

# СТОХАСТИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СУБЪЕКТИВНОЕ КАЧЕСТВО ЗВУКОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Чумаков М.И. к.т.н.

Выполнен анализ электроакустического тракта как канала передачи информации. Предложена модель влияния искажений элементов тракта на слуховое восприятие аудио информации.

Оценена степень влияния детерминированных и стохастических нелинейных искажений на субъективное восприятие аудио информации.

Предложена методика измерений и показатель доли стохастических нелинейных искажений усилителей мощности звуковой частоты на основе измерения обратной интермодуляции ОИМ (RIMD).

Представлены и обсуждены результаты измерений и субъективной оценки качества усилителей, спроектированных с учетом обеспечения требований к обратной нелинейности и без такого учета.

Сформулированы количественные критерии соответствия субъективного восприятия и измеряемых параметров стохастической нелинейности электроакустического тракта.

В современном электроакустическом звуковоспроизведении в последние годы отчетливо сформировалась тенденция, которую можно охарактеризовать как кризис доверия. Несмотря на успехи в развитии технологий звуковоспроизведения, которые привели к значительному улучшению технических параметров звукозаписывающего и звуковоспроизводящего оборудования, по-прежнему качество звучания аудиосистем сильно отличается от живого звука. При этом технические характеристики, фигурирующие в спецификациях аппаратуры самого разного уровня, выглядят как братья-близнецы: неравномерность АЧХ и уровни искажений ниже всех нижних пределов заметности, скорости нарастания и коэффициенты демпфирования в десятки раз больше, чем когда-то рекомендованные стандартами Hi-Fi. А звука нет. В то же время сохраняется популярность ламповой техники, виниловых пластинок, магнитофонной ленты, бумажных широкополосных громкоговорителей, которые, несмотря на удручающие технические параметры, оказываются зачастую субъективно предпочтительнее современных цифровых носителей, высокотехнологичных громкоговорителей и полупроводниковых усилителей.

Вакуум в системе соответствия субъективного качества звуковоспроизведения и технических параметров тракта неуклонно заполняется различного рода измышлениями, выдумками и аллегориями. А что еще остается, если все параметры достигнуты, все эффекты учтены, все схемы придуманы и массово выпускаются в виде готовых микросхем? Несмотря на подобный пессимизм, исследования в области изучения слухового восприятия и субъективной оценки различных видов искажений во всем мире продолжают.

В настоящее время существует ряд методик и моделей, ориентированных на объяснение особенностей аудиовосприятия [1,2,6]. Эти модели объясняют статистическую восприимчивость к конкретным видам линейных и нелинейных искажений. Однако, уровень искажений, которыми оперируют эти модели - единицы процентов. В то же время, большое количество профессионалов, работающих со звуком, и аудиоэнтузиастов давно уже предъявляют гораздо более жесткие требования к электроакустическому тракту в части заметности искажений, которое выражается в субъективных предпочтениях в выборе оборудования. При этом существует не имеющий исчерпывающего объяснения интересный парадокс: уровни искажений высококлассных акустических систем имеют порядок единиц процентов на низких частотах и 0,1-1% на средних и высоких частотах. Уровень искажений усилителей подобного класса – 0,005-0,03% и при этом искажения усилителей слышны – по крайней мере, замена усилителя в тракте субъективно отчетливо

различима. Попытки объяснить это явление разными авторами и с использованием разных подходов – от разного спектрального состава гармоник, до эзотерического различия пассивной и активной сущности этих элементов не удовлетворили моего любопытства.

Отмеченные несоответствия обусловили проведение собственных исследований по выявлению новых факторов и взаимосвязей, обеспечивающих большую адекватность субъективного восприятия звучания и результатов объективных измерений технических параметров электроакустического тракта. Для решения этой задачи был использован аппарат теории информации и приема сигналов, позволивший рассмотреть проблему с достаточно общих позиций.

Задача звуковоспроизводящего тракта – максимально без потерь передать информацию с носителя с преобразованием ее в акустическую волну. Электрический сигнал в электроакустическом тракте можно считать эквивалентом звуковой волны, поступающей к слушателю от акустической системы. Этот эквивалент может существовать как в виде цифрового кода, так и в виде аналогового сигнала. Для корректного сравнения процессов, происходящих в разных элементах электроакустического тракта, в дальнейшем будем считать этот сигнал аналоговым и существующим в виде напряжения, тока, звукового давления.

В процесс передачи сигнала по электроакустическому тракту происходит его усиление и преобразование (в акустическую волну), которые в общем случае сопровождаются искажениями, привнесением шума, случайных и регулярных помех. Все эти воздействия оказывают влияние на информацию, содержащуюся в сигнале. Эти преобразования (воздействия) в общем случае могут быть разделены на два класса: детерминированные, которые полностью известны, и случайные (стохастические), у которых известны только статистические характеристики.

### Детерминированные преобразования

Рассмотрим электроакустический тракт как канал передачи, на вход которого поступает одномерная случайная величина  $\xi$  с плотностью распределения  $p_\xi(x)$  [3]. Канал передачи преобразует входные значения  $x$  случайной величины  $\xi$  в значения  $y$  выходной случайной величины  $\eta$ :  $y=g(x)$ . Если  $g(x)$  однозначная дифференцируемая функция, то существует однозначная обратная функция  $x=h(y)$  и случайные величины  $\xi$  и  $\eta$  имеют однозначную детерминированную зависимость. Функция  $g(x)$  в общем случае нелинейная, но, при выполнении указанных условий, плотность вероятности выходной случайной величины  $\eta$ :  $p_\eta(y) = p_\xi(h(y))|h'(y)|$ . Найдем энтропию распределений входной и выходной случайных величин для канала без шума:

$$H_\xi = \int_{-\infty}^{\infty} p_\xi(x) \log p_\xi(x) dx, \quad H_\eta = \int_{-\infty}^{\infty} p_\xi(h(y)) |h'(y)| \log p_\xi(h(y)) |h'(y)| dy$$

Или, после разложения логарифма и замены переменных:

$$H_\eta = H_\xi - \int_{-\infty}^{\infty} p_\xi(x) \log |g'(x)| dx$$

Таким образом, энтропия выходного распределения меньше энтропии входного распределения на среднее значение логарифма производной передаточной функции  $g(x)$ .

Любые два последовательных состояния входной случайной величины  $\xi$  отображаются в такие же последовательные состояния выходной величины  $\eta$ . При этом скорость поступления информации  $H_\xi^1 - H_\xi^0 = H_\eta^1 - H_\eta^0$  и потеря информации в тракте нет.

В работах [3,4] показана справедливость такого вывода для общего случая многомерных сигналов. Условием для отсутствия потерь информации при преобразовании входного сигнала  $X$  в выходной  $Y=G(X)$ , в том числе и нелинейном,

является наличие однозначного обратного преобразования  $H(Y)$ , восстанавливающего входной сигнал  $X=H(G(X))$ .

Таким образом, при однозначном преобразовании входного сигнала в выходной потерь информации в канале без шума не происходит, даже если функция передачи нелинейная. Отсюда следует, что, наличие в электроакустическом тракте детерминированной однозначной дифференцируемой нелинейности не изменяет пропускную способность тракта, но лишь приводит к изменению пространства сигналов так, что каждая точка в этом пространстве смещается, но вполне определенным образом, определяемым функцией передачи.

Важность полученного вывода состоит не в том, что любая детерминированная нелинейность не будет заметна на слух, а в том, что существует *принципиальная* возможность безотносительно к конкретным способам обработки сигнала получить *всю* переданную информацию без потерь.

### Стохастические воздействия

Перейдем к выяснению того, какие искажения электроакустического тракта приводят к потере информации и принципиальной невозможности ее получения в полном объеме.

#### Шум

Так как шум естественным образом возникает во всех элементах электроакустического тракта, рассмотрим тракт как канал передачи информации с шумом. Формула Шеннона для пропускной способности канала с шумом имеет вид [4]:

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N} \right), \quad (1)$$

где:

$C$  – пропускная способность канала бит/с;

$W$  – полоса пропускания канала, Гц;

$P, N$  – средняя мощность сигнала и мощность белого шума в полосе  $W$  соответственно.

Обозначим через  $H_0$  энтропию на выходе приемника в некоторый момент времени. Тогда за последующий интервал времени  $T$  по каналу может быть передано следующее количество информации:

$$H_T - H_0 = CT = 2WT \log_2 \sqrt{1 + \frac{P}{N}}, \quad (2)$$

Учитывая, что размерность пространства сигналов имеет величину  $2WT$ , то средняя информационная емкость одного измерения будет иметь вид

$$I_1 = \frac{H_T - H_0}{2WT} = \log_2 \sqrt{1 + \frac{P}{N}} = \log_2 M \quad (3)$$

где  $H_T$  – энтропия в момент времени  $T$ ,

$M = \sqrt{1 + \frac{P}{N}}$  – величина, определяемая соотношением Хартли как количество

потенциально различимых уровней *амплитуды* сигнала, принимаемого в смеси с шумом.

Важность соотношения (3) состоит в том, что оно определяет верхнюю границу количества различимых уровней при воздействии шума по *одному* измерению, например, напряжению, току, или звуковому давлению.

Если воспользоваться геометрическим представлением [4], то каждый из сигналов длительностью  $T$  представляется точкой в  $2WT$ -мерном пространстве, а совокупность всех таких точек (сигналов) иногда называют *созвездием* сигналов. Процесс выделения информации из принятого по каналу передачи сигнала можно упрощенно представить как

некую многомерную «паутину», которая делит  $2WT$ -мерное пространство на некоторое количество областей ожидаемых значений сигнала.

При этом приемник сигнала «знает» расположение в пространстве истинных (ожидаемых) точек и попадание принятого сигнала в правильную область ожидания «паутины» приемника означает прием без ошибки.

Если же в канале происходит трансформация (искажение) сигнала, то ячейки «паутины» приемника не будут соответствовать искривленному этим искажением созвездию сигналов и возможно ошибочное решение при приеме. Однако если такая трансформация в канале может быть скомпенсирована неким обратным преобразованием (искривлением) приемной «паутины» так, чтобы ее ячейки соответствовали искаженному созвездию сигналов, то ошибок, связанных с искажениями в канале можно избежать, как и было показано выше. То есть наличие такой детерминированной нелинейности не препятствует получению всей информации из принятого сигнала. Аналогичным образом могут быть учтены и компенсированы другие детерминированные составляющие в канале передачи, например, фон, постоянная составляющая.

Если же к сигналу в канале добавляется шум, то принятая сигнальная точка смещается от своего истинного (ожидаемого) значения. Так как направление и величину смещения предсказать невозможно, то шум создает небольшую область неопределенности вокруг «истинной» сигнальной точки. Если из-за влияния шума принимаемый сигнал «попал» не в свою область «паутины» приемника – это ошибка и часть переданной информации теряется. Выражение (3) как раз и определяет количество потенциально различимых областей неопределенности по каждому измерению «паутины» приемника.

Однако непредсказуемое смещение сигнальной точки от своего истинного положения может быть вызвано не только шумом, но и другими процессами в канале передачи (электроакустическом тракте). Подобные случайные воздействия, могут быть сведены к дополнительному эквивалентному шуму.

### **Стохастическая нелинейность**

Рассмотрим, как и в предыдущем случае, электроакустический тракт как канал передачи, на вход которого поступает одномерная случайная величина  $\xi$  с плотностью распределения  $p_{\xi}(x)$ . Канал передачи преобразует входные значения  $x$  случайной величины  $\xi$  в значения  $y$  выходной случайной величины  $\eta$ :  $y=g(x)$ .

Однако, в отличие от предыдущего случая положим, что функция  $g(x)$  не является детерминированной и одной и той же последовательности входных величин  $\xi(t)$  могут соответствовать разные выходные последовательности  $\eta(t)$ , обусловленные флуктуациями  $g(x)$ . Причинами этого могут являться внутренние процессы в тракте либо не зависящие от наличия сигнала, например, паразитная амплитудная модуляция магнитной ленты, либо обусловленные сигналом, например, тепловая модуляция в полупроводниковых приборах. На рис. 1 а) показаны примеры поведения передаточной функции в различные моменты времени  $t_0$  и  $t_1$ , на рис. 1 б) показана область возможных значений в произвольный момент времени. Флуктуации передаточной функции приводят к появлению в выходном сигнале тракта стохастических искажений, которые уже нельзя рассматривать как изменение метрики пространства сигналов в силу случайности изменений  $g(x)$ . Стохастические искажения  $g(x)$  увеличивают область неопределенности вокруг «истинной» сигнальной точки и могут быть интерпретированы как дополнительный случайный шум, воздействующий на приемник информации и снижающий различимость сигналов.

На основании этого можно записать выражение для пропускной способности электроакустического тракта как канала передачи информации:

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_{ш} + N_{СИ}} \right), \quad (4)$$

и, по аналогии с (3):

$$I_1^{\tilde{N}\tilde{E}} = \log_2 \sqrt{1 + \frac{P}{N_{\phi} + N_{\tilde{N}\tilde{E}}}} \quad (5)$$

где  $N_{ш}$  и  $N_{СИ}$  – соответственно мощность шума и мощность продуктов стохастических искажений.

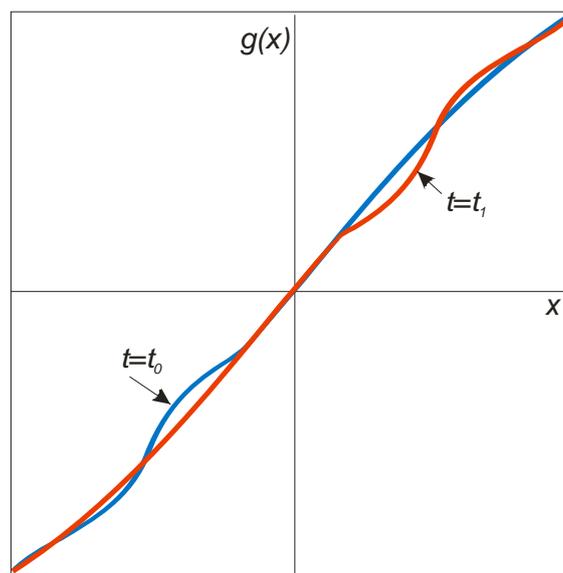
Следует отметить, что продукты детерминированных искажений в указанную формулу не входят, т.к. выражение (4) определяет потенциальную верхнюю границу пропускной способности безотносительно к способам обработки сигналов. Отсюда вытекает важное различие во влиянии детерминированных и стохастических искажений на информационные характеристики электроакустического тракта: продукты стохастических искажений не могут быть компенсированы при приеме информации и приводят к снижению информационной пропускной способности.

Таким образом, наличие в канале передачи информации стохастических составляющих, независимо от природы их возникновения (аддитивный шум, случайные модуляции передаточной функции) снижают пропускную способность канала. Это означает, что если скорость поступления информации от источника будет больше этой пропускной способности, то переданная информация не может быть принята в полном объеме и часть ее будет искажена.

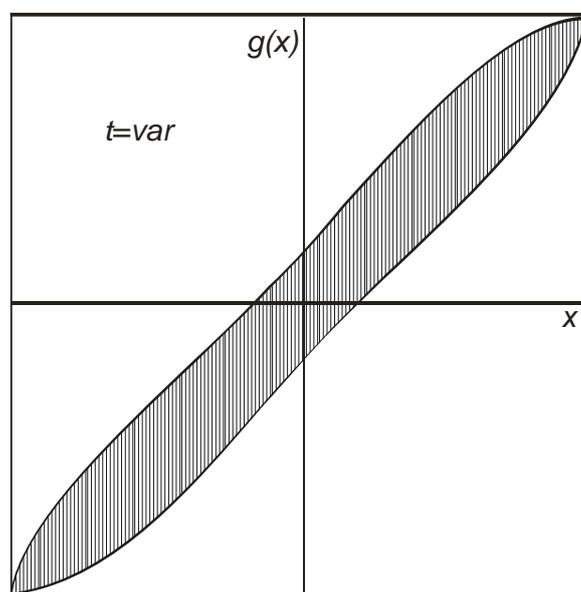
### Обсуждение

Описанные модели влияния различных искажений электроакустического тракта на возможность и качество передачи информации исходят из самых общих положений о том, что любое априорное знание о передаваемом сигнале, способах его преобразования, неидеальности канала и т.д., должным образом применяется и априорно известные характеристики не оказывают влияния на прием информации. Искажения информации потенциально обусловлены только случайными факторами, создающими область неопределенности при принятии решения и приводящие к ошибкам.

Выходным сигналом электроакустического тракта, в конечном счете, является акустическая волна, поступающая к слушателю. Полное устранение искажений этой акустической волны, вызванных различными звеньями тракта невозможно. Однако разделение искажений на два класса: принципиально устранимые детерминированные и



а)



б)

Рис.1

принципиально неустранимые стохастические позволяет по-новому взглянуть на субъективное восприятие искажений.

Слух обладает собственной достаточно большой нелинейностью, достигающей десяти и более процентов общих гармонических искажений [1,6]. Исходя из того, что адаптационные механизмы слуха, развитые в ходе эволюции, ориентированы на различение и восприятие сигналов мозгом с учетом этой собственной нелинейности, можно предположить, что слуховое восприятие уже содержит механизмы, выполняющие преобразование, обратное естественной нелинейности слуха. То есть, то самое обратное преобразование  $H(Y)$ , (или его многомерный аналог) уже выполняется слуховым восприятием человека. Тогда дополнительная детерминированная нелинейность электроакустического тракта также может быть нивелирована адаптацией слуха. По крайней мере, как было показано выше, принципиальных ограничений на возможность такой адаптации нет.

Здесь, видимо, будет уместно вспомнить существенно меньшую заметность гармоник низких порядков (2-й и 3-й) по сравнению с гармониками высоких порядков. Одним из аргументов может быть то, что собственная нелинейность слуха имеет невысокий порядок, вследствие чего адаптация к нелинейности электроакустического тракта схожего порядка происходит значительно эффективнее. Следует подчеркнуть, что речь идет не о маскировании продуктов нелинейности электроакустического тракта продуктами собственной нелинейности слуха, а о практически *полной компенсации* продуктов такой суммарной нелинейности. Некомпенсированные продукты детерминированной нелинейности тракта вносят окраску, обусловленную искривлением сигнального пространства

Стохастические искажения принципиально не могут быть скомпенсированы ни слухом, ни какими-либо техническими приемами. Их наличие приводит к снижению информационной пропускной способности электроакустического тракта. Это означает, что в случае попытки передачи по такому каналу информации со скоростью, большей, чем пропускная способность канала, такая передача является ненадежной [4] и часть ее утрачивается.

Информационная насыщенность музыкальных сигналов различных жанров и его отдельных составляющих (инструментов, партий, голосов) сильно отличаются между собой. В теории передачи информации для оценки потенциальной информативности сигнала используется такое понятие как база сигнала, равная произведению полосы сигнала и его длительности  $B=WT$ . Спектральный анализ звучания различных инструментов и источников показывает, что наибольшей базой (информативностью) обладают шумоподобные сигналы, такие как сибиллянты, ударные (тарелки, щетки), а также переходные процессы (атаки, транзиенты). Наименьшая база у тональных звуков с малым количеством обертонов.

Таким образом, высокоинформативные сигналы, проходя через тракт с ограниченной пропускной способностью в силу наличия стохастических составляющих претерпят большие искажения, нежели низкоинформативные. Поэтому субъективно звучание именно таких сигналов будет ухудшаться в первую очередь.

### **Источники стохастических искажений, способы измерений, критерии заметности**

Для установления степени влияния стохастической нелинейности на субъективное восприятие аудиоинформации, а также определения количественных показателей и требований к электроакустическому тракту, были проведены натурные исследования усилителей мощности звуковой частоты (УМЗЧ). УМЗЧ были выбраны из соображений того, что они являются с одной стороны, одним из высоколинейных компонентов тракта, а с другой, - их влияние на качество субъективного восприятия устойчиво заметно при смене модели, изменении режима и т.п.

УМЗЧ усиливает входной сигнал по напряжению и току, который затем поступает на акустическую систему (АС). АС является электромеханическим преобразователем сигнала от УМЗЧ в акустическую волну. Не вдаваясь в детали электромеханического преобразования, отметим лишь тот факт, что напряжение, подаваемое от УМЗЧ на АС и ток на границе их соединения связаны достаточно сложными зависимостями, имеющими как электрическую, так и механическую природу. Обычно эти зависимости отражают в виде графика полного электрического сопротивления, но следует понимать, что эти зависимости являются усредненными за достаточно большой промежуток времени. Каждая точка такого графика показывает *среднее* соотношение между амплитудами и фазами *гармонических* сигналов. Для реального широкополосного звукового сигнала можно положить, что модуль и фаза электрического сопротивления АС случайно распределены в области между соответствующим минимальным и максимальным значениями.

Рассмотрим схему УМЗЧ (рис. 2), построенного по принципу усилителя напряжения, управляемого напряжением (ИНУН), состоящего из усилителя напряжения  $A_U$  и усилителя тока (повторителя)  $A_I$ . Каждый из этих усилителей имеет собственную нелинейность, которую учтем как некоторое соответствующее напряжение ошибки  $U_{\Delta u}$  и  $U_{\Delta i}$ , добавленное к напряжению идеального элемента. Линейная часть выходного сопротивления повторителя обозначена как  $R_i$ , тогда как  $U_{\Delta i}$  определяет нелинейную зависимость падения напряжения вход-выход повторителя от выходного тока.

Пусть в рассматриваемой схеме усилитель тока идеальный, т.е. обладает бесконечно большим входным и нулевым выходным сопротивлением. С учетом идеальности повторителя положим, что  $U_{\Delta u}$  и  $U_{\Delta i}$  независимы, и искажения напряжения  $U_{\Delta u}$  определяются только значением напряжения и не зависят от выходного тока УМЗЧ, а искажения  $U_{\Delta i}$  определяются только выходным током нагрузки и не зависят от выходного напряжения.

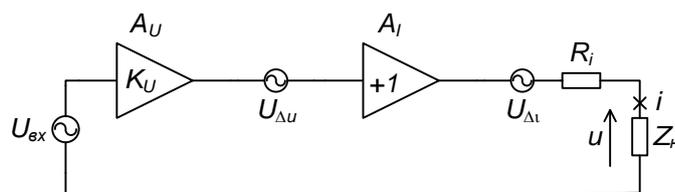


Рис. 2

Тогда суммарные искажения  $U_{\Sigma}(u,i) = U_{\Delta u}(u) + U_{\Delta i}(i)$

При работе УМЗЧ на АС искажения, обусловленные токовой реакцией АС на подводимое напряжение  $U_{\Delta i}(i)$  оказываются слабо коррелированными с искажениями напряжения  $U_{\Delta u}(u)$  из-за неопределенности модуля и фазы сопротивления нагрузки. А так как информационным (первичным) воздействием является подводимое к АС напряжение, то  $U_{\Delta i}(i)$  определяет *стохастическую нелинейность* УМЗЧ как элемента звукового тракта.

Аналогичные рассуждения можно провести для УМЗЧ, построенного по принципу усилителя тока, управляемого напряжением (ИТУН) с соответствующей заменой информационного воздействия и составляющей стохастической нелинейности.

Помимо рассмотренных токовых искажений УМЗЧ можно выделить другие составляющие стохастической нелинейности: тепловые искажения в полупроводниках, джиттер в АЦП/ЦАП, однако их исследование выходит за рамки настоящей статьи.

Для экспериментальной оценки нелинейности тракта широко используются методы, основанные на измерении комбинационных составляющих гармонических сигналов, возникающих при нелинейном усилении – измерение гармонических (ОГИ, ТНД) и интермодуляционных (ИМИ, IMD) искажений. Стандартные методики предполагают подачу на вход устройства гармонических сигналов и анализ комбинационных продуктов нелинейности в спектре выходного сигнала. Однако, для рассматриваемого случая УМЗЧ с резистивной нагрузкой, когда  $i = u/R_n$ , составляющие

суммарных искажений однозначно связаны между собой  $U_{\Sigma}(u) = U_{\Delta u}(u) + U_{\Delta i}(u/R_n)$  и разделить вклад каждой составляющей достаточно сложно.

Для оценки стохастической нелинейности выходного каскада УМЗЧ был применен модифицированный способ измерения ИМИ, суть которого в следующем: (рис.3)

На вход исследуемого УМЗЧ А1 (ИНУН) подается синусоидальный сигнал частотой 6 кГц. Выход усилителя нагружается на эквивалент нагрузки (резистор). Одновременно на выход исследуемого УМЗЧ подается синусоидальный сигнал частотой 60 Гц от вспомогательного (модулирующего) усилителя А2 через фильтр-пробку и токоограничивающий резистор R1. Фильтр-пробка настроен на частоту 6 кГц и служит для исключения влияния неидеальности вспомогательного

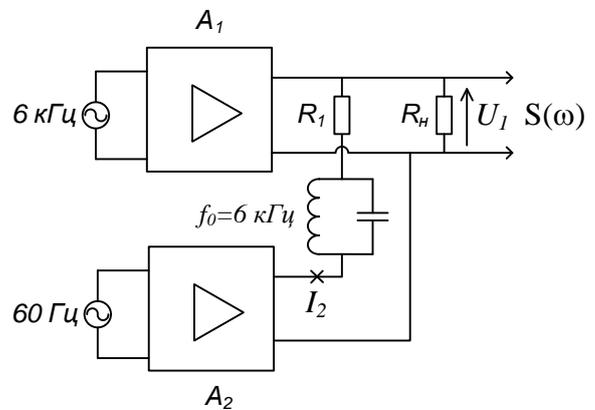


Рис.3.

усилителя. Так как выходное сопротивление исследуемого УМЗЧ (ИНУН) существенно меньше сопротивления нагрузки, то практически весь ток от вспомогательного (модулирующего) усилителя проходит через выходной каскад УМЗЧ, не создавая сколько-нибудь существенного падения напряжения на выходе УМЗЧ и не попадая в нагрузку. Величины испытательных напряжений устанавливаются такими, чтобы токи сигнала 6 кГц через резистор нагрузки и сигнала 60 Гц через токоограничивающий резистор (выходной каскад УМЗЧ) были равны. При этом в спектре выходного сигнала УМЗЧ продукты интермодуляции с частотой 60 Гц будут определяться только составляющей  $U_{\Delta i}(i)$ .

Измеренные таким способом искажения получили название обратных интермодуляционных искажений (ОИМИ, RIMD – Reverse Intermodulation Distortion) по аналогии с известными искажениями радиопередатчиков, измеряемых подобным методом. Величина ОИМИ определяется соответствующим коэффициентом, аналогичным коэффициенту интермодуляционных искажений:

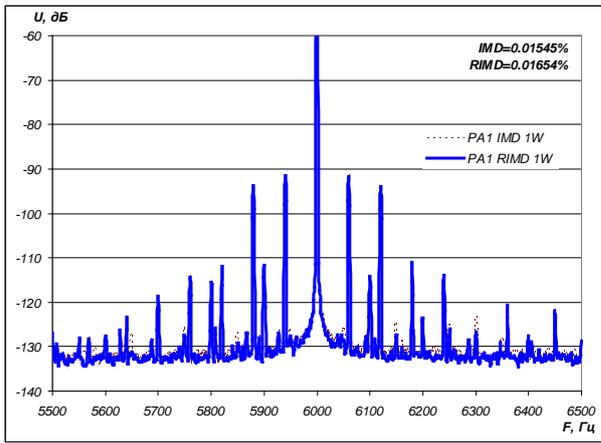
$$K_{i\ddot{i}\ddot{i}} [\%] = 100 \sqrt{\frac{\sum_{n,m=1}^N U_{nm}^2}{U_1^2 + (I_2 R_i)^2}}, \quad (6)$$

где  $U_{nm}$  – амплитуды комбинационных составляющих с частотами  $(nf_1 \pm mf_2)$ ,  $U_1$  и  $I_2$  – соответственно, выходное напряжение исследуемого УМЗЧ с частотой  $f_1$  и ток, создаваемый вспомогательным усилителем с частотой  $f_2$ ,  $R_n$  – сопротивление нагрузки.

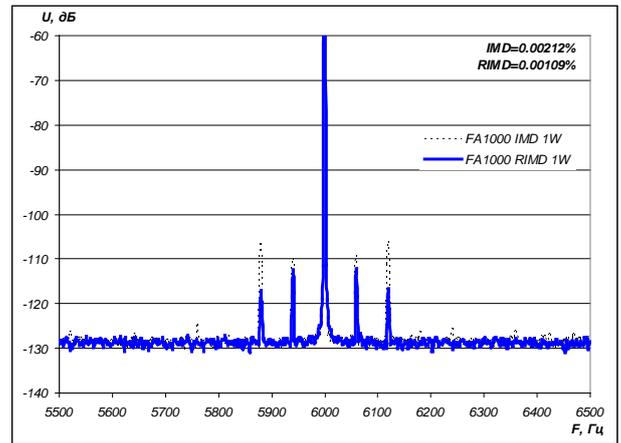
Нетрудно заметить, что выражение для  $K_{ОИМИ}$  совпадает с известным выражением [5] для интермодуляционных искажений, измеряемых путем подачи на вход УМЗЧ двух сигналов с частотами  $f_1$  и  $f_2$  при замене  $I_2 R_n = U_2$ .

Были проведены измерения обратных интермодуляционных искажений двух УМЗЧ, один из которых, условно названный РА1, построен по традиционной схемотехнике и является одним из признанных лидеров среди контрольных студийных усилителей мощности, используемых профессиональными звукорежиссерами. Второй УМЗЧ – Filigrane FA1000, построенный по оригинальной технологии, в которой предусмотрен специальный комплекс мер по линейаризации звукового тракта и подавлению стохастической нелинейности.

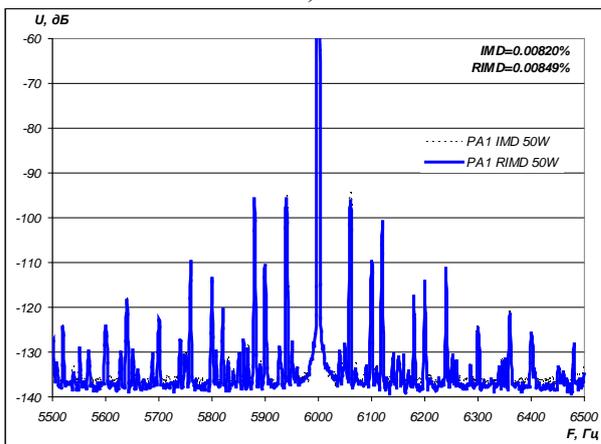
На рис. 4 и 5 приведены спектры и результаты измерений указанных усилителей для двух значений выходной мощности 1 и 50 Ватт.



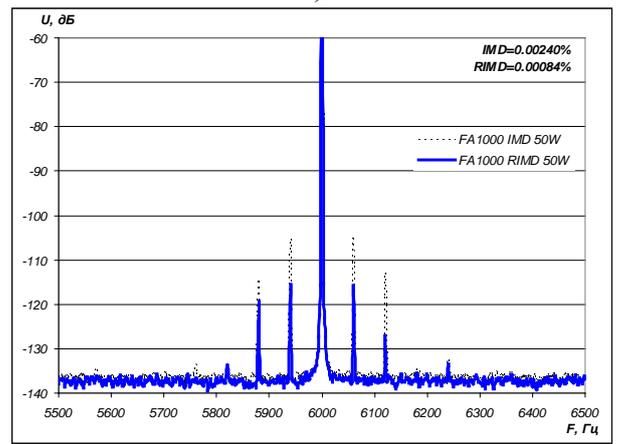
а)



а)



б)



б)

Рис.4.

Рис.5.

Анализ этих рисунков показывает, что для усилителя PA1 характер спектра и количественные показатели ИМИ и ОИМИ практически совпадают. Это позволяет сделать вывод о том, что практически все продукты нелинейности этого являются стохастическими, а вклад детерминированной нелинейности пренебрежимо мал.

Для усилителя Filigrane FA1000 получен коэффициент обратной интермодуляции в 2...3 раза меньше, чем общие интермодуляционные искажения в зависимости от выходной мощности. Здесь необходимо отметить важность не относительных отличий ИМИ и ОИМИ, а именно абсолютный уровень ОИМИ, который у Filigrane FA1000 находится на уровне -100 дБ а у PA1 -76...-82 дБ.

### Результаты субъективной оценки качества звуковоспроизведения.

При сравнение PA1 и FA1000 экспертами было отмечено лучшая детальность и прозрачность звучания FA1000. При этом была особо отмечена сбалансированность подачи атак (транзиентов) и информационно насыщенных звуков (сIBILЯНТОВ, ударных). Отмечено существенно меньшее искажением шипящих усилителем FA1000.

Также был проведен эксперимент по увеличению уровня ОИМИ до величины 0,004...0,005% (разрешение 14 бит в соответствии с (5)). Такое

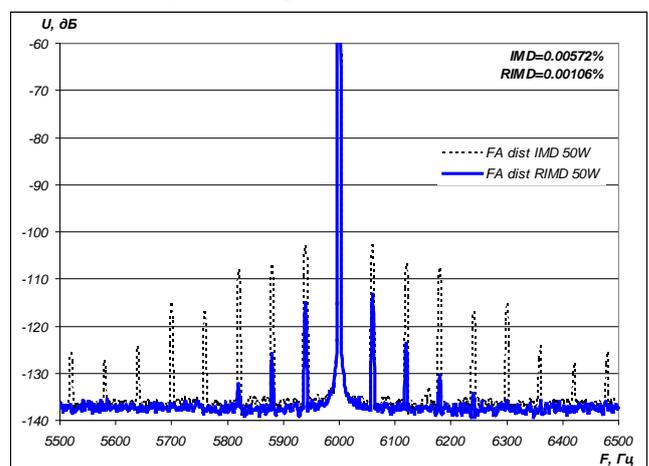


Рис 6.

увеличение было заметным на слух, по сравнению с 0,001-0,002%. (разрешение 15-16 бит) и выразалось в снижении детальности в воспроизведении атак. Дальнейшее снижение ОИМИ ниже 0,0007% на слух не было заметно, что, возможно, связано с ограничениями формата компакт диска, который выступал в качестве источника фонограммы. Исследование заметности введения искусственной нелинейности в усилитель напряжения (т.е. заведомо детерминированной) с уровнем ИМИ до 0,006% при сохранении величины ОИМИ порядка 0,001% (Рис. 6) не было обнаружено экспертами.

## ВЫВОДЫ

1. Раздельное рассмотрение детерминированной и стохастической нелинейности электроакустического тракта позволило установить принципиальные различия в воздействии нелинейности на восприятие акустической информации. Показана принципиальная невозможность адаптации слухового восприятия к стохастической нелинейности в отличие от детерминированной.

2. Показана зависимость характера искажений от информационных показателей сигналов. В наибольшей степени искажаются сибиланты и атаки, обладающие большей информативностью по сравнению с тональными звуками.

3. Раздельное исследование искажений, обусловленных детерминированной и стохастической нелинейностью позволяет объяснить довольно большой класс несоответствий субъективных оценок качества звуковоспроизведения и объективно измеряемых параметров. К таким несоответствиям можно отнести различия в звучании АС и УМЗЧ, различия между усилителями с выходными каскадами в классе А и АВ (В), заметность джиттера в ЦАП при существенно больших искажениях последующих звеньев тракта. Также возможно объяснение других несоответствий, когда существенно меньшая нелинейность одного элемента, но имеющая стохастический характер, оказывается субъективно гораздо заметнее более нелинейного элемента, обладающего детерминированной нелинейностью.

4. Исследован один из основных источников стохастической нелинейности – нелинейность выходного каскада УМЗЧ, работающего на комплексную электромеханическую нагрузку. Для практической оценки стохастической нелинейности УМЗЧ предложен способ, основанный на измерении коэффициента ОИМИ. Показан высокий уровень заметности таких искажений с границей  $K_{ОИМИ}=0,002...0,003\%$ .

## Литература:

1. Алдошина И.А. Субъективная оценка нелинейных искажений// Звукорежиссер.- 2004, №6.
2. Алдошина И.А. Слуховые модели восприятия линейных и нелинейных искажений в музыке и речи// Звукорежиссер.- 2006, №3.
3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника.- М.: Радио и связь, 1982.-624 с.
4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике.- М.: ИЛ, 1963.- 829 с.
5. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: Пер. с нем.-М.: Мир, 1991.-446с.
6. Daniel H. Cheever A new methodology for audio frequency power amplifier testing based on psychoacoustic data that better correlates with sound quality.- Thesis.- University of New Hampshire.- 2001.