

# КРИТЕРИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ УНЧ С УЧЁТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ СЛУХОВОГО ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА

Федосеев Д. С., Шилин Л. Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
220013, П. Бровки, 6, Минск, Республика Беларусь  
E-mail: precisionaudiosystems@gmail.com

*В статье рассмотрены особенности слухового восприятия человека, влияющие на субъективное ощущение качества воспроизведения музыкальных сигналов УНЧ, также рассмотрены некоторые нюансы работы пети отрицательной обратной связи.*

При проектировании устройств звуковоспроизведения для компенсации нелинейностей передаточных характеристик активных элементов и, как следствие, возникающих гармонических и интермодуляционных искажений воспроизводимого сигнала используется классический прием введения различного рода обратных связей. После чего для проверки качества звуковоспроизведения применяется стандартный набор тестов, включающий измерение коэффициента гармонических искажений, коэффициента интермодуляционных искажений, амплитудной, амплитудно-частотной характеристик и некоторых других. К достоинствам этих характеристик следует отнести их повторяемость и техническую обоснованность. Однако, данный метод обладает серьезным недостатком. В нем не учитываются физиологические и психические особенности работы человеческого органа слуха, вследствие чего возникает некое несоответствие применяемого набора тестов, которые должны быть согласованными с особенностями объекта получения информации действительному качеству звуковоспроизведения.

Вопреки распространенному мнению, ухо не является приемником с высокой степенью линейности даже при воздействии звука с весьма низкой интенсивностью из-за психофизиологических особенностей слухового восприятия. Более того, «комбинационные тоны», наподобие обнаруженных Тартини, в действительности начинают восприниматься ухом вблизи порога слышимости, где механические смещения во внутреннем ухе составляют доли ангстрем. Звуковые волны, попадающие в ушную раковину через наружный слуховой проход, подводятся к барабанной перепонке, расположенной на входе среднего уха.

В среднем ухе имеются три маленькие слуховые косточки, которые выполняют функции преобразователя импеданса между воздушной средой наружного уха и жидкостной средой внутреннего уха. В зависимости от индивидуальных анатомических особенностей, таких как площадь барабанной перепонки и площадь основания стремянки, преобразование импеданса со-

ставляет примерно 1:20 и передача акустической мощности через среднее ухо улучшается более чем в пять раз. При высоких интенсивностях звука подвижность косточек понижается вследствие непроизвольного сокращения прикрепленных к ним мышц («акустический рефлекс»), что предохраняет среднее ухо от повреждения из-за перегрузки. При высоких уровнях звука коэффициент передачи среднего уха уменьшается и в его амплитудной характеристике начинает преобладать квадратичный член. Если в наружное ухо при этом поступают два или более тона, то в результате воздействия этой нелинейности появляются комбинационные тоны. Так при поступлении в ухо двух тонов большой интенсивности с частотами  $f_1$  и  $f_2$  можно услышать разностный тон с частотой  $f_2 - f_1$ . Его амплитуда будет увеличиваться пропорционально увеличению амплитуд первичных тонов.

В зависимости от индивидуальных особенностей, можно услышать также суммарный тон  $f_1 + f_2$ , но, как правило, его интенсивность мала вследствие низкочастотного характера передаточной функции среднего уха, ослабляющего частоты выше 1 кГц. Во внутреннем ухе звуковые волны распространяются вдоль тонкой «базиллярной мембраны», резонансная частота которой изменяется на протяжении её длины от 20 кГц до 100 Гц, обеспечивая частотный анализ поступающего сигнала. Именно базиллярная мембрана поддерживает Кортиев орган – орган слухового ощущения. Кортиев орган содержит волосковые клетки, которые преобразуют смещения базиллярной мембраны относительно текториальной мембраны в нервные импульсы. Поскольку комбинационный тон (КТ) с частотой  $2f_1 - f_2$  становится слышимым при уровне звука, близком к порогу слышимости, когда среднее ухо ещё обладает высоколинейными характеристиками, это указывает на тот факт, что КТ возникает во внутреннем ухе. Амплитуда КТ очень сильно зависит от разности частот первичных тонов, уменьшаясь со скоростью 100 дБ на октаву, данное явление напоминает частотно-избирательные свойства базиллярной мембраны. Согласно результатам психоакустических и ней-

рофизиологических экспериментов, КТ с частотой  $2f_1-f_2$  может быть подавлен воздействием на наружное ухо третьего синусоидального колебания с частотой  $2f_1-f_2$  и с соответствующими амплитудой и фазой. Фактически, КТ проявляет себя как первичный тон, волна возбуждения от которого распространяется по базилярной мембране к вершине улитки. Из чего можно предположить, что базилярная мембрана и органы, принимающие участие в её движениях, представляют наиболее вероятное место возникновения КТ. На рисунке 1 показана зависимость ауральных гармоник, образуемых ухом в зависимости от интенсивности звукового давления.

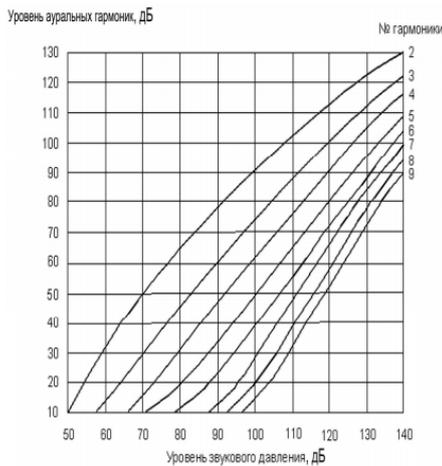


Рис. 1 – Зависимость ауральных гармоник

Представленные на рисунке кривые были получены на основе известного явления слуховых биений двух тонов, достигающих уха. Для определения уровней ауральных гармоник использовался внешний тон с частотой вблизи гармоник основного тестового тона, уровень которого увеличивался до момента появления слышимых биений это повторялось для первых восьми гармоник в широком интервале уровней звукового давления.

Рисунок 2 отражает зависимость уровня генерируемых ухом тонов в диапазоне от 50 Гц до 10 кГц.

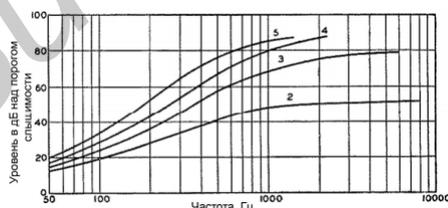


Рис. 2 – Зависимость уровня генерируемых ухом тонов

Для уровня звукового давления 80 дБ, 2-я гармоника, образуемая нелинейностью органа слуха, будет составлять 65 дБ над порогом слышимости (см. рис. 1), что эквивалентно уровню нормального голоса. Уровень третьей гармоники

45 дБ, что более чем на 40 дБ больше среднечастотного порога слышимости (см. рис. 2), но гармоники не слышны. Система ухо-мозг полностью подавляет весь набор гармоник и слышится чистый тон. Этот же механизм может быть успешно применен для подавления гармонических составляющих, которые вносит звуковоспроизводящее оборудование, если гармоники создаваемые усилителем не будут по интенсивности превышать соответствующие ауральные гармоники. Таким образом, все гармоники, вносимые усилителем, интенсивность которых не превышает интенсивности гармоник, создаваемых собственно ухом, будут маскироваться и оставаться неслышимыми.

### ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЕТЛИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Классическим подходом к проектированию УМЗЧ является введение отрицательных обратных связей (ООС), которая, как известно, в равной степени с ослаблением усиления уменьшает КГИ. Однако кроме ослабления гармоник, образуемых нелинейностью передаточной характеристики усилительного элемента, ООС образует высокочастотный шум из смеси высших гармоник, который коррелирован с сигналом и не может быть отделён от полезного сигнала системой ухо-мозг.

Передаточная функция приведенной на рисунке 3 схемы ООС имеет следующий вид :

$$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{K_y}{1 - K_{OC} \cdot K_y} \quad (1)$$

где  $K_y$  – усиление прямого контура,  $K_y \cdot K_{OC} = K_{yOC}$  – петлевое усиление.

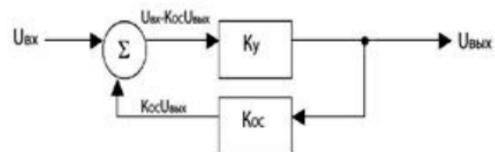


Рис. 3 – Передаточная функция

Глубина обратной связи в дБ определяется как :

$$- 20 \log(1 - K_{yOC})$$

Рассмотрим усилительный элемент, передаточная функция которого содержит квадратичный член, при отсутствии ООС его передаточная функция может быть представлена :

$$U_{ВЫХ} = K_y \cdot U_{ВХ} + \alpha (K_y \cdot U_{ВХ})^2,$$

При введении петли ООС, после суммирующего узла имеем сигнал:

$$U_C = U_{ВХ} - K_{OC} \cdot U_{ВЫХ},$$

При квадратичном характере передаточной характеристики, подавая на вход усилительного элемента синусоидальный сигнал частоты  $f$ ,

на его выходе будет присутствовать вторая гармоника. Введя ООС, на выходе появится третья гармоника, которая, попадая в цепь ООС, создает суммарные продукты на частоте  $f+3f$ , т.е. четвертую гармонику, а также пятую гармонику. Воспользовавшись вышеприведенными выражениями можно математически показать механизм появления гармоник более высокого порядка, чем характер нелинейности:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{K_{\text{OC}}K_y + 1 - \sqrt{(K_{\text{OC}}K_y + 1)^2 - 4 \cdot K_{\text{OC}} \cdot \alpha \cdot K_y^2 \cdot U_{\text{ВХ}}}}{2 \cdot K_{\text{OC}} \cdot \alpha \cdot K_y^2}$$

На рисунке 4 представлены осциллограммы и спектрограммы, полученные при моделировании воздействия на усилительный элемент с квадратичной нелинейностью петли ООС в среде Mathcad. Временные задержки сигнала в петле не учитывались.

На рисунке 4а и 5а сплошной тонкой линией показан исходный сигнал, тонкой прерывистой линией сигнал на выходе усилительного элемента, неохваченного петлей ООС и толстой линией показан сигнал для усилителя с введенной ООС.

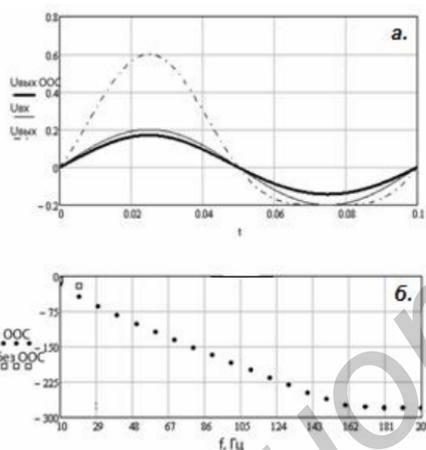


Рис. 4 – Осциллограммы и спектрограммы

На рисунке 4б и 5б показаны спектры каскадов охваченного ООС (●) и без введения ООС (◊). Отметим, что в спектре выходного сигнала (рисунок 4б) для каскада без ООС присутствует только 2-я гармоника, тогда как для случая с петлей ООС кроме второй гармоники, ослабленной на 23 дБ, появляются 3-я, 4-я, 5-я и т.д. гармонические составляющие, интенсивность которых уменьшается с увеличением номера гармоники. При воздействии многотональным сигналом (рисунок 5) петля ООС порождает мно-

жество комбинационных тонов. Итогом применения петли ООС является появление в сигнале высокочастотного шума, коррелированного с сигналом. При введении многопетлевой ООС эффект ещё больше усугубляется, поскольку ослабляя 2-ю гармонику, петля местной ООС порождает 3-ю, 4-ю, 5-ю гармоники. Петля общей ООС добавляет 4-ю, 6-ю, из-за наличия ослабленной 2-й гармоники появляются 8-я и 12-я гармоники и т.д.

Поскольку характер огибающей шума в звуковой динамике важен для правильного восприятия слушателем музыкальной информации, то шумовые загрязнения гармоническими составляющими низкой интенсивности, которые модулируют мгновенное значение сигнала, должны быть минимизированы. В противном случае, наличие шумового загрязнения полезного сигнала будет восприниматься как неестественное, «мутное», «лишенное воздушности» звучание, приведет к утомляемости и отсутствию вовлеченности у слушателя в прослушиваемый музыкальный материал.

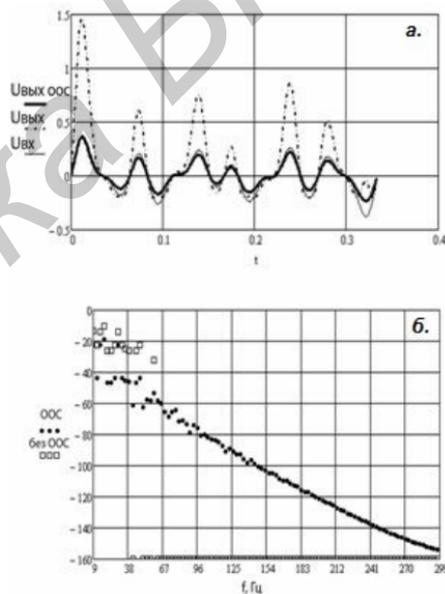


Рис. 5 – Осциллограммы и спектрограммы

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алдошина И., Приттс Р. Музыкальная акустика. Учебник. — СПб.: Композитор, 2006.— 720 с.: ил.
2. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике - М.: Мир, 1991. - 446 с.: ил.
3. Glen M. Ballou. Handbook for Sound Engineers. Fourth Edition. -UK: Focal Press is an imprint of Elsevier. Copyright © 2008, Elsevier Inc. - 1778 p.