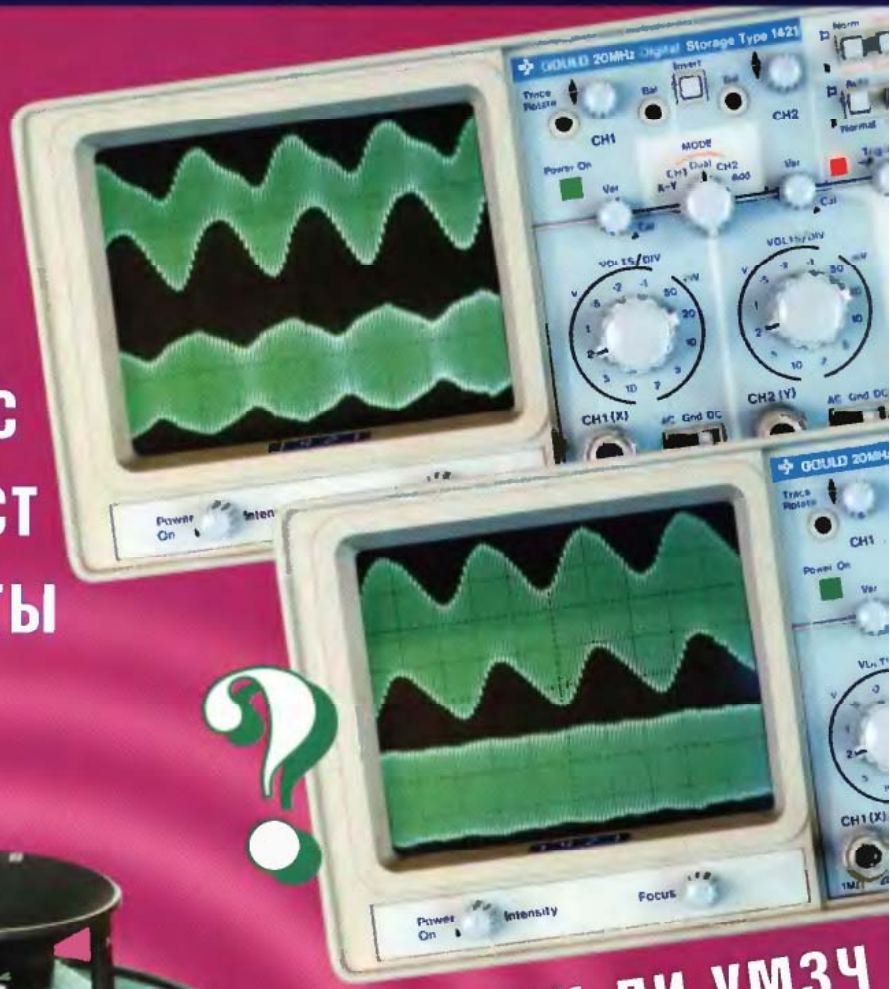


РАДИО

АУДИО·ВИДЕО·СВЯЗЬ·ЭЛЕКТРОНИКА·КОМПЬЮТЕРЫ

СВЯЗЬ
СРЕДСТВА И СПОСОБЫ
ЖУРНАЛ
В ЖУРНАЛЕ

- КЛАВИАТУРА IBM PC
- ЦИФРОВОЙ ТЕЛТЕСТ
- УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ



ДОЛЖЕН ЛИ УМЗЧ
ИМЕТЬ МАЛОЕ
ВЫХОДНОЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ



АКСИЯ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬ
С КРУГОВОЙ ДИАГРАММОЙ



ИЗДАЕТСЯ С 1924 ГОДА

4
1997

торой закреплен кубик. Кубик зажимают в тисках и начинают обработку конуса. Вначале ее ведут полукруглым напильником (до получения требуемой кривизны образующей), а затем шлифуют поверхность конуса наждачной бумагой. После такой обработки поверхность конуса шпательюют и еще раз обрабатывают мелким напильником и шлифуют мелкой наждачной бумагой. В заключение конус два-три раза красят нитрозмалью.

При самостоятельном изготовлении АС предлагается использовать более простой, чем показанный на фото, способ крепления конусов. Большой конус устанавливают над низко-среднечастотной головкой с помощью специально изготовленных для этой цели четырех шпилек из латуни или дюралюминия (рис. 6) и четырех металлических ушек (рис. 7). Последние следует прикрепить к основанию большого конуса шурупами по взаимоперпендикулярным радиусам. Шпильки, в соответствии с положением ушек, закрепляют одной стороной в сквозных отверстиях, просверленных в верхней стенке корпуса, причем две из них используют в качестве токопроводящих шин для подведения сигнала от фильтра к высокочастотной головке. Подводить сигнал к этим шпилькам следует с помощью латунных лепестков, подложенных под гайки. К этим лепесткам и припаивают провода.

Аналогично большому изготавливают и малый конус для высокочастотной головки. Закрепляют его над центром купола высокочастотной головки на высоте 2—3 мм от его вершины. Для закрепления малого конуса надо изготовить стальной кронштейн шириной 12 мм (рис. 8). Одной стороной этот кронштейн привинчивают шурупами к основанию большого конуса, а к другой его стороне прикрепляют малый конус. Как видно на фото, звукорассеивающие конусы вместе с головками громкоговорителей прикрыты пылезащитной объемной рамкой, изготовленной из реек и обтянутой радиотканью.

Данная АС прошла комплексные испытания в заглушенной звукомерной камере и тестовые испытания по качеству звучания в Акустическом центре Московского технического университета связи и информатики и получила высокую оценку.

Приведем ее основные технические характеристики.

Диапазон эффективного воспроизводимых частот — 50...20000 Гц; электрическое сопротивление — 4 Ом; долговременная мощность — 30, кратковременная — 60 Вт; частота настройки фазоинвертора — 85 Гц; диаграмма направленности звукоизлучения АС в горизонтальной плоскости — круговая во всем рабочем диапазоне частот (рис. 9).

Для наглядности диаграммы направленности в полосах октавных частот нанесены по уровням. Частотная характеристика описанной АС, а также зависимость ее полного сопротивления от частоты показаны на рис. 10.

АС демонстрировалась и на выставке Российского "Хай-Энда", организованной издательством "Машиностроение", и получила высокую оценку специалистов по критерию "цена—качество". В настоящее время она серийно выпускается на московском заводе "Янтарь" (тел. 368-01-91) и продается в магазинах Москвы и Московской области под названием 30АС-103П. К сожалению, высокие тарифы на транспорт пока не позволяют вывозить АС в другие регионы.

ДОЛЖЕН ЛИ УМЗЧ ИМЕТЬ МАЛОЕ ВЫХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ?

(О СНИЖЕНИИ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ И ПРИЗВУКОВ В ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯХ)

С. АГЕЕВ, г. Москва

Разницу в звучании громкоговорителей при работе с различными УМЗЧ, в первую очередь, замечают, сравнивая ламповые и транзисторные усилители: спектр их гармонических искажений часто существенно отличается. Иногда заметные отличия бывают и среди усилителей одной и той же группы. Например, в одном из аудиожурналов оценки, данные ламповым УМЗЧ мощностью 12 и 50 Вт, склонялись в пользу менее мощного. Или оценка была необъективной?

Как нам кажется, автор статьи доказательно объясняет одну из "мистических" причин возникновения в громкоговорителях переходных и интермодуляционных искажений, создающих заметную разницу в звучании при работе с различными УМЗЧ. Он предлагает также доступные методы существенного снижения искажений громкоговорителей, которые достаточно просто реализуются с применением современной элементной базы.

В настоящее время считается общепризнанным, что одним из требований к усилителю мощности является обеспечение неизменности его выходного напряжения при изменении сопротивления нагрузки. Иными словами, выходное сопротивление УМЗЧ должно быть невелико по сравнению с нагрузочным, составляя не более 1/10...1/1000 от модуля сопротивления (импеданса) нагрузки $|Z_n|$. Эта точка зрения отражена в многочисленных стандартах и рекомендациях, а также в литературе. Специально введен даже такой параметр, как коэффициент демпфирования — K_d (или демпинг-фактор), равный отношению номинального сопротивления нагрузки к выходному сопротивлению усилителя $R_{вых\ УМ}$. Так, при номинальном сопротивлении нагрузки, равном 4 Ом, и выходном сопротивлении усилителя 0,05 Ом K_d будет равен 80. Действующие ныне стандарты на аппаратуру HiFi требуют, чтобы значение коэффициента демпфирования у высококачественных усилителей было бы не менее 20 (а рекомендуется — не менее 100). Для большинства транзисторных усилителей, имеющих в продаже, K_d превышает 200.

Доводы в пользу малого $R_{вых\ УМ}$ (и соответственно высокого K_d) общеизвестны: это обеспечение взаимозаменяемости усилителей и акустических систем, получение эффективного и предсказуемого демпфирования основного (низкочастотного) резонанса громкоговорителя, а также удобство измерения и сопоставления характеристик усилителей. Однако, несмотря на правомерность и обоснованность вышеприведенных соображений, вывод о необходимости такого соотношения, по мнению автора, принципиально ошибочен!

Все дело в том, что этот вывод делается без учета физики работы электродинамических головок громкоговорителей (ГГ). Подавляющее большинство разработчиков усилителей искренне полагают, что все, что от них требуется — это выдать напряжение требуемой величины на заданном сопротивлении нагрузки с возможно меньшими искажениями. Разработчики громкоговорителей, в свою очередь, вроде бы должны исходить из того, что их изделия будут питаться от усилителей с пренебрежимо малым выходным сопротивлением. Казалось бы, все просто и ясно — какие тут могут быть вопросы?

Тем не менее вопросы, и очень серьезные, имеются. Главным из них является вопрос о величине интермодуляционных искажений, вносимых ГГ при работе ее от усилителя с пренебрежимо малым внутренним сопротивлением (источника напряжения или источника ЭДС). Второй вопрос касается величины и длительности призвуков, неизбежно возникающих в диффузоре ГГ при воспроизведении импульсных сигналов.

"Какое отношение к этому может иметь выходное сопротивление усилителя? Не морочьте мне голову!" — скажет читатель. — И ошибется. Имеет, и самое прямое, несмотря на то, что факт этой зависимости упоминается крайне редко. Во всяком случае, не обнаружено современных работ, в которых бы рассматривалось это влияние на все параметры сквозного электроакустического тракта — от напряжения на входе усилителя до звуковых колебаний. При рассмотрении этой темы ранее почему-то ограничивались анализом поведения ГГ вблизи основного резонанса на нижних частотах, тогда как не менее интересное происходит на замет-

но более высоких частотах — на пару октав выше резонансной частоты.

Для восполнения этого пробела и предназначена эта статья. Надо сказать, что для повышения доступности изложение весьма упрощено и схематизировано, поэтому ряд "тонких" вопросов остался нерассмотренным. Итак, чтобы понять, как выходное сопротивление УМЗЧ влияет на интермодуляционные искажения в громкоговорителях, нужно вспомнить, какова физика излучения звука диффузором ГГ.

Ниже частоты основного резонанса при подаче синусоидального напряжения сигнала на обмотку звуковой катушки ГГ амплитуда смещения ее диффузора определяется упругим противодействием подвеса (или сжимаемого в закрытом ящике воздуха) и почти не зависит от частоты сигнала. Работа ГГ в этом режиме характеризуется большими искажениями и очень низкой отдачей полезного акустического сигнала (очень низким КПД).

На частоте основного резонанса масса диффузора вместе с соколеблющейся массой воздуха и упругостью подвеса образуют колебательную систему, аналогичную грузу на пружинке. КПД излучения в этой области частот близок к максимальному для данной ГГ.

Выше частоты основного резонанса силы инерции диффузора вместе с соколеблющейся массой воздуха оказываются большими, чем силы упругости подвеса, поэтому смещение диффузора оказывается обратно пропорциональным квадрату частоты. Однако ускорение диффузора при этом теоретически не зависит от частоты, что и обеспечивает равномерность АЧХ по звуковому давлению. Следовательно, для обеспечения равномерности АЧХ ГГ на частотах выше частоты основного резонанса к диффузору со стороны звуковой катушки необходимо прикладывать силу постоянной амплитуды, как это следует из второго закона Ньютона ($F = ma$).

Сила же, действующая на диффузор со стороны звуковой катушки, пропорциональна току в ней. При подключении ГГ к источнику напряжения U ток I в звуковой катушке на каждой частоте определяется из закона Ома: $I(f) = U/Z_L(f)$, где $Z_L(f)$ — зависящее от частоты комплексное сопротивление звуковой катушки. Оно определяется преимущественно тремя величинами: активным сопротивлением звуковой катушки R_L (измеряемым омметром), индуктивностью L_L . На ток влияет также и противо-ЭДС, возникающая при перемещении звуковой катушки в магнитном поле и пропорциональная скорости перемещения.

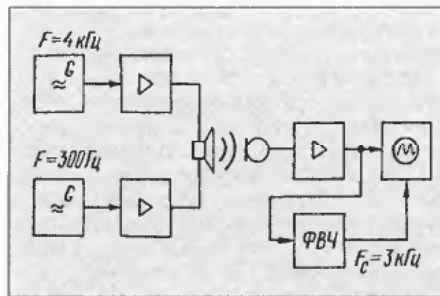
На частотах заметно выше основного резонанса величиной противо-ЭДС можно пренебречь, поскольку диффузор со звуковой катушкой просто не успевают разогнаться за половину периода частоты сигнала. Поэтому зависимость $Z_L(f)$ выше частоты основного резонанса определяется в основном величинами R_L и L_L .

Так вот, ни сопротивление R_L , ни индуктивность L_L особым постоянством не отличаются. Сопротивление звуковой катушки сильно зависит от температуры (ТКС меди около $+0,35\%/^{\circ}\text{C}$), а температура звуковой катушки малогабаритных среднечастотных ГГ при нормальной работе изменяется на величину в $30...50^{\circ}\text{C}$,

и причем весьма быстро — за десятки миллисекунд и менее. Соответственно сопротивление звуковой катушки, а следовательно, и ток через нее, и звуковое давление при неизменном приложенном напряжении изменяются на $10...15\%$, создавая интермодуляционные искажения соответствующей величины (в низкочастотных ГГ, тепловая инерционность которых велика, разогрев звуковой катушки вызывает эффект термической компрессии сигнала).

Изменения индуктивности еще более сложны. Амплитуда и фаза тока через звуковую катушку на частотах заметно выше резонансной в значительной мере определяются величиной индуктивности. А она очень сильно зависит от положения звуковой катушки в зазоре: при нормальной амплитуде смещения для частот, лишь немногим больших, нежели частота основного резонанса, индуктивность изменяется на $15...40\%$ у различных ГГ. Соответственно при номинальной мощности, подводимой к громкоговорителю, интермодуляционные искажения могут достигать $10...25\%$.

Сказанное выше иллюстрируется фотографией осциллограмм звукового давления (на экране верхнего осциллографа, на первой странице обложки), снятых на одной из лучших отечественных среднечастотных ГГ — 5ГДШ-5-4. Структурная схема измерительной установки



приведена на рисунке. В качестве источника двухтонального сигнала применены пара генераторов и два усилителя, между выходами которых подключена испытываемая ГГ, установленная на акустическом экране площадью около 1 м^2 . Два отдельных усилителя с большим запасом мощности (по 400 Вт) использованы с целью избежать образования интермодуляционных искажений при прохождении двухтонового сигнала через усилительный тракт. Звуковое давление, развиваемое головкой, воспринималось ленточным электродинамическим микрофоном, нелинейные искажения которого составляют величину менее -66 дБ при уровне звукового давления 130 дБ . Звуковое давление такого громкоговорителя в этом эксперименте составляло примерно 96 дБ , так что искажениями микрофона при данных условиях можно было пренебречь.

Как видно на осциллограммах (верхняя — без фильтрации, нижняя — после фильтрации ФВЧ), модуляция сигнала с частотой 4 кГц под воздействием другого с частотой 300 Гц (при мощности на головку $2,5 \text{ Вт}$) превышает 20% . Это соответствует величине интермодуляционных искажений около 15% ! Думается, нет нужды напоминать о том, что порог заметности продуктов интермодуляционных

искажений лежит намного ниже одного процента, достигая в ряде случаев сотых долей процента. Понятно, что искажения УМЗЧ, если только они имеют "мягкий" характер и не превышают нескольких сотых процента, просто неразличимы на фоне искажений в громкоговорителе, вызванных его работой от источника напряжения. Интермодуляционные продукты искажений разрушают прозрачность и детальность звучания — получается "каша", в которой отдельные инструменты и голоса слышны лишь изредка. Этот тип звучания наверняка хорошо знаком читателям (хорошим тестом на искажения может служить фонограмма детского хора).

Однако существует способ резко уменьшить описанные выше искажения, вызванные непостоянством импеданса головки громкоговорителя. Для этого усилитель, работающий на громкоговоритель, должен иметь выходное сопротивление, много большее, чем составляющие импеданса R_L и X_L ($2\pi f L_L$) ГГ. Тогда их изменения практически не будут оказывать влияния на ток в звуковой катушке, а следовательно, исчезнут и искажения, вызванные этими изменениями. С целью демонстрации эффективности такого метода снижения искажений измерительная установка была дополнена резистором сопротивлением 47 Ом (т.е. на порядок больше модуля импеданса исследуемой ГГ), включенным последовательно с ГГ. Для сохранения прежней величины звукового давления уровни сигнала на выходах усилителей были соответственно увеличены. Эффект перехода на токовый режим очевиден из сравнения соответствующих осциллограмм: паразитная модуляция высокочастотного сигнала на экране нижнего осциллографа значительно меньше и еле видна, величина ее не превышает $2...3\%$ — налицо резкое снижение искажений ГГ.

Знатоки могут возразить, что для уменьшения непостоянства импеданса звуковой катушки существует множество способов: это и заполнение зазора охлаждающей магнитной жидкостью, и установка медных колпачков на керны магнитной системы, и тщательный подбор профиля керна и плотности намотки катушки, а также многое другое. Однако все эти методы, во-первых, не решают проблему в принципе, а во-вторых, приводят к усложнению и к удорожанию производства ГГ, вследствие чего не находят полного применения даже в студийных громкоговорителях. Именно поэтому большинство среднечастотных и низкочастотных ГГ не имеет ни медных колпачков, ни магнитной жидкости (в таких ГГ при работе на полной мощности жидкость нередко выбрасывается из зазора).

Следовательно, питание ГГ от высокоомного источника сигнала (в пределе — от источника тока) является полезным и целесообразным способом снижения их интермодуляционных искажений, особенно при построении многополосных активных акустических систем. Демпфирование основного резонанса при этом приходится выполнять чисто акустическим путем, поскольку собственная акустическая добротность среднечастотных ГГ, как правило, значительно превышает единицу, достигая $4...8$.

Любопытно, что именно такой режим "токового" питания ГГ имеет место в ламповых УМЗЧ с пентодным или тетродным выходом при неглубокой (менее 10 дБ) ООС, особенно при наличии местной ООС по току в виде сопротивления в цепи катода.

В процессе налаживания такого усилителя его искажения без общей ООС обычно оказываются в пределах 2...5% и уверенно заметны на слух при включении в разрыв контрольного тракта (метод сравнения с "прямым проводом"). При этом после введения ООС звучание явно улучшается. Однако после подключения усилителя к громкоговори-телю обнаруживается, что по мере увеличения глубины обратной связи звучание сначала улучшается, а затем происходит потеря его детальности и прозрачности. Особенно четко это заметно в многополосном усилителе, выходные каскады которого работают непосредственно на соответствующие головки громкоговори-теля без каких-либо фильтров.

Причина этого, на первый взгляд, парадоксального явления в том, что при увеличении глубины ООС по напряжению выходное сопротивление усилителя резко снижается. Негативные последствия питания ГГ от УМЗЧ с малым выходным сопротивлением рассмотрены выше. В триодном усилителе выходное сопротивление, как правило, намного меньше, чем в пентодном или тетродном, а линейность до введения ООС выше, поэтому введение ООС по напряжению, конечно, улучшает характеристики отдельно взятого усилителя, но вместе с тем еще более ухудшает работу головки громкоговори-теля. Как следствие, в результате введения ООС по выходному напряжению в триодный усилитель звук, действительно, может становиться хуже, несмотря на улучшение характеристик собственно усилителя! Этот эмпирически установленный факт служит неискажаемой пищей для спекуляций на тему вреда от применения обратных связей в звуковых усилителях мощности, а также рассуждений об особой, ламповой прозрачности и естественности звучания. Однако из выше-рассмотренных фактов со всей очевидностью следует, что дело не в наличии (или отсутствии) самой по себе ООС, а в результирующем выходном сопротивлении усилителя. Вот где "собака зарыта"!

Стоит сказать несколько слов об использовании отрицательного выходного сопротивления УМЗЧ. Да, положительная обратная связь (ПОС) по току помогает задемпфировать ГГ на частоте основного резонанса и уменьшить мощность, рассеиваемую на звуковой катушке. Однако за простоту и эффективность демпфирования приходится платить возрас-танием влияния индуктивности ГГ на ее характеристики, даже по сравнению с режимом работы от источника напряже-ния. Это вызвано тем, что постоянная времени L_r/R_r заменяется на большую, равную $L_r/[R_r + (-R_{\text{вых.ум}})]$. Соответственно понижается частота, начиная с кото-рой, в сумме импедансов системы "ГГ+УМЗЧ" начинает доминировать ин-дуктивное сопротивление. Аналогично увеличивается и влияние тепловых изме-нений активного сопротивления звуковой катушки: сумма изменяющегося сопро-тивления звуковой катушки и неизмен-

ного отрицательного выходного сопро-тивления усилителя в процентном отно-шении изменяется сильнее.

Конечно, если $R_{\text{вых.ум}}$ по абсолютной величине не превышает $1/3... 1/5$ от ак-тивного сопротивления обмотки звуковой катушки, потеря от введения ПОС невелика. Поэтому слабую ПОС по току для небольшого дополнительного демпфиро-вания или для точной подстройки доб-ротности в низкочастотной полосе при-менить можно. Кроме того, ПОС по току и режим источника тока в УМЗЧ не совме-стимы между собой, вследствие чего токовое питание ГГ в низкочастотной по-лосе, к сожалению, оказывается не все-гда применимым.

С интермодуляционными искажениями мы, видимо, разобрались. Теперь оста-лось рассмотреть второй вопрос — вели-чину и длительность призвуков, возника-ющих в диффузоре ГГ при воспроизведе-нии сигналов импульсного характера. Этот вопрос гораздо сложнее и "тоньше".

Как известно, диффузоры ГГ можно считать бесконечно жесткими только в очень грубом приближении. На самом же деле они при колебаниях существенно изгибаются, причем весьма причудливым образом. Это связано с наличием боль-шого числа паразитных резонансных час-тот диффузора и подвижной системы ГГ в целом. После прохождения импульс-ного сигнала свободные колебания на каждой из резонансных частот затухают не сразу, порождая призвуки, окрашива-ют звучание и скрадывают ясность и де-тальность, ухудшая стереозвук.

Для исключения этих призвуков тво-ретически есть две возможности. Пер-вая — это сдвинуть все резонансные час-тоты за пределы рабочего диапазона час-тот, в область далекого ультразвука (50...100 кГц). Этим способом пользуют-ся при разработке маломощных высоко-частотных ГГ и некоторых измеритель-ных микрофонов. Применительно к ГГ — это способ "жесткого" диффузора.

Вторая возможность — это снижение добротности паразитных резонансов, с тем чтобы колебания затухали настоль-ко быстро, что их нельзя услышать. Для этого необходимо применение "мягких" диффузоров, потери при изгибе которых настолько велики, что добротность пара-зитных резонансов оказывается близка к единице. Однако нелинейные искаже-ния и максимальное звуковое давление ГГ с "мягким" диффузором оказываются несколько хуже, чем у ГГ с "жестким" диффузором. С другой стороны, ГГ с "мягкими" диффузорами, как правило, значительно выигрывают по ясности, не-окрашенности и прозрачности звучания.

Так вот, возможен и третий вариант — использование ГГ с относительно "жес-тким" диффузором и введение ее акусти-ческого демпфирования. В этом случае удастся в некоторой мере совместить достоинства обоих подходов. Именно таким образом чаще всего строятся сту-дийные контрольные громкоговори-тели (большие мониторы). Естественно, что при питании демпфированной ГГ от ис-точника напряжения из-за резкого паде-ния полной добротности основного ре-зонанса существенно искажается АЧХ. Источник тока в этом случае также ока-зывается предпочтительнее, поскольку способствует выравниванию АЧХ одно-

временно с исключением эффекта тер-мической компрессии.

Что же касается призвуков, возникаю-щих из-за свободных колебаний диффу-зоров ГГ, то, поскольку паразитные ре-зонансные частоты расположены, как правило, намного выше частот основ-ного резонанса, режим работы ГГ — с источником тока или напряжения — прак-тически никакого влияния на них не ока-зывает. Единственный прямой способ борьбы с паразитными резонансами — акустическое демпфирование. Однако вероятность их возбуждения при пита-нии ГГ от источника тока оказывается меньшей, поскольку эти резонансы ста-новятся наиболее заметными при их воз-буждении продуктами искажений. Как абсолютные, так и относительные амплитуды этих продуктов искажений для этого режима работы ГГ оказываются существенно меньше.

Обобщая вышеизложенное, можно сде-лать следующие практические выводы.

1. Режим работы головки громкоговори-теля от источника тока (в противополо-жность источнику напряжения) обеспе-чивает существенное снижение интер-модуляционных искажений, вносимых самой головкой.

2. Наиболее целесообразный вариант конструкции громкоговори-теля с низки-ми интермодуляционными искажениями — активный многополосный, с раздели-тельным фильтром (кроссовером) и от-дельными усилителями на каждую поло-су. Впрочем, этот вывод справедлив не-зависимо от режима питания ГГ.

3. Работа головок от источников тока вызывает необходимость акустического демпфирования их основного резонан-са, вследствие чего попутно достигается и некоторое демпфирование паразит-ных резонансов подвижной системы. Это улучшает импульсные характеристики громкоговори-теля и способствует устранению дополнительной окраски звучания.

4. С целью получения высокого выход-ного сопротивления усилителя и сохра-нения малой величины его искажений следует применять ООС не по напряже-нию, а по току.

Конечно, автор понимает, что предлага-емый метод снижения искажений не является панацеей. Кроме того, в случае использования готового многополосного громкоговори-теля осуществление токо-вого питания его отдельных ГГ без пере-делки невозможно. Попытка же подклю-чения многополосного громкоговори-теля в целом к усилителю с повышенным выходным сопротивлением (как к гене-ратору тока) приведет не столько к сни-жению искажений, сколько к резкому искажению АЧХ и соответственно сбою тонального баланса.

Тем не менее снижение интермодуля-ционных искажений ГГ почти на порядок, причем столь доступным методом, явно заслуживает достойного внимания. В свя-зи с этим автор надеется подготовить к публикации описание конструкции высо-кокачественного активного четырехполос-ного громкоговори-теля на основе неде-фицитных ГГ, в котором реализован пред-ложенный принцип снижения искажений.

Автор благодарит сотрудников НИК-ФИ Сырицо А.П. за помощь при прове-дении измерений и Шрайбмана А.Э. за обсуждение результатов.