, где дуют наискосок в открытый конец. А противоположный конец — закрыт.

Луша. Эдакий большой милиейский свисток. Ну и губа должна быть у органиста. Каку милионера...

И. А. Что характерно, поведением на частоте резонанса сходство лабиринта и фазоинвертора ограничивается. Выше резонанса фазоинверторное отверстие оказывает на процессы все более и более ограниченное действие, труба же благополучно звучит на частотах  $3C_0/4L$ ,  $5C_0/4L$ ,  $7C_0/4L$  и т. д.

Луша. Ага-а-а! То есть вот много и уже можно что-то сыграть.

К. К. Не знаю, как в кларнете, но в АС типа „лабиринт“ эти резонансы считаются побочными, и с ними борются традиционными методами, то есть демпфированием с помощью звукопоглощающих материалов.

Сравним лабиринт и фазоинвертор. Во-первых. На частоте резонанса

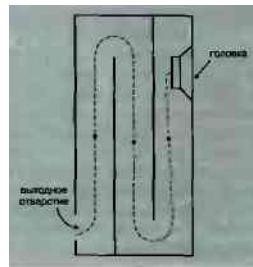


Рис. 6. Акустический лабиринт. В отличие от традиционных АС вся масса воздуха в лабиринте оказывается соколеблющейся с диффузором. Это эквивалентно снижению резонансной частоты головки

они схожи. Заранее трудно сказать, чей объем окажется меньше, фазоинвертора  $V_B = 15V_{\text{ас}} \times Q_{\text{ас}}^{2.87}$  или лабиринта  $V_L = \pi dL$ , где  $d$  — диаметр диффузора,  $L = C_0/4f$ . Все зависит от параметров головки.

Во-вторых. Ниже резонанса оба „раздемпфируются“. Причем фазоинвертор ведет себя явно хуже, это легко объяснить.

В-третьих. Выше резонанса фазоинвертор ведет себя все более похоже на закрытый ящик, а лабиринт — на задемпфированную на побочных резонансах трубу.



**И. А.** Неполное демпфирование (гашение) **резонансов** на нечетных гармониках частоты настройки нередко приводит к окрашиванию звучания, кста-ти, крайне неприятному. Окончательное решение технологического и коммерческого вопроса в пользу **фазоинвертора** или лабиринта базируется на многих приводящих параметрах. Важными из них могут быть либо **одни**, либо другие, в зависимости **DT** ситуации. Следует учитывать и тот факт, что существуют пристрастия: хочет, например, клиент лабиринт...

**Луша.** ...и **бандпассом** и **вариовсн**-того его уже не удовлетворишь.

**К. К.** Если лабиринт еще поддается какому-то анализу и расчету, то в большинстве источников описания трансмиссионной линии содержат фразу типа: „Принцип действия трансмиссионной линии **схож** с таковым у лабиринта, хотя основные процессы не поддаются аналитическим методам анализа...”.

Не буду это оспаривать. Есть **разные** методы. Но об одном сказать надо: большинство посвященных как **лабиринту**, так и трансмиссионной **линии** литературных **источников**, **попавшихся** нам при работе над **статьей**, друг другу **противоречили**.

Итак, отличия трансмиссионной линии от лабиринта **следующие**.

1. Площадь **сечения** трубы у трансмиссионной линии **оказывается переменной** — она максимальна **в** районе диффузора и постепенно спадает к порту (отверстию на **противоположном** конце трубы).

2. Внутренний объем трубы трансмиссионной **линии** довольно плотно заполняется волокнистым материалом. Помимо функции **звукопоглощения** на побочных резонансах **заполнение** позволяет укоротить трубу, так как резко снижает эффективную скорость звука. Многие **считают**, что трансмиссионная линия скорее эффективно борется с излучением задней стороны диффузора, нежели пытается использовать его, как это делает **фазоинвертор**.

**Луша.** В мирных целях.

**К. К.** Отличие трансмиссионной линии от лабиринта во многом условное, терминологическое. Оба устрой-

ства — **представители** одного и того же **типа** оформления. Субъективно звучание трансмиссионной **линии** может **оказаться** очень симпатичным. Эффективная борьба с резонансными явлениями при отсутствии (если повезет) **среднечастотного** окрашивания способствует созданию достоверного, не бубнящего звучания. Многие ассоциируют звучание трансмиссионной линии с **„английским ЗВУКОМ”**. Действительно, именно в Англии популярность подобного рода акустических оформлениях весьма велика. В отличие от Штатов, например. Лично мне хорошо выполненные трансмиссионные линии нравятся на **симфонической музыке**, особенно при наличии литавр и контрабасов пиццикато...

**Луша.** Контрабасы **пиццикато**, это все равно что попкорн **из** свинины

**И. А.** Чувствую, коллеги, что нам пора прерваться и подумать о вещах менее возвышенных.

**К. К.** (*открывая холодильник и отгоняя собачку*). Но более **насушенных**.

В следующих номерах — корпус типа “полосовой резонатор” и рупорные излучатели. И с басами будет покончено. По **крайней мере** с тем, где они живут. ◀



# Там, где живут басы (5)



нижневешнем в физическую суть акустических явлений, частенько вообще отказывается от каких-либо физических объяснений, когда речь заходит о ПР.

К. К. Действительно, ящик с фазоинверсным приспособлением (рис. 1а) является "природным" акустическим фильтром нижних частот. Ведь, как мы уже писали ранее, труба фазоинвертора, акустически прозрачная для басов, становится все большим и большим препятствием по мере увеличения частоты.

Придавав такой дополнительный ящик-резонатор к любой АС, например к закрытому ящику, мы получим простейший полосовой резонатор (рис. 1б).

И. А. Если закрытый ящик имел такую АЧХ, как на рис. 2(1), то ПР в простейшем случае показывает нам "полосовую" АЧХ, обрезая "все лишнее".

К. К. Все бы хорошо. Но откуда берутся "лучший динамический диапазон", "минимальные из всех возможных" размеры, "лучшие переходные

рике недалеко от колонки, кроме звучания фазоинвертора, и так никогда ничего не слышу.

К. К. Бу-бу-бу, бы-бу-ба... Бубнига и только. Кстати, не грех вспомнить, какова картина звукового давления у трубы фазоинвертора (см. рис. 4).

Таким образом, в любом фазоинверсном оформлении отверстие фазоинвертора является настоящим полюсовым излучателем. В основе работы ФНЧ лежит уже оговоренный нами

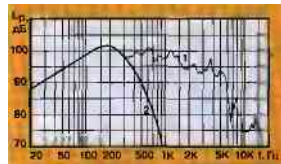


Рис. 2. АЧХ громкоговорителя в оформлении "закрытый корпус" (1) АЧХ полосового резонатора (2)

## Вместо предисловия

Мы по собственному опыту знаем, как трудно писать сложно о сложном. Но писать о сложном просто порой совсем невозможно. С превеликим удовольствием мы с И. А. уединились бы где-нибудь, прихватив с собой хорошего кофе (и конфет.— С. Л.), и написали бы что-нибудь простенькое о звучании какого-то тракта. Но увы, не такова наша аудиотехническая планета. Мы прекрасно понимаем, что большинство читателей, увидев графики и формулы в отсутствие конкретной аппаратуры, смело "залистнут" наши последние страницы журнала. Но, если хоть десятая часть напрягает безусловно наличествующее серое вещество своего мозга и дочитает наши записки до конца хотя бы с третьего раза, наш труд будет вознагражден.

Эта статья сложнее предыдущих. Тем не менее — не сдавайтесь.

Разудалою русскою тройкой пронесли мы по басовым полям современной ауднотехники. Напомним уважаемым читателям, что в предыдущих статьях мы — К. К., И. А. и шерстистая С. Л., рассмотрели следующие типы акустического оформления: закрытый ящик, фазоинвертор, пассивный излучатель, панель акустического сопротивления, лабиринт и трансмиссионную линию.

К. К. На очереди — полосовой резонатор (bandpass. ПР).

И. А. Замечу, что современная зарубежная массовая аудиопресса, не балующая читателя глубоким про-

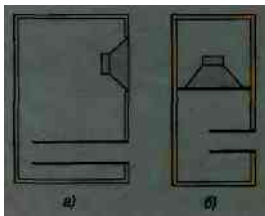


Рис. 1. а) ящик с фазоинвертором б) простейший полосовой резонатор

характеристики", о которых так любят писать аудиопресса,— остается большой загадкой.

И. А. Оставим пока эти вопросы без ответа.

Давайте поиграем в такую игру: отвлечемся на время от звучания динамической головки в фазоинверсном оформлении и займемся прослушиванием звучания фазоинверсного отверстия (рис. 3).

**Собачка Луша.** Замечательное занятие! Особенно если учесть, что мне не надо к нему готовиться — мои черные лохматые уши как раз на уровне дырки в "КЕФ Q-90", и я, сидя на ков-

ранее физический процесс, связанным с инертностью воздуха в трубе. В качестве ФВЧ выступает сама головка.

Заметим, что на рис. 4 изображено несколько кривых. В зависимости от параметров фазоинверсного оформления (в том числе динамической головки) "полосовые" характеристики фазоинвертора могут быть разными. "Квазипорядочные" фазоинверторы (имеются в виду фазоинверсные отверстия) имеют широкую полосу, баттервогтовские — более узкую, че-

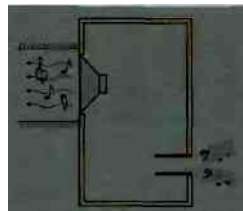
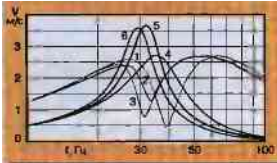


Рис. 3. Прямое излучение от динамической головки можно ликвидировать либо мысленно, либо отведя его при помощи длинной трубы. Тогда появится возможность насладиться звуком только фазоинверсного приспособления

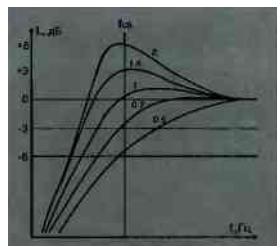


**Рис. 4.** Характеристики фазоинверсного оформления. 1, 2, 3 — скорость смещения диффузора динамической головки в зависимости от частоты (баттервортовский, квазитретьего порядка и чебышевский случаи); 4, 5, 6 — соответствующее излучение фазоинвертора в относительных единицах

бипольские — совсем узкую. Кстати (это на рисунке не отражено) меняется и эффективность фазоинвертора.

Луша. Кажется, я догадалась. Лучший способ отвлечься от звучания динамической головки — это накрыть ее сверху ящиком, получив при этом:

- а) типичную конструкцию **полосового резонатора** (рис. 1б);
- б) возможность изменять кажущиеся параметры головки (**жесткость** иод-



**Рис. 5.** АЧХ в оформлении "закрытый корпус" для разных значений полной добротности ГГ

веса, полную добротность, собственную резонансную частоту ( $f_0$ ) путем изменения объема **закрытой** камеры.

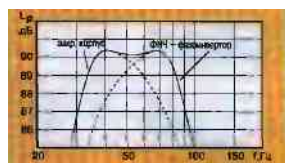
И. А. Собачка как всегда права. Теперь остается разобраться с эффективностью ПР и его размерами.

Взглянем на зависимость АЧХ звукового **давления** для закрытого ящика от его **полной** добротности, с учетом гибкости воздуха — "акустического подвеса" (рис. 5).

Пик АЧХ при высоких значениях **полной** добротности на слух **воспринимается** как подчеркивание определенного частотного участка. Для закрытого ящика это беда, а для полосового резонатора — **именно** то что нужно. Объединив две симметричные **характеристики**, мы получаем то, что хотели, **то есть** полосовую АЧХ (рис. 6).

К. К. Радиотехники сказали бы, что в ПР реализуется система двух связанных **равнонастроенных** контуров (рис. 7).

Один контур — закрытый ящик (элементы  $R_1, L_1, C_1$ ); другой **фазоинверсный** ящик —  $L_2, L_3, C_2, R_2$ . Связь осуществляется через диффузор дина-



**Рис. 6.** АЧХ ПР как результат взаимодействия двух видов НЧ-оформлений

**мического** головки. Фазоинвертор настраивается на частоту резонанса динамической головки с учетом ее усталопки в закрытый ящик ( $f_0$ ). Вот такая формула:

$$f_0 = f_0 \sqrt{V_{\text{экв}} / V_0 + 1},$$

где  $V_{\text{экв}}$  — эквивалентный объем для головки,

$V_0$  — объем **закрытой** камеры ПР.

Луша. Товарищи радиотехники! Бы все помните, к чему **стремятся** создатели полосовых систем из **связанных** контуров, например в приемниках? К максимально **прямоугольной** полосовой характеристике!

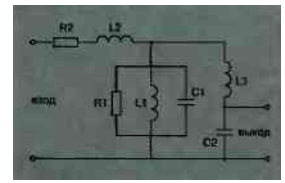
К. К. Для этого используют целую систему связанных **равнонастроенных** контуров, называемую ФСС...

Луша. ФСБ?

К. К. ...то есть фильтр сосредоточенной селекции. К счастью, у нас пока всего лишь два контура.

И. А. Итак, можно **показать**, что при снижении объема **закрытой** задней камеры, если **рост**  $f_0$  сопровождается адекватной перестройкой **фазоинверсной** трубы. АЧХ вытягивается вверх и смешается вправо (рис. 8).

К. К. Добротность системы связанных контуров **растет**, циркулирующая в них энергия и. **соответственно**, та же



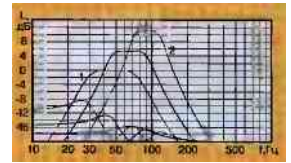
**Рис. 7.** Эквивалентная схема НЧ-оформления "полосового резонатора"

часть, что "отсасывается" с емкостного выхода (см. схему на рис. 7), растут — таким образом, повышается эффективность излучателя.

Луша. Замечу, что "емкостной выход" — **Wo** труба фазоинвертора.

К. К. И еще. Как сказал бы наш коллега М. А. фазоинвертор — он и в Африке фазоинвертор. То есть **на** частоте настройки он обеспечивает максимум демпфирования ("отбора **энергии**") диффузора, и, следовательно, минимум амплитуды его колебаний, а значит и искажений (см. рис. 8. синие кривые). Этим во многом объясняется высокая эффективность полосового резонатора.

И. А. Что же касается роста средней частоты полосы излучения при попытке повысить эффективность, то **этого** бояться не надо. Благодаря **подбору** соответствующих параметров головки **эта** подростая средняя частота может быть все же достаточно **низкой**. Как **правило**, в оформлении типа ПР мы обнаруживаем головки со сравнительно небольшим, **но** тяжелым диффузором, мощным подвесом и с огромным ходом.



**Рис. 8.** Изменение АЧХ звукового давления и смещения диффузора при изменении размеров задней камеры. 1 — **изыбыточный** объем, 2 — **недостаточный** объем

Луша. Для все **еще** сомневающихся в преимуществах ПР нарисую картинку, **иллюстрирующую** поведение такой **головки** в закрытом ящике малого объема и в полосовом резонаторе, изготовленном на основе этого ящика (рис. 9).

К. К. Отмечу безусловное преимущество ПР и том, что касается параметра  $K_{\text{нл}}$  коэффициента нелинейных искажений. Этому способствуют две причины. Одна нам уже известна — амплитуда **колебаний** диффузора на резонансе минимальна. Вторая причина — фильтрующие свойства **фазоинверсного** отсека: излучение ПР, как **правило**, узкополосно, и даже вторая, а тем более третья и более высокие гармоники, обусловленные нелинейными искажениями, продуцируемыми ПР, в значительной степени отфильтровываются.

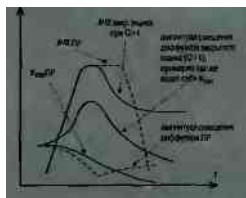


Рис. 9. Сравнительные характеристики различных видов оформлений

И. А. Что ж, продолжим. Теперь будем изменять объем передней фазоинверсной камеры. Все остальное, включая настройку фазоинвертора,

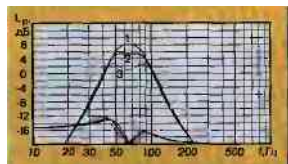


Рис. 10. АЧХ звукового давления (дБ) и смещения диффузора (отн. ед.) при изменении объема фазоинверсной камеры. 1 - избыточный объем, 2 - оптимальный объем, 3 - недостаточный объем

оставляем без изменений. Получаем следующие картинки (рис. 10).

Луша. Радиотехники, занимающиеся связанными контурами, называли бы связь контуров в случае 2 оптимальном (критической), связь 3 — большекритической, 1 — меньшекритической.

И. А. Не ирониюю, коллега, где она всего этого нахваталась? Обычно не в меру говорливая не по теме, сегодня собачка отбегает добрую половину нашего научного батона.

Луша. Вот еще!.. Я сегодня еще и из мисочки покушала...

И. А. Третья степень свободы — настройка собственно фазоинверсной трубы (рис. И). Только оптимальная настройка (на частоту резонанса головки в закрытой камере  $f_0$ ) при непротиводействии прочих обстоятельств обеспечивает желаемую АЧХ (кривая 1).

Уход настройки наверх все перекашивает (кривая 2), не лучше обстоят дела и при уходе вниз (кривая 3).

К. К. Вывод. Даже самый простой из ИР, рассмотренный нами.— вещь чрезвычайно сложная в настройке.

И. А. Расчет полосового резонатора сложен (настолько, что мы даже не публикуем его элементов), но хоро-

шее знание основных параметров головки позволяет воспользоваться с этой целью одной из многочисленных программ, например той, что представлена в Интернете: <http://members.tripod.com/XSSpl/Audio/Seal dB P1.htm>.

К. К. Рискните — и пейте шампанской.

Луша. Под омерзительные бубнящие звуки вашего детинца.

И. А. Рассмотренная конфигурация действительно является просрейшей и, кстати, наиболее части применяемой. Замечу, что спад вправо и влево оказывается некрутым — около 12 дБ на октаву, так как в качестве ФВЧ выступает закрытый ящик, а в качестве ФНЧ — фазоинвертор.

Учитывая, что ПР (особенно наиболее аффективные его разновидности) — устройство исключительно узкополосное, остальные узлы АС должны быть сконструированы соответствующим образом. Например, ПР перекрывает (по уровню -6 дБ) диапазон 32–68 Гц. Следовательно, акустическая система, которую он "под-

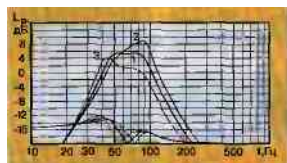


Рис. 11. Настройка трубы фазоинвертора

тирает" снизу, должна сама воспроизводить 68 Гц и весьма эффективно.

К. К. Наиболее часто полосовые резонаторы применяются для поддержки полноценных высококачественных двух- или даже трехполосных систем. При этом для ПР используется отдельный усилитель и активный кроссовер по входу. Фильтрующих (12 дБ/окт) свойств ПР как ФНЧ, как правило, не хватает.

И. А. А вот весьма плавным спадом АЧХ в сторону низких частот частенько объясняют те случаи...

Луша. ... сплюдь, кстати, не частые, когда полосовой резонатор звучит хорошо, обеспечивая плотный, незатянутый бас.

К. К. Теперь насчет "плотного и незатянутого".

Даже при неплохой ФЧХ узкополосное устройство не может звучать хорошо. Любом реальным басовый звук, например в симфоническом оркестре, достаточно широкополосен и разделение его между двумя устройст-

вами — ПР и низкочастотным звуком АС, обычно не прибавляет красоты в звучании.

На несимфонических фрагментах, особенно на современной электронной музыке, этот эффект практически не сказывается.

И уж совсем хорошо проявляет себя ПР, когда речь идет вообще не о музыке, а о звуках. Самое место ему в системах домашнего кинотеатра, где танки, взрывы, вертолеты...

Луша. ...и прочие акустические блага современной цивилизации.

К. К. Итак, обобщим вышеизложенное.

Во-первых. Полосовой резонатор позволяет получить высокую эффективность акустического излучения при весьма ограниченных размерах конструкции. Учитывая, что излучение происходит через небольшое отверстие фазоинвертора, ПР становится незаменимым в помещениях прослушивания ограниченного объема — особенно в автомобилях.

Во-вторых. Заметные преимущества даст простота балансировки между эффективностью и полосой воспроизводимых частот. Для этого достаточно варьировать объем заднего закрытой камеры и длину трубы фазоинвертора.

И. А. Закончим это маленькое лирическое отступление и ознакомим читателя с другими конфигурациями ПР.

Система, изображенная на рис. 12а, имеет эквивалентную схему, представ-

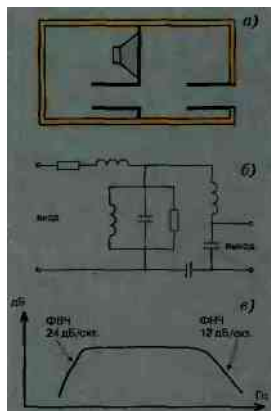


Рис. 12. а) полосовой резонатор, запатентованный в США фирмами "Tedyne" и "Bose" широко применяется в автомобильной аудиотехнике; б) эквивалентная схема; в) АЧХ

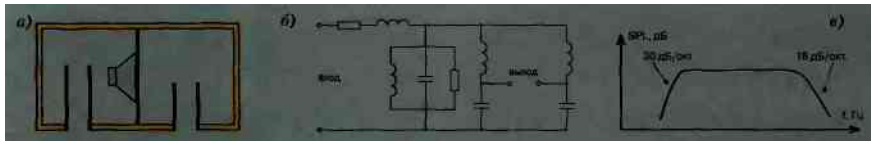


Рис. 13. а) полосовой резонатор, запатентованный в США фирмой "Bose" (более глубокий экскурс в историю говорит о приоритете **Дальтона** (d'Alton, Франция, 1934 г.)); б) эквивалентная схема в АЧХ

ленную на рис. 12б, и АЧХ, отображенную на рис. 12в.

На рис. 13 показан ПР 6-го порядка. Трубы **фазоинверторов** настраиваются с разномс примерно в октаву.

**Луша** (ехидно). Дотошный читатель может попытаться **самостоятельно** проанализировать эти **конфигурации**.

И. **А.** Для остальных же отметим, что именно сложность настройки пи-

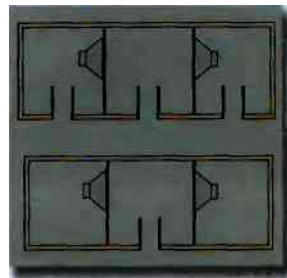


Рис. 14. Другие разновидности полосового резонатора

лобных **систем** нередко препятствует их производству ПТ широкому распространению. Хотя, если посмотреть **объективно**, **полосовой** резонатор уверенно пробивает себе дорогу на рынок.

Первый патент на конструкцию низкочастотного оформления типа "полосовой резонатор" появился во Франции еще в 1934 году, получил его **А. Дальтон**. Интерес к ПР возобновился после доклада **Л. Опичема** на 63-м конгрессе AES в 1979 году, посвященного методам конструирования ПР. В 1982 году два французских инженера Огрис (Aligns) и Сантан (Santens) опубликовали в журнале "L'Audiophile" методику расчета таких систем. В 1985 фирма "Bose" получила патент на ПР 6-го порядка (передняя и задняя камеры с **фазоинвертором**) и выпустила первую АС серии "Acoustimass". Бурный рост интереса среди профессионалов и любителей к таким типам оформления **начался** после появления английского перевода статьи из "L'Audiophile" в журнале "Speaker Builder" в 1988 году.

Сейчас существует довольно много разнообразных конструкций АС с такими низкочастотными оформлениями и множество компьютерных программ для их расчета.

К. К. Заметим, что несмотря на ряд сложностей полосовой резонатор имеет определенные преимущества даже перед фазоинвертором.

Во-первых, габаритные размеры и **эффективность**.

Во-вторых, степень **раздемпирования**, характерная для ПР на самых низких частотах, отнюдь не так опасна для **головки**, как в **фазоинверторе**.

В-третьих, и об этом мы уже говорили, "самоедство" **полосового** резонатора относительно порождаемых искажениями гармоник тоже добавляет золотых монет в его копилку.

Я неоднократно слушал звучание ПР, и, надо сказать, нередко оно мне не нравилось. Совершенно не впечатлили сабвуферы "Jamo", хотя бас у "Jamo

И. А. Следует предостеречь особенно **даровитых аудиолобителей...**

**Луша.** Аудиогубителей...

К. К. ...от попыток сделать с ходу хороший ПР, раскопав, например, данные в Интернете, — это скорее всего не удастся. По крайней мере, начать опыты мы бы посоветовали с простейшей конструкции, которую описали наиболее подробно.

И-А. Три базовые конструкции позволяют произвести на свет целый ряд дочерних конфигураций, основанных на симметрии. Например, ПР, изображенные на рис. 14.

К. К. Использование двух головок позволяет решить вечную проблему борьбы с четными гармониками. Кстати, считается, что ПР 6-го порядка (рис. 14) вообще обладает минимальными для ПР искажениями. Отчасти это объясняется тем, что диффузоры с обеих сторон оказываются нагруженными на фазоинверторы.

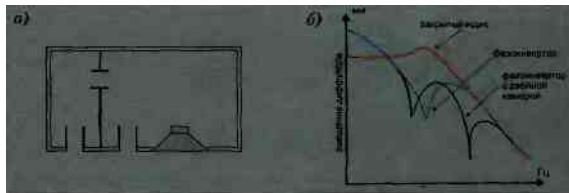


Рис. 15. а) фазоинвертор с двойной камерой;

б) зависимость амплитуды смещения диффузора ГГ от частоты в разных **НЧ-оформлениях**

707" с полосовым резонатором в НЧ-секции был весьма и весьма приемлемым. Но это говорит о том, что любую АС надо делать уметь.

Один из патриархов отечественной электроакустики **А. Р. Пригожин** как-то показывал нам с М. А. Сергеевым систему с НЧ-звеном типа ПР и рупорным **СЧ-излучателем**. Низко- и **среднечастотные** звенья прекрасно согласовывались по чувствительности, хотя уважаемому **Анатолию Рохмизльевичу** и приходилось подсыпать пенопластовых кубиков то в одну, то в другую камеру ПР для настройки объема методом научного тыка

И. А. В заключение **заметим**, что далеко не только ПР обеспечивает возможность организации полосового излучения. Например, обычный фазоинвертор, **дополненный** субкамерой (рис. 15л), частично позволяет избежать проблем, связанных с резонансным характером собственно **фазоинвертора**.

Надо сказать, что особенно широко распространения такие системы не **получили**, несмотря на ряд их очевидных преимуществ.

**Луша.** И это еще не все о басах. Не верьте сплетням, ждите наших дальнейших публикаций. ◀

## Фазо инвертор: перечитывая заново

## 1. Введение.

К. К. Почти три года прошло с тех пор, как уважаемая Ирина Аркадьевна Алдошина подвигнула нас с шерстистой собачкой к написанию целого ряда статей, раскрывающих основы построения акустических систем.

Всякий труд, требующий значительных в масштабах человеческой™

Луша. Собачьей.

К. К. Человеческой собачьей жизни затрат времени, побуждает взглянуть назад в процессе либо по завершении его.

Вот и теперь, так сказать, *перечитывая заново*, признаюсь, что меня одолевает сомнение: **все ли**, что надо, написано, и все ли так, как надо, изложено™

**Собачка.** Как творит наш коллега М. А. (Сергеев) — спасает та что никому не ведомо, *что* надо и *как* надо.

К. К. Так или иначе, но мысль написать вторую статью о самом распространенном варианте акустического оформления — фазоинверторе — созрела у меня довольно давно. Дальше — больше, и если читатель оценит сегодняшний труд, то последует вскоре целая серия статей обо всех типах акустического оформления.

Уважаемый **читатель** должен иметь в **виду**, что **эта** статья возникла не на пустом месте, и тем, кто не стесняется листать старые журналы, мы с **Лупсей** рекомендуем открыть номера 25 и 26 за **1999 год**, а также последние два номера за **2000 год**. Для остальных кратко изложим суть дела.

Фазоинвертор — любимое детище конструкторов акустических систем, он призван при минимальных проблемах разработчика решить задачу расширения АЧХ в сторону нижних частот. Другими словами, улучшить работу АС в басовом регистре.

**Собачка.** Что значит улучшить?

К. К. То **есть**, помимо расширения АЧХ добиться:

- а) снижения искажений,
- б) повышения КПД.

Простейшая модель фазоинвертора содержит два элемента гибкости (упругости): подвес диффузора головки и

воздух в ящике, и две массы: массу подвижной системы головки и массу воздуха, присоединенного к трубе фазоинвертора.

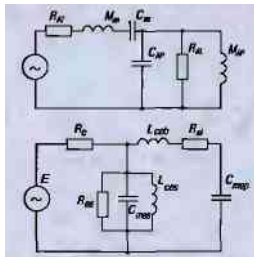
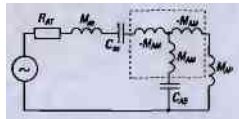


Рис. 1а. Упрощенный акустический и электрический эквивалент АС фазоинверсного типа



**Рис. 16.** Более сложный акустический эквивалент

Эквивалентная электрическая схема (рис. 1а), помимо традиционной для закрытого оформления части  $R_{cs}, R_{cs}, C_{ms}$  и  $L_{cs}$ , содержит ветвь, характеризующую *электрические эквиваленты массы воздуха* в трубе и около  $C_{msp} = M_{sp} S_d^2 / (V B^2)$ , гибкости воздуха в корпусе  $L_{ech} = C_{al} B^2 / S_d^2$  и сопротивления потерь в корпусе  $\bar{f}_e = B^2 / (R_{al} S_d^2)$  ( $l$  — длина намотки,  $B$  — индукция в зазоре). Отметим важное: если в закрытом ящике гибкость воздуха в корпусе и гибкость подвеса динамической головки выступают как *неразделимое общее, неразделимое настолько, что добротность* характерная для головки и обозначаемая  $Q_{cs}$  в ящике навсегда превращается в  $Q_{ls}$  то в фазоинверторе все иначе, и указанные гибкости выступают абсолютно независимо. Анализ физических процессов в простейшей модели позволяет утверждать, что передаточная

функция АС  $K(f)$ , то есть отношение создаваемого звукового давления к напряжению сигнала, подаваемому на головку, будет похожа на ту, что характерна для ФВЧ четвертого порядка, причем АЧХ, ФЧХ и импульсный отклик также будут определяться параметрами этого эквивалентного ФБЧ (1):

$$K(F) = \frac{F^4/F_0^4}{1 + a_1 F/F_0 + a_2 F^2/F_0^2 + a_3 F^3/F_0^3 + F^4/F_0^4}$$

где  $F = \frac{\omega}{2\pi}$  — комплексная круговая частота,  $F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$  — приведенная частота настройки,  $a$  — параметры  $a_i$  определяют как раз исключительно частотой настройки  $F_0$  и добротностью головки  $Q_0$ , и потерь в корпусе  $Q_1$ , с которыми мы познакомимся чуть позже. Таким образом, и тип фильтра, и его характеристики в рассматриваемой простейшей модели будут заданы полной добротностью головки  $Q_0$ , частотой настройки  $F_0$  и фазовым сдвигом  $\varphi$  и объемом  $V_0$ .

Иными словами, если мы **ХОТИМ**, зная добротность и эквивалентный объем  $V_{\text{эк}}$ , найти желаемую частоту **настройки**  $F_b$  и требуемый объем ящика  $V_r$ , то прежде всего необходимо выбрать тип эквивалентного ФВЧ. го есть задать класс характеристик создаваемого акустического оформления, а уж затем можно приступить к проектированию.

Остановимся на этих вопросах подробнее.

Комплексный коэффициент передачи определяет **все характеристики** фильтра, например АЧХ, ФЧХ и ГВЗ. Упростим задачу и примем во внимание только АЧХ. Тогда нам **достаточно** рассмотреть *модуль* комплексного коэффициента *передачи*  $\text{mod } K(F) = K(\omega)$ :

$$K^2(\omega) = \omega^8/\omega_0^8 / (1 + A_2 \omega^2/\omega_0^2 + A_4 \omega^4/\omega_0^4 + A_6 \omega^6/\omega_0^6 + \omega^8/\omega_0^8). \quad (2)$$

Здесь, естественно, коэффициенты  $A_j$  легко выражаются через  $a_j$ .

Теперь все просто: допустим, нас интересует **вопрос**, в каком случае реализуется чисто **баттервортовский** вариант **аппроксимации**

А тогда, когда пилим (2) охватывается **вырожденным**, что дает максимально плоскую характеристику. Это условие будет **выполнено**, если все  $A_j$  равны нулю, что, соответственно, создает требования к  $a_{\text{н}}$ , а потому к добротностям и частотам настройки.

Проведя вычисления, получаем:  $a_1 = -a_3 = 2,6131$ ,  $a_2 = 3,1412$ . При этом  $Q_{\text{н}} \approx \approx 0,4$ , а частота среза АЧХ  $F_3 = F_{\text{н}} = F_{\text{с}}$ .

Раньше мы говорили о том, что существуют стратегии построения фазоинверторов, направленные на оптимизацию АЧХ, импульсного отклика и т. п. Не следует путать типы фазоинверторов и стратегии их построения. Это близкие, но все же различные понятия.

## 2. Типы фазоинверторов

Хронологически первым (аде в тридцатые годы) появился **бумбокс четвертого порядка** (ББ4), но детально изучен он был гораздо позже — в середине 1970-х годов У. Хогом (W. J. J. Hogge).

Простейший бумбокс можно получить, если АС, которая представляет собой головку в нормированном ( $V_{\text{б}} = V_{\text{с}}$ ) закрытом **ящике**, укомплектовать трубой, настроенной на собственную частоту головки в открытом воздухе  $F_{\text{с}}$ .

Результат достигается **просто замечательный!**

Эквивалентный ФВЧ удвоит свой порядок по сравнению с фильтром, характерным для закрытого ящика, и снизит частоту среза почти вдвое (с  $1,414F_{\text{с}}$  до  $0,866F_{\text{с}}$ ), правда, на АЧХ появится элегантный горбик высотой 2,4 дБ, который, обеспечивая легкое **подбубнивание** устройств на басах, и подарил этому типу оформления красивое...

Луша. Прямо таки Собаче

К. К. ...имя **бумбокс (Войбокс)**.

Но **не** это при проектировании бумбоксов главное. Все они настраиваются на одну и ту же **частоту!**

**Собачка** (основательно **цешет** затылок): О-го-го-го!

К. К. Ну надо: на одну и ту же **нормированную** частоту  $F_{\text{б}} = F_{\text{с}}$ . В дальнейшем объем ящика выбирается так, чтобы минимизировать выброс АЧХ.

**Собачка**. Сначала, как я понимаю, выбирается **ящик**, а потом **осуществляется** **настройка**.

К. К. Резкое ограничение свободы выбора, вызванное желанием выбрать постоянную частоту настройки, **сильно** осложняет личную жизнь бумбоксов и их изготовителей. При низких **добротностях** головок (до 0,25) для бумбоксов требуются ящики весьма малого объема (в сравнении с  $V_{\text{ас}}$ ); их **настройка** на низкие частоты  $F_{\text{б}} = F_{\text{с}}$  оказывается проблематичной, так как требует слишком узких и длинных труб. При **высоких** до-

бротностях применяемых головок (более 0,6) частота настройки, наоборот, оказывается **чрезмерно** высокой, что приводит к заметному (до 10 дБ) выбросу в АЧХ даже при реальных  $Q_{\text{сн}}$ .

Так что разумную зону для бумбоксов **образуют** средние добротности, и, кстати, в ее пределах они ведут себя более чем прилично: почти не бубнят, имеют весьма приемлемый объем  $V_{\text{б}}$ ; при малых **добротностях** головки обеспечивают великолепный импульсный отклик устройств; понятное дело, просто в настройке ( $F_{\text{б}} = F_{\text{с}}$ ).

**Собачка**. А я почему-то считала **зоной разумных бумбоксов** Костромскую область...

К. К. На достоинстве удачно сконструированных бумбоксов в начале 1980-х обратил внимание Роберт Баллок (R. Bullok). Он заметил, что если добротность головки ниже 0,34, то она вообще не даст выброса на АЧХ, а в системах с потерями (добротность потерь  $Q_{\text{л}}$  не стремится к бесконечности) даже возрастание  $Q_{\text{сн}}$  до 0,38–0,42 не приводит к появлению выброса.

Отметим, что бумбокс — это способ построения, а не тип эквивалентного фильтра.

**Пушечка**. Ну, это и ежу ясно. Беселя знаю, **Баттерворта** — тоже. Чебышев — вообще, соотечественник. Может, он еще мою прабабку колбасой потчевал...

А вот об ученом **Бумбоксе** не слышала.

К. К. Мы же поговорим о бумбоксах в сравнении с другими типами фазоинверторов.

**Собачка**. А пока продолжим...

К. К. Бывают фазоинверторы с **баттервортовой** характеристикой **квазитретьего порядка** (КБЗ). В книжках иногда пишут о квазibatтервортовской аппроксимации **третьего порядка** — это **тоже** самое. Есть несколько принципиальных **отличий** КБЗ от ББ4.

**Первое**: полного вырождения полинома (2) нет.  $A_2 = A_3 = 0$ , в связи с чем возникают требования к  $a_{\text{н}}$ , однако  $A_1 \neq 0$ , и потому все параметры **квазibatтервортовских** аппроксимаций оказываются зависящими от этой величины.

**Второе**: КБЗ настраиваются не на постоянную частоту, как бумбоксы, а на **частоту** настройки  $F_{\text{б}}$ , значительно зависящую от добротности  $Q_{\text{сн}}$ .

**Третье**: под сильнейшим влиянием величины добротности оказываются и объем ящика, необходимый для сохранения квазibatтервортовской аппроксимации. При малых добротностях этот объем получается очень небольшим, что позволяет проектировать весьма компактные изделия; при повышении

добротности объем быстро возрастает и уже при сравнительно небольших добротностях (0,57) возможностей для сохранения квазibatтервортовской аппроксимации не остается — объем устремляется к бесконечности! К тому же при больших добротностях на АЧХ **правее** частоты среза  $F_3$  образуются выбросы, нередко превышающие 10–15 дБ, что делает КБЗ неприменимым в данных условиях.

Случай с промежуточной добротностью (от 0,4 до 0,55) был подробно описан Баллоком.

Импульсный **отклик** для головок с малой добротностью у систем с аппроксимацией КБЗ хуже, чем у бумбоксов (подробнее о характеристиках см. в подрисованных подписях).

Третий и весьма распространенный тип фазоинвертора — это **чебышевские системы**. При малых добротностях они ничем не отличаются от бумбоксов: **настройка** ведется практически на частоту  $F_{\text{с}}$ , **да и** объем ящика выбирается почти таким же.

Однако по мере роста **добротности**  $Q_{\text{сн}}$  чебышевские системы требуют все более и более обьемистых конструкций; правда, рост требуемого объема происходит не так стремительно, как у КБЗ, в связи с чем **чебышевская аппроксимация четвертого порядка Ч4** может быть с успехом использована для **высокодобротных** головок.

Из всех систем **Ч4** требуют самой **низкой** частоты настройки при добротностях, превышающих 0,4, и при этом обеспечивают наименьшую частоту среза. АЧХ имеет колебательный характер в полосе прозрачности, что всегда **было** свойством чебышевским фильтрам. К неоспоримым **преимуществам Ч4** можно отнести то, что:

— удается избежать пика АЧХ, характерного для бумбоксов и КБЗ, получив взамен колебательный характер АЧХ; амплитуда колебаний АЧХ даже при высоких добротностях  $Q_{\text{сн}}$  оказывается небольшой, гораздо меньше **потенциального** выброса **на АЧХ** у других аппроксимаций (редко превышает 1–3 дБ, практически не скашивается на звуке; типичная величина колебаний 0,5 дБ при добротности 0,6);

- внутри класса **Ч4** реализуются **фазоинверторы**, имеющие наивысший КПД при минимальных габаритах и наибольшее значительное расширение АЧХ в низкочастотную область.

Не будем рассматривать, как отражается желание получить **чебышевскую** характеристику на коэффициентах характеристического полинома, ведь принцип нам ясен; для каждой аппроксимации, в том числе и для чебы-



искусский он заключается в следующем: хочешь иметь такую-то аппроксимацию эквивалентного ФВЧ (читай — такие-то характеристики фазоинвертора) — выясни, какие  $A_1$  и соответственно  $a$ , нужны, и уже исходя из них определяй добротности, частоты и прочие параметры устройства. Ясно, что инженеры давно превратили сложные формулы во вполне приемлемые графики и таблицы, часть из которых мы и представим уважаемой публике.

### 3. Другие подходы

Читатель получил сведения об одном из наиболее **общих** подходов к решению проблемы построения фазоинвертора. В литературных источниках, которые редко встречаются у нас, практически отсутствуют у нас, есть и другие подходы, имеющие право на жизнь.

Часто приходится слышать, что при малых добротностях головки фазоинвертор имеет КБЗ-характеристику, при средних — чисто баттервортовскую, при больших — чебышевскую. Это не так. При любых добротностях можно стремиться к реализации как КБЗ, так и ББ4 и Ч4, и почти всегда успешно; другое дело, что не имеет смысла пытаться построить КБЗ при высоких добротностях, а Ч4 — при малых, если разработчик не преследует каких-либо специфических целей, хотя, повторю, это не возбраняется.

Представленные на рис. 2 графики подробно (см. подписанные подписи) иллюстрируют вышесказанное. На них изображены точные расчетные зависимости, но мы не будем приводить весьма громоздких точных формул, а с аппроксимационными зависимостями читатель уже знаком.

Догадливый аудиофил...

**Собачка Луша.** Хватит диагнозов!..

К. К. ...вооружившись нашими графиками, теперь сможет не только грамотно рассчитать фазоинвертор, но и доложить в коллегам...

**Шерстистая- За рюмкой чая...**

К. К. ...о достижении той или иной аппроксимационной характеристики.

В предыдущих публикациях, посвященных фазоинвертору, мы приводили простейшие формулы для поиска параметров настройки  $V_b = 15V_{ас}Q_{дл}^{2,87}$ ,  $F_b = 0,42F_{ас}Q_{дл}^{-0,92}$ ,  $F_3 0,26F_{ас}Q_{дл}^{-1,43}$ . Заметим, что графики, построенные по этим аппроксимационным зависимостям, ложатся (в зависимости от добротности  $Q_{дл}$ ) то на квазibatтервортовские, то на чебышевские точные расчетные кривые, что хорошо видно на картинках. Так что наши "новые данные" никак не противоречат тем, что мы уже сообщали читателям пару лет назад.

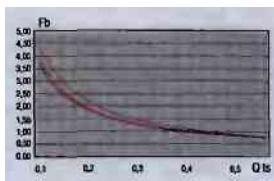


Рис. 2.1. Частоты настройки фазоинверторов баттервортовского типа. По мере роста добротности головки необходимая для получения баттервортовской аппроксимации частота настройки снижается, становясь равной частоте  $F_3$  в районе  $Q_{дл} = 0,4$ . При низкой добротности  $Q_1 = 2-3$  требуется более высокая частота настройки (пунктир), по мере роста добротности частота несколько снижается.

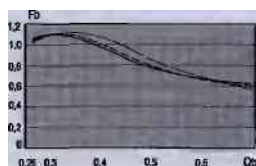


Рис. 2.2. Частоты настройки фазоинверторов чебышевского типа

Отличие от баттервортовских систем наличие: безудержного роста требуемой частоты настройки при малых добротностях нет. Наоборот, снижение добротности до 0,3 и меньше вызывает снижение требуемой частоты настройки. Отметим, что все чебышевские системы настраиваются на довольно низкую частоту. Для бумбокса картинка, подобной рисункам 2.1 и 2.2, нет — на ней, как вы понимаете, красовалась бы малоинформативная прямая линия, параллельная оси абсцисс.

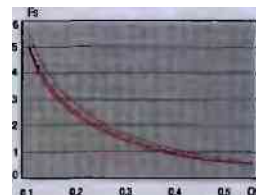


Рис. 2.3. Частоты среза фазоинверторов квазibatтервортовского типа

В общем — ничего интересного. Предложенные в данном разделе рисунки призваны не столько удовлетворить любопытство читателя, сколько стать простым, надежным и достоверным инструментом для расчетов в условиях любительского аудиостроения.

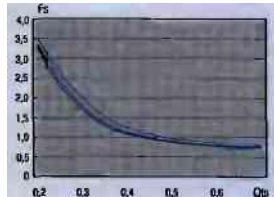


Рис. 2.4. Частоты среза бумбокс

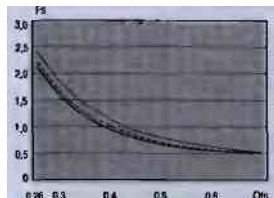


Рис. 2.5. Частоты среза фазоинверторов чебышевского типа

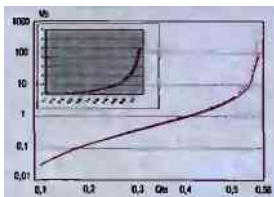


Рис. 2.6. Объемы ящиков фазоинверторов квазibatтервортовского типа

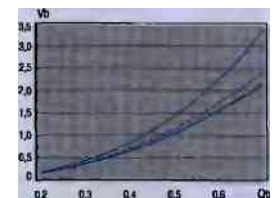


Рис. 2.7. Объемы ящиков бумбокс. Заметно более ровные, чем в предыдущем случае, кривые.

### 4. Что еще можно учесть при проектировании фазоинвертора?

Именно можно, а не нужно. Учесть можно многое, но сделать это корректно весьма сложно. Порой "неучтенка" так вредит достоверности расчета, что выплывание блох путем прогулок по аппроксимационным кривым в поняти-

**КЕ** отыскать оптимальную конфигурацию становится неоправданным.

**Собачка.** Для ловли этих насекомых я готова гулять где угодно...

К. К. Тем более что блохи могут давать выброс в 20 дБ. Так вот, многого действительно уществ **НЕ** удается.

Прежде всего наша **модель** уж слишком проста. Она **рассматривает** фазоинвертор как систему, имеющую исключительно сосредоточенные параметры, то есть: расстояние от головки до трубы должно **составлять** менее 3-5% длины волны. Современные **"бигбены"** часто этому условию не отвечают

Далее. Фазоинверторная труба, как правило, принимается в модели за идеальный излучатель, который создаст такую же звуковую волну, **как** и некоторая эквивалентная ее мембрана. При этом не учитывается возможная **нелинейность** воздушных потоков в трубе, возникновение краевых эффектов, стоячих волн и т. п. Замечено, что комбинации типа **"диффузор-вперед-труба-назад"**, **"диффузор-вперед-труба-вперед"** звучат **по-разному**.

**Луша.** А также **вбок**, **вверх**, **вниз** и в другие стороны на ваш выбор...

К. К. Вообще говоря, все **"блохи"** разделяются на две большие группы: те, **которые могут быть** учтены в модели, и прочие, для учета которых потребовалось бы кардинальное изменение **модели**. И тех и других предостаточно.

**Меховая собачка** (*горестно вздыхая*). Увы, как всегда...

К. К. Пример учитываемых **педостатков** модели — потери в **фазоинверторе**. Они складываются из паразитной составляющей, вызванной продуквой ящика через незапланированные отверстия и вносящей дополнительное затухание  $D_1$ ; из "управляемых" **потерь**, которые **провоцируются** всевозможными вставками в трубу  $D_p = D_{p1} + D_{p2}$  (сумма собственных и дополнительно внесенных потерь), а также из потерь в демпфирующем материале  $D_a$ , заполняющем корпус. Надо сказать, что все эти потери, как правило, невелики, если только не **допущено** ошибок (например, дыра в корпусе) или конструктор не вносит их специально, скажем, заполняя корпус демпфирующим материалом. Итоговая добротность потерь  $Q_b = (D_1 + D_p + D_a)^{-1}$  оказывается где-то между 2 и 25 (типично 6-8).

Учет  $Q_b$  лишь иногда существенно влияет на параметры **фазоинвертора**, однако забывать об этой возможности не следует (см. рис. 2.7 и особенно 2.8). Еще раз отметим, что наши  **$q_1$  и  $A_1$**  напрямую зависят от  $Q_b$ . Так, например, у передемпфированного КБЗ ( $Q_b = 0.55$ ,  $Q_0 = 2$ ) пик АЧХ едва достигает

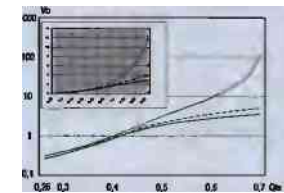


Рис. 2.8. Объемы ящиков **фазоинверторов** чебышевского типа. В случае **высокодемпфированного** ящика ( $Q_1$  - мало) рост добротности головки приводит к потребности в ящике очень большого объема (пунктир)

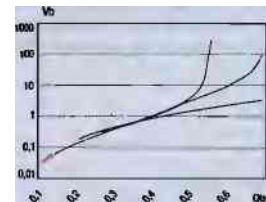


Рис. 2.9- Сравнительный анализ объемов ящиков фазоинверторов, необходимых для реализации различных аппроксимаций при высоком демпфировании ( $Q_1$  - мало). Графики даны в логарифмическом масштабе

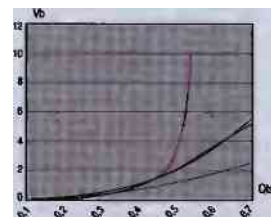


Рис. 2.10. То же, что и рис. 2.9, однако без логарифмического масштаба и для случая средней добротности  $Q_1 = 5-7$ . Черным цветом выделена аппроксимационная кривая, предложенная нами в более ранних статьях для упрощенных расчетов:  $V_b = 15 Q_b^{2.87}$ . Разглядывая ее, читатель оценит, насколько она удачна. Если пытаться аппроксимировать точные зависимости для более широкого круга значений добротности  $Q_b$  аппроксимирующие формулы придется **корректировать**.

1,5 дБ, а у недемпфированного ( $Q_b = 25$ ) — **превышает 16 дБ** (Часто принимают  $D_p = 0$ , тогда  $Q_b$  сводится к  $Q_1$ .)

А другой очень важный **момент**, на который мы неоднократно обращали внимание **читателей**, не нашел отражения в модели. Внимательно посмотрев на эквивалентную схему (рис. 1а), никакой связи между колебательными

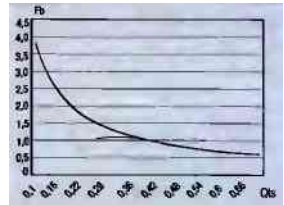


Рис. 2.11. Аналогично рис. 2.10 позволяет сравнить с аппроксимацией  $V_b = 0.42 F_0 Q_b^{-0.92}$  реальные кривые, отражающие требуемую частоту настройки ( $Q_1 = 5-7$ ).

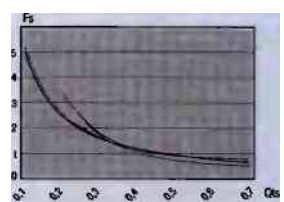


Рис. 2.12. То же, что и на рис. 2.11, но для частот среза. Черная кривая - аппроксимация

контурами **упругость подвеса** — **масса диффузора** и **упругость воздуха** в ящике — **масса воздуха**, присоединенно к трубе мы не **обнаружим**; оба контура подключены к генератору напряжения и потому не связаны. Правильной является схема на рис. 1б, которую также приводил в своих статьях Р. Смолл, хотя рассчитывать **се** не пытался.

## 5.Ещекартинки,и очень любопытные

Для исследователей фазоинверторов представляют интерес частотные зависимости некоторых характерных параметров (АЧХ, ФЧХ, ГВЗ, величина хода диффузора и др.).

Естественно, интересна и связь этих параметров с **отправным** пунктом всех расчетов — добротностью  $Q_{0a}$ , а также с типом реализации (КБЗ, ББ4, Ч4 и др.). Для начала займемся АЧХ. Если добротность невелика, то кривая АЧХ для всех аппроксимаций идет **достаточно** **главно** (рис. 3, левые графики, наши расчеты сделаны для  $Q_{0a} = 0.28$ ). Наибольший спад за частотой среза имеет КБЗ. Слева крутизна спада АЧХ у всех кривых примерно одинакова и составляет меньшую величину, чем мы ожидаем от системы **четвертого** порядка (около 17,5-20,5 дБ/окт).

Для фазоинверторов с использованием головок, имеющих большую **доброт-**

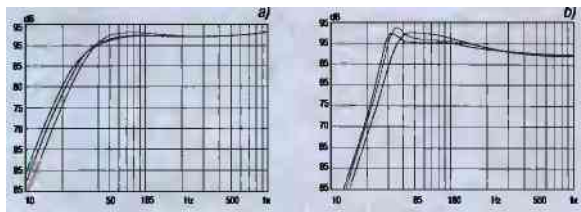


Рис. 3.1. АЧХ АС

При малой добротности головки (а) **кривые**, соответствующие разным аппроксимациям эквивалентного ФВЧ, отличаются в основном крутизной спада. Раньше всех затевает спад бумбокс, но его запала хватает **ненадолго**, и левее частоты среза (кстати, примерно одинаковой для всех кривых) крутизна не превышает **17,5 дБ/окт**. Впрочем, КБЗ и Ч4 тоже не достигают крутизны 24 дБ традиционной для систем четвертого порядка. При больших добротностях (б) бумбокс продолжает **"стоять на крайних позициях"**: теперь он оказывается настроен на слишком высокую частоту, в связи с чем его АЧХ **"сваливается"** первой; не так круто, как у коллег (около **27,5 дБ/окт**), но все же круче, чем все те же 24 дБ/окт. Во всех трех случаях наблюдается заметно неплоская АЧХ в полосе пропускания. Здесь и везде КБЗ - красный цвет, Б4 - синий. Ч4 - зеленый.

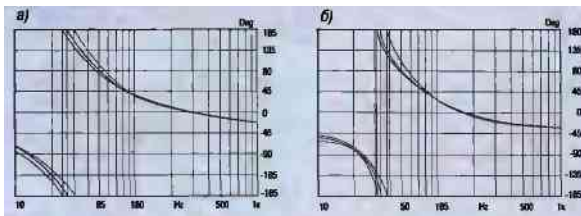


Рис. 3.2. ФЧХ АС

В используемой модели **фазоинвертора** ФЧХ **фазоинверсного** оформления должна начинаться с **нуля**, все время уходить в минус и оканчиваться снова нулем при очень высоких частотах (если не принимать во внимание индуктивность катушки); поэтому обычно ее изображают со скачком на **360°**, имеющим тот же физический смысл, что разворот в строю на аналогичный угол. Если это не удивляет, то и поведение кривых ФЧХ не покажется странным: чем круче АЧХ, тем круче ФЧХ. Отметим также большую крутизну ФЧХ в районе частоты среза для больших добротностей — это несомненно повлечет за собой проблемы с ГВЗ и импульсным откликом б).

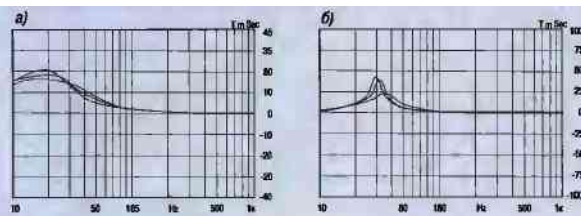


Рис. 3.3. ГВЗ

ГВЗ - производная от ФЧХ по частоте; в подробных комментариях не нуждается. Однако обратим внимание на интересные особенности. У систем с малой добротностью на наивысших частотах, находящихся в полосе пропускания, проблемы с ростом ГВЗ начинаются у КБЗ, что дает основания обвинить в бубнении именно эту аппроксимацию, а не бумбокс. а) При более низких частотах рост ГВЗ системы с аппроксимацией КБЗ прекратится, а бумбокс и Ч4 побубнят вволю, однако этого уже никто не услышит - вредные процессы разыграются заметно ниже частоты среза. Переход к высоким **добротностям** радикально изменяет (я **бы** сказал, усугубляет) ситуацию. Изучив картинку (б) вы легко самостоятельно разберетесь в происходящем.

ность (в наших графиках и расчетах для примера выбрана  $Q_{\omega} = 0,51$ ), картина заметно изменяется: частоты среза для всех реализаций снижаются, спад АЧХ **"крутеет"** до 27–31 дБ/окт. отчетливо наблюдаются выбросы и прочие **неравномерности** АЧХ. Об остальном вы узнаете из подписей к рисункам.

Кривые ведут себя достаточно цивилизованно: чем круче в данной точке на **частотной** оси АЧХ — тем **круче** ФЧХ, и потому **ТСМ** больше групповое время задержки (рис. 3.3). Для низкодобротного случая ( $Q_{\omega} = 0,28$ ) **наибольшим** а **полосе прозрачности** эквивалентного ФВЧ оказывается групповое время КБЗ (рис. 3.3а), что, вероятно, и позволяет сделать вывод о том, что импульсные характеристики этой реализации с точки зрения слушателя являются наилучшими. Левее полосы прозрачности бумбокс свое **возмещет**, на то он и **бумбокс**, но это случится уже при значительных затуханиях АЧХ и может быть не воспринято слушателем.

Для **фазоинверторов** с головками большей добротности (рис. 3.3б) **замечный** рост ГВЗ происходит уже в **полосе прозрачности** эквивалентного **фильтра**. причем абсолютный максимум почти **линейно** растет с ростом  $Q_{\omega}$ . Это в корне меняет дело, и в ряде случаев появляется повод для небезосновательных утверждений о том, что **"чебышев бубнит сильнее"**.

## 6. "Точечные аппроксимации"

Рассмотренные только что методы выбора характеристики эквивалентного ФВЧ **не** являются точечными. Это означает, что как КБЗ, так и другие **аппроксимации** могут существовать для самых различных **добротностей**  $Q_{\omega}$  и  $Q_{\omega}$  — **надо** лишь подобрать соответствующие параметры настройки  $F_0$  и  $V_0$ .

Вместе с тем есть ряд интересных **аппроксимаций**, дающих разработчикам дополнительные возможности при построении **фазоинверторов**, но реализуются они только для конкретных величин добротноей.

Типичный пример — точечная аппроксимация **Баттерворта** четвертого порядка.

Тс. кто знаком с теорией фильтров, знают, что при этом особом случае удовлетворяется целый букет условий:

- спад АЧХ имеет в переходной зоне максимальную скорость среди всех аппроксимаций четвертого порядка при выполнении пункта б);
- на АЧХ все еще нет ни выбросов. ни колебаний.

Полином четвертого порядка **вырождается**, характерные частоты  $F_0$  и

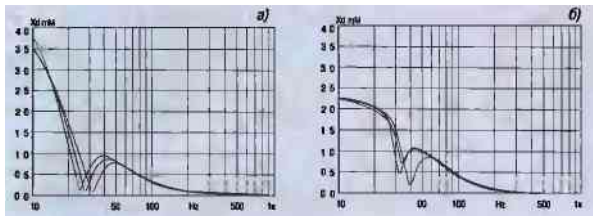


Рис. 3.4. Частотные зависимости амплитуды смещения диффузора

Советую читателю обратить внимание на следующий момент: при малых добротностях частоты настройки, отчетливо регистрируемые по выраженному минимуму амплитуды, различны. Ниже всех настроен **КБЗ** однако при дальнейшем снижении частоты он активнее **раздемпфирован**. При больших добротностях (**40**) не отмечается столь резко выраженного минимума на частоте настройки, что может служить хорошим тестом при анализе готовых АС. Левее частоты настройки амплитуда быстро достигает максимума и, в отличие от случая с малыми добротностями, дальше почти не растет.

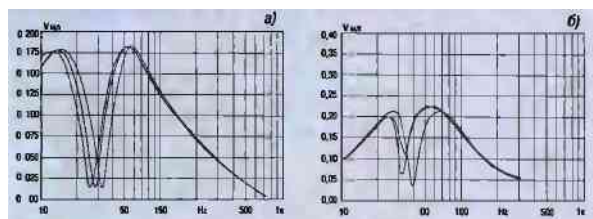


Рис. 3.5. Частотные зависимости скорости диффузора

Пожоие как в случае малых, так и в случае больших добротностей **кривульки**, поведение которых легко объясняется, если принять во внимание предыдущие графики. Ход кривых практически повторяет таковой для закрытого ящика, однако есть и особенности - провал на частоте настройки и большая (особенно при малых добротностях) скорость диффузора на низких частотах в связи с **раздемпфированием** (а).

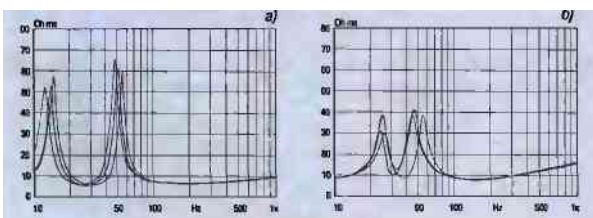


Рис. 3.6. Частотные зависимости модуля полного сопротивления

Пожоии на предыдущие графики: сопротивление зависит исключительно от скорости хода диффузора, однако зависимости значительно острее, чем графики скорости хода, и колебания сопротивления в общем заметнее, чем у закрытых систем.

**F<sub>3</sub>** совпадают. Более того — они совпадают с **F<sub>1</sub>**!

**Собачка**. Мы это **видели**, когда говорили об аппроксимациях. Что ж, повторение, мать, мучение...

К. К. Как мы уже отмечали в "АМ" № 2 и 3 за 1999 год, "баттервортовская" точка находится вблизи  $Q_{\text{кв}} = 0,39$ , однако практическая реализация **истинно**

баттервортовских кривых **загрудни-теля** к связи с **дополнительным** влиянием, оказываемым потерями в ящике, то есть величиной  $Q_0$ .

Так, при малых  $Q_0$  ( $Q_0 = 2...3$ ) получаем необходимую для баттервортовской аппроксимации  $Q_{\text{кв}} = 0,43-0,44$ , что требует применения  $V_b = 1,5V_{\text{кв}}$ ; при больших же  $Q_0$  (12-25) необходимая доб-

ротность  $Q_{\text{кв}}$  снижается до **0,38-0,39**, при этом  $V_b = 0,7-0,8V_{\text{кв}}$ .

Заметим, что, несмотря на **дож** **говер-ность** **изложенного**, попытки добиться чисто баттервортовской аппроксимации носят исключительно спортивный характер и **до сипитый** успех на звуке никак не сказывается.

**Собачка**. Зато на колонках можно смело писать "**Pure Butterworth 4th** **чувствам** глубокого удовлетворения, я хотела сказать **удовлетворения**, **наки-дывать** на **цепиш** изделия 30%!

К. К. Однако еще одна точечная аппроксимация имеет и физический, и потребительский смысл. Речь **идет** о **бесселевском** случае, приводящем к лучшему **из** всех импульсному **отклику**. А к этому уже можно **стремиться**.

**Луша**. Сдается мне, что такую точку надо искать среди **бумбосков...**

Не устаю **удивляться!**

К. К. Это ты, подруга, верно **подме-тила**. Только не **среди**, а **около**.

Слушай внимательно. Оказывается, что для каждой добротности  $Q_{\text{кв}}$  находящейся в достаточно узкой "бесселевской" зоне 0,3-0,37, существует своя оптимальная добротность  $Q_0$ ; для **этих** нар добротностей могут быть подобраны расчетные параметры  $V_b$  и  $F_b$ , позволяющие получить **бесселевскую** характеристику, которая отличается минимальным скачком ГВЗ, да еще и полосе задержания и без **выброса!**

**Бесселевские** системы настраивают на 2-3% ниже  $F_{\text{кв}}$ , частота среза у них практически постоянна и раза к полтора превышает  $F_{\text{кв}}$  ( $a_1 = 3,12394$ ,  $a_2 = 4,39155$ ,  $a_3 = 3,20108$ ). Понятно, что при проектировании подобных фазоинверторов большое число степеней свободы требует известной доли аккуратности, в противном случае заветной благозвучной комбинации не достичь.

Мы не случайно уделяем такое внимание **бесселевским фазоинверторам** тот, кто хоть раз слышал их звучание, никогда не скажет, что фазоинверторы бубнят или в чем-то уступают закрытым ящикам.

Для **аудиолюбителей-рукоделов** приведем вспомогательную табличку, позволяющую вести **бесселевский** расчет.

$Q_0$	$Q_{\text{кв}}$	$F_b/F_{\text{кв}}$	$V_b$	$F_3/F_{\text{кв}}$
2-4	0,35	0,97	0,7	1,5
5-7	0,33	0,97	0,55	1,5
12-15	0,32	0,97	0,48	1,5
25и более	0,31	0,97	0,44	1,5

Поделимся с читателями "АМ" своим **опытом**.

Если у нас есть АС на основе **низко-добротной** головки с **бесселевской** характеристикой в закрытом ящике, то есть  $Q_{\text{кв}} = 0,33$ ,  $Q_{\text{кв}} = 0,57 = 1/\sqrt{3}$ ,  $F_{\text{кв}} =$

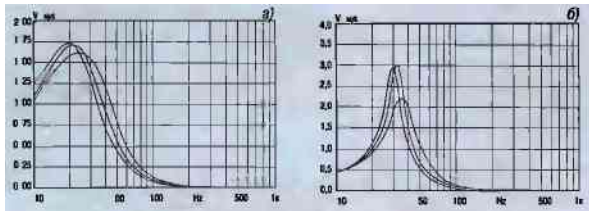


Рис. 3.7. Частотные зависимости скорости газового потока в трубе

Обратите внимание: скорость газового потока вместе с большой доорзостьюапоаки очень быстро возрастает при приближении слева к частоте настройки (б). Для систем с малой добротностью (а) это не характерно.

$=\sqrt{3F_v}$ ,  $V_c = V_{ж}/2$ , делоплате ее трубой, настроенной чуть ниже  $F_v$  — и лучший фазоинвертор у вас в кармане.

## 7. Немного обэнергетическиххарактеристиках фазоинвертора

Я отдаю себе отчет в том, что чтение популярной литературы должно приносить больше радости, чем пользы. С атих позиций отправлять читателя к ранее опубликованному негуманно. Однако и повторяться не стоит. Поэтому примем соломонино решение: сошлемся на мои статьи, в которых энергетика рассмотрена достаточно подробно (см. "АМ" № 4 (33) — 6 (35) 2000), а здесь приведем лишь общие соображения и достаточно показательный пример.

На тех частотах, где ЛЧХ ЛС сохраняет плоский характер, ни одно из акустических оформлений одной и той же головки не дает энергетических преимуществ. На языке акустиков это означает, что чувствительность АС раз и навсегда задается головкой (исключение составляет рупорное оформление).

Если говорят о том, что у фазоинвертора есть энергетические преимущества перед закрытым ящиком при применении одной и той же головки, имеют в виду следующее: его КПД выше на низких частотах, то есть там, где АЧХ закрытого ящика перестает быть плоской; КПД и, следовательно, чувствительность фазоинвертора выше, чем закрытого ящика, для всех частот, если в том и в другом случае использованы различные головки, максимизирующие КПД при равных объемах.

Огромного возрастания КПД фазоинвертора, в отличие от закрытого ящика, можно добиться, смилившись с неравномерностью АЧХ. Этот немаловажный факт иллюстрируется следующим примером, кстати, из любительской практики.

Один мой коллега задумал смастерить высококачественный сабвуфер. Коллега учен и рассуждал так: если в оркестре барабан звучит своей мембраной,

то пытаться воспроизвести его трубой (фазоинверторной) — все равно, что черпать воду душлагом. Это трубу можно воспроизвести трубой...

Не скрою, чем-то мне его рассуждения симпатичны.

Для своего дитища он заказал на ЛОМО 15-дюймовую головку, вооружился 180-литровым ящиком, обеспечившим  $F_3 = 28$  Гц, и... с горечью убедился, что этот монстр даже при немалом (22 мм) ходе диффузора обеспечивает на частоте среза всего 113,5 дБ звукового давления: для возбуждения более значительной громкости и сам диффузор, и величина его смещения должны быть побольше. А 50-литровый сабвуфер-фазоинвертор своей 12-дюймовой головкой на той же частоте создавал 122 дБ при всего лишь восьмимиллиметровом (1) смещении диффузора. Правда, звучала при этом труба, а не диффузор.

Вся хитрость состоит в том, что при использовании фазоинвертора в качестве сабвуфера, то есть при ограничении рабочей полосы одной-двумя октавами, оказывается возможным полностью смириться с неравномерностью АЧХ — какая же равномерность в узкополосном устройстве! В этих условиях объем воздуха, продуваемый трубой, может в десятки раз превышать объемное смещение диффузора на частоте настройки и в несколько раз его максимально допустимое объемное смещение, которое определяется конструкцией и ограничивает отдачу закрытого ящика. Не следует забывать об этой особенности фазоинвертора и всецело доверяться скромному обаянию закрытого ящика...

## 8. ВЫВОДЫ

Написана последняя формула, прочитана последняя строчка. Какие же выводы должен сделать читатель, требующий вознаграждения за прочтение статьи?

Во-первых, фазоинвертор — эффективнейший инструмент в руках разработчика акустических систем. Это аку-

стическое оформление позволяет решить две главные задачи: расширить АЧХ в низкочастотную область и снизить искажения на низких частотах.

Во-вторых, данные преимуществ являются прерогативой исключительно фазоинверторов, в какой-то мере они могут достигаться применением других технических решений (корректирующих фильтров, использованием специальных головок, АС с пассивным излучателем, с трансмиссионной линией и т. п.). Однако надо иметь в виду, что ни фазоинвертор, ни его конкуренты не могут претендовать на звание лучшего по совокупности свойств — у каждого из них есть свои недостатки.

В-третьих, главными недостатками фазоинвертора являются:

- ухудшение импульсного отклика — по сравнению с закрытым ящиком и трансмиссионной линией — приводит к потере натуральности звучания тех инструментов, у которых ярко выражена атака на базах (скажем, барабан); потеря может быть умеренной при удачных расчетах и проектировании и безнадёжной — при неудачном;

- шум и свист трубы;

- раздмифирование при воспроизведении очень низких частот, что может привести к аварии;

- сложность в расчетах, а именно — вероятность возникновения ошибки при использовании неоправданно упрощенной модели.

Все недостатки в совокупности дают основания некоторым авторам (см., например, "АМ" № 1 (36) 2001, с. 183) сделать вывод о неприменимости фазоинвертора в системах высококачественного звуковоспроизведения. Я не сторонник крайних суждений, к тому же практика мирового акустикостроения свидетельствует об обратном — коммерческая победа фазоинвертора над закрытыми системами компрессионного типа очевидна. Однако, вне всякого сомнения, если у разработчика есть иные, свободные от грехов фазоинвертора, способы борьбы с недостатками закрытого ящика, если действуют иные, нежели в массовом коммерческом аудио, критерии, то на пути к достижению высокого качества звука должны приниматься взвешенные и обоснованные, беспристрастные и неконъюнктурные решения.

Дорогой читатель. Эта статья начинается целую серию работ, затрагивающих вопросы углубленного изучения основ электроакустики. Мнение читателя, его отзыв о понятности и полезности материала чрезвычайно важны автору. Поэтому я сосными помощниками жду ваших писем. ◀



# Там, где живут басы

## Акустические системы с пассивным излучателем

К. К. Читатель, которому хорошо знакома **серия статей** "Там, где живут басы", опубликованных в нашем журнале в 1999-2000 годах и посвященных различным типам низкочастотных оформлений ЛС, наверняка заметил, что **акустическим** системам с пассивным излучателем было уделено весьма скромное место.

Причин тому несколько.

Во-первых, ЛС с пассивным излучателем (**ПИ**) составляют не более 7% от общего количества производимых ЛС, поэтому, хотя и существуют популярные модели известных фирм ("B & W", "Thiel", "ALR/Jordan"), очередь до их описания дошла только сейчас.

Во-вторых, бытует мнение о том, что системы с **ПИ** практически ничем не отличаются от систем с фазоинвертором, и оно не лишено оснований. Однако это вовсе не повод, чтобы откладывать написание статьи о **ПИ**.

В-третьих, стройный хор поборников закрытого ящика, которые признают только **акустический** подвес и пытаются причислять все ЛС под одну гребенку, "затачивая" их под Генделя и Баха, в общем, не фальшивит: пассивному излучателю не место там, где нужен филармонический **бас** — достоверный, собранный, сухой и чистый. Но и это не означает, что **ПИ** не надо применять и тем более изучать.

И. А. Возьму **я** себя смелость утверждать, что в **полонине** случаев, где использовать **фазоинвертор** (**ФИ**), стоило применить **ПИ**. Кто-то, конечно, может **залить**, что и этих случаев для систем, отличных от закрытого ящика, **многовато**. Но **это** уже другой вопрос.

Крапкая историческая справка.

**Фазоинвертор** и пассивный излучатель (пассивный радиатор) — почти ровесники. На первый Турасом был получен патент с приоритетом 1930 года (Л. Л. Thuras, U.S. Patent № 1,869,178 от 15.04.1930). То, что главная заслуга в изобретении **пасемного** радиатора принадлежит выдающемуся акустике Гарри Олсону (Н. Е. Olson, U.S. Patent № 1,988,250 от 17.02.1934), **сегодня** уже не подлежит сомнению.

**Собачка Луша** (откуда не возьмись). То есть, **как**я понимаю, в смысле авторства вы с И. А. сегодня отдыхаете?

К- К. Послушать тебя — так мы отдыхали **всю жизнь**.

Как и подобает выдающемуся изобретению, **ПИ** на добрые 20 лет был предан забвению, однако в 1954 году неугомонный Олсон выступает со статьей

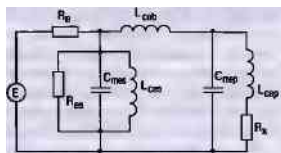


Рис. 1. Электрическая эквивалентная схема ПИ

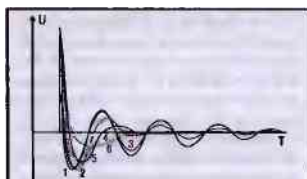


Рис. 2. Импульсный отклик АС на единичный импульс — ступеньку

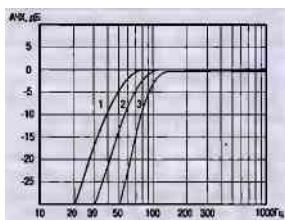


Рис. 3. АЧХ АС с пассивным излучателем для разных величин соотношения **гибкости** подвеса **ПИ** и воздуха в корпусе (параметр  $\delta$ ). Малые **гибкости** подвеса (кривая 3,  $\delta = 1,8$ ) делают систему эквивалентной закрытому ящику, большие (кривая 1,  $\delta = 6$ ) — **фазоинвертору**. Возможны и промежуточные варианты. Чтобы не перегружать картинку, мы на рассматриваем случай очень низких частот, для которого окажутся характерными колебания **АЧХ**.

в JAES ("Recent development in direct radiator hi-fidelity loudspeaker system", October 1954), и, как говорится, зеленая улитка для **ПИ** была бы открыта, но... и следующие 20 лет прошли тихо. В 1973 году вездесущие Номура и Китамура...

**Собачка**. Фома и Ерѐма, только по-японски.

К. К. ...публикуют небольшую статью в журнале Международной ассоциации радиоинженеров (Nomura and Kitamura, IEEE trans. Audio and Electroacoustics, October 1973), после **чего** подводящие итог статьи Р Смолла в JAES, завершившие его бессмертную серию 1974-1975 годов, все расставляют по местам.

Конечно, здесь мы припили данные, соответствующие **современным** представлениям о затронутой проблеме, тем не менее в основу нашей статьи, безусловно, легли результаты, полученные **Смоллом**.

И. А. Для начала мы напомним читателям **ой** основных достоинств и недостатках фазоинвертора и закрытого ящика.

Во второй части публикации мы познакомимся с основами аналитического подхода к изучению систем с **ПИ**, причем часть утверждений из предыдущего раздела **обретет** строгую математическую форму. Однако лишь в той мере, чтобы не отпугнуть доверчивого читателя.

В третьей части мы постараемся удовлетворить интерес **тех**, кто жаждет самостоятельно конструировать АС: как **знать**, быть может, заветный и самый лучший **звук** ждет своего создателя...

К. К. Ну а **отом**, что будет в продолжении, пока умолчим.

### 1. Акустический подвес, фазоинвертор, пассивный излучатель

К. К. Когда при мне перечисляют преимущества фазоинвертора, я вспоминаю старую народную притчу про коша, лису и множество собак.

**Собачка**. Так, так... Про собак, пожалуйста, подробнее.

К. К. Спасались как-то указанные две особы от этого самого множества. Лиса, открывшись хваставшая **тем**, что имеет в своем арсенале сотню уловок против собачьей погони, не сразу, но все же была **поймана**, и, что характерно, не стало ни ее, ни ее обширного арсенала. У **кота**, как известно, есть все-го одна уловка, воспользовавшись которой, бедное животное наблюдало за происходящим с **вершины** дерева.

Мораль: все многочисленные преимущества фазоинвертора — ничто по сравнению с единственным достоинством закрытого ящика: **закрытый** ящик **лучше** играет...

**Собачка Луша**. Ваши, коллега, упреждения в "высоком **шгиле**" нередко приводят к неприятным ассоциациям. Например, **сыграть в закрытый** ящик... Кстате, о том, что мораль этой побасенки имеет отношение к фазоинвертору, я слышу впервые.

К. К. Хорошо. Оспаривать утверждение о преимуществе акустического подвеса можно, но лишь тогда, когда стороны, обсуждающие проблему, до-



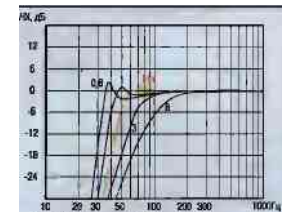


Рис. 4. АЧХ системы с ПИ при изменении параметра  $a$  (значение параметра нанесено на кривые). Надо иметь в виду, что  $a = \delta$ , и эти параметры изменяются одновременно. При малых гибкостях подвесов ситуация иная: при **значительной** гибкости воздуха, то есть при большом объеме ящика кривые получают **закрывающийся** характер (красная и розовая); при больших гибкостях - их характер спокойный, без **выбросов** на АЧХ.

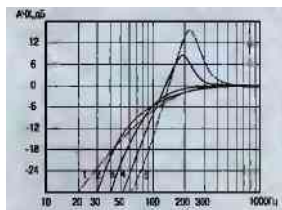


Рис. 5. АЧХ системы с ПИ при ошибочной частоте настройки. Кривые 4 и 5 — настройка на слишком высокие частоты, соответственно на 20 и на 50% выше номинала. Кривые 2 и 1 — то же самое, только при настройке на 20 и на 50% ниже номинала.

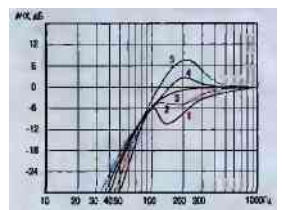


Рис. 6. АЧХ системы с ПИ при ошибке в выборе добротности головки при настройке, соответствующей нормальной добротности. Кривые 1 и 2 - при выборе слишком низкодобротных головок (на 50 и 20%). Кривые 4 и 5 соответствуют противоположной ошибке, то есть выбору чрезмерно **высокодобротных** головок.

говорятся о сути понятия **лучше**. Мы будем придерживаться традиционного понимания и стараться **любое звучание**, имеющее оригинал, воспроизвести как можно ближе к этому **оригиналу**.

И. А. С этих позиций **фазоинвертор** (ФИ) по сравнению с закрытым ящи-

ком имеет два недостатка, с которыми можно так или иначе **бороться**, и два, борьба с **которыми**, насколько нам известно, успехом пока не увенчалась.

**Недостаток № 1:** фазоинвертор в большей степени, чем АС с акустическим подвесом, искажает форму импульсных **сигналов**, основная энергия **которых** находится вблизи **его** характерных частот, например вблизи частоты **настройки**  $f_0$ . Заметим, **речь идет** о **нелинейных искажениях**, с **этим** параметром у ФИ как раз **все** в порядке. Просто **нелинейность** ФЧХ, обусловленная **большим** количеством взаимодействующих масс и **упругостей** и акустической схеме ФИ. приводит к различию в ГВЗ составляющих разных частот. в результате **чего** звуки с **активной** **атакой** **рассыпаются**. Это явление называют **по-разному**, но по сути это враг, с **которым** надо бороться.

**Собачка**. Представьте, что временная задержка в пути вагонов одного и того же поезда будет различной...

К. К. Эта борьба сродни борьбе с искушением: чем круче **сражение**, тем больше хочется. Ведь если задушить фазоинвертор, не дать ему бубнить вволю — вроде и преимуществ у него **не останется**. Но это только на первый взгляд.

И. А. Иными **словами**, с первым недостатком можно и нужно **бороться**. И многие умеют это делать неплохо.

**Недостаток № 2.** Рассчитать **фазоинвертор** сложно. Существует не так уж много заслуживающих доверия справочных материалов, есть трудности в измерениях **параметров** НЧ-голубок ( $Q_0$ ,  $V_{00}$ ,  $F_0$ ) или, скажем, **вуче** добротности потерь в корпусе  $Q_L$ .

**Недостаток № 3.** Все попытки научи **ги** трубу ФИ не свистеть и не шипеть увенчались **относительно** успешно. Самые лучшие **фазоинверторы** АС почти не свистят и почти **не шипят**, но таковых — **считанные** проценты. Этот недостаток **принципиально неустраним**, пока не заткнута труба.

**Луша**. Это типа наших **отношений** с Украиной?

**Недостаток № 4.** Все формулы могут быть правильными, все добротности и **всё** прочее учтено, однако **не только** звук будет **не такой**, какой хотелось получить, но и АЧХ, ФЧХ и другие характеристики будут далеки от ожидаемых.

И. А. Это учитывают крупные производители, потому они держат **не** только штат **разработчиков**, но и **деревянных** дел мастеров, чтобы быстро проверить и **глот** разработки.

Эти неудобства связаны с **целюлю** той и **оттого** порой с **недостов**рностью математических **моделей** ФИ, а ведь, как **известно**, именно математи-

ческие модели **порождают** **сперва** формулы и **просьты**, а впоследствии груду **деревянного** лома...

К. К. Мы уже говорили о том, что эквивалентность двух основных типов излучателей — грубы и мембраны — исключительно **условная**, она справедлива, строго говоря, лишь в **нулевом** приближении. Понятное дело, дальше акустических систем разговоры о такой эквивалентности **не идут**.

**Собачка**. Представьте, если в симфоническом оркестре партию литавр отдалуд тромбонному **и** **ри**о!

К. К. Так почему же мы **считаем** приемлемой **модель**, основанную на возможности трактовать оба излучателя — грубу и мембрану — с **единых** позиций?

И. А. О достоинстве рассматриваемых НЧ-оформлений мы поговорим чуть **позже**. А пока подумаем, какие из недостатков ФИ могут быть **устранены** или ослаблены в системе с **пассивным** излучателем.

К. К. **Первое и, пожалуй**, самое главное. Нет трубы — **нет** **шипения**, свиста и **нет** **нелинейных искажений**, связанных с **процессами**, происходящими в трубе, и до сих пор **так** и не рассмотренных в наших статьях. Это очень серьезный момент: устранение одного из главных **«неустрашимых»** недостатков **фазоинвертора** — **ваг** основная **причина**, по которой интерес разработчиков к заметно более **дорогому**, чем ФИ, пассивному излучателю не ослабевает. Итак, недостаток № 3 может быть **устранен** полностью.

И. А. Кстати, замечу, что порождением продольных стоячих волн в воздушном столбе вредоносность трубы не исчерпывается. В трубах возникают и поперечные, более высокочастотные колебания, последствия которых также неприятны для слуха.

К. К. Четвертый недостаток оказывается более **стойким**. С одной стороны, замена трубы на мембрану заметно увеличивает адекватность расчетной модели — не надо учитывать физические особенности газовых потоков в трубах, всяческие турбулентности с ламинарностями и т. п. С другой появляется **дополнительный** элемент в электрической эквивалентной схеме (рис. 1): гибкость подвеса пассивного излучателя  $C_{00}$  (соответственно, индуктивности  $L_{00}$ ). К несчастью для **математиков**, она **появляется** в самом неподходящем **месте** схемы и ни в одну из имеющихся гибкостей ( $C_{00}$  и  $C_{00}$ , **согласит** с **венно**  $L_{00}$  и  $L_{00}$ ) **пересчет** ее **невозможен**, что приводит к заметному усложнению полинома, описывающего АЧХ. Но об этом **и** **ютом**.

**Второе**. Пока применим на веру, а впоследствии докажем, что **импульс-**

ный отклик у системы с ПИ, как правило, еще хуже, чем у системы с ФИ.

Рассмотрим импульсный отклик АС. Идеального отклика нам не достичь, для этого потребовалось бы воспроизвести все частоты, начиная с нуля. Наилучший из реальных откликов — экспоненциальное спадание сигнала во времени после скачкообразного роста. Наиболее близка к нему кривая 6, соответствующая закрытому ящику (синие кривые) с бесселевской аппроксимацией. При добротности  $Q_0 \approx 1,3$  (кривая 5, чибисовский случай) закрытый ящик ведет себя уже не лучшим образом: так что же заставляет применять такие добротности?

Ситуация с фазоинвертором (красные [финые]) радикально хуже. Уже при малых добротностях головки (рис. 4, пунктир) при аппроксимации квазибатарейторновским фильтром поведение отклика немалогоразднее, чем в случае средней добротности реализации закрытого ящика. Чибисовский фазоинвертор (рис. 3) может заглушить, как туба-гелюкон. Совсем плохо обстоят дела в АС с пассивным излучателем. Здесь все зависит от соотношения гибкостей: при  $a = 6$  (черный пунктир, кривая 2) ситуация еще находится под контролем и колебания как-то заглушаются, в отличие от кривой 1 (сплошная линия,  $a = 1$ ). Здесь и далее, если не оговорено особо, считается, что  $a = 5$ , об этих параметрах — чуть позже.

И. А. Однако мы договорились не считать этот недостаток неустраняемым или принципиальным — всегда найдется такое применение для АС, при котором форма сигнала на базах и правильность ее воспроизведения отойдут на второй план, например в мощном дискотечном комплексе.

Третье. В системе с пассивным излучателем в значительной мере сохраняются те преимущества, которые ФИ имеет перед закрытым ящиком. Главное из них — резкое снижение искажений на базах — теперь не столь очевидно: прибавилась дополнительная нелинейность подвеса ПИ, однако отсутствие магнитной цепи, а также необходимости заботиться о сохранении линейности магнитного поля при больших амплитудах колебания мембраны является достойной компенсацией. Расчет и изготовление собственно пассивного радиатора не должны вызвать особых трудностей и уж во всяком случае это проще, чем создать динамическую НЧ-головку.

Шерстистая собачка. Особенно, если делать радиаторы из уже готовых головок. Помните, у Владимира Владимировича: *Я гайки делаю, а ты — из гаек делаешь болты...*

И. А. (оглядываясь вокруг). У какого это Владимира Владимировича?

К. К. Маленькое дополнение. Принципиальным, а порой очень ценным преимуществом ПИ может стать отсутствие необходимости применять грубую, то есть конструкцию, расположенную внутри ящика и, само собой разумеется, требующую места. В маленьких колодочках (а именно для них в основном и рассчитываются системы четвертого порядка) места для трубы зачастую просто не остается...

И. А. Таков арсенал свойств, с которыми пассивный излучатель входит в число рассмотренных нами акустических оформлений.

## 2. Свойства систем с пассивным излучателем

К. К. Начнем самого простого. При появлении дополнительной гибкости подвеса ПИ  $C_{dp}$  свойства акустических систем в значительной мере будут определяться ее соотношением с уже известными нам гибкостью подвеса диффузора динамической головки  $C_{ds}$  и гибкостью воздуха в ящике  $C_{ab}$ .

Рис. 3 показывает, как изменяется характер АЧХ акустических систем при снижении параметра  $b = C_{dp}/C_{ab}$ . При малых гибкостях подвеса ПИ (то есть при его высоких упругостях) система становится похожей на обычный закрытый ящик: действительно, устремив  $b$  к нулю, то есть сделав подвес НИ в пределе вообще негибким, мы получим систему другого типа.

Наоборот, снижение упругости, то есть рост гибкости подвеса ПИ, приводит нас ко второму асимптоту — системе с ФИ.

И. А. Рис. 4 иллюстрирует хорошо известный случай изменения АЧХ при одновременном снижении гибкостей подвеса динамической головки и пассивного излучателя. Эти данные хорошо согласуются с результатами, представленными на рис. 2: чем эффективнее система воспроизводит низкие частоты, тем хуже ее импульсный отклик.

К. К. Следующие три рисунка совершенно типичны для ФИ. Наблюдается почти полное сходство ФИ и ПИ. Рис. 5 и 6 предупреждают о том, что ПИ, как и ФИ, надо настраивать правильно, иначе слушатель музыкальных программ столкнется с серьезными проблемами. Далее мы приведем графики, соответствующие характеристикам совершенно реальных устройств (см. рис. 10 13).

Рис. 7 заставляет вспомнить о необходимости учитывать потери в корпусе, так как воздействие на АЧХ и на прочие характеристики АС различных источников потерь в корпусе различно.

Заметим, что все имеющиеся результаты могут быть получены с помощью анализа эквивалентной схемы на рис. 1;

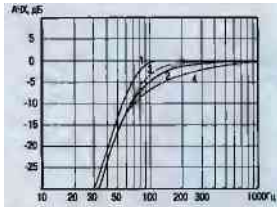


Рис. 7. Изменение поведения АЧХ системы с ПИ при различной величине факторов определяющих добротность потерь в ящике. Красная кривая 1 — случай отсутствия потерь. Остальные кривые соответствуют добротности потерь равной пяти, но факторы вызывающие потери — разные. Случай 3 — потери присутствуют в подвесе ПИ, случай 2 — потери вызваны утечками воздуха из ящика, случай 4 — внутренняя абсорбция энергии в ящике (заполнением и пр.). Данные кривые идентичны тем, что мы видели в системе с ФИ, однако пытливым и наметанным глаз заметит разницу.

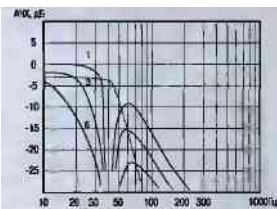


Рис. 8. Кривые, отражающие частотную зависимость хода диффузора системы с ПИ при изменении параметра  $a$ . Очень похоже на фазоинвертор, однако несколько меньше выражено разделение фазирования и характер кривых при малых гибкостях подвесов диффузора и ПИ чуть иной. Пунктирная кривая — амплитуда хода ПИ (один из возможных вариантов).

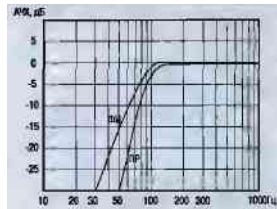


Рис. 9. Сравнение АЧХ ФИ и ПИ. Совершенно конкретный случай: чисто батарейторновский ФИ (добротность головки 0,37; настройка практически на частоту свободного резонанса головки, суммарная добротность потерь — 9) и система с пассивным излучателем, имеющим малую гибкость подвеса ПИ ( $a = 1$ ), настроенная на ту же частоту. Заметим, что частота среза у системы с ПИ получается чуть-чуть выше.

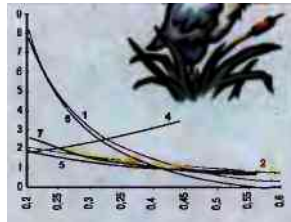


Рис. 10. К расчету систем с ПИ.  
Пояснения в тексте.

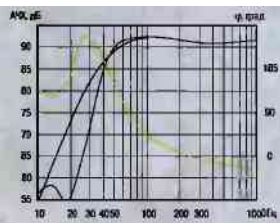


Рис. 11. АЧХ ПИ (красные линии) ФИ (синяя) и ФЧХ ПИ (желтая). Пояснения в тексте.

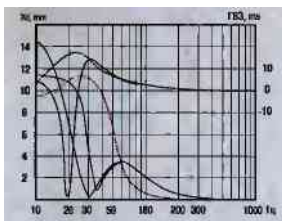


Рис. 12. Смещения диффузоров и ГВЗ ПИ и ФИ при подводимой мощности 20 Вт

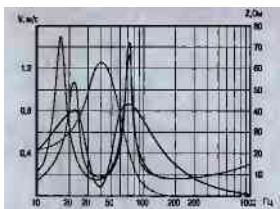


Рис. 13. Полное сопротивление (1 Вт) и скорость хода подвижной системы (20 Вт)

при этом основным инструментом в руках исследователя становится выражение для комплексного коэффициента передачи (ККП) — оно аналогично тому, которое мы вводили в статьях о фазоинверторе. Отличный от фазоинверторного коэффициента передачи не несколько, но два из них принципиальны.

Во-первых, появление новых деталей в эквивалентной схеме приводит к наличию в числителе ККП члена второго порядка (он отмечен красным). Именно его существование позволяет числительно на некоторых самых низких частотах обращаться в ноль. Во-вторых, все участвующие в выражении коэффициенты  $a$  и  $b$  получают определенную зависимость от параметров, связанных теплер и с характеристиками ПИ:

$$\text{ККП} = \frac{(a_1 F^4 + a_2 F^2) / (1 + b_1 F + b_2 F^2 + b_3 F^3 + b_4 F^4)}$$

Что же изменяется и в какой степени? Внимательное изучение характеристик смещения диффузоров динамической головки при изменении гибкости подвеса последней (рис. 8) выявляет сходные с ФИ тенденции: на смену достаточно спокойным квазибатарейным кривым при больших гибкостях подвеса головки приходят чебышевские, но столь резкого раздмифирования, какое было характерно для ФИ, при низких частотах не наблюдается. Это связано прежде всего с появлением дополнительной упругости — упругости подвеса ПИ.

Рис. 9 дает возможность сравнить АЧХ ФИ и ПИ. Отметим, что данные о том, что ПИ является системой шестого, а не четвертого порядка, приведенные в некоторых изданиях, неверны. Простая система с ПИ способна реализовывать не только известные для ФИ аппроксимации, но и каузовские кривые.

Как правило, АЧХ системы с ПИ заваливается на самых низких частотах заметно круче, чем у ФИ, однако такой характер поведения АЧХ наблюдается лишь в зоне, близкой к частоте среза.

В некоторых случаях, особенно при применении в качестве ПИ той же динамической головки только без катушки и магнитной системы, АЧХ вообще может иметь ноль, что не мешает левее частоты нуля АЧХ присутствию небольшого выброса.

### 3. Расчет систем с пассивным излучателем

Расчет систем с ПИ осуществить заметно проще, чем расчет фазоинверторов. С одной стороны, это объясняется тем, что добротность потерь в ящике редко отклоняется от средних величин (5–7), с другой — как показывает практика, гибкости подвесов головки и ПИ, как правило, совпадают, что радикально упрощает дело и снижает число возможных вариантов.

Читатель может воспользоваться рисунком 10, чтобы зависимость параметров ПИ (сплошные кривые) от квазибатарейного

ФИ со средней добротностью потерь в ящике (пунктиры).

Графики аналогичны тем, что приводились в прошлом номере "АМ" для систем с фазоинвертором. Кривые 1, 2, 3, 4...

**Собачка.** Каждый охотник желает знать...

К. К. ...иллюстрируют соответственно: требуемую частоту настройки, нормированную к частоте собственного резонанса головки; параметр альфа, показывающий, во сколько раз примененный ящик может быть меньше, чем эквивалентный объем головки; частоту среза, опять-таки нормированную к резонансной; получаемое соотношение объемных смещений диффузоров головки и пассивного радиатора. Кривые 5, 6 и 7...

**Собачка.** ...где сидит фазан?

И. А. Какой к черту фазан? К К., ульните распоясавшееся животное!

К. К. (обращая внимание на график). Да вроде и впрямь сидит... Ну и клюв отстрелил...

Луша. ...иллюстрируют фазоинвертор, а именно требуемую частоту настройки, параметр  $\alpha$  и получаемую в результате частоту среза.

К. К. Заметим, различия невелики. Более того, в пределах плоских АЧХ производительности трубы и объемное смещение ПИ также оказываются близки. Следующий график (рис. 11) демонстрирует АЧХ и ФЧХ ПИ. Мне надоело рисовать ФЧХ с ничем не значащим скачком на 360°, поэтому в нашем случае кривая взлетела на ординатой 180°. Для сравнения синим цветом показана АЧХ ФИ. Данные, представленные на рис. 11–12, относятся к совершенно реальному устройству, собранному на базе 12-доймовой НЧ-головки.

Следующий рисунок (рис. 12) отражает зависимости амплитуд колебаний диффузоров головки (красная линия) и ПИ (красный пунктир) от добротности головки в сравнении с тем же параметром ФИ (голубые линии). Здесь же даны кривые ГВЗ. Естественно, там, где производная фазы ПИ равна нулю, наблюдается провал ГВЗ.

Рис. 13 иллюстрирует изменение скоростей хода диффузоров ПИ (зеленая сплошная линия - головки; пунктир - собственно диффузора ПИ). Здесь же показаны кривые модуля полного сопротивления головки ПИ (красная линия) и ФИ (голубая линия). Думаю, пояснений не требуется.

И. А. На этом разрешите остановиться.

К. К. И оставить уважаемого читателя в глубоком раздумье.

**Собачка.** В ожидании продолжения статьи. ◀

# Басы.

## Обратная связь

Как быстро минули три года с тех пор, как мы, вооружившись плащами и зонтиками, загрузив в старую резиновую байдарочку изрядное количество "Довгана" (как почему-то заметил один из наших читателей), а также мешок писем, создавали с лохматой подругой "Имитацию отпуска" (см. "АМ" № 4 (9) 96, с. 67).

Давно поконтится на десятиметровой глубине наше славное плавсредство, поименованная шестидесятипроцентная вода почему-то напрочь исчезла из продажи несмотря на нашу скрытую рекламу...

**Луша.** А письма все идут и идут, и отпуска как не было, так и нет...

Как когда-то и обещали, мы отвечаем на письма по нашему циклу статей "Там, где живут басы"; начнем с послания Игоря Хайруллина из Москвы.

*Обладая некоторой технической подготовкой и непочатым радиотехническим образованием, с удовольствием читаю статьи в вашем журнале, [касаясь] технических вопросов, как, впрочем, и другие. Например, нравятся статьи, посвященные описанию и объяснению принципов работы разных аппаратов. В последних номерах радует появление серии статей, [где описываются] принципы работы акустических систем разного типа. И все было бы хорошо, но удивляет недосказанность, непонимание основных моментов, остающееся после прочтения. Например, в статье написано, кем и когда был запатентован тот или иной принцип построения акустического оформления, далее следуют пространные объяснения достоинств и недостатков этого принципа. Но сам принцип, его физическая суть так и остается скрытой от читателя. Насколько мне известно, практически все макрофизические явления можно объяснить, как говорится, "на пальцах", что было бы небесполезно сделать и в данном случае. Далее я постараюсь пояснить своего жителя.*

В статье "Там, где живут басы (2)" написано буквально следующее: "Представим, что диффузор «летит»

*внутрь корпуса. Но и труба фазоинвертора в это время всасывает воздух..." По прочтении этого места, у любого нормального человека, имеющего основы технических знаний, должно что-то замкнуть в голове... Если дуть в трубу, то трудно ожидать, что с другого ее конца воздух также будет всасываться — скорее наоборот. Я полагаю, что в момент появления сигнала так и будет: при движении диффузора внутрь корпуса воздух из фазоинвертора будет выходить (кстати, если это так, то вот еще один недостаток фазоинвертора). Но для процесса колебаний диффузора, видимо, это утверждение становится не совсем верным. Не так уж [сложно], полагаю, было бы пояснить, вследствие каких явлений противофазные колебания диффузора и воздуха в фазоинверторе переходят в синфазные (или близкие к ним). Связано ли это с размерами корпуса, расстоянием между диффузором и фазоинвертором? Если связано, то каким образом и почему?*

**Луша.** Удивляюсь, как один человек может задать столько вопросов? А с "недоговорием" он вас с И. А. действительно здорово подцепил. Кстати, Костик, хочешь анекдот свеженький? Подруга в бане рассказала...

Едет иа лодке глухонемой дворник с собачкой. Собачка и так на него посмотрит и эдак — а он все глаза отводит.

— **Слышь,** — говорит собачка, — Герасим... Чего-то ты сегодня не договариваешься...

**К. К.** Ну и?..

**Луша.** А вот, я думаю, и волнуются читатели, что мол, раз недоговорили, другой недоговорили...

**К. К. ???**

**Луша.** А потом кирпич на шею и концы в воду...

**К. К.** Ну слава Богу. А я уж думал, мы в технике где-то ошиблись.

Теперь по существу. С физической сутью — прав читатель Хайруллин. Исправимся. А чтобы в голове не замыкало, объясним ситуацию.

Прежде всего — для анализа принципов работы АС мы выбрали самый



простой способ — синусоидальное воздействие. Понятно, что, если диффузор совершает очень медленные синусоидальные колебания, будет так, как пишет Игорь: диффузор движется внутрь, а воздух из фазоинверсионного отверстия — наружу. Диффузор при этом не чувствует "противодействия воздуха", то есть оказывается раздетым. Теперь пусть частота повышется. Понятно, что между двумя колебательными процессами (диффузора и воздуха в трубе) появляется и все увеличивается фазовый сдвиг: колебания воздуха в трубе отстают все больше. Отставание это тем значительнее, чем выше инерционность воздуха в трубе и чем меньше упругость воздуха в ящике. Понятно, что рано или поздно возникнет частота, при которой "всасывание" воздуха трубой будет соответствовать во времени движению диффузора уже не наружу, а внутрь. Понять, что решающее значение в этом процессе имеет упругость воздуха, несложно. Устремите упругость к бесконечности...

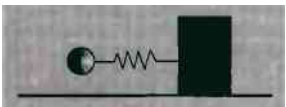
**Луша.** То есть, залейте все водой?

**К. К.** ...и уже практически на любой частоте инверсия фазы будет невозможна. Диффузор будет загонять воду внутрь, а дырка сифизно выливать ее наружу.

Суть функционирования фазоинвертора заключается в том, что частота инверсион фазы **не** просто присутствует, но выбирается равной одной из характерных частот двух связанных колебательных систем, первая — диффузор, а вторая — масса воздуха, присоединенная к трубе и "висящая" на пружине — упругости воздуха в ящике. В этом случае процессы носят выраженный резонансный характер, мы наблюдаем максимум в излучении трубы и одновременно максимум демпфирования диффузора, что позволяет ему не просто гонять воздух, а отда-

вать максимальную колебательную энергию.

В широком диапазоне ни изменение формы ящика, ни расстояние между головкой и отверстием роли не играют. На характерных частотах в ящике идет упругий газодинамический, а не волновой (как, например, в трансмиссионной липни) процесс. Все составляющие процесса могут рассматриваться как элементы с сосредоточенными параметрами. Наиболее простая аналогия — колебания грузика на пружине:



Ясно, что ход процессов будет определяться именно упругостью пружины, а не ее длиной. Кстати, взяв пружину помягче и имея руки похлострее, вы многое сможете понять в работе фазоинвертора, поставив несложные опыты с колебаниями.

Луша. А вот многие наши читатели считают, что "руки похлострее" — это обязательно что-либо из серии "сделай сам". С подобными просьбами к нам обращаются Марат Валеев из Казани. Сергей Распопов из Самары. А. Ситников из Новгорода, Валентин Скворцов из Киришей Ленинградской области и многие, многие другие.

К. К. Чувствую, подруга, здесь без фанеры, пилы и клея не обойдется. Порывшись в лабораторном хламе, мы с М. А. Сергеевым наши неплохую отечественную головку типа 200ГДН-1.

В паспорте головки была указана резонансная частота (35 Гц), а вот про величину добротности  $Q_{ts}$  в отечественных паспортах любят писать что-нибудь вроде  $0,5 \pm 0,2$  (???) — с такой точностью не то что фазоинвертор, закрытый ящик не спроектировать.

В связи с вышеизложенным мы с М. А. измерили все что нужно и получили:  $f_s = 38$  Гц;  $Q_{ts} = 0,33$ ;  $V_{as} = 112$  дм<sup>3</sup>.

Луша. А неплохую головку выпустила паша промышленность!

К. К. Особенно если учесть, что купили мы ее за \$12<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Известно, что последние статьи про АС я пишу вместе с И. Л. Алдошиной, без которой этот труд был бы для меня тяжелее. Достав из пыли голенищу, я спросил у И. А., с тыла: а ли она про такие и видела ли когда-нибудь. Ответ был более чем скромным.

ВНИИРПА стащила и вам предала" меня чуть-чуть похвалила. Полятно, конечно, что вопрос мой был не продуман: И. Л. и те времена как раз была главным разработчиком этих 200ГДН.

Луша. Меня, положим, купили за \$5, хотя рядом продавались собачки и по одному... Но вчера...

К. К. Воспользуемся формулами из наших с И. А. статей:

$$V_B = Q_{ts}^{2,87} \times 15 V_{as} = 0,043 \times 15 \times 112 = 72 \text{ дм}^3;$$

$$f_B = Q_{ts}^{-0,92} \times 0,42 f_s = 2,76 \times 0,42 \times 38 = 43,5 \text{ Гц};$$

$$f_{3\text{мх}} = Q_{ts}^{-1,4} \times 0,26 f_s = 4,85 \times 0,26 \times 38 = 47 \text{ Гц}.$$

Для определения параметров трубы удобнее воспользоваться номограммой со с. 151 в "АМ" № 3 (26) 99. откуда имеем:  $L = 20$  см.  $d = 15$  см.

Габаритные размеры корпуса — произвольные, главное, чтобы и головка и труба успешно разместились и объем ящика соответствовал  $V_B$ .

Наш ящик был сделан из 18-миллиметровой многослойной фанеры (передняя панель — два слоя фанеры, проклеенных и стянутых шурупами, то есть 36 мм). Кстати, подойдет и ДВП (MDF). Стенки собраны в шип, то есть после выполнения ряда восемнадцатимиллиметровых запилов. Возможны и другие варианты. Переднезадние, верхненижние и боковые панели дополнительно укреплены стяжками и распорками, стяжка — стальной прут диаметром 8 мм, распорка — брусочек, сделанный из березы. Внутренние стенки оклеены мягкими ватно-марлевыми ковриками толщиной 6 см (всего около 2 кг технической ваты). Если использовать тридцатимиллиметровую ДВП, никакого дополнительного укрепления, может, и не потребуется.

Все измерения проводились в салоне "Автоаудиомастер" на Обводном канале, где мы с подвернувшимся как нельзя более кстати М. А. обнаружили также красавицу-головку неотечественного производства "JL Audio 15W6". тоже диаметром 15 дюймов, и, конечно, тут же ее обмерили;  $f_s = 17$  Гц;  $Q_{ts} = 0,78$ ;  $V_{as} = 258$  дм<sup>3</sup>.

Теперь  $V_B = 0,78^{2,87} \times 15 \times 258 = 1935$  дм<sup>3</sup> (у собачки шерсть встала дыбом...);

$$f_B = 0,78^{-0,92} \times 0,42 \times 17 = 9 \text{ Гц};$$
$$f_{3\text{мх}} = 0,78^{-1,43} \times 0,26 \times 17 = 6,5 \text{ Гц}.$$

Какой же из всего этого можно сделать вывод?

Луша. Первое. Расчетные объемы ящиков  $V_B$  соотносятся примерно как цены динамиков.

Второе. Частота настройки во втором случае рассчитана в основном на психотронный эффект.

Третье. Головку надо ставить в автомобиль, при этом авто используется как двухкубовая колонка, а музыке слушают вокруг.

К. К. И наконец, четвертое и самое главное. Первая головка как нельзя лучше подходит для мощного и компактного сабвуфера. Импортная красавица, **наверное**, лучше подойдет для другого оформления, скорее всего — типа **free air**. Замечу, кстати, что частота среза отечественного сабвуфера вышла не **низкой**, что говорит о реализации характеристики квазнтретьего порядка. Это обеспечит **упругий**, **нзатянутый бас** и огромную (что усугубляется высокой чувствительностью головки) отдачу. Замечательная компактность сабвуфера позволит использовать его в небольших (до 50 м³) помещениях, приставляя к нему сверху минн-моиторы вроде "Acoustic Energy I Ser. II" или "Castle Isis". Продолжим чтение писем об АС.

**В своем стремлении все предельно упростить не перегибаете ли вы пешку? Неужели весь звук определяется горсткой параметров  $Q_{ts}, V_{as}, f_s$ ? Неужели ничего не зависит от конфигурации АС, от хода диффузора, его площади, толщины стенок и т. п.? Лет 20 назад, будучи еще совсем молодым, я пытался сделать АС с басами на паре 8ГД-1. На настройку фазоинвертора на слух ушел почти год... Собираетесь ли вы продолжать теоретизировать или все же попытаетесь рассчитать какой-нибудь ящик?** Это пишет нам читатель В. Скворцов из города Кириши.

**Луша. Ага...** Значит с предыдущей коробочкой с 200ГДН-1 мы в точку попали! Вот вам г-н Скворцов... Восемь **гэдэ-один**, восемь **гэдэ-один**!..

К. К. (продолжает цитировать письмо). Категорически не согласен с тем, что АЧХ и ФЧХ в АС связаны однозначно, хотя в глубине души понимаю, что в этом что-то есть. Иначе почему же колонки с очень похожими АЧХ звучат по **низам** совсем различно?

**Луша. Да.** этот Кулибин **не** уймется! К. К., когда отвечать-то будешь?

К. К. Да я уж и не **знаю**, с чего начинать...

Конечно, читатель всегда прав. "Горстка параметров"  $\{Q_{ts}, V_{as}, f_s\}$  позволяет оценить необходимые параметры АС  $[V_B, f_B, f_{3АЧХ}]$  с точки зрения неплохой, но весьма ограниченной модели. Действительно, площадь и ход диффузора, диаметр и площадь сечения трубы **при** этом могут быть различными, но ведь мы нигде и не писали, что комбинация  $\{Q_{ts}, V_{as}, f_s\}$  однозначно определит **звучание**!

Комбинация  $\{Q_{ts}, V_{as}, f_s\} + [V_B, f_B, f_{3АЧХ}]$  уже многое скажет о АЧХ, ФЧХ и импульсном отклике, особенно если  $[V_B, f_B, f_{3АЧХ}]$  не связано с  $\{Q_{ts}, V_{as}, f_s\}$

приведенными нами формулами. Но **звучание** — это для **ушей**, а не для формул.

Теперь еще раз об АЧХ и ФЧХ. Согласен, что многие устройства из области **аудиотехники минимальнофазовыми** не являются. Таковы, **например**, существенно нелинейные системы: проигрыватели CD, магнитофоны; даже линейную цепь с перекрестными связями можно считать **неминимальнофазовой**.

Но здесь дело не в этом. Как мне кажется, фазоинвертор с небольшой нагрузкой можно считать **минимальнофазовой** цепью, АЧХ которой связана с ФЧХ простейшим образом — через преобразование Гильберта. Но: и АЧХ и ФЧХ должны быть измерены во всем частотном диапазоне — от нуля герц, — тогда не будет **проблем**, обычно же **их** так не измеряют, в результате чего и получаются "очень похожие АЧХ".

По долгу службы мне приходится **разбирать и ремонтировать** очень много АС. Начинку их я знаю почти наизусть. Нередко при вскрытии оказывается, что **многие**, в том числе и **облизанно-разрекламированные** вами системы внутри представляют плачевное зрелище: тонкие плохо укрепленные **провода**, катушки чуть ли не со стальным сердечником, отсутствие хорошего **"ватника"** и т. д. С чем это связано и не дурят ли нашего брата?

**Луша. Дурят. Конечно дурят!** Кстати, хочешь еще анекдот?

Патологоанатом после очередного удачного вскрытия в недоумении чешет репу, приговаривая: "Странно... А человеком ведь был хорошим..."

К. К. Ну, подруга, у тебя сегодня и юмор. Хотя в оценке "дурят" ты не ошиблась. Видели мы немало хваленых колонок, разбирать которые никому не рекомендуем. Все безобразие внутри АС — в угоду дешевизне и технологичности. С большой вероятностью можно ожидать, что если применить толстенные **провода**, катушки с воздушным сердечником, конденсаторы с хорошим диэлектриком (и уж тем более не электролиты...), обеспечить отличное демпфирование, то звук будет лучше.

Или хуже. **М. А. сказал бы**, как фишка ляжет... И, в общем, оказался бы прав. Одно дело — наука, техника и технология, там **лучше не делать грубых ошибок**, другое — звук, где **уши** играют весьма немаловажную роль.

**Луша. Но я бы все равно предпочла** делать все по уму.

**К. К. А пока — до следующих писем.** ◀