

Психоакустика

(По материалам статей в журналах «Радио», «Салон AV», «Суфлёр» и др. с дополнениями)

В 60–х годах текущего столетия для оценки качества звучания высококлассной звуковоспроизводящей аппаратуры широко использовался очень емкий, но безразмерный термин «высокая верность воспроизведения звука». В настоящее время термин этот, к сожалению, забыт, а качество звучания оценивается с помощью таких измеримых параметров, как коэффициент гармоник (K_g), коэффициент интермодуляционных искажений (K_i), наличие динамических искажений (ТИМ-искажений) и ряда других, подробно описанных в литературе [1-3], но дающих далеко неполное и неистинное представление о качестве звучания того или иного звуковоспроизводящего устройства. Нередки случаи, когда при проведении слуховых экспертиз предпочтение отдается аппаратуре не с лучшими, а с худшими параметрами. В чем же здесь дело? А в том, что перечисленные выше параметры выбраны без учета особенностей человеческого слуха.

Психоакустические исследования [4], с которыми читатели познакомятся в этой статье, могут помочь им найти другой, более реальный подход к оценке качества звучания бытовой радиоаппаратуры.

Для начала рассмотрим кривые, приведенные на Рис. 1.

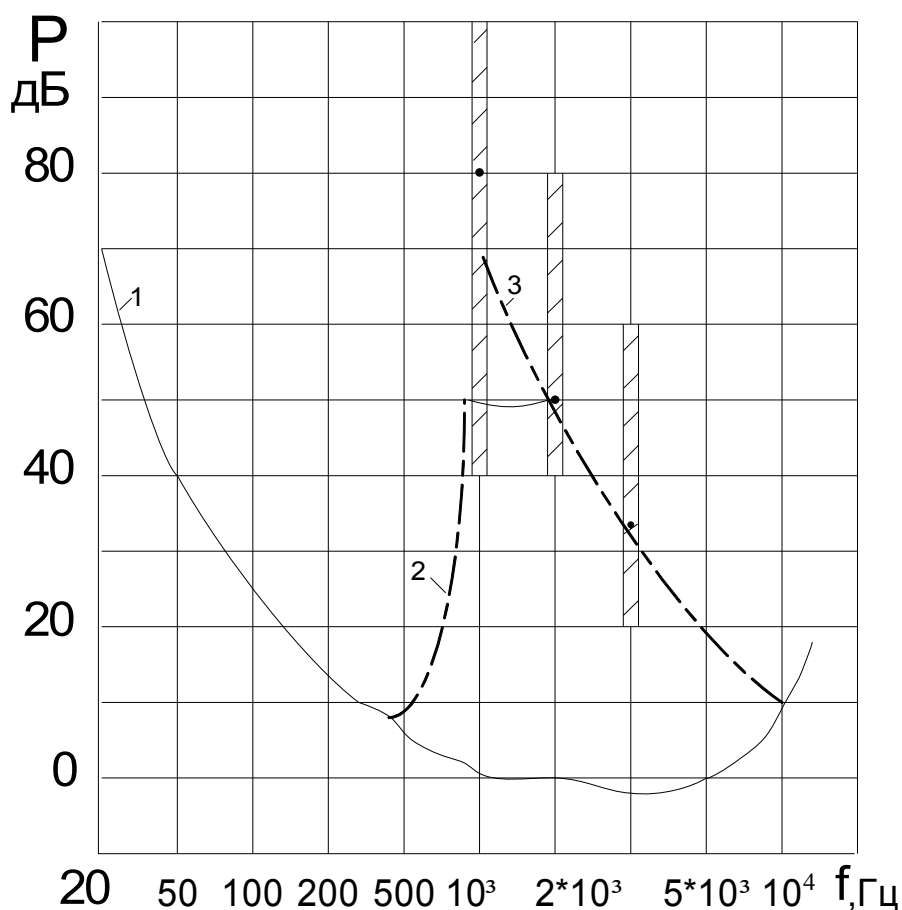


Рис.1

Сплошной линией 1 показана зависимость абсолютного порога слышимости (АПС) звука от частоты. Область выше этой кривой называют плоскостью слышимости. На ней кружком обозначен чистый 1кГц и уровнем громкости 80 дБ. Проведем такой эксперимент. Допустим, что одновременно с этим тоном (назовем его мешающим или маскирующим) будет звучать ещё один, с переменной частотой и амплитудой (назовем его измерительным). Так вот, в области частот от 20 до 500 Гц измерительные тона не будут слышны до тех пор, пока их уровни не превысят ограниченные кривой АПС. А как только это произойдет, измерительные тона будут слышны вместе с мешающим. Иными словами, в этом диапазоне АПС и порог

слышимости тона при маскировке совпадают. В области частот 500...1000 Гц измерительный тон сильно маскируется мешающим (см. штрих-пунктирную кривую 2). Чтобы измерительный тон был слышен в этой области, его уровень должен быть много больше АПС, т.е. при маскировке мешающим тоном порог слышимости измерительного лежит здесь выше кривой АПС. В диапазоне частот 1000...2000 Гц измерительный тон вообще не будет слышен до тех пор, пока его уровень не превысит АПС на 50 дБ, причем, если его уровень будет увеличиваться и дальше, то слышимым окажется не он, а разностный тон, частота которого меньше мешающего тона 1 кГц. Это явление будет наблюдаться до тех пор, пока уровень измерительного тона не достигнет некоторого нового порога слышимости, ограниченного штриховой линией 3, после чего наряду с разностным и мешающим тонами становится слышимым и измерительный. Оба эти порога следует строго различать. В октаве, расположенной выше частоты мешающего тона, порог слышимости измерительного тона всегда намного выше порога слышимости разностных тонов. Если частота измерительного тона близка к основной, удвоенной или утроенной частоте мешающего тона, то в широком диапазоне уровней (выделены штриховкой) слышны биения. В диапазоне частот 2000...10000 Гц порог слышимости измерительного тона лежит выше уровней ,ограниченных штрих-пунктирной кривой. При более низких уровнях слышен только мешающий тон. На самых высоких частотах (10000.ж..20000 Гц) маскирующее действие мешающего тона исчезает и измерительный тон становится слышимым, как только его уровень превысит АПС.

На Рис. 2 показаны кривые порогов слышимости измерительного тона при маскировке его мешающим тоном частотой 1 кГц и уровнями 30, 50, 70 и 90 дБ. Измерительный тон станет слышимым только тогда, когда его уровень превысит соответствующий порог слышимости. Ниже этих порогов будет слышен только мешающий тон. Следует обратить внимание на то, что область маскировки измерительного тона сужается с уменьшением уровня мешающего тона.

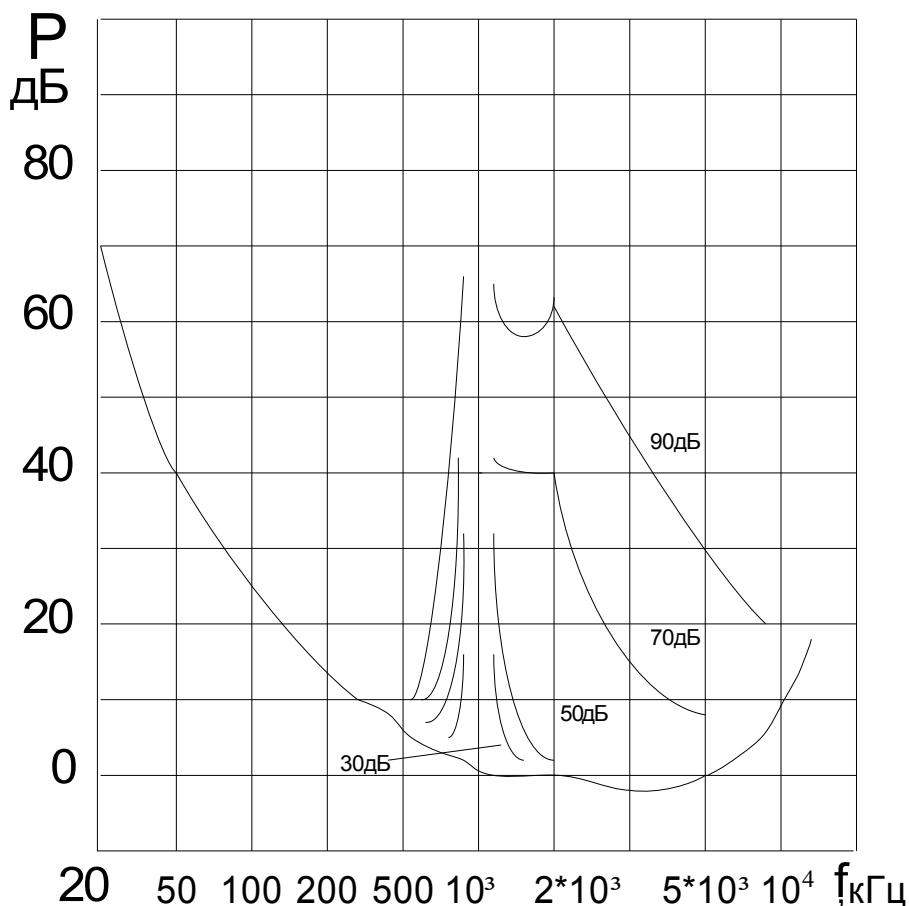


Рис.2

Рассмотрим теперь, какие минимальные изменения уровня воспринимаются на слух. На рис. 3 показаны зависимости порога слышимости синусоидального тона частотой 1 кГц и уровнем 40, 60, 80 и 90 дБ от глубины и частоты его модуляции синусоидальным тоном переменной частоты. Из рисунка видно, что наиболее чувствителен слух к частоте модуляции 3...4 Гц. На этой частоте при уровне тона 90 дБ слух воспринимает глубину модуляции около 1 %.

Анализ кривых порогов слышимости, показанных на Рис. 1 и 2, позволяет объяснить резкое увеличение чувствительности слуха к амплитудной модуляции частотой выше 200 Гц. Слуховое восприятие нижней боковой частоты модуляции определяется и этой областью кривой АПС, эффект маскирования здесь минимален.

При прохождении музыкальных и речевых сигналов через предварительные усилители ЗЧ и усилители мощности изменяются фазовые соотношения между составляющими созвучий, проявляющиеся в виде так называемых временных искажений.

Пороговая величина воспринимаемого на слух временного сдвига зависит от характера звукового сигнала. Проведем такой опыт. Пропустим через усилитель импульсный звуковой сигнал, содержащий высокочастотную и низкочастотную составляющие. Из-за временного сдвига между этими составляющими тембр исходного созвучия изменится. При импульсивном характере сигнала пороговая величина слухового восприятия временного сдвига составит около 2 мс. Причем при уровнях звукового давления, превышающих АПС, эта величина практически не зависит от уровня.

Рассмотренные выше особенности слухового восприятия звукового сигнала позволяют сделать некоторые выводы о допустимых величинах K_g и K_i .

1. Анализ кривых, приведенных на Рис. 1 и 2, показывают, что все гармоники с амплитудой ниже уровня, ограниченного кривой 2, будут неслышны. Создается впечатление допустимости большого числа и значительных по амплитуде гармоник высших порядков. Например, судя по рис. 1, уровень 15-й гармоники может достигать -30 дБ (здесь и далее уровень гармоник указан относительно максимальной мощности сигнала 1 кГц - 80 дБ). Однако на этот счет не следует обольщаться. Во-первых, амплитуда допустимых с точки зрения слухового восприятия гармоник быстро падает с уменьшением уровня сигнала (Рис. 2), например, при уровне 50 дБ амплитуды гармоник, вносящих наибольший вклад в K_g (со второй по шестую), должны быть ниже кривой АПС. Во-вторых, сконструировать усилитель ЗЧ, амплитуды гармоник которого повторяли бы АПС, практически невозможно. В-третьих, все сказанное справедливо для одночастотного сигнала. При усилении реального сигнала процессы возникновения продуктов нелинейности будут гораздо сложнее. Поэтому при проектировании усилительного устройства следует стремиться к тому, чтобы спектр усиленного сигнала был ограничен пятью гармониками. Согласно Рис. 1, уровни второй, третьей, четвертой и пятой гармоник не должны превышать соответственно -30, -46, -60 дБ, что соответствует $K_g=3,32\%$. Однако столь большая величина допустимого K_g не должна вызывать никаких иллюзий, поскольку она фактически на 99% определяется уровнем второй гармоники, а те, кто серьезно занимается разработкой аппаратуры высокой точности воспроизведения звука, понимают, как трудно сконструировать усилитель с резким спадом амплитуд гармоник высшего порядка, к которым наиболее чувствителен слуховой аппарат человека. Именно эта особенность слухового восприятия указывает на неправомочность рекомендаций некоторых авторов при выборе K_g усилителя мощности ЗЧ (УМЗЧ) принимать во внимание K_g электропроигрывателей и громкоговорителей. Эти устройства, в отличие от усилителей ЗЧ, не синтезируют гармоник высшего порядка, а потому вносимые ими искажения менее заметны на слух.

Выводы относительно допустимого K_i при анализе Рис. 1 и 2 получить еще проще. Все сигналы с частотами, являющимися разностью или суммой двух не вызывающих биений тонов (т.е. не попадающих в заштрихованные области на Рис. 1), должны лежать ниже уровня АПС, а это - 90 дБ (Рис. 2). Такому уровню соответствует $K_i=0,003\%$, и именно эта величина указана в [1,5]. Особенно это относится к разностным сигналам, так как крутизна спада левой части кривой порога слышимости 2 (см. Рис. 1) существенно выше правой. Действительно, если на вход усилителя подать два равных по амплитуде сигнала частотой, например, 19 и 20 кГц, мешающий сигнал суммарной частоты окажется далеко за пределами слышимого диапазона частот, а разностной частоты 1 кГц будет хорошо слышим, если $K_i>0,003\%$, причем его уровень будет тем выше, чем больше K_i .

Сравнение требуемых значений $K_g=3,32\%$ и $K_i=0,003\%$ показывает, что измерять нужно не первый, а второй параметр. В крайнем случае можно ограничиться измерением K_g , но в наиболее широком диапазоне частот. Рост этого коэффициента в диапазоне высших звуковых частот (10...20 кГц) косвенно свидетельствует о значительном K_i .

2. При использовании нестабилизированных источников питания низкочастотные составляющие с частотами вблизи 50, 100 и 200 Гц оказываются промодулированными пульсациями напряжения выпрямителя. На слух это воспринимается, как биения. Особенно сильно этот эффект проявляется при максимальной мощности УМЗЧ. Восприимчивость слуха к такого рода искажениям иллюстрирует Рис. 3.

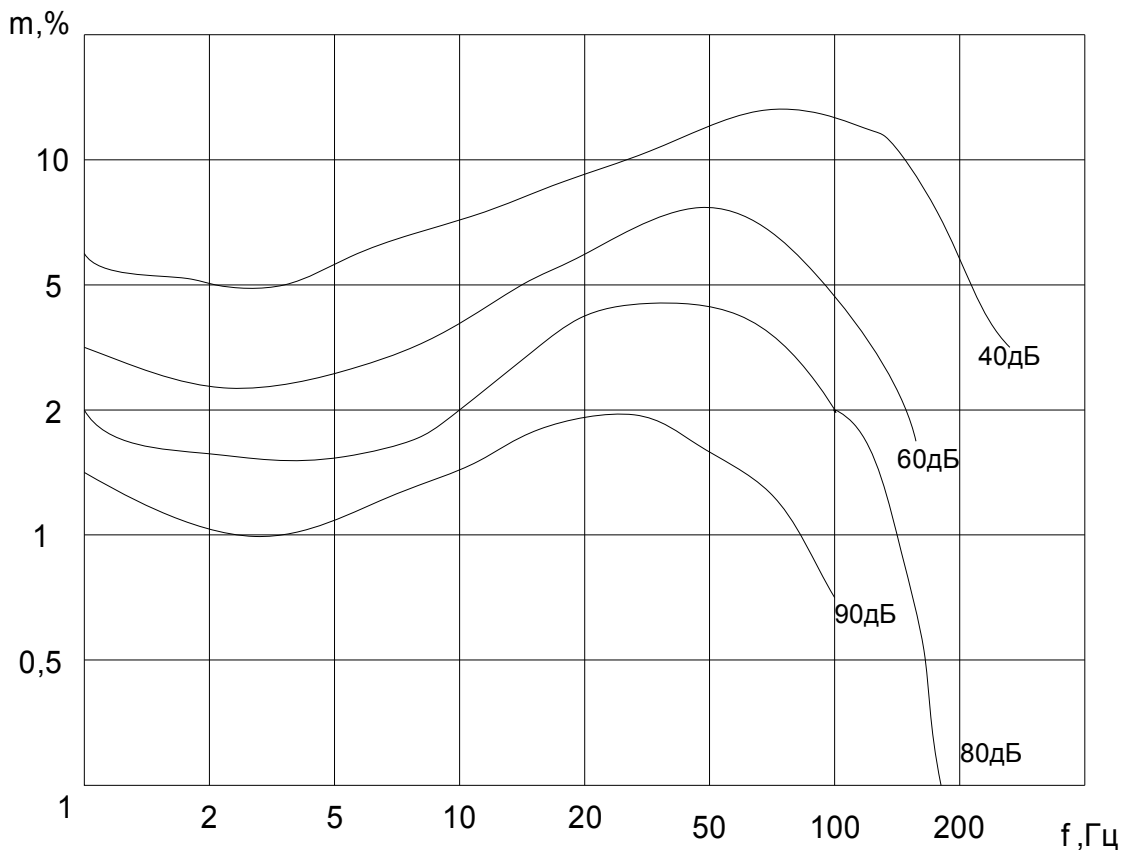


Рис.3

По-

видимому, наличием этих искажений можно объяснить, что при больших амплитудах пульсаций «басы» приобретают «жесткость». Глубина амплитудной модуляции определяется выходным сопротивлением выпрямителя и коэффициентом пульсаций питающего напряжения. Устранить этот эффект можно тремя методами. Первый и самый очевидный—применение стабилизатора. Однако создание стабилизатора на ток порядка 10...15 А (в импульсе) дело довольно сложное и дорогостоящее. Второй метод—увеличение глубины ООС, что требует и соответствующего увеличения коэффициента усиления УМЗЧ (K_o). Но по ряду причин (о чем будет сказано ниже) и это далеко не оптимальный вариант.

В 70÷80 годы за рубежом эта проблема решается введением дополнительной (помимо основной R2, R1, определяющей коэффициент усиления УМЗЧ по переменному напряжению K_i) цепи частотно-зависимой ООС (Рис.4).

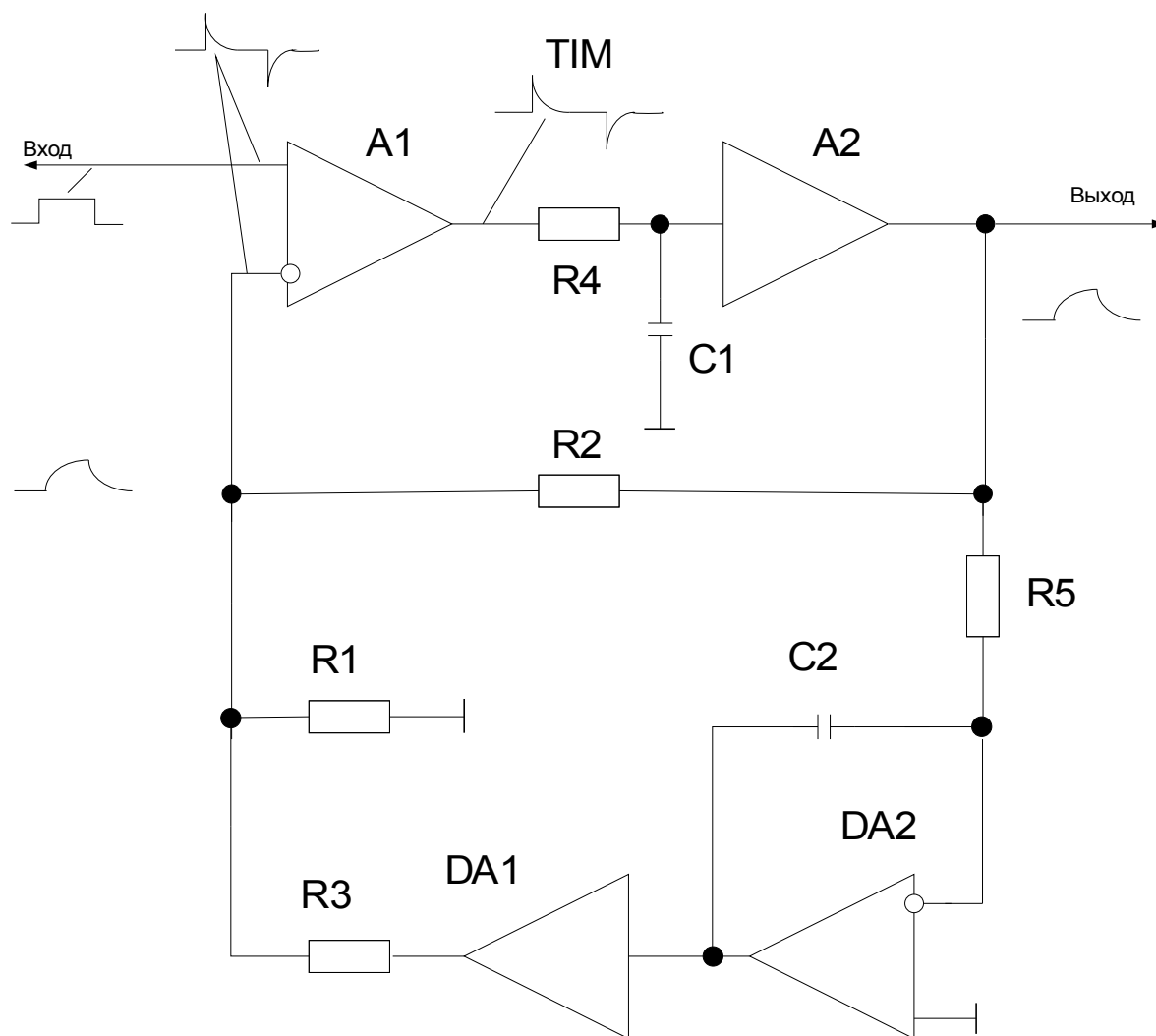


Рис.4

Она образована ОУ DA1, DA2. На ОУ DA2 собран интегратор с частотой среза $f_i = 1/2\pi R_5 C_2$. ОУ DA1 включен инвертером, через резистор R3 сигнал дополнительной ООС поступает в цепь основной ООС. Общая частота среза обеих цепей ООС равна:

$$f_i = R_2 / 2\pi R_5 C_2 R_3.$$

На частоте сигнала $f > f_i$ работает только цепь основной ООС. При $f = f_i$ интегратор начинает вести себя как фильтр нижних частот (ФНЧ) первого порядка, что влечет за собой увеличение глубины ООС на 6 дБ на октаву. При дальнейшем снижении частоты глубина ООС увеличивается и достигает своего предельного значения, определяемого коэффициентом усиления ОУ DA2 плюс K_0 самого усилителя, т.е. позволяет увеличить K_0 на несколько порядков только в области низших частот.

Необходимое значение частоты f_i можно выбрать, руководствуясь зависимостями, приведенными на рис.3. Легко видеть, что значение f_i должно лежать в диапазоне 2...5 Гц, поскольку он соответствует наименьшей чувствительности слуха к восприятию амплитудной модуляции.

Третий метод – увеличение энергии запасённой в конденсаторах фильтра. Это наиболее удобный метод по которому сейчас идёт большинство производителей. Необходимо учитывать, что запасённая энергия пропорциональна U^2 , выгодней работать при максимально высоких напряжениях питания.

Рассмотрим теперь те свойства УМЗЧ, которые приводят к возникновению динамических искажений, или, как их ещё принято называть, ТИМ-искажений. Структурная схема типичного УМЗЧ подробно описана в [1], ее упрощенный вид с осциллограммами сигналов в различных точках приведен на Рис. 4. Функции входного дифференциального каскада выполняет усилитель A1 с коэффициентом усиления K_1 . ФНЧ R4C1 формирует однополюсную АЧХ усилителя с главным полюсом на частоте f_0 (Рис.5).

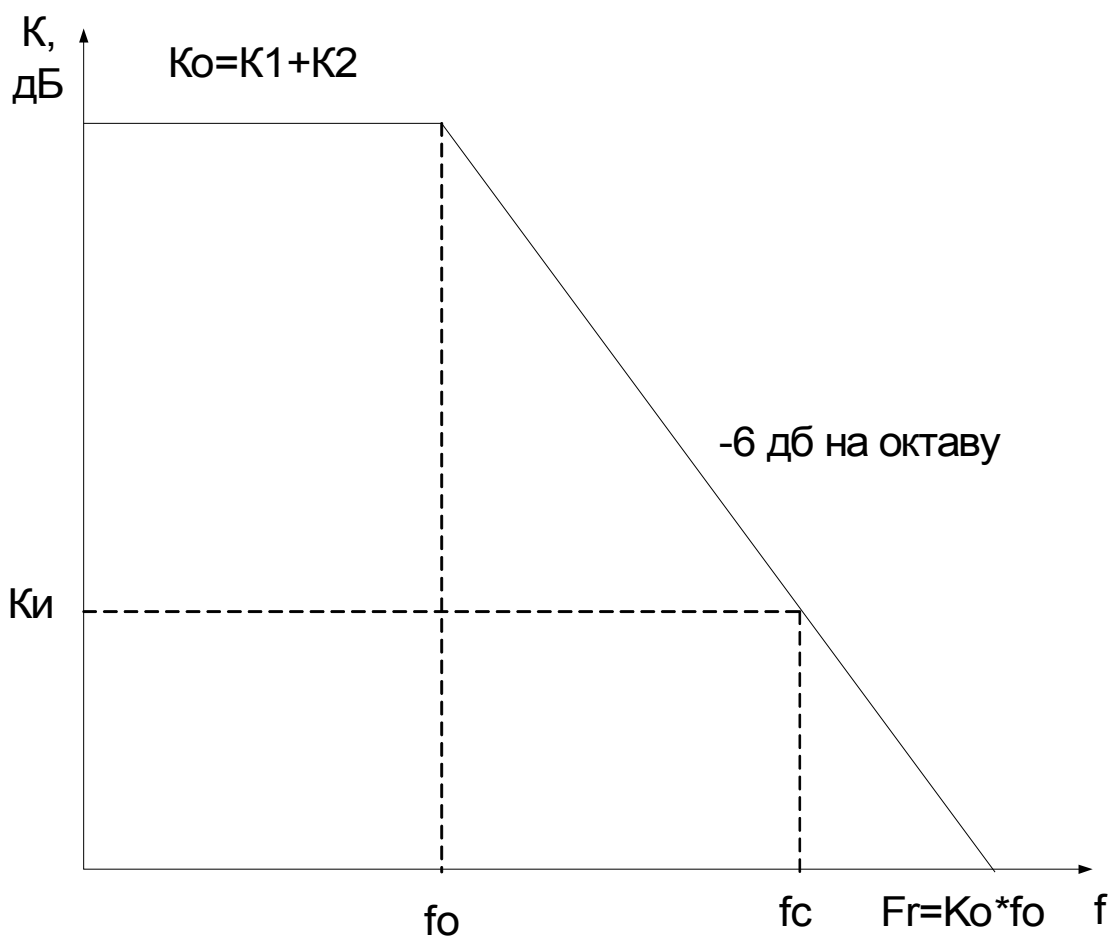


Рис.5

Второй каскад представляет собой усилитель A_2 с коэффициентом усиления K_2 . Весь усилитель охвачен цепью ООС (R_2R_1).

Проследим процессы, происходящие в УМЗЧ при подаче на его вход импульсного сигнала. Поступивший сигнал усиливается первым каскадом с коэффициентом усиления K_1 , а так как обратная связь включится только после прохождения сигнала через ФНЧ R_4C_1 с постоянной времени $t = R_4C_1 = 1/2\pi f_0$, а большинство усилителей проектируется на получение максимального коэффициента усиления K_0 , то первый каскад неизбежно ограничит поступивший сигнал. Именно это обстоятельство является основной причиной искажений.

Здесь ещё раз уместно вернуться к выбору K_g и K_i . Дело в том, что режим ограничения приводит к дополнительному увеличению числа и энергии гармоник. Часть их неизбежно попадает в область частот более низких, чем та область, в которой маскирование отсутствует (на Рис. 1 и 2 область частот ниже 1 кГц). Отсюда и требование стремиться проектировать усилители, создающие минимальное число гармоник, особенно высоких порядков.

Через какое-то время ООС полностью включится и полюс АЧХ усилителя с частоты f_0 сместится на частоту f_c (Рис.5), характеризующую поведение УМЗЧ в установившемся режиме.

Несмотря на то, что, как указывалось выше, слух воспринимает только достаточно большие временные искажения (более 2 мс), это не должно служить поводом для оптимизма, поскольку такую задержку создает ФНЧ с главным полюсом АЧХ на частоте 79 Гц. Поэтому, даже если исключить все факторы, влияющие на возникновение динамических искажений, но использовать УМЗЧ, АЧХ которого будет иметь главный полюс на частоте $f_0 \geq 79$ Гц, возникшая временная задержка будет превышать 2 мс и хорошо восприниматься на слух.

Основными методами борьбы с ТИМ-искажениями могут быть уменьшение глубины ООС, увеличение частоты f_0 , уменьшение коэффициента усиления входного дифференциального каскада K_1 и получение необходимого усиления K_0 за счет второго каскада K_2 , увеличение динамического диапазона каскадов A_1 и A_2 . Следует, однако, иметь в виду, что уменьшение глубины ООС негативно скажется на K_g и K_i , а это потребует разработки специальных высоколинейных усилительных каскадов. Нельзя также забывать и об уменьшении глубины ООС с увеличением частоты. В качестве примера возьмем такой случай: $f_0 = 1$ кГц,

$K_0=80$ дБ, $K_i=30$ дБ (Рис.5). В этом случае глубина ООС на частоте 20 кГц составит 24 дБ, а на частоте 40 кГц – всего 18 дБ, что ещё раз показывает недопустимость большого числа гармоник, скомпенсировать которые невозможно из-за недостатка усиления в петле ООС.

В таблице приведены значения измеренных анализатором спектра СК4–56 амплитуд гармоник и рассчитанные по ним значения K_1 для дифференциального усилительного каскада, каскада на ламповом триоде, а также каскада, выполненного на транзисторах, включенных по схеме эмиттерного повторителя и работающих в режимах АВ и А. Переход от режима АВ к А дает уменьшение K_g в четыре раза, что позволяет уменьшить K_0 УМЗЧ на 13 дБ и, что как следствие, увеличивает f_0 на две октавы. Следует отметить, что требованию получения монотонно спадающего ряда амплитуд гармоник в наибольшей степени отвечает каскад на ламповом триоде. Огромный несопоставимый с транзисторным каскадом динамический диапазон (100 ÷ 200В), высокая линейность (несколько вольт против 25мВ), благоприятный спектр гармоник и, как следствие, меньшая глубина ООС в значительной степени и определяют «мягкость» звучания ламповых усилителей.

Резюмируя изложенное, можно дать следующие рекомендации для разработки и испытания аппаратуры ВВВ:

1. Величины K_g и K_i должны согласовываться с рекомендациями психоакустики, а распределение гармоник необходимо измерять анализатором спектра или, подавая на вход УМЗЧ двухчастотный сигнал (19 и 20 кГц равной амплитуды), измерять компоненты искажений в диапазоне разностных частот 1...10 кГц или в крайнем случае на одной частоте 1 кГц.

2. Особое внимание необходимо уделить измерению динамических характеристик УМЗЧ и всего тракта.

3. Стремиться к созданию наиболее линейных усилительных звеньев, что позволит уменьшить глубину ООС и снизить опасность возникновения ТИМ-искажений.

4. Общее представление о качестве УМЗЧ может дать следующий эксперимент. Отключив высокочастотную головку АС и заменив ее резистором эквивалентного сопротивления более высокой мощности, подать на вход УМЗЧ два тона равной амплитуды в диапазоне частот 20...30 кГц с разницей частот в 1÷2 кГц. Уровень воспроизводимо АС звука и будет характеризовать величину K_g и K_i .

5. Стремиться к получению монотонно спадающего спектра гармоник.

6. По всей видимости именно спектр гармоник определяет особую комфортность «винила» не смотря на то, что искажения многократно превосходят тот уровень, который обеспечивает CD.

Выходной каскад	Выходное напряжение, В(режим)	Уровень гармонических составляющих, дБ						Суммарный коэффициент гармоник, %
		2	3	4	5	6	7	
К159НТ1Б	4,5	-70	-26	-70	-60	-72	-66	4,45
	3	-66	-36	-66	-66	-78	-70	1,6
	1	-62	-58	-	-	-	-	0,16
6Н2И	10	-46	-52	-77	-82	-	-	1
	5	-56	-70	-	-	-	-	0,33
	2	-62	-	-	-	-	-	0,086
Т814, КТ815	(АВ)	-38	-42	-80	-48	-56	-58	1,59
	(А)	-50	-56	-60	-62	-68	-	0,38