

ИННОВАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

Годына В.С., инженер-программист ИООО «Энам Системз» (Минск, Белоруссия),
e-mail: vladimir.godyna@gmail.com;

Перелыгин С.В., к.т.н., доцент кафедры аудиовизуальных систем и технологий
Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, e-mail: sergey.perelygin@gmail.com;
Штейн Б.М., к.т.н., доцент кафедры аудиовизуальных систем и технологий Санкт-Петербургского
государственного института кино и телевидения, e-mail: botos@yandex.ru.

NOVEL APPROACH IN MEASURING IMPULSE RESPONSE AND NONLINEAR DISTORTION

Godina V.S., Perelygin S.V., Stein B.M.

This article reviews a novel method of simultaneous measurement of impulse response and nonlinear distortion, proposed by Pr. A. Farina (University of Parma). The advantages over traditional measurement methods are examined, as well as the wide possibilities for using this method in the practice of measuring the characteristics of audio devices and rooms. In addition, the accuracy of the considered method was estimated.

Key words: impulse response measurement, nonlinear distortion measurement, room acoustics, correlation method, acoustic measurement.

Ключевые слова: измерение импульсной характеристики, измерение нелинейных искажений, акустика помещений, корреляционный метод, акустические измерения.

Введение

В 2000 году профессор Пармского Университета Анджело Фарина [1] предложил оригинальный метод измерения импульсной характеристики с использованием тестового гармонического сигнала с экспоненциально нарастающей частотой [2] (далее ESS – Exponential Sine Sweep), имеющего вид:

$$x(t) = \sin \left[\frac{\omega_1 \cdot T}{\ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

где ω_1 , ω_2 – начальная и конечная круговая частота тестового сигнала (выбирается в соответствии с измеряемым диапазоном частот), T – длительность тестового сигнала.

Взяв производную по времени от аргумента синуса в (1), получим выражение для экспоненциально возрастающей во времени мгновенной частоты ESS-сигнала (рис. 1):

$$f(t) = f_1 \cdot e^{\frac{t}{T} \ln \frac{f_2}{f_1}}, \quad (2)$$

где f_1 , f_2 – начальная и конечная частота тестового сигнала в Герцах.

Отметим, что вследствие нелинейного закона возрастания частоты, амплитудная спектральная плотность такого сигнала неравномерна и имеет спад 3 дБ/окт в сторону высоких частот (рис. 2).

Приведён обзор метода одновременного измерения импульсной характеристики и нелинейных искажений, предложенного профессором А. Фарина (университет Пармы). Рассмотрены преимущества над традиционными методами измерения, а также широкие возможности по использованию данного метода в практике измерения характеристик аудиоустройств и помещений. Оценена точность рассматриваемого метода.

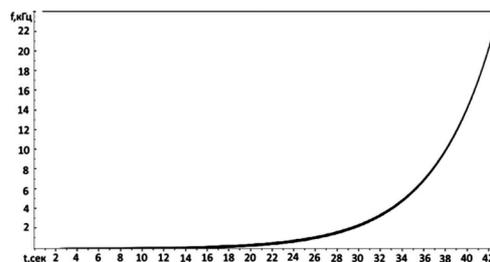


Рис. 1. Временная зависимость мгновенной частоты ESS-сигнала с параметрами: $f_1 = 11,7$ Гц, $f_2 = 24$ кГц, $T = 43$ с

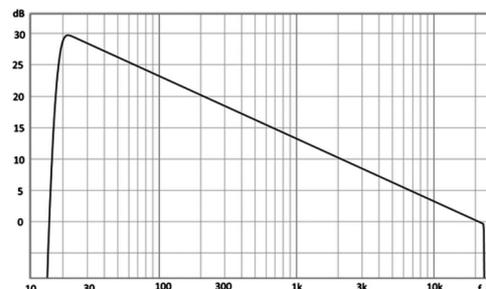


Рис. 2. Теоретическая амплитудная спектральная плотность тестового ESS-сигнала с параметрами: $f_1 = 11,7$ Гц, $f_2 = 24$ кГц, $T = 43$ с

Особенности метода

Измерение импульсной характеристики и нелинейных искажений испытуемого устройства производится следующим образом [2]:

1. Вначале необходимо подать ESS-сигнал на вход испытуемого устройства и записать его выходной сигнал.
2. Далее необходимо произвести операцию свёртки выходного сигнала со специально подготовленным «обратным» ESS-сигналом.

«Обратный» ESS-сигнал образован из исходного ESS-сигнала путём его отражения с конца в начало по временной оси. Так как амплитудные спектральные плотности и исходного, и «обратного» ESS-сигнала имеют *слад* 3 дБ/окт в сторону высоких частот, то амплитудная спектральная плотность свёртки этих двух сигналов будет иметь *слад* 6 дБ/окт в сторону высоких частот. Для компенсации этого наклона отражённый по времени ESS-сигнал необходимо промодулировать так, чтобы его мгновенная амплитуда уменьшалась во времени по экспоненциальному закону, одновременно с экспоненциально убывающей мгновенной частотой. Такой сигнал имеет вид [1]:

$$x^*(t) = \sin \left[\frac{\omega_1 \cdot T}{\ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} \cdot \left(e^{\frac{T-t}{T} \ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} - 1 \right) \right] \cdot e^{\frac{t}{T} \ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} \quad (3)$$

Полученный после свёртки сигнал содержит линейную (основную) импульсную реакцию и импульсные реакции нелинейных искажений испытуемого устройства в виде последовательности импульсных характеристик (ИХ). Расположение импульсных реакций на временной оси иллюстрирует рис. 3 (аббревиатура IR_HD образована от первых букв словосочетаний Impulse Response и Harmonic Distortion). Последняя (правая) из импульсных реакций является линейной импульсной реакцией устройства, ей предшествует во времени импульсная реакция на квадратичную нелинейность устройства, перед ней – реакция на нелинейность 3-го порядка т.д. На практике удаётся зафиксировать нелинейности до 20 порядка.

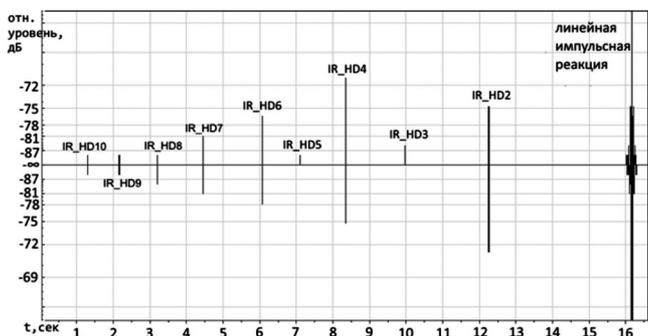


Рис. 3. Пример сигнала, полученного в результате свёртки тестового сигнала с выхода устройства и отражённого во времени, промодулированного ESS-сигнала

Подробное объяснение такого эффекта содержится в [2], [3].

При этом именно ESS-сигнал обладает свойством разделять во времени импульсные реакции нелинейных

искажений от линейной импульсной реакции.

Кроме этого, ESS-метод обладает следующими преимуществами [2], [3]:

Повышенная устойчивость к случайному шуму: гармонический сигнал «сканирует» очень узкий частотный промежуток в каждый интервал времени, что позволяет уменьшить уровень случайного шума в результирующих импульсных реакциях. Чем длиннее ESS-сигнал и, соответственно, чем медленнее возрастает частота, тем заметнее эффект снижения уровня шума.

Простота использования: декодирование сводится к процедурам вычисления быстрого преобразования Фурье, что является очень недорогой и быстрой операцией на современных компьютерах.

Возможность автоматизации процесса измерений: расположение импульсных реакций искажений относительно линейной импульсной реакции на временной оси можно найти по следующему правилу [2]: если частота ESS-сигнала растёт со скоростью 1 октава в секунду, то реакция на нелинейность 2-го порядка будет расположена за 1 секунду до линейной импульсной реакции; реакция на нелинейность 4-го порядка будет расположена за 1 секунду до реакции на нелинейность 2-го порядка и т.д.

Несмотря на очевидные преимущества, ESS-метод имеет и определённые границы применения. Сам автор описываемого метода перечисляет следующие ограничения [3]:

Чувствительность к широкополосным помехам, попадающим в диапазон частот от ω_1 до ω_2 в (1) и (2).

Собственная погрешность метода в частотной области (рис. 4), вызванная тем, что во временной области ESS-сигнал можно считать промодулированным прямоугольным окном. В результате, спектр ESS-сигнала искажается спектром прямоугольного окна (по свойству свёртки спектров). Наибольшая погрешность проявляется на краях диапазона ($\omega_1 \div \omega_2$).

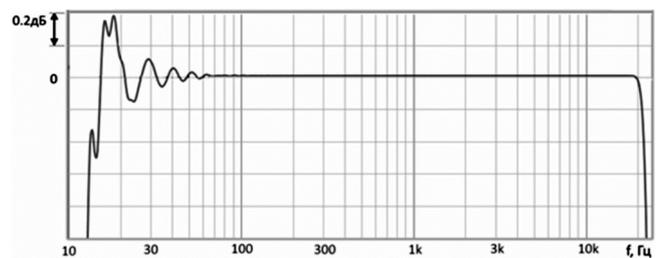
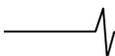


Рис. 4. Собственная погрешность ESS-метода при измерении АЧХ

В работе [4] рассмотрена проблема, связанная с тем, что каждая следующая октава, отсчитываемая относительно начальной частоты ω_1 ESS-сигнала (1), начинается не в нулевой фазе. Этот фактор вносит дополнительную погрешность в измерение гармоник испытуемого устройства. Для решения проблемы в [4] предложен следующий закон изменения ESS-сигнала:

$$x(n) = \sin \left[\frac{\pi \cdot L}{2^P \cdot P \cdot \ln 2} \cdot e^{\frac{n}{N} \cdot P \cdot \ln 2} \right], \quad \frac{\pi \cdot L}{2^P \cdot P \cdot \ln 2} = 2 \cdot \pi \cdot M \quad (4)$$

где P – целое число октав, L – действительное (нецелое) число отсчётов ESS-сигнала, N – округлённое до



целого L , M – положительный целочисленный множитель.

Данная формула описывает ESS-сигнал в дискретном виде. Верхняя частота такого сигнала равна половине частоты дискретизации.

Экспериментальные исследования

Погрешность метода

Был рассчитан и сгенерирован ESS-сигнал по формуле (4) длительностью 43 секунды, диапазоном в 11 октав ($11,7 \div 24000$ Гц) с частотой дискретизации 48 кГц. Для оценки погрешности ESS-метода была произведена свёртка исходного ESS-сигнала с отражённым по времени и промодулированным ESS-сигналом по формуле (3). В результате была получена импульсная реакция идеального линейного всепропускающего безынерционного устройства. На рис. 4 представлена амплитудная спектральная плотность полученной импульсной реакции. По форме она близка к равномерной в диапазоне частот $11,7 \div 24000$ Гц и имеет заметную неравномерность только на краях диапазона. Эту неравномерность можно считать собственной погрешностью ESS-метода при измерении АЧХ. Приемлемым диапазоном измерения частот можно считать $15 \div 21000$ Гц при погрешности, не превышающей 0,4 дБ.

Исследование характеристик громкоговорителя

ESS-метод был также применён при измерении акустических характеристик громкоговорителя. В качестве испытуемого устройства был выбран студийный монитор (электроакустический агрегат со встроенным усилителем) промышленного производства.

Измерение производилось с использованием следующих компонентов:

– Измерительный микрофон RFT MV201 с капсулем МК201 [7].

– Компьютер со звуковой картой – в качестве источника аналогового аудиосигнала, оцифровщика сигнала, полученного с измерительного микрофона, а также устройства для вычисления характеристик испытуемого громкоговорителя.

– Заглушённое студийное помещение объёмом 80 м^3 .

Процедура физической части измерения заключалась в следующем:

– ESS-сигнал воспроизводился с выхода звуковой карты компьютера и подавался на студийный монитор.

– Акустический отклик монитора регистрировался с помощью микрофона, который также был подключён к звуковой карте компьютера.

Записанный сигнал (отклик монитора) обрабатывался программно (осуществлялась его свёртка с отражённым промодулированным ESS-сигналом). В результате был получен сигнал, состоящий из последовательности импульсных реакций (рис. 5).

Линейная импульсная реакция изображена в правой части графика (самая последняя). Импульсные реакции нелинейностей 2-го, 3-го и 5-го порядков находятся на временной отметке 5,4; 3,1 и 0,2 сек соответственно. Паузы между импульсными реакциями содержат шум,

ниже уровня которого данные измерений недействительны.

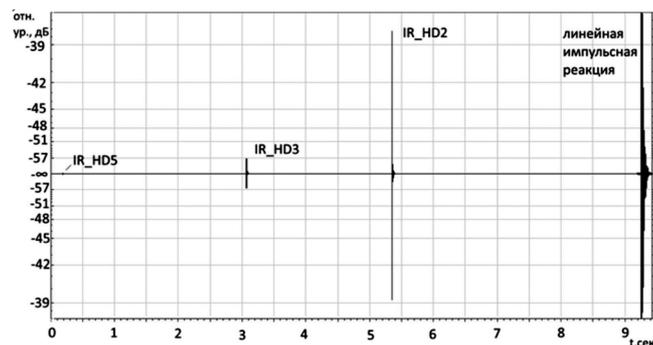


Рис. 5. Временное представление сигнала, вычисленного после свёртки

Далее эти импульсные реакции были разделены и сохранены в виде отдельных сигналов, а затем преобразованы из временной области в спектральную, что дало возможность получить АЧХ и частотные зависимости нелинейных искажений студийного монитора (рис. 6).

Также, удалось оценить нижнюю границу измерения (порог шумов). Выяснилось, что помимо импульсных реакций результат вычисления свёртки (рис.5) содержит также некоторый уровень шума, маскирующий совсем малые импульсные реакции. Для оценки уровня порога шумов был выделен участок такого шума между импульсными реакциями и оценена его спектральная плотность (серый график на рис. 6).



Рис. 6. АЧХ и частотные характеристики нелинейностей 2, 3 и 5-го порядков студийного монитора.

Серый график соответствует порогу шумов измерения

В данном примере приведены измерения АЧХ и частотных зависимостей нелинейных искажений студийного монитора (электроакустического агрегата) в ближнем поле при уровне звукового давления 90 дБ относительно 20 мкПа. Учитывая, что приведённый собственный шум измерительного микрофона Gefell MV201 составляет 22 дБА [7], ожидаемым авторами отношением сигнал/шум должно было стать значение $90 - 22 = 68$ дБ. Но как видно из графика, в диапазоне $300 \div 20000$ Гц отношение сигнал/шум составило более 90 дБ.

Другими примерами применения ESS-метода могут стать измерение АЧХ и нелинейных искажений аудиоустройств (в том числе музыкального оборудования), а также измерение акустических характеристик помещений.

Заключение

Метод, предложенный А. Фарина, открывает возможность производить измерения характеристик электронных и электроакустических устройств, а также акустических свойств помещений с высокой точностью. ESS-метод отличается универсальностью применения, высокой помехоустойчивостью, а также возможностью автоматизировать процесс измерений. Известно, что данный метод уже успешно применяется в программах акустических измерений, таких как CLIO [5] и REW [6].

Дальнейшей работой будет оптимизация исходного ESS-сигнала для уменьшения частотных и временных искажений самого метода.

Литература

1. Персональная страница профессора А. Фарина [Электронный ресурс]. – URL: <http://pcfarina.eng.unipr.it> (дата обращения 10.09.2019).
2. Метод одновременного измерения импульсной характеристики и нелинейных искажений с помощью гармонического сигнала экспоненциально изменяющейся частоты. [Электронный ресурс] – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.33.1614&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 10.09.2019).
3. Достижения в измерении импульсной характеристики с помощью гармонического сигнала экспоненциально изменяющейся частоты. [Электронный ресурс] URL: <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/226-AES122.pdf> (дата обращения 10.09.2019).
4. Реализация метода измерения импульсной характеристики с помощью сигнала экспоненциально качающейся частоты [Электронный ресурс]. URL: https://www.uni-weimar.de/kunst-undgestaltung/wiki/images/ExpoChirpToolbox_a_Pd_implementation_of_ESS_impulse_response_measurement.pdf (дата обращения 10.09.2019).
5. CLIO software. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.audiomatica.com> (дата обращения 10.09.2019).
6. REW software. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roomeqwizard.com> (дата обращения 10.09.2019).
7. Характеристики измерительного капсюля Gefell МК-201. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.microtechgefell.de/mikrofonkapsel?wl=472-MK201#> (дата обращения 10.09.2019).