

Акустическая метрология

Часть 3

Электроакустические параметры излучателей. Нелинейные искажения

И.А. Алдошина

Как уже было отмечено в ч.1 (см. «Install-Pro», 2001, N5 (13), наличие нелинейных искажений в аудиоаппаратуре (акустических системах, громкоговорителях, звуковых колонках и др.) приводит к появлению новых спектральных составляющих, отсутствовавших в исходном сигнале, что искажает временную структуру излучаемого сигнала. В процессе электро-механоакустического преобразования сигналов, которые имеют место во всех этих преобразователях, происходит нелинейное взаимодействие входного сигнала (приложенного напряжения) с выходным сигналом (звуковым давлением), которое обусловлено многими причинами, например нелинейными колебаниями в гофрированных подвесах и диафрагме громкоговорителей, нелинейными процессами взаимодействия звуковой катушки с магнитным полем, нелинейными процессами в фазоинверторе при больших давлениях и др.

Для оценки нелинейных искажений в аудиоаппаратуре в настоящее время используются различные виды испытательных сигналов: тональные, многотональные, шумовые, импульсные и др.

Наибольшее распространение (в международных и отечественных стандартах IEC 268-5 и ГОСТ 16122-87) получили методы измерения на тональных (синусоидальных) сигналах: при возбуждении акустической системы (громкоговорителя) синусоидальным сигналом в спектре излучаемого сигнала можно выделить следующие виды искажений: гармонические первых порядков nf , где $n=2, 3 \dots$; гармонические высших порядков $n > 4$; субгармонические $- 1/nf$ (рис. 1).

Для их количественной оценки используются следующие коэффициенты.

- Коэффициент гармонических искажений n -порядка: определяется как «отношение, выраженное в процентах (или децибелах) эффективного значения звукового давления n -й гармоники к эффективному значению звукового давления сигнала, содержащего частоту возбуждения и все ее гармоники».

$$K_{r_n} = \frac{P_{r_n}}{P_{эфф}} 100\%,$$

где P_{r_n} – среднеквадратичное значение звукового давления, соответствующее n -гармонической составляющей, обычно ограничиваются записью второй и третьей гармоник $n=2, 3$. Измерения проводятся в заглушенной камере или полупространстве (аналогично измере-

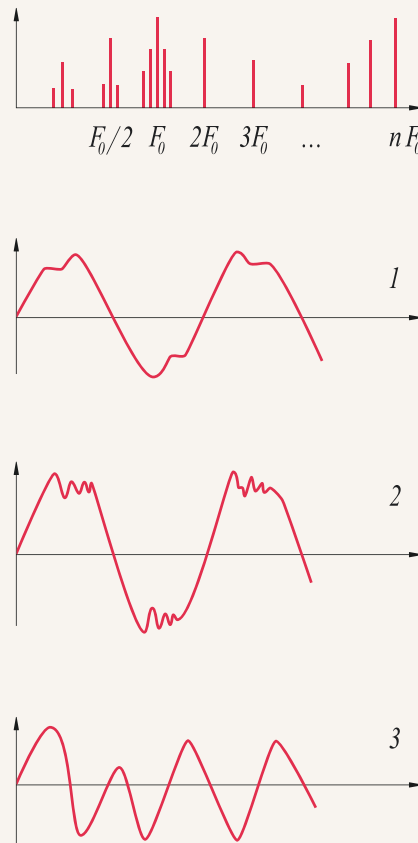


Рис.1. Виды гармонических искажений в частотной и временной области

Примечание. Начало см. «Instal Pro», 2001, N5 (13), 6 (14)

ниям АЧХ, ч.1), на скользящем синусоидальном сигнале с частотой до 5000 Гц или на дискретных частотах (по точкам), при этом с помощью анализатора спектра записывается АЧХ отдельных гармоник, по ним рассчитывается коэффициент K_{r_n} (рис. 2). Значения коэффициента выражаются в процентах, если измерения выполняются на дискретных частотах, или в децибелах, если производится непрерывная запись гармоник. Величина подводимого напряжения, при котором осуществляются измерения нелинейных искажений, не должна превосходить значений соответствующей максимальной синусоидальной мощности (она будет определена дальше).

• Характеристический коэффициент гармонических искажений n -го порядка: «отношение, выраженное в процентах (или децибелах) эффективного значения звукового давления n -й гармоники к среднему значению звукового давления, сигнала в заданном диапазоне частот»:

$$K'_{r_n} = \frac{p_{fn}}{p_{cp}} 100\%,$$

где p_{fn} – среднеквадратичное значение звукового давления соответствующее n -гармонической составляющей, p_{cp} – среднее значение звукового давления. Измерения проводятся аналогичным методом, только p_{cp} измеряется на сигнале, представляющем собой 1/3-октавные полосы розового шума, при этом мощность сигнала в каждой частотной полосе должна быть равна мощности сигнала, на котором измерялось давление гармоник.

• Полный коэффициент гармонических искажений (total harmonic distortion – THD) может определяться как сумма коэффициентов n -порядка:

$$K_r = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} K_{r_n}^2},$$

или непосредственно из измерений давлений разных гармоник.

Он может выражаться в процентах или децибелах:

$$L = 20 \lg \frac{K_r}{100} \text{ дБ.}$$

Аналогично определяется полный характеристический коэффициент K'_r , только используются коэффициенты K'_{r_n} .

Хотя стандарт IEC 268-5 не ограничивает номер измеряемых гармоник, на практике и при оценке полного

коэффициента (THD) используются измерения низших (второй и третьей) гармоник. В отечественном ГОСТ 168122-87 предложен метод измерения коэффициента дребезжания, который определяется уровнем высших гармоник $n > 8-10$ и может служить критерием различных механических дефектов в акустических системах, однако в международные документы он не был принят.

В спектре выходного сигнала акустических систем и громкоговорителей при возбуждении их тональным сигналом могут появляться и половинные гармоники с частотами f_0/n -субгармоники (см. рис. 1). Причиной их появления служит особый вид нелинейности, обусловленный потерей «динамической устойчивости» при колебаниях диафрагм громкоговорителей. Это чаще всего происходит, когда частота возбуждающего сигнала находится в области удвоенной частоты основного резонанса поперечных колебаний диафрагмы, при этом при больших значениях сигнала в ней могут возникнуть достаточно интенсивные колебания с половинными частотами. На слух такие колебания воспринимаются как дополнительные призывы в звучании, измерения показали, что они появляются у достаточно большого количества громкоговорителей. В ГОСТ 16122-87 был предложен метод измерения этих видов нелинейности, однако широкого распространения он также не получил.

В соответствии с требованиями IEC 581-7 для АС категории hi-fi полный коэффициент гармонических искажений не должен превышать 2% в диапазоне частот 250 – 1000 Гц и 1% в диапазоне свыше 2000 Гц при уровне звукового давления 90 дБ на расстоянии 1 м. Подавляющее число современных высококачественных акустических систем удовлетворяет этим требованиям.

При необходимости оценивать нелинейные искажения при высоких уровнях входного сигнала (особенно полезно для аппаратуры озвучения) в новом IEC 268-5 предлагается использовать метод измерения на радиоимпульсах (прямоугольных импульсах с синусоидальным заполнением, рис. 3). Излучатель также устанавливается в заглушенной камере (или полупространстве для головок громкоговорителей), на него подается сигнал с амплитудой напряжения, которое может быть больше, чем напряжение, соответствующее максимальной синусоидальной мощности, но не больше кратковременной максимальной мощности (иногда ее называют музыкальной). Длительность импульса должна быть достаточна, чтобы обеспечить возможность расчета стационарной АЧХ, при этом частота заполнения импульса меняется. После микрофона, установленного на расстоянии 1 м, сигнал вводится в компьютер, где из него выделяется стационарная часть, которая затем повторяется необходи-

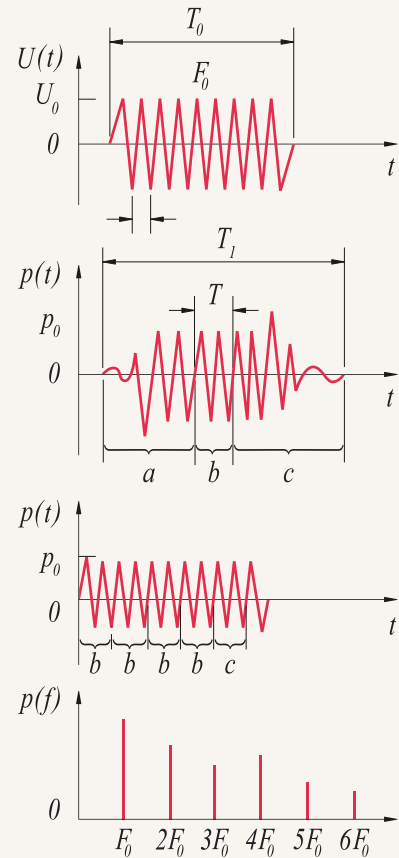


Рис.3. Измерения на радиоимпульсах

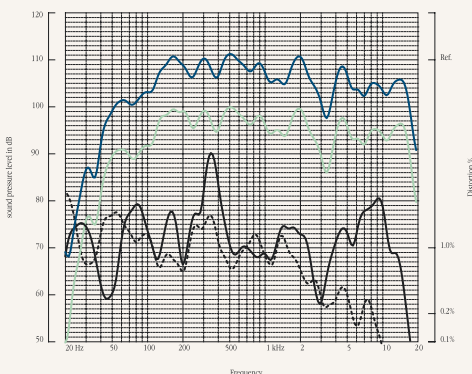


Рис.2. Запись АЧХ и отдельных гармоник

мое число раз. Полученный периодический сигнал используется для расчета с помощью БПФ общей АЧХ, а также АЧХ гармоник и расчета коэффициентов нелинейных искажений (в стандарте рекомендуется использовать при выполнении БПФ окна Ханнинга). Пример расчета амплитуд гармоник для сигнала с заполнением 2000 Гц при мощности 50 Вт для высокочастотного купольного громкоговорителя показан на рис. 4. Меняя частоту заполнения импульса, можно измерить КНИ на любой частоте.

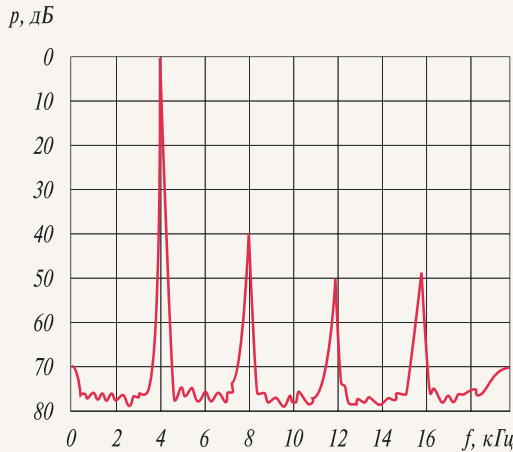


Рис.4. Амплитуды гармоник

Наряду с измерениями гармонических искажений в практике проектирования и оценки АС применяются методы измерений интермодуляционных искажений, обусловленных теми же нелинейными процессами преобразования сигнала в излучателях, но во многих случаях более информативными, поскольку их можно измерять в более широком диапазоне частот, что особенно важно для высокочастотных излучателей. Кроме того, продукты интермодуляционных искажений заметнее на слух (поскольку могут создавать ощущения диссонансов звучания) и потому с их помощью можно точнее определить нелинейные свойства системы.

Методика измерений представлена в ГОСТ 16122-87 и IEC 268-5 и основана на подведении к излучателю двух синусоидальных сигналов с частотами f_1 и f_2 , при этом в выходном спектре излучателя при наличии нелинейности появляются суммарные и разностные боковые составляющие (рис. 5). В соответствии со стандартом «интермодуляционные искажения определяются как отношение арифметической суммы среднеквадратичных значений давлений всех боковых составляющих на частотах $f_2 \pm (n-1)f_1$ к среднеквадратичному значению давления на частоте f_2 . Измерения также проводятся в заглушенной камере, на акустическую систему (или другой излучатель) подаются два сигнала с частотами $f_1 < 1/8 \cdot f_2$ при соотношении амплитуд на частотах $f_2 : f_1$ как 4:1. Обычно оцениваются только коэффициенты интермодуляционных искажений второго и третьего порядков по формуле:

$$K_{IM_n} = \frac{P_{(f_2-nf_1)} + P_{(f_2+nf_1)}}{P_{f_2}} 100\%, \quad \text{где } n=1,2.$$

Характеристический коэффициент интермодуляционных искажений измеряется так же, только вместо значения давления на частоте f_2 используется среднее значение звукового давления в заданном диапазоне частот. Следует отметить, что при таком методе измерений оцениваются боковые составляющие в выходном спектре сигнала, обусловленные как амплитудной, так и частотной модуляцией сигналов в громкоговорителях. Поскольку они вызываются разными причинами, в частности частотная модуляция может обуславливаться эффектом Доплера, то для их раздельной оценки используются дополнительные методы измерения фазовых характеристик.

Наряду с измерением интермодуляционных искажений в стандарты введены методы измерения только разностных искажений, это удобно для оценки высокочастотных громкоговорителей в области высоких частот, что не позволяют сделать вышеперечисленные методы. Для этого на громкоговоритель подаются два тональных сигнала с близкими частотами $f_2 - f_1 = 80$ Гц, при измерениях узкополосным фильтром вырезаются только значения разностных компонент в выходном сигнале и коэффициент разностных искажений определяется по формуле:

$$K_{pi} = \frac{P_{(f_2-f_1)}}{P_{f_1} + P_{f_2}} 100\%.$$

Исследованию субъективных порогов восприятия нелинейных искажений посвящены многочисленные исследования, которые показали, что слуховая система чрезвычайно чувствительна к наличию нелинейных искажений в акустических излучателях (контрольных агрегатах, акустических системах и др.). Обобщая результаты этих работ, можно считать установленным, что для всех видов нелинейных искажений в АС на реальных музыкальных программах субъективные пороги слышимости составляют 1–5%. Для специальных тестовых сигналов пороговые значения могут достигать 0,1%. Заметность гармонических составляющих зависит от их порядка, в частности, заметность гармонических искажений третьего порядка примерно вдвое выше, чем второго; чувствительность к искажениям пятого и других более высоких порядков в 6–10 раз выше, чем второго (поэтому так заметны на слух дребезг и призвуки в акустических системах). Частотная область максимальной чувствительности слуха ко всем видам нелинейных искажений находится в пределах 1–2 кГц, где порог чувствительности составляет 1–2%. При многократном прослушивании восприятие нелинейных искажений обостряется, особенно при прослушивании отдельных музыкальных инструментов. Наличие большого уровня нелинейных искажений в прослушиваемой музыкальной программе приводит к быстрой утомляемости слуховой системы.

Поскольку за последние годы достигнут значительный прогресс в понимании механизмов возникновения различных видов нелинейности в акустических преобразователях и требования к качеству звучания всех видов акустических систем значительно выросли, то используемые в стандартах методы оценки нели-

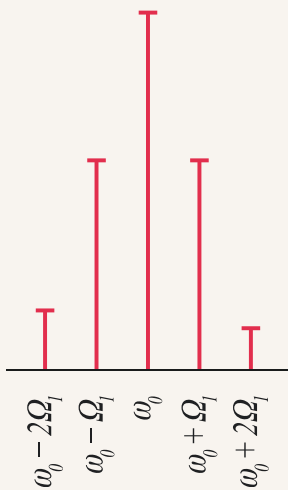


Рис.5. Интермодуляционные искажения

нейных искажений оказались явно недостаточными, поскольку они не обеспечивают четкой корреляции с субъективно оцениваемым качеством звучания. Часто оказывается, что измерения коэффициентов гармонических искажений и интермодуляционных искажений дают приемлемые значения (1 – 2%), а слуховая оценка этой аппаратуры на реальной музыкальной программе бывает очень низкой, потому что музыкальный сигнал – это сигнал многокомпонентный и при воздействии на нелинейную систему он создает много продуктов нелинейных искажений как гармонических, так и комбинационных, в том числе и высоких порядков, которые не улавливаются с помощью принятых методов измерения, но к которым слух очень чувствителен. Поэтому поиски новых методов измерения нелинейных искажений, более адекватных слуховому восприятию, активно продолжаются.

На последних конгрессах AES были представлены доклады, посвященные этим вопросам. На 111 конгрессе в Нью-Йорке в декабре 2001 г. работала специальная группа Комитета Стандартов SC-04-03-C, где детально обсуждались современные методы измерения нелинейных искажений, в ближайшее время предлагается разработка нового стандарта. Анализ предлагаемых новых методов измерения нелинейных искажений, представленный в обзорном докладе А. Войвилло (фирма Servin-Vega, в прошлом мой коллега по работе в ИРПА, С-Пб.), позволяет выделить основные из них: измерения гармонических и интермодуляционных искажений на многократных сигналах, на импульсных сигналах, оценка функций когерентности между входным и выходным сигналами, оценка нелинейности с помощью рядов Вольтерра, а также такие современные методы идентификации нелинейных систем, как теория нейронных сетей и NARMAX.

Применение многократных сигналов представляет собой более информативный инструмент для оценки как гармонических, так и интермодуляционных искажений всех порядков одновременно, что очень важно для оценки реальных акустических излучателей, так как продукты интермодуляционных искажений значительно преобладают в общем выходном сигнале над продуктами гармонических искажений, особенно при больших порядках нелинейности (например, если нелинейное взаимодействие между входным и выходным сигналами можно представить в виде полинома пятого порядка, то уровень продуктов интермодуляционных искажений типа $2f_1 \pm f_2$ будет на 34 дБ выше, чем амплитуды пятой гармоники).

Многократный сигнал представляет собой сумму синусоидальных компонент следующего вида:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i),$$

распределение частот в нем подчиняется логарифмическому закону, распределение фаз подбирается из условия минимизации пик-фактора (отношения максимального значения сигнала к среднему). Общий вид спектра и осциллограмма такого сигнала показаны на рис. 6. Применение такого сигнала к нелинейному устройству вызывает в выходном сигнале образование

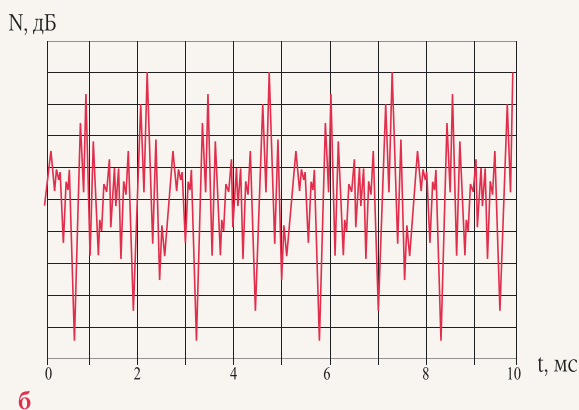
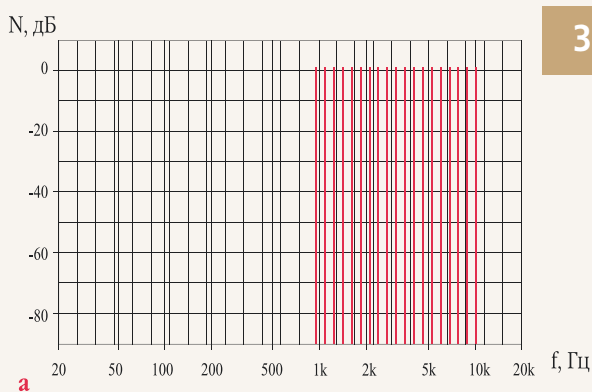


Рис. 6. Многократный сигнал:
а) спектр;
б) волновая форма

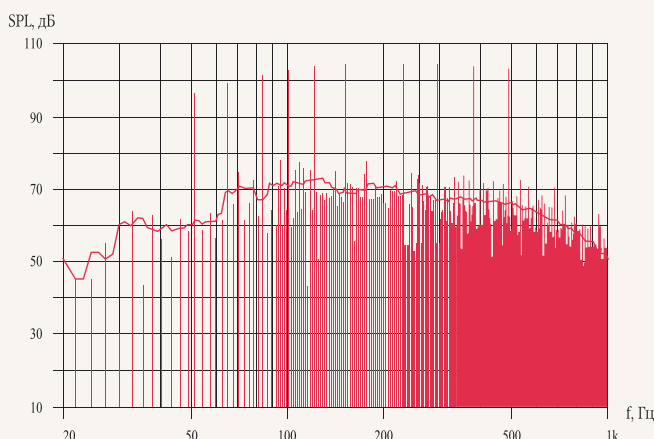


Рис. 7. Продукты искажений многократного сигнала

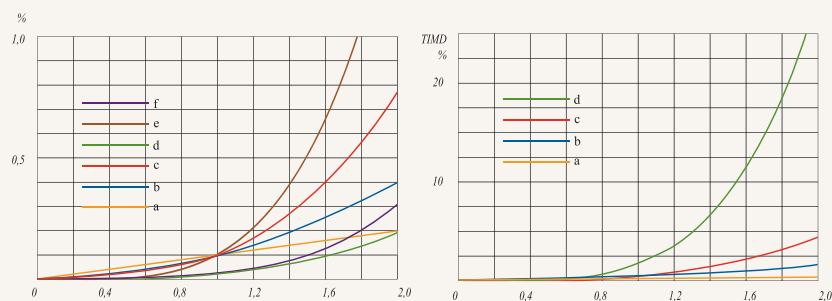


Рис. 8. Отдельные виды искажений, полученные с помощью многократного сигнала

продуктов гармонических и интермодуляционных искажений (рис. 7), которые с помощью последующей процессорной обработки могут быть разделены и оценены отдельно. Пример общих гармонических и интермодуляционных искажений показан на рис. 8.

Метод измерения с помощью многотонавого сигнала обладает рядом преимуществ: он достаточно быстрый и дает детальное графическое представление продуктов искажений. Когда используется многотонавый сигнал, то в спектре выходного сигнала присутствует значительно больше продуктов интермодуляционных искажений, чем гармонических (что значительно ближе к реальному воспроизведению музыки и речи). Следует отметить, что несмотря на оптимизацию в многотонавом сигнале получается более высокий пик-фактор по сравнению с шумовым, поэтому этот метод измерений дает более пессимистическую оценку, чем обычно при измерениях на шумовом сигнале, но, возможно, этот запас и полезен при оценке аппаратуры.

Некоторые преимущества имеют и измерения на многотонавом отрезке (вырезанном прямоугольным окном), которые позволяют оценить максимально допустимое значение звукового давления (max SPL). Это значение указывается теперь во всех каталогах на аппаратуру, оно определяется допустимым уровнем общих нелинейных искажений. Применение многотонавого импульса дает возможность оценить все виды искажений в полном диапазоне за одно измерение.

Функция когерентности $\gamma(f_i)$, по определению, выражается как отношение квадрата кроспспектра (взаимного энергетического спектра) между входным и выходным сигналами $G_{xy}(f_i)$, к квадратам автоспектров (энергетических спектров) входного $G_{xx}(f_i)$ и выходного сигналов $G_{yy}(f_i)$:

$$\gamma^2 = \frac{|G_{xy}(f_i)|^2}{G_{xx}(f_i)G_{yy}(f_i)}$$

Если акустический преобразователь строго линейная система, то функция корреляции равна единице. Если входные и выходные сигналы вообще не связаны друг с другом, то функция корреляции равна нулю. Если акустическая система производит нелинейное преобразование входного сигнала или вносит шумы, то функция корреляции имеет значения между нулем и

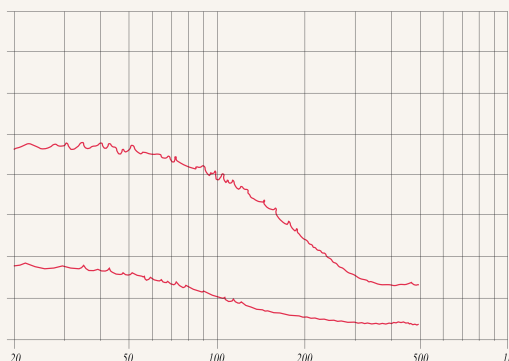


Рис. 9. Зависимость функции корреляции от частоты и уровня сигнала

единицей, т.е. значение функции корреляции дает общее описание всех нелинейных продуктов в выходном сигнале, она характеризует степень «подобия» сигналов. Результаты применения ее для оценки нелинейности в громкоговорителях показаны на рис. 9 (по оси абсцисс отложена величина $I(f_i) = \sqrt{1-\gamma^2(f)}$ 100%). На этом рисунке видна зависимость функции корреляции от частоты и уровня сигнала (нижняя кривая соответствует подводимой мощности, обеспечивающей смещение катушки на 4 мм, верхняя – 10 мм). Удобство применения этого критерия к оценке нелинейных искажений – четкое графическое представление, недостаток – невозможность выделения отдельных продуктов искажений. Возможности применения этого критерия для оценки нелинейных искажений в акустических системах сейчас интенсивно изучаются.

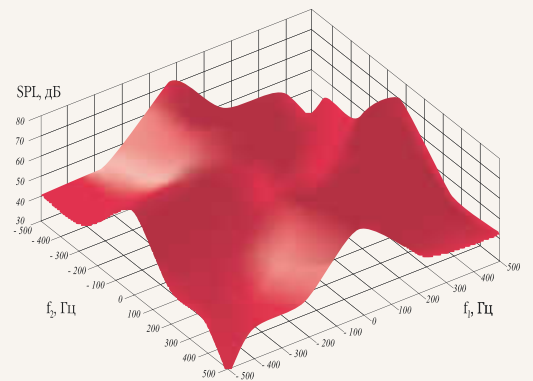


Рис. 10. Искажения, измеренные с помощью рядов Вольтерра

Ряды Вольтерра позволяют представить продукты нелинейных искажений второго и третьего порядков как гармонических, так и интермодуляционных в трехмерном (объемном) виде (рис. 10). Впервые идея использовать ряды Вольтерра для оценки нелинейных искажений в громкоговорителях была предложена в трудах Кайзера, сейчас она развивается многими исследователями. Ряды Вольтерра для нелинейной системы могут быть представлены в следующем виде:

$$y(t) = \int_0^t h_1(\tau_1)x(t-\tau_1)d\tau_1 + \iint_0^t h_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \iiint_0^t h_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3, \text{ где}$$

$h_1(\tau)$ – ядро первого порядка, соответствующее импульсной характеристике линейной системы;
 $h_2(\tau_1, \tau_2)$ – ядро второго порядка, т.е. импульсная характеристика системы с нелинейностью второго порядка и т.д.

Подавая на акустическую систему сигналы типа шумового или многотонавого, можно рассчитать ядра (т.е. импульсные характеристики разных порядков), и,

Семинар

s e m i n a r

З В У К

сделав их спектральный анализ, построить трехмерные (для второго порядка) графики, где точки на пересечении отрицательных и положительных частот соответствуют интермодуляционным компонентам $P_{f_2-f_1}$, а точки на пересечении положительных значений частот дают значения уровней звукового давления компонент $P_{f_1+f_2}$, диагонали, соответствующие равным значениям положительных частот, дают значения гармоник $P_{f_1+f_1}$. Метод это обеспечивает наглядные представления только для нелинейностей малых порядков, уже для третьего порядка требуются четырехмерные поверхности, что ненаглядно. Кроме того, он принципиально применим лишь к малым уровням нелинейности, что не всегда выполняется, особенно в рупорных громкоговорителях. Однако методики измерений акустических систем и громкоговорителей с использованием рядов Вольтерра интенсивно разрабатываются в настоящее время.

Теория нейронных сетей и теория, получившая название NARMAX, представляются сейчас одними из самых перспективных методов идентификации и оценки нелинейных искажений в различных системах, в том числе и акустических. Они активно разрабатываются в разных приложениях. За последние годы появились статьи в журнале «JAES» и доклады на конгрессах AES, но они базируются на достаточно сложном математическом аппарате, и изложение их превосходит возможности данной статьи.

Анализ всех имеющихся методов измерения нелинейных искажений позволяет предположить, что в дальнейшем работы в этом направлении пойдут следующими путями: с помощью одного (или нескольких) из вышеуказанных методов строится нелинейная динамическая компьютерная модель акустической системы, на нее подается реальный музыкальный сигнал, и выходной сигнал с этой модели расщепляется на линейные и нелинейные компоненты, затем нелинейные искажения вводятся в компьютерную модель слухового тракта, учитывающую эффекты маскировки и другие процессы обработки, которые сейчас используются в разработке систем сжатия сигналов, например в стандартах MPEG 3 – 7, потом анализируется, к каким видам искажений слуховая система наиболее чувствительна и каковы их пороги, параллельно оценка продуктов искажений производится с помощью субъективного тестирования, на основе чего и принимаются решения об установлении допустимых норм на акустическую аппаратуру.

Весь этот комплекс работ, несомненно, позволит в ближайшее время перейти на новый уровень оценки нелинейных искажений в акустической аппаратуре, значительно лучше коррелирующих со слуховым восприятием.