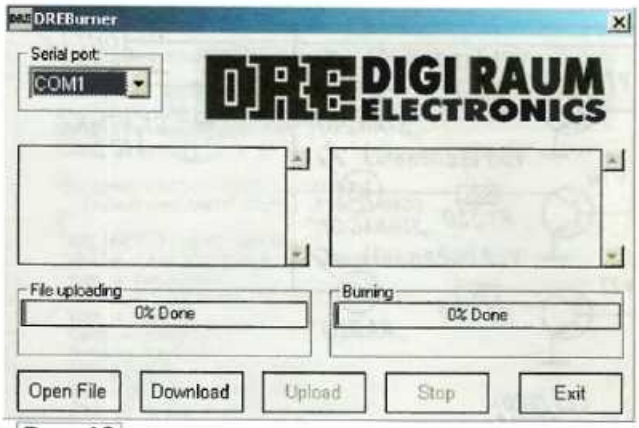

Рис. 10

файл дампа ПО (для этого необходимо указать папку, где он расположен). Загрузчик при этом отобразит информацию о загружаемом файле. Опцией Upload запускают процесс загрузки программы во FLASH-память. Загрузчик при этом должен выдать сообщение о попытке открыть COM-порт. Включают питание ресивера, указатели степени загрузки при этом покажут процесс записи.

Сначала программа загрузчика производит запись информации в оперативную память SD RAM ресивера (указатель File Uploading). Затем происходит программирование FLASH-памяти (указатель Burning). После завершения процесса загрузчик укажет на успешное программирование, а ресивер перейдёт в дежурный режим. На этом программирование завершено (необходимо отключить компьютер и нуль-модемный кабель от ресивера).

Компания НСК систематически обновляет ПО со спутника. Обновление происходит в течение определённого времени, которое всегда объявляют по информационному каналу, транслируемому в открытом (нескремблированном) виде. Для обновления необходимо настроить работающий ресивер на любую из программ пакета Триколор и переключить его на неё в рабочем режиме. При этом появится инфобаннер с запросом на обновление ПО. Необходимо подтвердить запрос нажатием на клавишу "OK". После этого нужно подождать, пока не появится указатель прогресса процесса обновления. После завершения программирования ресивер войдёт в рабочий режим с обновлённым ПО.

Внимание! Очень важно помнить, что при загрузке ПО в ресивер выключать его питание запрещается.

ЛИТЕРАТУРА

2. Прошивки. — **<http://connectiv.narod.ru>**.

(Окончание следует)

Особенности проектирования кроссоверов для высококачественных АС

Д. ГОРШЕНИН, г. Москва

Автор рассматривает связь гармонических искажений в динамических головках АС со схемотехникой пассивного кроссовера и выходным сопротивлением усилителя. Естественно, на уровень нелинейных искажений влияет и конструкция головки: в более сложной конструкции магнитной системы, как правило, искажения меньше. Тем не менее приведённые в статье методы снижения нелинейных искажений, особенно высокого порядка, будут способствовать более продуманному проектированию высококачественных АС на основе полосовых динамических головок.

Идея написания этой статьи возникла в процессе разработки акустической системы (АС) мониторного типа, предназначенной для работы в ближнем поле (на небольшом расстоянии от слушателя). Но речь в статье пойдёт не о ней, а о некоторых особенностях проектирования разделительных фильтров (далее для краткости кроссоверов) для подобных и вообще любых высококачественных АС.

В практике проектирования любительских АС сложилась странная ситуация, являющаяся отчасти следствием общей тенденции на потребительском аудиорынке. Не в последнюю очередь усилиями аудиопрессы, продвигающей на рынок изделия фирм, производящих аудиофильскую продукцию, у потребителя (и у разработчиков любительских АС в том числе) сформировалось устойчивое представление о том, что качество аудиоаппаратуры надо оценивать прежде всего "на слух", а интересоваться её техническими параметрами во вторую очередь. Обычный в таких случаях аргумент — мы слушаем не параметры, а музыку. Такая точка зрения не бесспорна, но имеет право на существование. Действительно, если кому-то, например, нравится звучание, окрашенное приятными слуху гармониками "ламповых" искажений, то почему он должен отказываться от него только потому, что его ламповый Hi-End усилитель с шестизначным ценником не удовлетворяет минимальному набору технических требований, обеспечивающих высокую верность воспроизведения, т. е. формально не является усилителем класса Hi-Fi. Главное, что такой звук нравится самому владельцу. Недоумение в этом случае может вызвать только то, что окрашенное звучание такого усилителя характеризуют как "чистое" и "натуральное".

Нет ничего удивительного в том, что субъективизации подверглись и методы проектирования АС. Отчасти это оправдано: пусть будет много хороших и разных АС, и тогда каждый потребитель сможет подобрать себе что-то по вкусу. Но такой подход к проектированию неприемлем при разработке мониторных АС, перед которыми ставится принципиально иная задача — максимально точно воспроизводить записи с минимумом искажений всех видов. И тогда волей-неволей приходится отбрасывать эзотерику и субъективизм и возвращаться к нормальным инженерным методам проектирования, т. е. к методам, основанным на измерении объективных технических параметров АС.

Подавляющее большинство любительских АС, конечно же, проектируются не только "на слух". Прежде всего стараются получить максимально плоскую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), а в многополосных АС разделить полосы так, чтобы более или менее оптимально использовать возможности излучателей (головок) в каждой из них. Но обычно на этом инженерная часть проектирования и заканчивается. Иногда делают ещё и "тюнинг" кроссовера, подбирая на слух аудиофильские супердетали и суперпровода в надежде на улучшение звучания, но к объективным параметрам АС этот этап "проектирования" уже никакого отношения не имеет. В то же время существуют реальные, а не мнимые способы улучшения объективных характеристик АС на этапе разработки схем кроссоверов, позволяющие полнее реализовать потенциальные возможности применённых головок. Вот о них мы и поговорим в этой статье.

Любой, кто просматривал любительские проекты АС, не мог не обратить внимания на то, что среди графиков АЧХ, ФЧХ и импедансов, поясняющих выбор частот разделения полос кроссовера и работу АС в целом, никогда не

приводятся графики нелинейных искажений. В большинстве проектов они даже не упоминаются. Иными словами, всегда при проектировании АС приоритет отдаётся минимизации линейных искажений и, прежде всего, получению плоской АЧХ. На это же рассчитаны и различные компьютерные программы проектирования кроссоверов. А нелинейные искажения — уж какие получатся. Странная ситуация! Нелинейные искажения АС не настолько малозначимый параметр, чтобы его игнорировать. Более того, именно АС — главный источник нелинейных искажений в любом звуковоспроизводящем тракте. Почему же столько внимания уделяется минимизации искажений в усилителях и цифроаналоговых преобразователях и так мало в АС?

Причин этого минимум три. Первая упоминалась выше — общий крен методов любительского проектирования АС от инженерных к субъективно-слуховым, вторая — распространённость мнения, что нелинейные искажения АС, несмотря на большую величину, не так деструктивно влияют на звук, как искажения электронного тракта, и третья — сложность учёта нелинейностей и отсутствие формализованных алгоритмов минимизации нелинейных искажений. Популярные программы расчёта кроссоверов для этого практически непригодны.

А, может быть, действительно нелинейные искажения АС для звука не страшны? Вот одно очень авторитетное мнение по этому вопросу, принадлежащее ведущему специалисту в области электроакустики профессору И. А. Алдошиной [1]:

"Пороги слуховой чувствительности существенно зависят от характера нелинейности: при появлении низших (второй, третьей) гармоник пороги слуха для тональных сигналов составляют 0,1 %, для фортепианной музыки — 1...2 %, для эстрадной музыки — до 7 %. Чувствительность слуха зависит от порядка гармоник: заметность гармонических искажений третьего порядка вдвое выше, чем искажений второго порядка, а заметность искажений пятого и более порядка в 6...10 раз выше, чем искажений второго порядка. Именно этим объясняется странное явление, что в акустических системах, имеющих в основном нелинейные искажения низших порядков, пороговые значения составляют 1...2 %, в то же время в транзисторных усилителях и цифровой аппаратуре, где возникают нелинейные искажения высоких порядков, уровни нелинейных искажений должны составлять сотые и тысячные процента, чтобы они были незаметны для слуховой системы".

Вроде бы это даёт индульгенцию нелинейным искажениям в АС, ведь

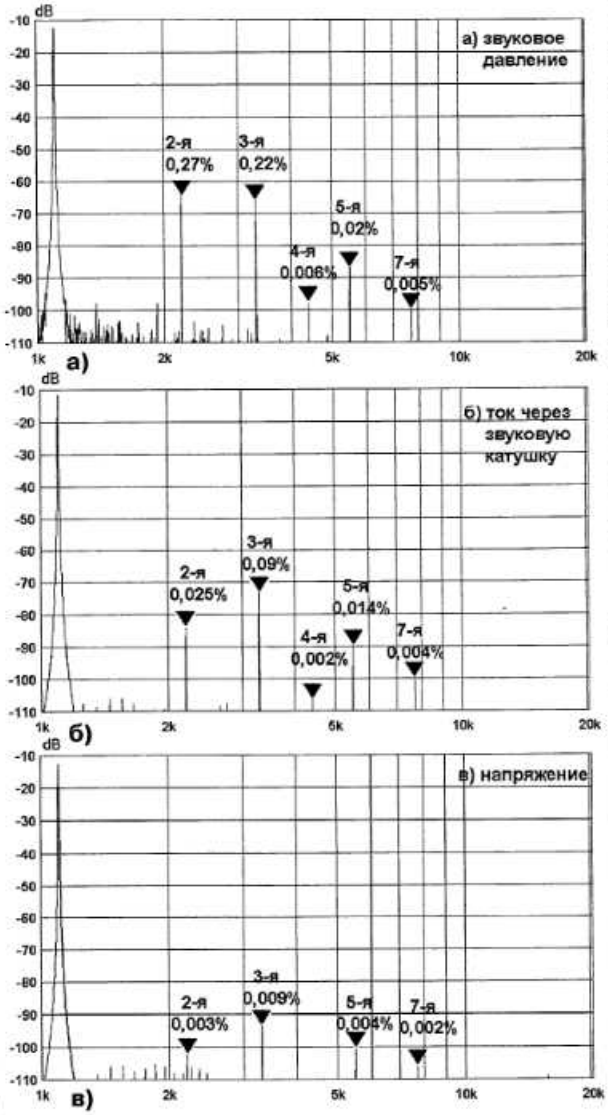

Рис. 1

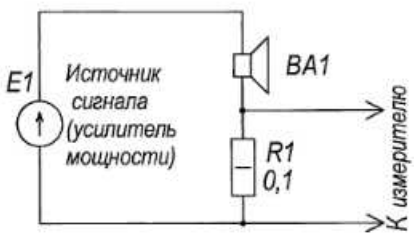

Рис. 2

современные высококачественные АС имеют нелинейные искажения на уровне 0,1...0,5 % на наиболее важных для слуха средних частотах. Значит, хотя бы в этом диапазоне вопрос с нелинейными искажениями закрыт? Ничего подобного. Действительно, в нелинейных искажениях АС доминируют вторая и третья гармоники (как, впрочем, и в любом электронном устройстве), но распространённое мнение, что в динамических головках нет физических механизмов, генерирующих искажения более высоких порядков, ошибочно.

Нелинейность импеданса динамических головок порождает гармоники вплоть до седьмой — девятой, причём с уровнями, обычно превышающими уровни аналогичных гармоник даже бюджетных электронных трактов. В качестве примера на **рис. 1** приведены спектрограммы гармоник звукового давления динамической Hi-End головки SEAS W18NX001 (E0042) (а), тока через эту головку (б) и выходного напряжения усилителя, от которого эта головка была запитана при измерениях (в). В качестве усилителя использовался недорогой AV-ресивер Yamaha RX-V657. Выходное напряжение при измерениях составляло 2,8 В (эфф.), что соответствует мощности 1 Вт на нагрузке сопротивлением 8 Ом. Измерительный сигнал — синусоида с частотой 1,1 кГц.

Спектры сигналов ясно показывают, что все значимые гармоники электронного тракта ресивера (ЦАП плюс усилительный тракт) (в) значительно меньше, чем соответствующие гармоники акустического сигнала, излучаемого головкой (а). Происхождение высших гармоник в спектре акустического сигнала поясняет спектрограмма тока через головку (б), показывающая, что импеданс головки существенно нелинейно преобразует приложенное к ней усилителем мощности напряжение в ток звуковой катушки.

Причина нелинейности импеданса динамических головок хорошо известна, как известны и методы подавления этого эффекта. Нелинейность преобразования напряжения в ток обусловлена зависимостью индуктивности звуковой катушки от протекающего через неё тока и изменения положения катушки внутри магнитной системы. На средних частотах, о которых далее и пойдёт речь в статье, существенен только первый механизм нелинейности. Звуковая катушка представляет собой дроссель с незамкнутым магнитопроводом, роль которого играет магнитная система головки. Этот магнитопровод намагничен полем постоянного магнита до уровня, близкого к насыщению, и его магнитная проницаемость (следовательно, и индуктивность звуковой катушки) изменяется при дополнительном подмагничивании протекающим через звуковую катушку током. Электромеханический преобразователь головки, состоящий из звуковой катушки и магнитной системы, далее по тексту будем называть принятым в англоязычной литературе термином "мотор".

Несколько ссылок для тех, кто не знаком с проблемами нелинейности импеданса головки или хочет углубить свои знания по этой проблеме: англоязычные публикации [2, 3] и русскоязычная [4].

тел. 608-83-05
Приём статей: mail@radio.ru
Вопросы: consult@radio.ru

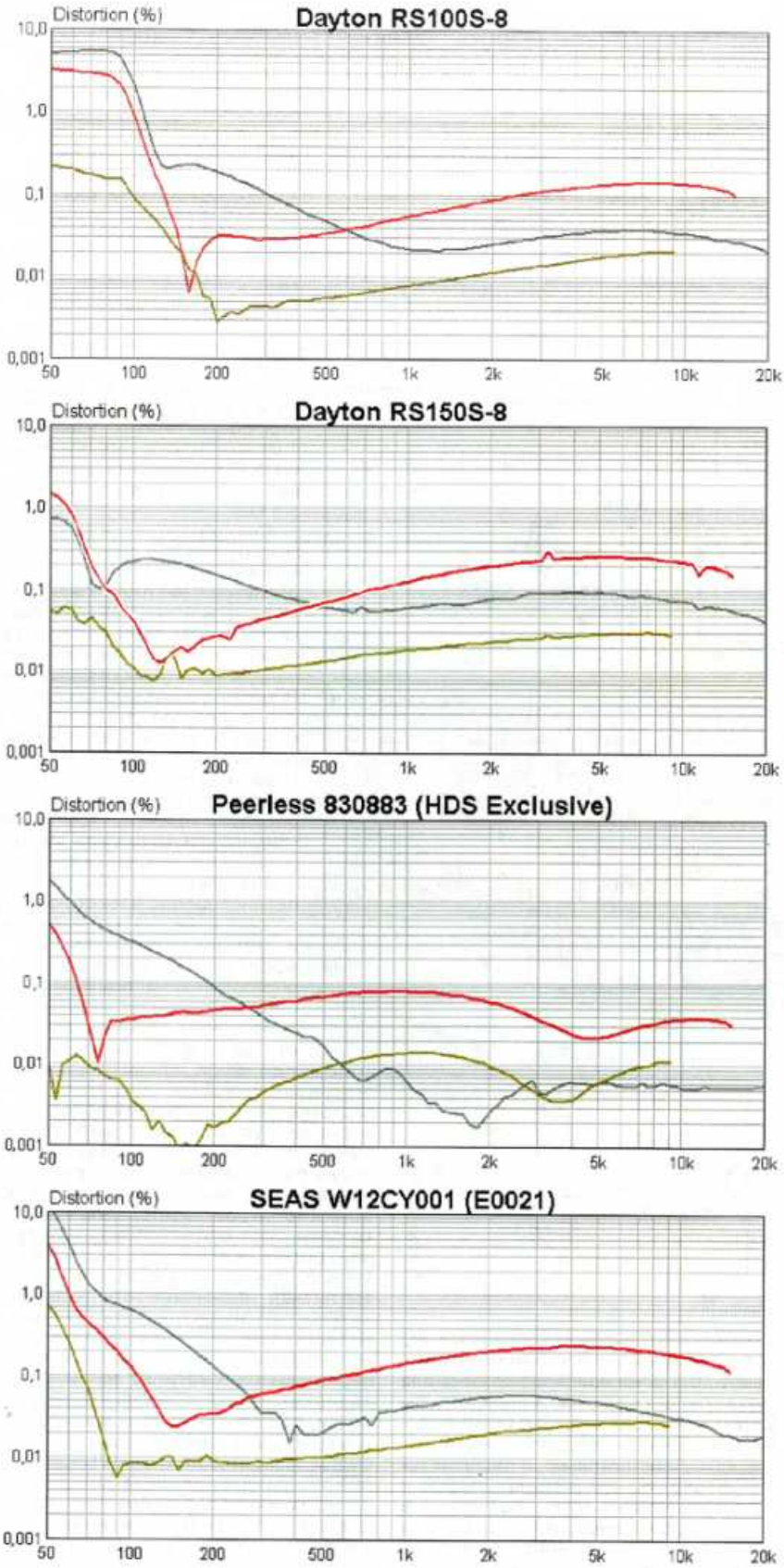

Рис. 3

Методы борьбы с искажениями, вызываемыми нелинейностью импеданса динамических головок, можно разделить на конструктивные и схемотехнические. К первым относятся различные способы минимизации индуктивной составляющей импеданса звуковой катушки. Обычно это достигается введением в мотор замкнутых колец из меди или алюминия, надеваемых на керн магнитной системы, и установкой медных или алюминиевых заглушек на внешнем торце керна. Большинство современных высококачественных динамических НЧ/СЧ головок имеют в своих моторах те или иные конструктивные элементы, снижающие индуктивность.

Схемотехнический метод борьбы с влиянием нелинейности импеданса, по сути, один — увеличение выходного сопротивления усилителя мощности, питающего головку, т. е. замена усилителя — источника напряжения на усилитель — источник тока (ИТУН) [5]. Несмотря на то что этот метод позволяет полностью исключить искажения из-за нелинейности импеданса (далее по тексту для краткости — ИНИ), сколько-нибудь широкого распространения он не получил, хотя известен уже четверть века. Причин этого несколько, главная из которых — невозможность использования одного усилителя ИТУН с многополосными АС. Одну из попыток "подружить" их предпринял, например, С. Д. Бать [6], хотя, на самом деле, рассмотренные там кроссоверы не решают главной задачи — не обеспечивают существенного снижения ИНИ, сводя тем самым на нет преимущества ИТУН перед традиционным усилителем мощности. Предлагаемое в этой статье техническое решение мы разберём ниже.

Полностью реализовать достоинства ИТУН можно только в схемах с разделением сигнала на полосы с помощью активного кроссовера и последующим многоканальным усилением мощности (мультиампингом), когда на каждую головку АС работает отдельный усилитель. Но применение ИТУН имеет и ряд других "побочных эффектов", обусловленных тем, что все без исключения головки проектируют для работы от источников напряжения, а не от источников тока. О них можно прочитать, например, в упомянутой статье С. Д. Батя.

За годы, прошедшие с момента написания первых статей о снижении искажений с помощью ИТУН, качество динамических головок значительно улучшилось, но это не значит, что проблемы ИНИ решены полностью. Медные кольца на керне и медная заглушка на его внешнем торце установлены и в моторе вышеупомянутой W18NX001. Как показывают измерения, они неплохо подавляют вторую гармонику ИНИ на средних частотах и интермодуляцию средних частот низкими, но при этом недостаточно эффективно снижают уровень гармоник третьего и более высоких порядков, что может отрицательно сказаться на качестве звука в некоторых АС. Методы снижения этого вида искажений и будут

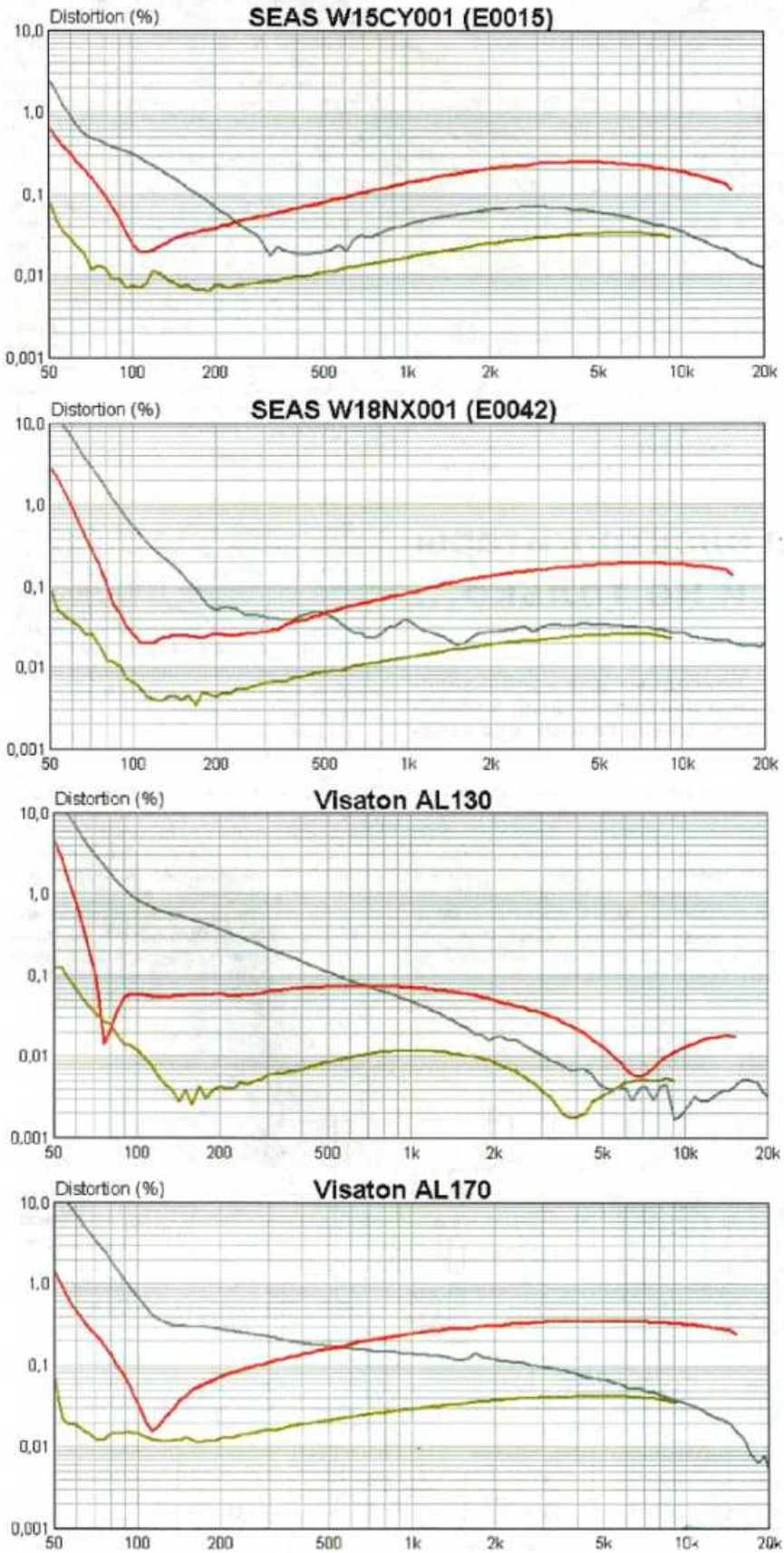

Рис. 4

предметом нашего дальнейшего рассмотрения.

Для определения "масштабов бедствия" были проведены измерения ИНИ различных динамических головок. Чтобы выборка была представительной, в тесте использовались головки различного диаметра — от 100 до 200 мм (от 4" до 8") — нескольких популярных у самодельщиков производителей (Dayton, Peerless, SEAS, Visaton, Wavecor). Объединяет эти головки то, что все они имеют "оверханговые" (от англ. over hung) моторы, т. е. моторы с длинными звуковыми катушками, существенно превышающими длину магнитного зазора. Такие головки используются в подавляющем большинстве двухполосных АС и в среднечастотном звене многих трёхполосных, и именно в них "импедансные" искажения имеют наибольшее значение. В головках с короткими звуковыми катушками, например, в специализированных среднечастотных головках, проблем с этим видом искажений значительно меньше благодаря меньшему значению индуктивной составляющей импеданса.

Большинство протестированных головок имеют моторы улучшенной конструкции с существенно подавленной индуктивностью звуковой катушки. В трёх головках (SEAS L21RNX/P, Visaton W100S, Visaton AL170) используется обычный мотор. Схема, по которой проводились измерения искажений, приведена на **рис. 2**, результаты измерений — на **рис. 3—5**. При измерениях на четырёхомные головки подавалось напряжение 2 В (эфф.), на восьмиомные — 2,8 В (эфф.). На графиках показаны только вторая (серый цвет), третья (красный цвет) и пятая (жёлто-зелёный цвет) гармоники ИНИ. Четвёртая гармоника и гармоники шестого порядка и выше у всех головок имеют довольно низкий уровень, они не показаны, чтобы не загромождать графики.

Сравнение графиков искажений позволяет отметить следующее:

1. Характер поведения гармоник ИНИ у всех головок схож. На низких частотах искажения всех порядков велики, что объясняется большой амплитудой смещения звуковой катушки. Затем с ростом частоты гармоники снижаются, так как амплитуда смещения катушки быстро уменьшается, после чего начинается рост ИНИ нечётных порядков (третья и пятая гармоники), вызванный ростом вклада нелинейной индуктивной составляющей импеданса звуковой катушки.

2. У головок с улучшенным мотором вторая гармоника ИНИ спадает с ростом частоты значительно быстрее, чем у головок с обычным мотором. Это прямое следствие применения короткозамкнутых колец и торцевых заглушек из меди и алюминия.

3. На средних и высоких частотах уровень третьей гармоники, как правило, превышает уровень второй.

4. Производители по-разному расставляли акценты при разработке конструкции качественных моторов. В

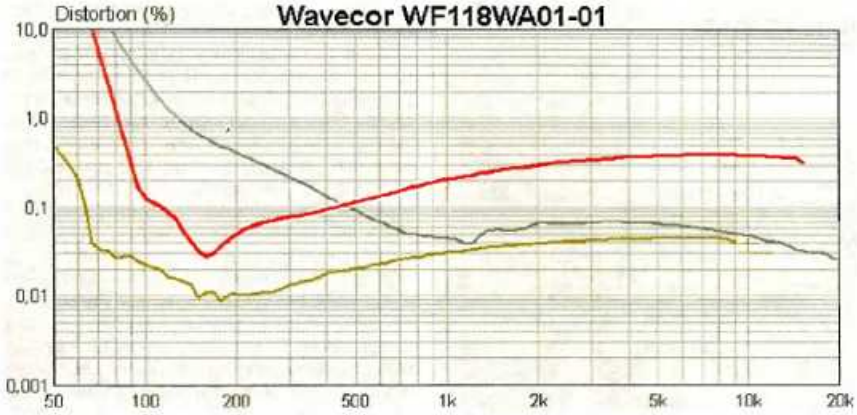

Рис. 5

головках Peerless и Visaton (например, AL130) нечётные гармоники ИНИ подавляются намного эффективнее, чем у других производителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алдошина И. А.** Слуховые пороги, часть 2 (Основы психоакустики, часть 2). — <http://rus.625-net.ru/audioproducer/2000/06/6.htm>.

2. **Klippel W.** Loudspeaker Nonlinearities — Causes and Symptoms. — <http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Files/Know_How/Literature/Papers/Loudspeaker%20Nonlinearities%3FCauses%2CParameters%2CSymptoms_06.pdf>.

3. **Pirimoglu A.** The Effect of Faraday Ring (Shorting Ring) Usage on Voice Coil Impedance and Its Benefits. — <http://www.diy-audio.narod.ru/litr/FaradayRingsVoiceCoilImpedance.pdf>.

4. **Горшенин Д.** Как выбрать динамическую головку для высококачественной АС. — Радио, 2008, № 7, с. 15—18.

5. **Mills P. G. L., Hawksford M. O. J.** Distorsion Reduction in Moving-Coil Loudspeaker Systems Using Current-Drive Technology. — J. Audio Eng. Soc., Vol.37, 1989, № 3, March.

6. **Бать С. Д.** Токовый усилитель глазами инженера. — <http://www.vacoustics.com/texts/200502171530>.

(Продолжение следует)

Три усилителя для электрогитары и не только...

П. ПЕТРОВ, г. София, Болгария

Автор предлагает три усилителя, пригодных для использования совместно с электромузыкальными инструментами, устройствами музыкальных эффектов, а также микрофонами для вокала и акустических инструментов.

Портативный усилитель для гитары и микрофона

Практика игры на электрогитаре или электроскрипке в общественных местах, таких как дворы, улицы и парки, может быть полезной, интересной и выгодной.

Для распространённых громкоговорителей, используемых в портативных АС, выходная мощность менее 2 Вт, как правило, недостаточна при звукоусилении на улице. С другой стороны, выходная мощность более 6...8 Вт вряд ли необходима для отдельного инструмента или голоса, а также с точки зрения энергопотребления. Описываемый здесь усилитель мощности имеет вход для гитары и микрофона и выходную мощность от 2 до 6 Вт (зависит от сопротивления нагрузки).

Портативный мобильный усилитель должен работать от батареи гальванических элементов или аккумуляторов обычно напряжением 12 В и ёмкостью не менее 4 А·ч. Он должен иметь малый ток покоя, чтобы работать несколько часов. Такой усилитель должен быть простым и не содержащим регуляторов тембра. Шумы и искажения в этих усилителях не очень важны.

На **рис. 1** представлена схема портативного гитарного усилителя с возможностью подключения микрофона. Вход через разъём XS1 рассчитан на работу от пассивного датчика для электрической гитары или скрипки. В случае необходимости повышения входного сопротивления номинал резистора R1 может быть увеличен.

Входной разъём XS2 предназначен для подключения микрофона, который можно применить для звукоусиления акустической гитары, скрипки или голоса. Когда выключатель SA1 замкнут, на

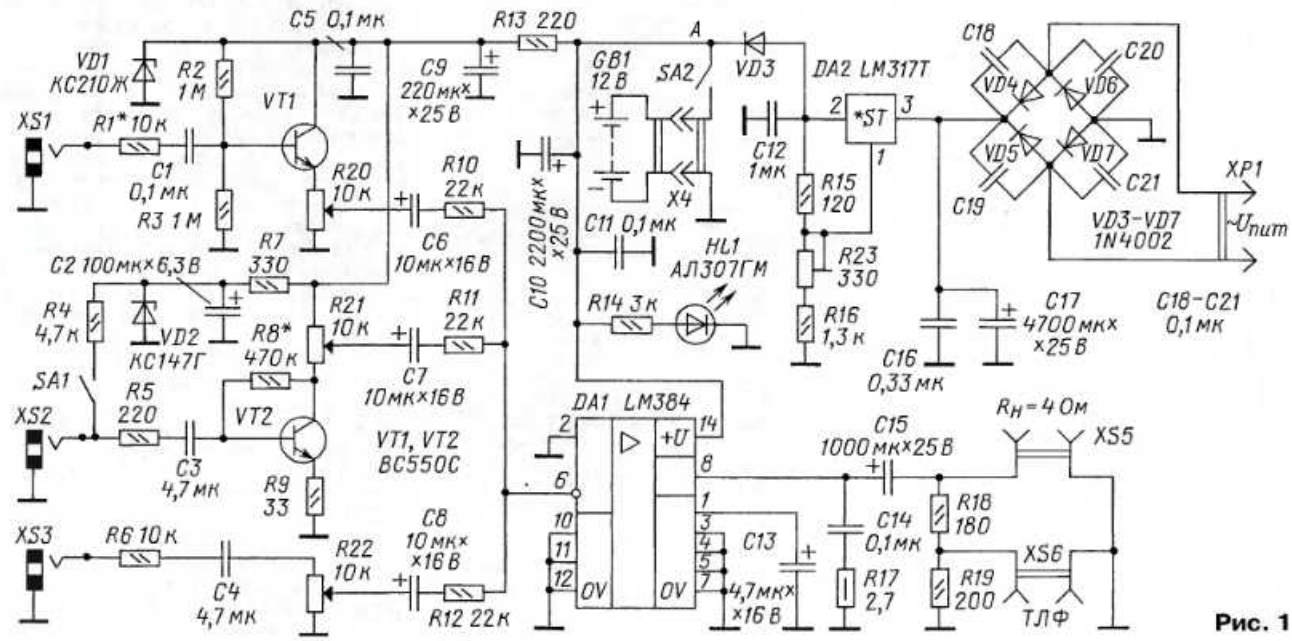

Рис. 1

Приём статей: mail@radio.ru тел. 608-83-05
Вопросы: consult@radio.ru
РАДИО № 6, 2013

Особенности проектирования кроссоверов для высококачественных АС

Д. ГОРШЕНИН, г. Москва

Несколько слов о физических причинах появления нечётных гармоник ИНИ на средних частотах. Как уже говорилось, звуковая катушка — это фактически дроссель с незамкнутым магнитопроводом, роль которого играют элементы магнитной системы головки: керн, верхний и нижний фланцы и магнит. Под действием знакопеременного тока звукового сигнала, протекающего через катушку, происходит перемагничивание составных частей магнитопровода по частной петле гистерезиса. Уменьшение магнитной проницаемости магнитопровода из-за перемагничивания материалов элементов, из которых он состоит, приводит к периодическому изменению индуктивной составляющей импеданса катушки. Поскольку ток достигает максимального значения дважды за период синусоидального сигнала, то возникающее вследствие этого изменение импеданса продуцирует нечётные гармоники искажений тока в катушке: третью, пятую, седьмую и т. д. Подробнее об этом можно прочитать в хорошей инженерной статье [7] и в научной статье [8].

Вторая гармоника ИНИ на средних частотах является следствием эффекта, называемого "модуляцией потока", т. е. порождается той частью магнитного поля катушки, которое идёт по длинному магнитному пути: керн — нижний фланец — магнит верхний фланец. Это дополнительное поле, в зависимости от направления тока в катушке, или суммируется с полем постоянного магнита, или вычитается из него, изменяя магнитный поток в рабочем зазоре. Отсюда и название. Вторая гармоника ИНИ эффективно подавляется кольцами большого сечения, расположенными внутри мотора под магнитным зазором. Нечётные гармоники ИНИ преимущественно порождаются полем катушки, сосредоточенным в районе магнитного зазора. Силовые линии этого поля идут по короткому магнитному пути: верхняя часть керна — верхний фланец. Для их минимизации кольца приходится располагать или непосредственно в зазоре, что снижает чувствительность головки, или, что менее эффективно, вблизи зазора — сверху и снизу.

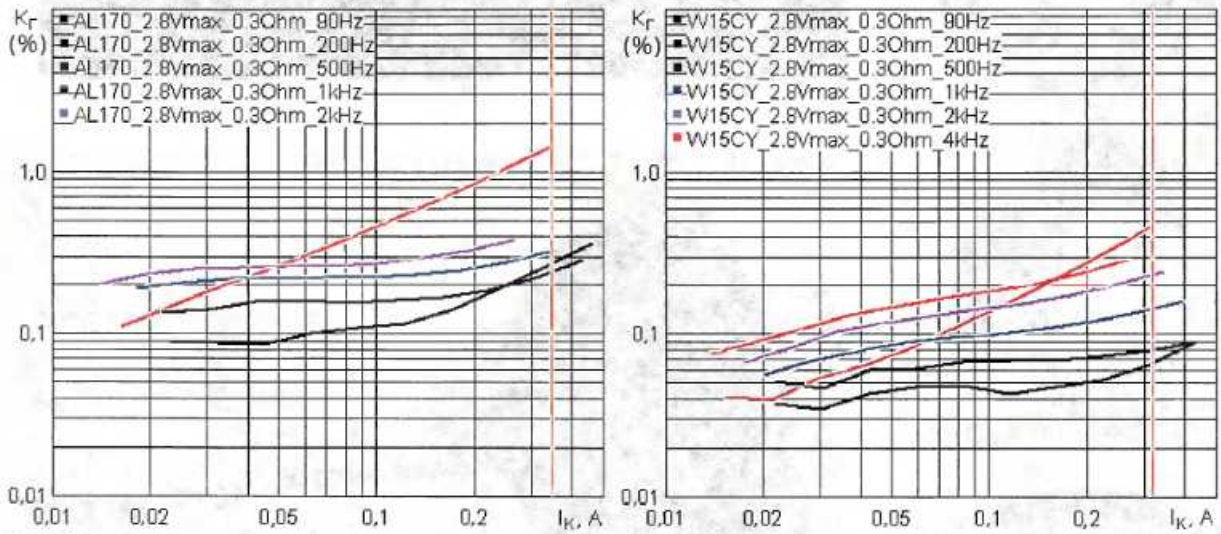

Рис. 6

Важной особенностью ИНИ на средних частотах является их относительно слабая зависимость от уровня сигнала. С одной стороны, это хорошо: при больших уровнях сигнала (подводимая к головке мощность значительно больше 1 Вт) искажения, связанные с механическими процессами в диффузоре и подвесах, во много раз превышают ИНИ и маскируют их; с другой — при мощности 1 Вт и меньше ИНИ становятся доминирующим видом искажений и пренебрегать ими нельзя, особенно принимая во внимание тот факт, что классическую или джазовую музыку дома мы слушаем именно при таких средних уровнях сигнала.

На **рис. 6** показаны зависимости суммарного коэффициента гармоник ИНИ при разных частотах сигнала для головки с обычным мотором (Visaton AL170) и популярной Hi-End головки с улучшенным мотором (SEAS W15CY001 (E0015)). Измерения проводились по схеме на рис. 2. По горизонтальной оси отложена величина тока, протекающего через звуковую катушку (напряжение на датчике тока). При измерениях приложенное к головке напряжение изменялось от 0,14 до 2,8 В (эфф.). Полученные результаты показывают, что на средних частотах при снижении уровня сигнала ИНИ падают очень медленно, особенно у головки с обычным мотором. Так, при снижении напряжения в 20 раз (а мощности в 400 раз) у AL170 на частоте 1 кГц коэффициент гармоник уменьшился всего в полтора раза: с чуть более 0,3 до 0,2 %, а у W15CY001 — примерно в три раза: с 0,17 до 0,055 %. Таким образом, у некоторых головок даже при подводимой мощности всего 2,5 мВт коэффициент гармоник, обусловленный ИНИ, может оставаться довольно высоким. Это надо иметь в виду тем разработчикам, которые рассчитывают получить очень низкие искажения АС, используя вместо одной качественной головки несколько дешёвых.

До сих пор речь шла о том, как выглядят ИНИ в электрической части головки, для нас же важно понять, как они преобразуются в акустический сигнал и насколько существенен их вклад в общей картине искажений по звуковому давлению (акустических искажений). На **рис. 7** показаны АЧХ и частотно-зависимые уровни гармоник нелинейных искажений головки с металлическим (W15CY001) и бумажным (W18NX001) диффузорами, снятые при напряжении 2,8 В (эфф.). Здесь следует обратить внимание на то, что общий характер поведения гармоник искажений в среднем похож на поведение соответствующих гармоник ИНИ, приведённых для этих головок на рис. 4,а,б, но имеет ряд характерных отличий, на которых следует остановиться подробнее.

Важнейшая особенность проявления ИНИ в общей картине акустических искажений состоит в том, что на средних частотах графики ИНИ нечётных

Продолжение.
Начало см. в "Радио", 2013, № 6

Приём статей: mail@radio.ru тел. 608-83-05
Вопросы: consult@radio.ru

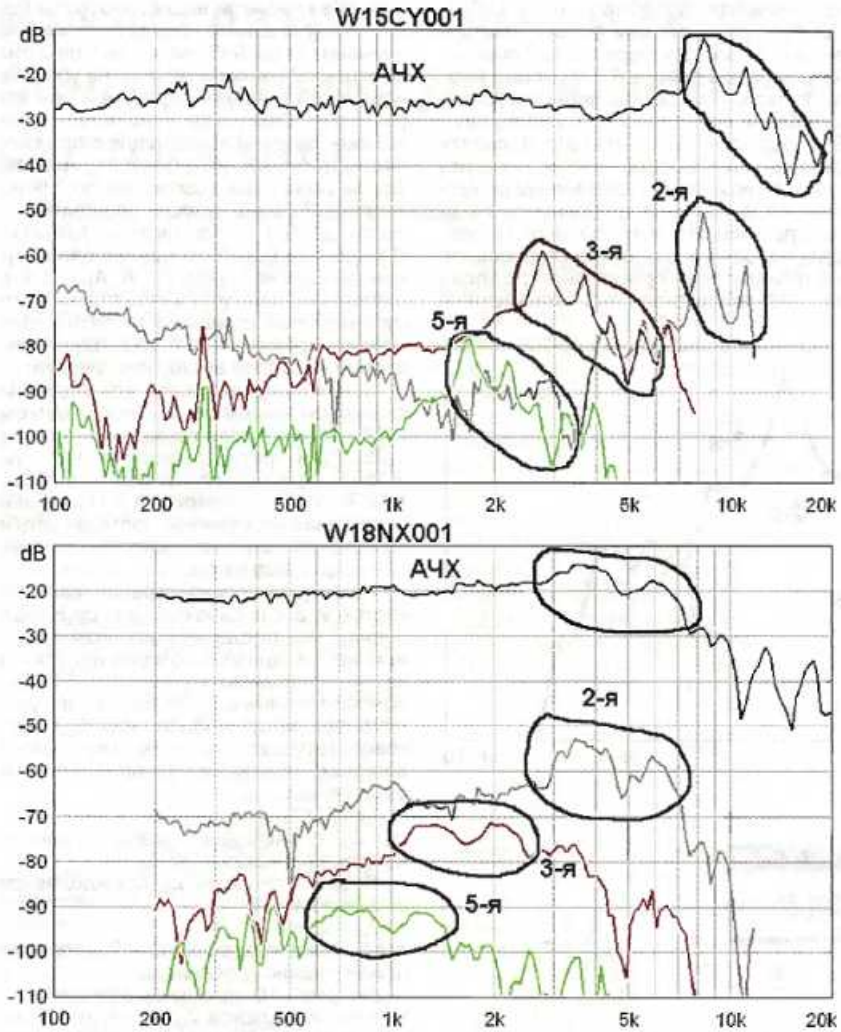

Рис. 7

порядков (третьей, пятой и т. д.) по форме похожи на АЧХ головки, но при этом сдвинуты по частотной оси вниз — в три раза для третьей гармоники, в пять раз для пятой и т. д. Особенно хорошо это видно на примере головок с пиками и провалами на АЧХ. Эта закономерность распространяется и на вторую гармонику ИНИ, но обычно вторая гармоника "диффузорных" искажений маскирует этот факт. Поэтому, если на графике гармоник пики искажений совпадают по частоте с пиками АЧХ головки, это точно не ИНИ, а "диффузорные" искажения (далее — ДИ). Как показывают измерения, у головок с бумажными диффузорами спектр ДИ состоит практически только из второй гармоники, а в металлических диффузорах, кроме второй, могут генерироваться и гармоники более высоких порядков, хотя и с относительно небольшими уровнями. Если графики ИНИ напоминают график АЧХ головки, но сдвинуты вниз по частоте, то для больших выбросов на второй гармонике ДИ характерно отсутствие частотного сдвига — её пики обычно совпадают по частоте с пиками АЧХ головки. А вот третья или пятая гармоника ДИ по своему проявлению похожа на ИНИ. Отмеченное свойство иллюстрирует рис. 7. Третья и пятая гармоники искажений, скорее всего, имеют "импедансное" происхождение, а пики на второй гармонике — ДИ. Таким образом, сопоставляя форму АЧХ головки и форму графиков искажений, часто можно определить доминирующую причину их возникновения.

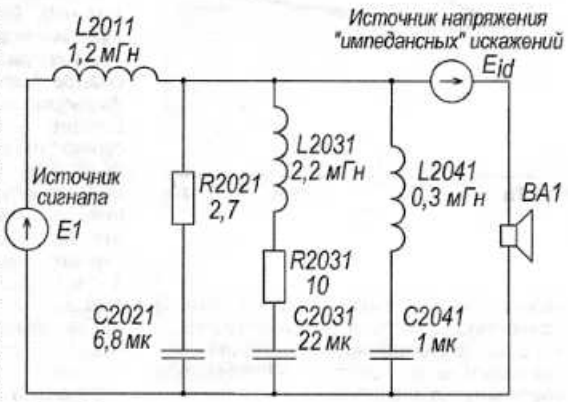

Рис. 8

Для чего нужна такая сортировка гармоник? Для проектирования кроссоверов. Никаких средств, позволяющих влиять на ДИ головки в пределах её рабочей полосы в составе АС, не существует. Можно только отрезать кроссовером частоты, на которых наблюдаются особенно сильные деформации диффузора и связанные с ними выбросы ДИ, что обычно и делают при проектировании. Для ИНИ ситуация принципиально иная. Их можно, а в ряде случаев просто необходимо, минимизировать выбором адекватной схемной реализации кроссовера.

Подобие формы графиков гармоник ИНИ и АЧХ головки не случайно, а является проявлением того факта, что искажения, генерируемые током полезного сигнала в звуковой катушке с нелинейным импедансом, могут быть представлены в виде включённого последовательно с головкой дополнительного источника напряжения ИНИ — E_{id}, как это показано на схеме НЧ—СЧ звена одного из проектов АС (**рис. 8**). Такое представление объясняет подобие формы АЧХ самого сигнала и порождённых им гармоник ИНИ при измерении звукового давления: электрические гармоники ИНИ вместе с полезным сигналом преобразуются головкой в звуковое давление в соответствии с её АЧХ. Но есть очень важное отличие источника напряжения гармоник ИНИ E_{id} от источника напряжения полезного сигнала E1: E_{id} всегда "включён" на выходе кроссовера, а E1 — на его входе.

Введение источника напряжения ИНИ E_{id}, не претендуя на полную адекватность отображения физики процесса, тем не менее оказывается очень удобным для объяснения и прогнозирования поведения ИНИ при разных схемах подключения головки к источнику сигнала, и особенно при использовании пассивного кроссовера. Для преобразования электрических ИНИ в звуковое давление источник напряжения искажений E_{id} должен создать ток в звуковой катушке. Наша же задача — максимально осложнить это преобразование. Из этого следует общеизвестный "предельный" вывод: наихудшим с точки зрения подавления ИНИ является случай, когда полезный сигнал на головку подаётся непосредственно (без фильтра) от источника напряжения, т. е. от источника с очень низким выходным сопротивлением, а наилучшим — питание головки от источника тока (ИТУН). В первом случае напряжение E_{id} целиком прикладывается к головке, развивая максимально возможный ток через неё, а во втором — высокое выходное сопротивление ИТУН предотвращает протекание тока искажений через головку. Ещё один вывод состоит в том, что для снижения излучения головкой ИНИ необходимо повышать выходное сопротивление кроссовера, причём не только в рабочей полосе, что более или менее оче-

тел. 608-83-05
Приём статей: mail@radio.ru
Вопросы: consult@radio.ru

видно, но и за её пределами — там, где лежат третья, пятая, седьмая и т. д. гармоники ИНИ полезного сигнала, т. е. фактически вплоть до частот, где акустическая отдача головки (без фильтра) существенно падает. А вот это, как показывает опыт, очевидно далеко не всем разработчикам.

Как это работает при анализе схем, разберём на конкретных примерах кроссоверов.

Вернёмся к рис. 8, где показано НЧ—СЧ звено двухполосной АС, спроектированной известным в любительских кругах разработчиком из Дании Троелсом Гравесеном (Troels Gravesen) [9]. В этой полосе применена упомянутая выше головка SEAS W15CY001.

Следует сразу заметить, что кроссовер спроектирован неудачно, и АС имеет очень высокий уровень искажений в НЧ—СЧ звене. Судя по всему, автор проекта их вообще не измерял, что, к сожалению, очень типично для любительских разработок.

Коротко о назначении элементов кроссовера. Цепь L2011,C2021,R2021 — фильтр НЧ второго порядка. Цепь L2031,C2031,R2031 предназначена для корректировки дифракционного спада звукового давления на низких частотах, называемого "baffle step". Цепь L2041, C2041 — режекторный фильтр, настроенный на частоту первого выброса на АЧХ головки в районе 8,2 кГц, связанного с мощным резонансом модовых колебаний металлического диффузора. Его задача — максимально подавить резонансный выброс, чтобы сгладить суммарную АЧХ АС. Применение режекторного фильтра потребовалось из-за выбора слишком высокой частоты раздела полос — 3 кГц. В этом кроссовере настройка режекторного фильтра должна производиться под конкретный экземпляр головки с очень высокой точностью. В частности, для головки, с которой выполнялись измерения, индуктивность дросселя L2041 пришлось увеличить до 360 мкГн.

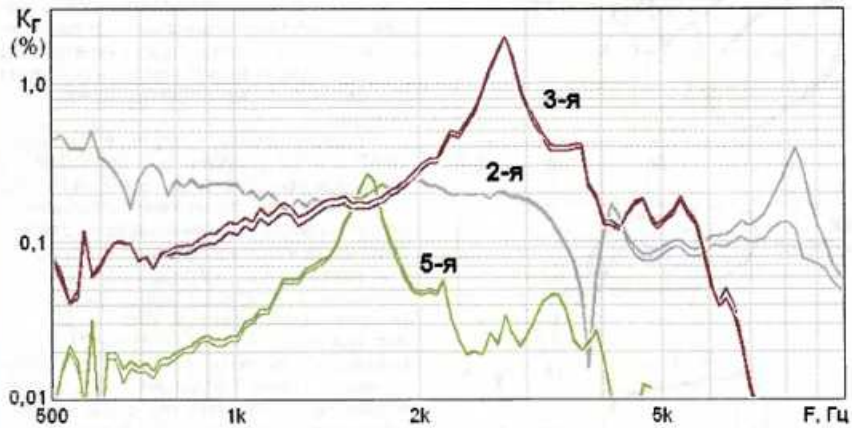

Рис. 9

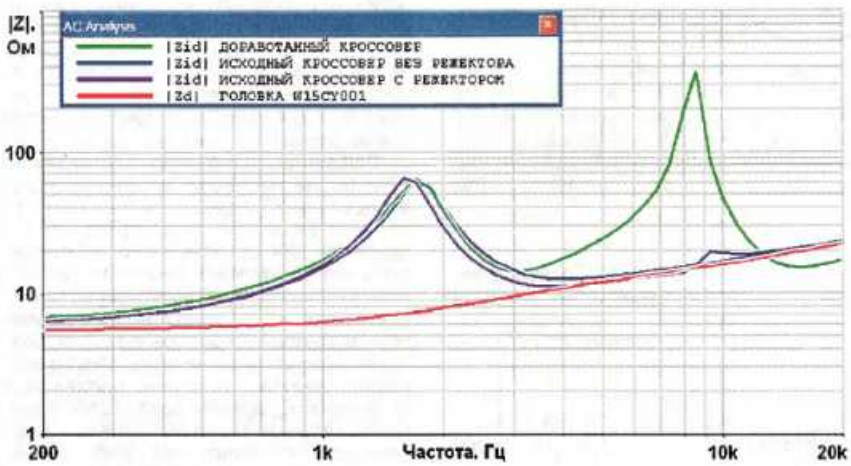

Рис. 10

На **рис. 9**,а показаны АЧХ звукового давления НЧ—СЧ звена для трёх вариантов кроссоверов: исходного, того же кроссовера, но без режекторного фильтра (L2041 и C2041 отсутствуют), и кроссовера, модернизированного для уменьшения ИНИ, о котором речь пойдёт ниже. На рис. 9,б приведены измеренные уровни гармоник нелинейных искажений звукового давления НЧ—СЧ звена с кроссовером Гравесена при наличии режекторного фильтра и без него. Из графиков видно, что добавление режекторного фильтра заметно улучшает спад АЧХ звена, но при этом практически никак не влияет на уровень искажений в пределах рабочей полосы (до 3 кГц). Сам же уровень нелинейных искажений НЧ—СЧ звена для высококачественной АС неприемлемо высок. Третья гармоника возрастает до 2 % на частоте 2,75 кГц, пятая гармоника — почти до 0,3 % на частоте 1,65 кГц. Причём эти 0,3 % отнюдь не безобидная величина, ведь И. А. Алдошина пишет (см. цитату в начале статьи), что субъективная слышимость пятой гармоники примерно в 6 раз выше, чем второй и в 3 раза выше, чем третьей.

Можно предположить, что в данном случае мы имеем дело с проявлением ИНИ, так как пятая гармоника частоты 1,65 кГц и третья гармоника частоты 2,75 кГц приходятся как раз на выброс АЧХ головки в районе 8,2 кГц. Пики искажений на указанных частотах есть и на графиках звукового давления головки без фильтра на рис. 7.

Почему кроссовер, ограничивающий частотой 3 кГц рабочую полосу НЧ/СЧ звена, не предотвратил появление искажений, причина которых находится за её пределами на частоте 8,2 кГц, поможет понять анализ тока, развиваемого генератором искажений E_{id} в звуковой катушке. Значение тока "импедансных" искажений I_{id} определяется выражением

$$I_{id} = E_{id}/ Z_{id},$$

где Z_{id} — импеданс в цепи источника напряжения искажений E_{id}.

В свою очередь Z_{id} определяется выражением

$$Z_{id} = Z_d + Z_c,$$

где Z_d — импеданс головки; Z_c — выходной импеданс кроссовера.

На **рис. 10** показана зависимость модуля импеданса Z_{id} от частоты для трёх рассматриваемых вариантов кроссовера: исходного, далее — того же, но без режекторного фильтра, и доработанного. Дополнительно показан модуль импеданса головки Z_d. Из приведённых графиков видно, что для кроссовера Гравесена как с режекторным фильтром, так и без него, значение Z_{id} в районе частоты 8,2 кГц практически одинаково и не отличается от импеданса головки. Это и объясняет высокий и при этом одинаковый уровень искажений, полученный при измерениях для этих двух вариантов. Следует заметить, что ненулевое значение Z_c на частоте 8,2 кГц (примерно 4 Ом) ничего не добавило к суммарному импедансу Z_{id} из-за взаимной компенсации части индуктивной составляющей импеданса головки и ёмкостной составляющей импеданса кроссовера.

Важно отметить, что именно цепь C2021, R2021 обеспечивает проход к головке напряжения искажений источника E_{id}. Иными словами, их высокий уровень в данном проекте является прямым следствием применения в кроссовере фильтра второго порядка. Но и при отключении цепи C2021, R2021 искажения останутся высокими, так как им гарантирован другой короткий путь к головке — через цепь режекторного фильтра L2041C2041.

Приём статей: mail@radio.ru тел. 608-83-05
Вопросы: consult@radio.ru

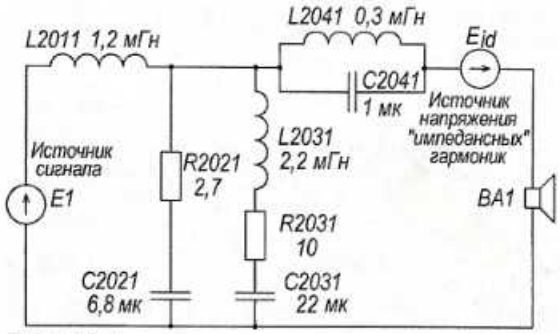

Рис. 11,а

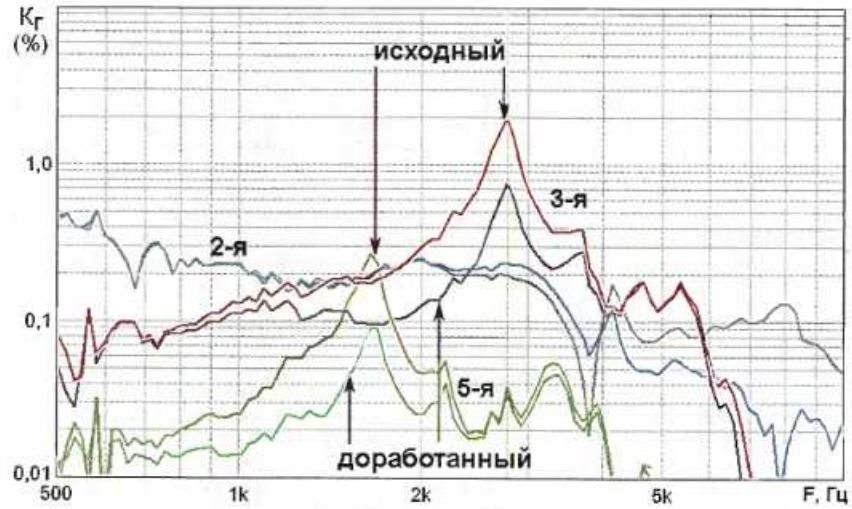

Рис. 11,б

Очевидно, для того чтобы снизить пики акустических искажений, возникающих из-за ИНИ, необходимо существенно увеличить Z_{id} хотя бы в районе частоты 8,2 кГц. Это можно сделать, например, за счёт увеличения выходного импеданса кроссовера Z_c при замене параллельного головке режекторного фильтра на последовательный, настроенный на ту же частоту (схема на **рис. 11**,а). АЧХ модифицированного кроссовера, показанная на рис. 9,а зелёной линией, выглядит даже более предпочтительной, чем АЧХ звена с кроссовером Гравесена, но главное не это, а снижение излучаемых головкой нелинейных искажений. На рис. 11,б показаны искажения НЧ—СЧ звена с кроссовером Гравесена и с доработанным кроссовером. Увеличение Z_{id} в области частот повышенной отдачи головки (на частотах выше 4 кГц, см. рис. 10) ожидаемо привело к значительному снижению уровня искажений в пределах рабочей полосы НЧ—СЧ звена. Но снижение искажений на частотах 1,65 и 2,75 кГц оказалось меньше ожидаемого, если исходить из отношения Z_{id} в доработанном варианте к его значению в исходном кроссовере. Причина этого в том, что после доработки остаточный уровень искажений на этих "пиковых" частотах определяется уже не ИНИ, а "диффузорными" искажениями, против которых бессилен даже ИТУН. Дальнейшее снижение уровня искажений для головки W15CY001 возможно только при ограничении рабочей полосы НЧ—СЧ звена частотой, значение которой существенно меньше, чем частота выброса на АЧХ (8,2 кГц), делённая на три. В этом случае, по крайней мере, третья гармоника ДИ будет дополнительно подавлена.

ЛИТЕРАТУРА

7. **Мухамедзянов Н.** Мотор глазами схемотехника. — **<http://reanimator-h.narod.ru/magn_s.htm>**.

8. **Пономарёв Ю.** К закону намагничивания Рэлея. Симметричные и асимметричные петли гистерезиса. Эксперимент. — Физика металлов и металловедение, том 105, 2008, № 3, с. 281—293.

9. SEAS W15CY001 + HIQUPHON OWI = Super mini-monitor. — **<http://www.troelsgravesen.dk/W15.htm>**.

(Окончание следует)

НОВОСТИ ВЕЩАНИЯ

Раздел ведёт В. ГУЛЯЕВ, г. Астрахань

РОССИЯ

РГРК "Голос России" произвела замену частоты для своих программ на русском языке: с 16.00 до 19.00 теперь взамен частоты 5925 кГц используется частота 5975 кГц, передатчик — мощностью 250 кВт, вещание — в направлении Средней Азии.

Расписание коротковолнового вещания "Радио России" в летнем сезоне 2013 г. приведено в **таблице**.

АСТРАХАНЬ. ООО "Радио Дача" признано победителем конкурса на наземное эфирное радиовещание в городе Астрахани на частоте 88,3 МГц мощностью 1 кВт, время вещания — ежедневно и круглосуточно с программной концепцией "Радио Дача".

АЧИНСК. С 26 апреля на частоте 101,1 МГц в городе Ачинске Красноярского края вещает "Радио Дача".

ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ КРАЙ. "Радио Сибирь" 7 мая начало вещание в посёлке Холбон Шилкинского района, став третьей радиостанцией диапазона FM в районе после "Радио России" и "Юности". "Радио Сибирь" — первая негосударственная музыкально-информационная радиостанция, находящаяся в городе Томске, начала вещание с 7 января 1992 г. Имеет филиалы, вещающие в Омске,

Время вещания	Частота, МГц	Местонахождение передатчика	Мощность, кВт	Направление вещания
00.00—13.00, 17.00—21.00	5930	Петропавловск-Камчатский	100	Дальний Восток
01.00—21.00	5930	Мурманск	50	Север России
00.00—13.00, 17.00—19.00	5940	Охотск	100	Дальний Восток
00.00—17.00, 21.00—24.00	6085	Красноярск	50	Дальний Восток
00.00—17.00, 21.00—24.00	6100	Красноярск	5	Дальний Восток
01.00—21.00	6160	Мурманск	50	Север России
00.00—17.00, 21.00—24.00	6195	Иркутск	50	Дальний Восток
17.30—21.00	7215	Москва	250	Западная Европа
00.00—05.00, 19.00—24.00	7230	Якутск	100	Дальний Восток
00.00—13.00, 17.00—21.00	7320	Охотск	100	Дальний Восток
04.00—08.00	12070	Москва	250	Западная Европа
08.30—13.00	13665	Москва	250	Западная Европа
13.30—17.00	13735	Москва	250	Западная Европа

Примечание. *Время всюду — UTC. Время MSK = UTC + 4 ч.*

Особенности проектирования кроссоверов для высококачественных АС

Д. ГОРШЕНИН, г. Москва

Рассмотрим ещё один пример доработки кроссовера для снижения ИНИ. Двухполосная АС — проект "Bijou 170", предлагаемый компанией VISATON для самостоятельного изготовления. НЧ—СЧ звено выполнено на упоминавшейся ранее головке AL170 с алюминиевым диффузором. На **рис. 12** показаны АЧХ и гармоники акустических искажений этой головки. На второй гармонике в полосе изломных резонансов диффузора наблюдаются выбросы ДИ, а на частотах 800 Гц — 2,5 кГц — выбросы третьей и пятой гармоник предположительно "импедансного" происхождения. Вблизи частоты 1,7 кГц на АЧХ головки и на всех гармониках искажений имеется узкий выброс/провал, связанный с каким-то резонансом в подвижной системе головки не "диффузорного" и не "импедансного" происхождения. На **рис. 13** и **14** показаны схемы НЧ—СЧ звена проекта с исходным и доработанным кроссоверами соответственно.

Исходный кроссовер выполнен по схеме ФНЧ второго порядка. Кроме того, дроссель L1 исходной схемы совместно с элементами C1, R1 образует включённый последовательно с головкой режекторный фильтр для подавления выброса на АЧХ в интервале 6...7 кГц. И хотя, в отличие от кроссовера Гравесена, здесь режекторный фильтр включён последовательно с головкой, из-за ёмкости C2 кроссовер всё равно имеет низкое выходное сопротивление на высоких частотах. Принимая во внимание высокий уровень ИНИ применённой головки (см. рис. 4,г), такая схема гарантирует большой уровень акустических искажений, что и демонстрируют графики на **рис. 15**,а (показаны только третья и пятая гармоники акустических искажений). В доработанном кроссовере фильтр НЧ (L1C1R1) и режекторный

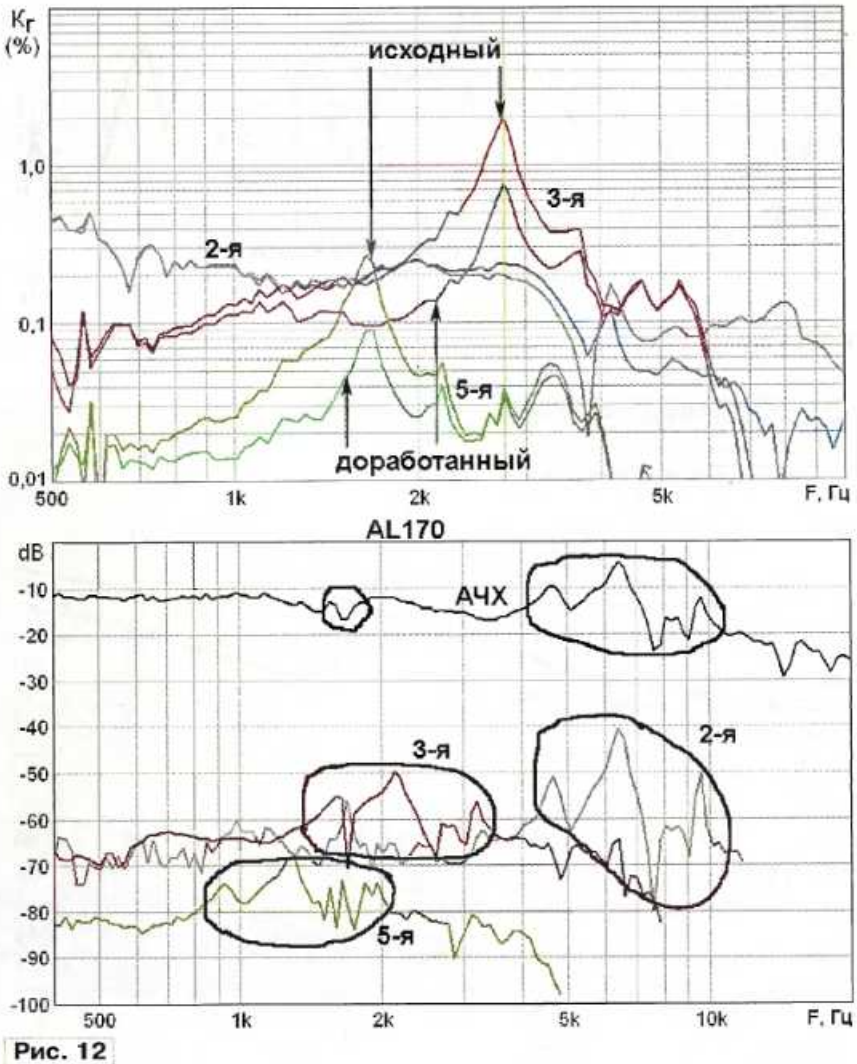

Рис. 12

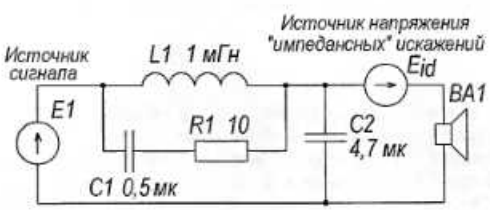

Рис. 13

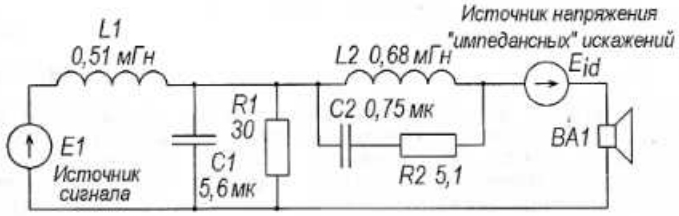

Рис. 14

фильтр (L2C2R2) были разделены, что позволило существенно увеличить выходное сопротивление кроссовера в области выброса АЧХ головки на частотах 3...8 кГц и тем самым значительно снизить пиковые уровни третьей и пятой гармоник акустических нелинейных искажений в рабочей полосе звена. Однако, в отличие от ранее рассмотренного примера, в данном случае снижение оказалось не бесплатным. В результате переработки кроссовера третья гармоника искажений в области частот 500...850 Гц выросла. Произошло это, как следует из графиков на рис. 15,б, из-за снижения значения $Z_{вд}$ в интервале 1,5...2,5 кГц. В целом же ситуация всё-таки значительно улучшилась. Если не придираться к очень узкому "пичку" искажений неизвестного происхождения в районе частоты 1,7 кГц, то можно сказать, что головка с простым мотором (AL170) продемонстрировала заметно большую "отзывчивость" к увеличению выходного сопротивления источника сигнала в плане снижения искажений, чем более сложная головка от SEAS.

Окончание.
Начало см. в "Радио", 2013, № 6, 7

тел. 608-83-05
Приём статей: mail@radio.ru
Вопросы: consult@radio.ru

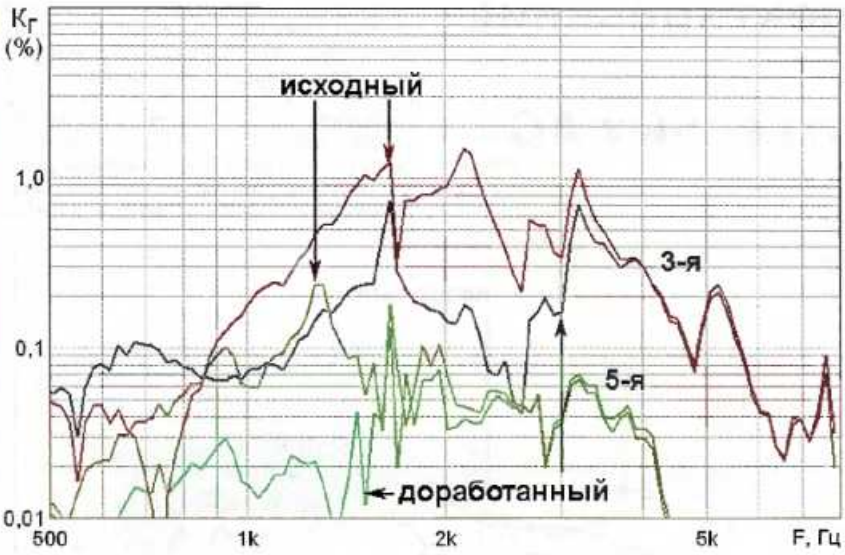

Рис. 15,а

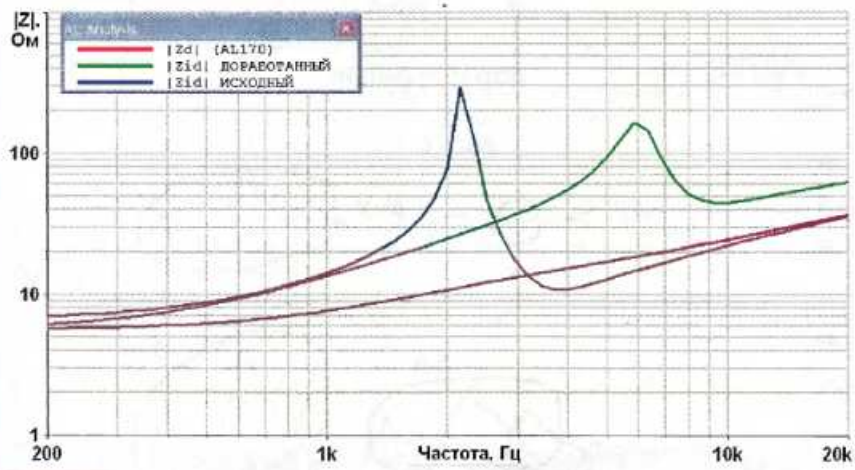

Рис. 15,б

1,5...2 кГц и выше, например, фильтров НЧ второго порядка или режекторных фильтров, включаемых параллельно головке.

Рассмотрим ещё одну схему НЧ—СЧ звена двухполосной АС, также предназначенной для самостоятельного изготовления [10]. Проект называется "Bifrost". Он разработан специалистами норвежской компании SEAS. В НЧ—СЧ звене используется упоминавшаяся ранее головка W18NX001. Это одна из относительно недавних разработок компании. От W15CY001 её отличает более качественный мотор с меньшими ИНИ в рабочей полосе (см. рис. 4,а и 7) и менее выраженные выбросы на АЧХ за её пределами. Сочетание этих факторов позволяет рассчитывать на меньший уровень акустических искажений на средних частотах. Правда, это не относится ко второй гармонике искажений, где из-за более высокого уровня ДИ применённая в W18NX001 "бумага" вполне ожидаемо значительно проигрывает магниевому сплаву диффузора W15CY001 (см. вторую гармонику на рис. 7).

К достоинствам проекта "Bifrost" следует отнести разумно спроектированный кроссовер, НЧ—СЧ звено которого выполнено по схеме фильтра НЧ не второго, а третьего порядка (**рис. 16**,а). Дополнительный дроссель увеличил выходное сопротивление кроссовера на высоких частотах и снизил излучение головкой ИНИ. Возможно, именно поэтому в описании проекта разработчики не постеснялись привести результаты измерений нелинейных искажений этой АС. Они действительно значительно ниже, чем в рассмотренных выше проектах.

Применение в кроссовере НЧ—СЧ звена АС дросселя, включаемого последовательно с головкой, представляется довольно перспективной идеей. Действительно, ИНИ на средних частотах обычно монотонно увеличиваются с ростом частоты (см. рис. 3), что объясняется увеличением вклада нелиней-

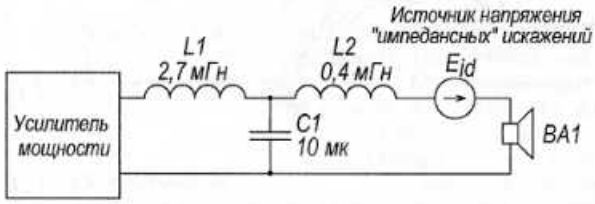

Рис. 16,а

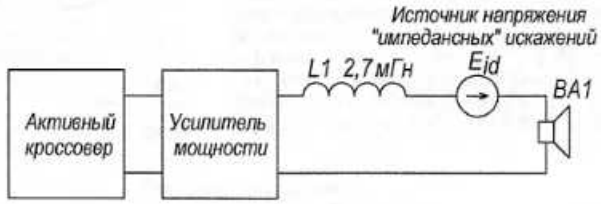

Рис. 16,б

Применённый в доработанном варианте кроссовера режекторный RLC-фильтр может быть рекомендован как достаточно универсальное решение для подавления выбросов акустических искажений, вызванных высоким уровнем ИНИ в сочетании с выбросами на АЧХ головок. Приведённые примеры показывают, что для снижения излучения ИНИ необходимо увеличивать выходное сопротивление кроссовера не только в рабочей полосе НЧ—СЧ звена, а, что часто ещё важнее, за её пределами — в частотной области, где лежат гармоники ИНИ, вплоть до естественного спада отдачи головки. Если этого не сделать, то головка будет излучать гармоники ИНИ, в том числе и высоких порядков, что негативно скажется на качестве звука. Особенно строго надо следовать этому правилу в случае, если на АЧХ головки имеются участки повышенной отдачи, пусть даже и находящиеся за пределами рабочей полосы, в которой используется головка в конкретном проекте АС. Для таких головок крайне нежелательно применение в кроссовере всех типов фильтров, имеющих низкое выходное сопротивление на частотах ной индуктивности в общий импеданс головки. Добавление внешнего линейного дросселя с индуктивностью, сопоставимой с индуктивностью головки, и включённого последовательно с ней, позволяет ограничить рост нелинейного вклада в импеданс и стабилизировать уровень ИНИ. Если же индуктивность дополнительного дросселя выбрать существенно больше, чем индуктивность головки, то с ростом частоты нелинейность импеданса системы головка—дроссель будет снижаться, а следовательно, станет снижаться и уровень ИНИ.

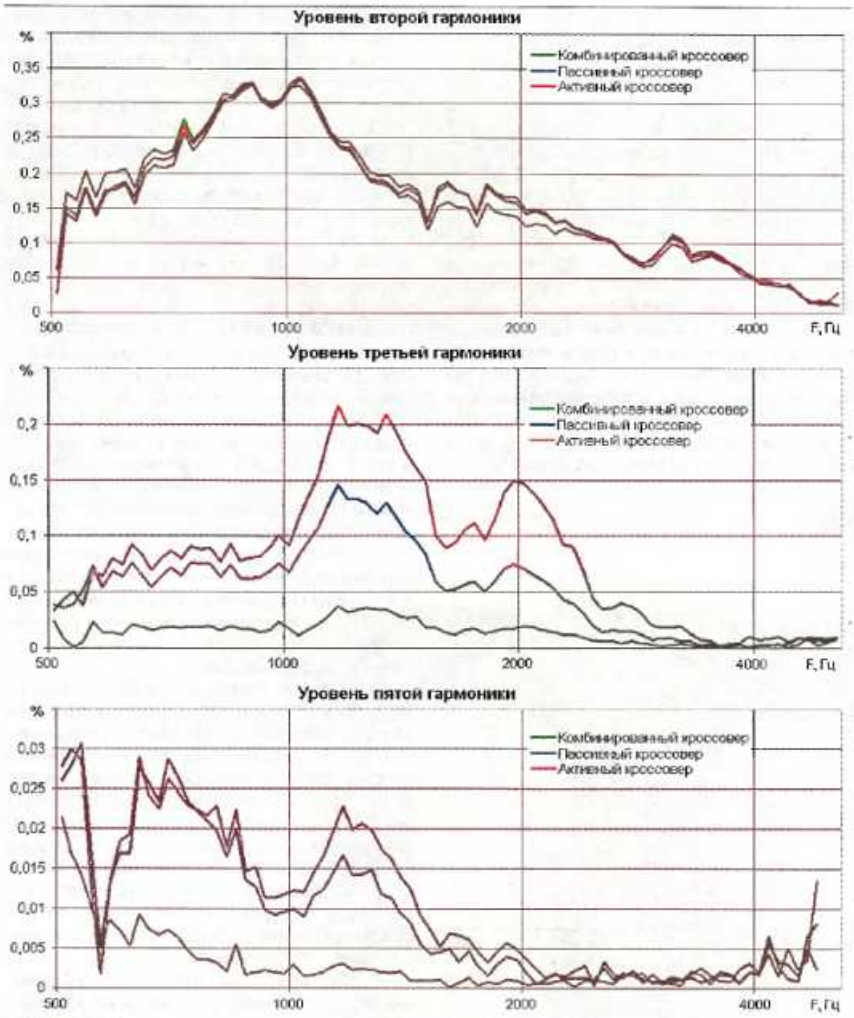

Рис. 17

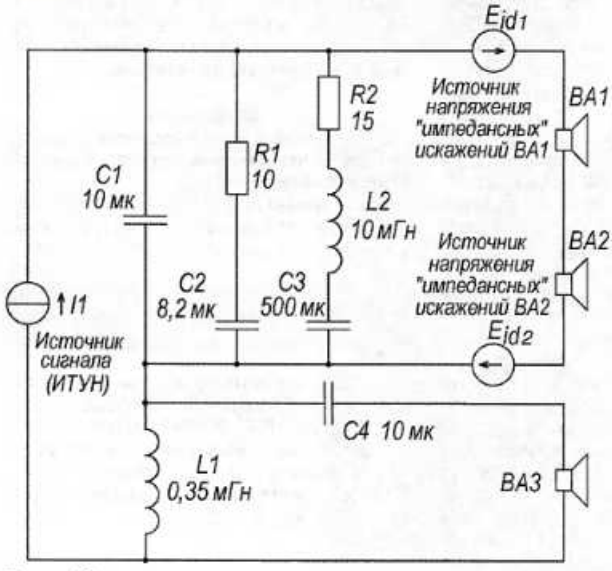

Рис. 18

В третьем примере поставим задачу шире: оценим уровень искажений трёх разных вариантов НЧ—СЧ звена на головке W18NX001 с полностью идентичными АЧХ, но принципиально различными реализациями кроссовера. АЧХ всех трёх вариантов соответствуют АЧХ проекта "Bifrost", а реализации кроссоверов следующие.

1. Пассивный кроссовер проекта "Bifrost".

2. Активный кроссовер на входе усилителя мощности, головка соединена непосредственно с выходом усилителя.

3. Комбинированный кроссовер: активный кроссовер на входе усилителя мощности и дроссель 2,7 мГн на выходе усилителя (рис. 16,б).

На **рис. 17** показаны полученные уровни гармоник акустических искажений при напряжении 2.8 В (эфф.) (напряжение измерялось на частоте 1 кГц на выводах головки).

Головка W18NX001 имеет качественный мотор и мягкий диффузор, поэтому во второй гармонике искажений на средних частотах доминируют "диффузорные", а не "импедансные" составляющие. В результате уровень этой гармоники зависит только от частоты среза фильтра НЧ—СЧ звена и не зависит от его схемной реализации. У третьей и пятой гармоник ситуация принципиально иная. Они, как и положено у головок с "мягким" диффузором, определяются исключительно ИНИ, поэтому исполнение кроссовера влияет на их уровень радикальным образом. Как и следовало ожидать, наихудший результат даёт вариант с чисто активным кроссовером. Пассивный кроссовер "Bifrost" даёт заметный выигрыш по сравнению с активным вариантом, но индуктивность дросселя (0,4 мГн), последовательно включённого с головкой, недостаточна, чтобы полностью подавить эффект роста искажений с учётом усиления гармоник выбросом на АЧХ головки в интервале 3...4 кГц. А вот дроссель 2,7 мГн комбинированного варианта кроссовера достаточно эффективно решил проблему подавления ИНИ.

Вывод очевиден: если есть желание и возможность применить многополосное усиление, то чисто активный вариант кроссовера выглядит менее предпочтительным решением, чем комбинированный вариант с дополнительным дросселем на выходе. Совсем неудачным решением будет использование активного варианта кроссовера в СЧ или НЧ—СЧ звене АС с головками, имеющими жёсткие диффузоры из металла или керамики — звук будет сильно окрашен ИНИ. С такими головками активный кроссовер можно рекомендовать только при замене традиционного усилителя мощности на ИТУН. Но и в этом случае положительный результат не гарантирован, если частота раздела полос слишком завышена, как, например, в рассмотренном выше проекте Гравесена.

Что касается комбинированного кроссовера с дросселем на выходе, то это решение, довольно эффективное в борьбе с нелинейностью импеданса (для большинства головок его будет вполне достаточно), всё же является компромиссным. При выборе индуктивности не следует забывать, что чем она выше, тем больший запас по выходному напряжению потребуется от усилителя мощности, чтобы компенсировать его падение на дросселе.

Для тех же, кто в достижении наивысших параметров привык "патронов не жалеть", всегда остаётся вариант с ИТУН, например, в версии, предложенной А. П. Сырицо в [11]. На 11-й выставке "Российский Hi-End" можно было вживую послушать впечатляющую реализацию этой идеи. И средние частоты, воспроизводимые головкой ScanSpeak, запитанной от описанного в [11] усилителя, были, пожалуй, самыми точными и прозрачными среди представленных на выставке АС. Разумеется, без сравнительного прослушивания утверждать, что это исключительная заслуга оригинальной версии ИТУН, было бы опрометчиво, поскольку использованная в

системе головка в силу конструктивных особенностей мотора и сама по себе имеет очень линейный импеданс. И тем не менее...

Теперь вернёмся к статье С. Д. Батя о согласовании одного ИТУН с многополосной АС и рассмотрим предложенный в ней вариант схемной реализации кроссовера (**рис. 18**), который должен был бы обеспечить снижение акустических искажений "импедансного" происхождения у НЧ—СЧ головок ВА1 и ВА2. На **рис. 19** показана частотная зависимость модуля импеданса Z_{id} в цепи генераторов искажений (E_{id1} и E_{id2}) и суммарного импеданса Z_d двух последовательно включённых головок ASW WG-150 (построен по данным, приведённым в статье). Ввиду отсутствия головок провести сравнительные измерения искажений не удалось, но вид включив её по схеме рис. 2, проверить уровень электрических гармоник с использованием ИНИ. Затем взглянуть на АЧХ головки, лучше измеренную, но можно и паспортную. При более или менее плоской, без выбросов, АЧХ головки во всей рабочей полосе, вплоть до естественного спада отдачи на высоких частотах, можно ожидать, что уровень акустических нелинейных искажений, вызванных ИНИ, не превысит соответствующего уровня электрических (в обоих случаях имеются в виду относительные уровни, выраженные в процентах). Если на АЧХ головки имеются выбросы по отношению к среднему значению в рабочей полосе головки, то при низком выходном сопротивлении источника сигнала (кроссовера) ИНИ создадут выбросы такой же амплитуды на второй, третьей, пятой, седьмой и т. д.

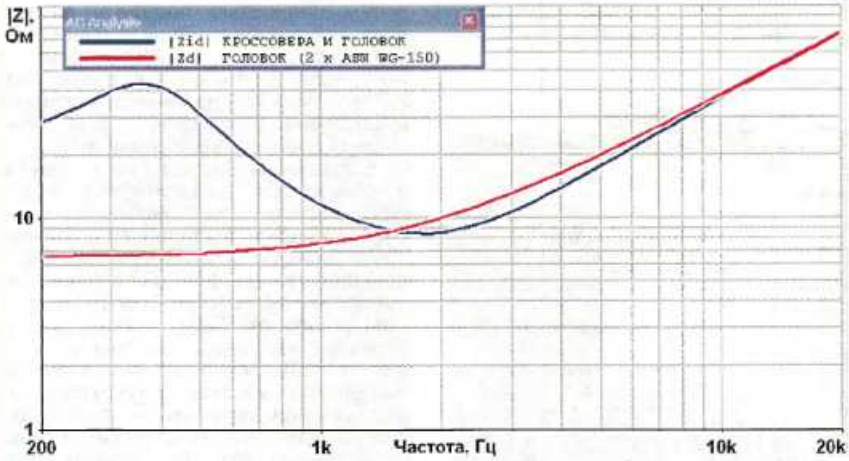

Рис. 19

графика Z_{id} и не даёт никаких оснований рассчитывать на сколько-нибудь заметный положительный эффект. Сгенерированные нелинейными индуктивностями головок гармоники ИНИ с частотами выше 1... 2 кГц благодаря конденсатору С1 будут практически без потерь преобразовываться в ток через звуковую катушку, а затем — в звуковое давление.

Предложенная реализация кроссовера, несмотря на питание АС от ИТУН, не сможет эффективно подавить акустические искажения головок НЧ—СЧ звена, обусловленные ИНИ, поскольку не обеспечивает высокое выходное сопротивление в верхней части средних и на высоких частотах, где локализуется львиная доля гармоник "импедансных" искажений.

Когда же нужно, а когда не обязательно применять кроссоверы с высоким выходным сопротивлением? Даже среди головок с металлическими диффузорами встречаются относительно беспроблемные. Из протестированных автором таковыми можно считать головки компании VISATON AL130 (см. рис. 4,в) и Ti100, имеющие очень низкий уровень ИНИ. Среди "мягких" головок прекрасные параметры по ИНИ показал PEERLESS 830883 (см. рис. 3,в).

Но всё же лучше не полагаться на чужие измерения, а взять головку и, гармониках акустических искажений, но со смещением вниз по частоте в число раз, соответствующее порядку гармоники. Если полученный такой оценкой прогноз уровня искажений разработчик считает неприемлемым, то для снижения уровня излучения ИНИ имеет смысл применить кроссовер с повышенным выходным сопротивлением.

Проектирование АС — сложный и многофакторный процесс с существенной субъективной составляющей, поэтому сформулировать алгоритм разработки идеального кроссовера АС не стоит даже пытаться. Каждый разработчик по-своему расставляет приоритеты. Одни пытаются получить идеально плоскую АЧХ, другие ставят во главу угла линейность, третьи конструируют только фазокогерентные АС. Тем не менее при разработке кроссовера следует иметь в виду следующее.

1. Различные схемные решения кроссовера при одинаковых АЧХ могут существенно влиять на уровень нелинейных искажений работающих с ним головок. Поэтому при проектировании кроссовера АС необходимо обязательно контролировать нелинейные искажения, иначе можно получить посредственный результат даже при использовании высококачественных головок.

2. Для определения схемотехники кроссовера перед началом его проектирования целесообразно измерить уровень искажений, вызываемых нелинейностью импеданса головки (ИНИ). Это позволит более взвешенно подойти к выбору схемного решения кроссовера.

3. Наибольшие искажения имеют решения с активным кроссовером и непосредственным соединением головки и усилителя мощности с низким выходным сопротивлением.

4. Если головка имеет существенную нелинейность импеданса (большой уровень ИНИ), особенно в сочетании с участками повышенной отдачи на АЧХ (пики на АЧХ), в том числе и за пределами рабочей полосы, то необходимо выбирать схемные решения кроссовера с высоким выходным сопротивлением не только в рабочей полосе частот, но, прежде всего, за её пределами, — вплоть до частот естественного спада АЧХ головки. Для таких головок применение в пассивном кроссовере фильтров НЧ второго порядка или параллельных головке режекторных фильтров крайне нежелательно — это приводит к излучению гармоник искажений третьего и более высоких порядков. В первую очередь это касается головок с жёсткими диффузорами.

5. Вариант комбинированного решения кроссовера: активный фильтр на входе усилителя и дроссель с индуктивностью 1...3 мГн на выходе — простое и эффективное компромиссное решение, позволяющее значительно снизить искажения, вызываемые нелинейностью импеданса головки в диапазоне средних частот, без применения ИТУН. Но тут важно не переусердствовать с выбором индуктивности, иначе потребуется усилитель мощности с большим запасом по напряжению.

В заключение хотелось бы поблагодарить Виталия Пронского и Романа Эрлиха за предоставленные для испытаний динамические головки. Особую признательность автор выражает Игорю Рогову, взявшему на себя труд первого прочтения статьи и давшему ценные советы по её улучшению.

ЛИТЕРАТУРА

10. Bifrost. — <**http://www.seas.no/index.php?option=com_content&view=article&id=181&Itemid=176**>.

11. **Сырицо А.** Особенности использования УМЗЧ—ИТ с динамическими громкоговорителями. — Радио, 2009, № 10, с.13—16.

МОДУЛЬНАЯ РЕКЛАМА
Условия см. в "Радио", 2013, № 7, с. 9

Дистанционные курсы обучения программированию микроконтроллеров AVR, PIC, STM32. Занятия проводятся по электронной почте или с помощью программы Skype.
www.electroniclab.ru/courses.htm
т. +7-912-619-5167

* * *

Двукратное использование порции электричества, прошедшей через нагрузку.
Подробности **scr87@rambler.ru**