

## РАЗДЕЛ IV. ИЗМЕРЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭКОЛОГИИ, НАУКАХ О ЧЕЛОВЕКЕ И ОБЩЕСТВЕ

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент 2245695 Российская Федерация, МПК А61F7/02. Полупроводниковое термоэлектрическое устройство для локального замораживания тканей гортани / Т.А. Исмаилов, Г.И. Аминов, Т.А. Рагимова; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет». – №2002135494, заявл. 26.12.02; опубл. 10.02.05. Бюл. № 4. – 4 с.
2. Васильев, Г.Н. Тепловой поток как показатель энергоинформационного объекта / Г.Н. Васильев, Г.Н.Дульнев // Парапсихология и психофизика. – 1993 г. – №2. – С.24-29.

*Д.т.н., профессор Исмаилов Т.А., к.т.н., Евдулов О.В., к.т.н., Рагимова Т.А. - (8722) 62-37-15, unidgtu@yandex.ru, ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет».*

УДК 534.647:534.1: 612.821.8

## АНАЛИЗ ПСИХОАКУСТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ ТЕХНИКИ

С. А. Завьялов, К. В. Мурасов

В статье рассмотрены особенности слухового восприятия человека, влияющие на субъективное ощущение качества воспроизведения музыкальных сигналов УМЗЧ, также рассмотрены некоторые нюансы работы пелли отрицательной обратной связи, проведено исследование лампового однотактного усилителя на соответствие критериям качества формируемым человеческим органом слуха.

**Ключевые слова:** ауральные гармоника, маскирование, гармонические искажения, интермодуляционные искажения, шум коррелированный с сигналом, передаточная характеристика.

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 (КГИ), коэффициента интермодуляционных искажений (КИИ), 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.

В последнее время в технических журналах по аудиотехнике стали появляться статьи с обзорами усилителей мощности,

разработанных с использованием однотактных каскадов на электронных лампах, например [4], где исследуется усилитель Cary Audio Design CAD-300SE.

На рисунке 1 представлен спектр гармонических искажений при воздействии тестового синусоидального сигнала частотой 50 Гц, мощностью 6 Вт на нагрузке 4 Ома. После результатов тестового прослушивания, заканчивающегося отзывами о «прозрачности», «чистоте» и т.д. звучания следовали результаты измерений стандартного набора параметров.

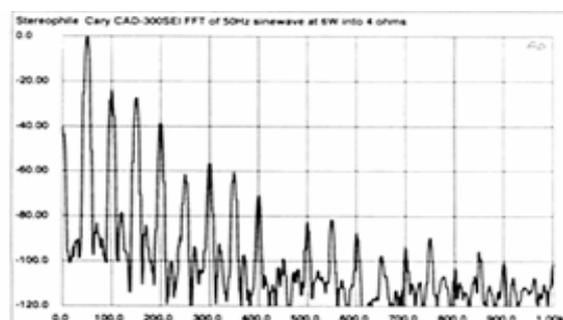


Рисунок 1 – Спектр гармонических искажений усилителя мощности Cary CAD-300SE

Как видно из рисунка 1, величина второй гармоники составляет 5% от основного тона (-26 дБ). Тем не менее, его звучание

АНАЛИЗ ПСИХОАКУСТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ ТЕХНИКИ

оценивалось как более натуральное по сравнению с Bryston 3B-ST power amplifie (120 Вт, КГИ -100 дБ, КИИ -85 дБ) [3] – рисунок 2.

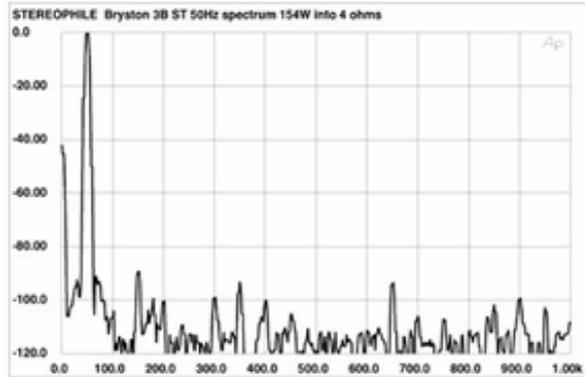


Рисунок 2 – Спектр гармонических искажений усилителя мощности Bryston 3B-ST (50 Гц, входной синусоидальный сигнал 154 Вт, нагрузка 4 Ом)

После тестового прослушивания экспертами отмечалась недостаточная «прозрачность» на ВЧ, «зжатость» сцены. Приведенные обзоры подтверждают отсутствие достаточной корреляции между измеряемыми параметрами и качеством воспроизведения, ведь Bryston 3B-ST превосходит Cary CAD-300SE по всем измеряемым параметрам, однако экспертное прослушивание дает обратный результат.

**Постановка задачи**

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 [8], в действительности начинают восприниматься ухом вблизи порога слышимости, где механические смещения во внутреннем ухе составляют доли ангстрем, т.е. вполне соизмеримы с диаметром атома водорода.

Звуковые волны, попадающие в ушную раковину через наружный слуховой проход, подводятся к барабанной перепонке, расположенной на входе среднего уха (рисунок 3).

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 барабан-

ной перепонки и площадь основания стремечка, преобразование импеданса составляет 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 [5]. 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.



Рисунок 3 – Органы слуха человека

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,

## РАЗДЕЛ IV. ИЗМЕРЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭКОЛОГИИ, НАУКАХ О ЧЕЛОВЕКЕ И ОБЩЕСТВЕ

комбинационный тон (КТ) с частотой  $2f_1-f_2$  становится слышимым при уровне звука, близкому 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 базилярной мембраны. Согласно результатам психоакустических и нейрофизиологических 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 [7]. 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 4 показана зависимость ауральных гармоник, образуемых ухом в зависимости от интенсивности звукового давления [6].

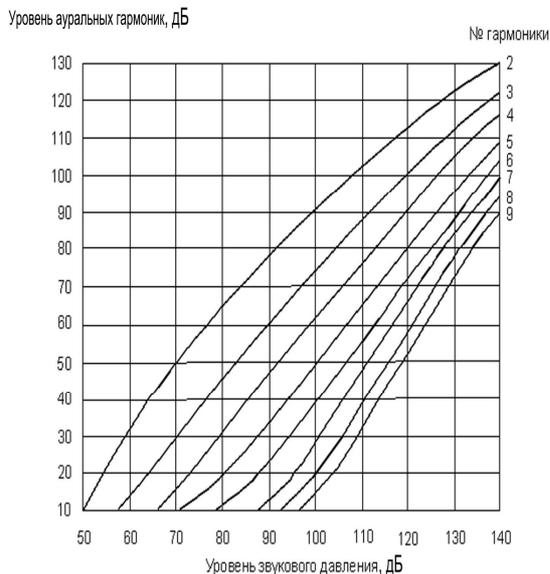


Рисунок 4 – Зависимость интенсивности ауральных гармоник от уровня звукового давления

Представленные на рисунке 4 кривые были получены на основе известного явления слуховых биений двух тонов, достигающих уха. Для определения уровней ау-

ральных гармоник использовался внешний тон с частотой вблизи гармоник основного тестового тона, его уровень увеличивался до момента появления слышимых биений это повторялось для первых восьми гармоник в широком интервале уровней звукового давления. Рисунок 5 отражает зависимость уровня генерируемых ухом тонов в диапазоне от 50 Гц до 10 кГц.

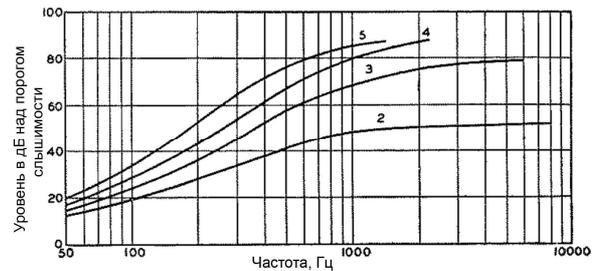


Рисунок 5 – Зависимость уровней ауральных гармоник от изменения частоты.

Для уровня звукового давления 80 дБ, 2-я гармоника, образуемая нелинейностью органа слуха, будет составлять 65 дБ над порогом слышимости (см. рисунок 4), что эквивалентно уровню нормального голоса.

Уровень третьей гармоники 45 дБ, что более чем на 40 дБ больше среднечастотного порога слышимости (см. рисунок 5), 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 отделен от полезного сигнала системой ухо-мозг.

АНАЛИЗ ПСИХОАКУСТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ ТЕХНИКИ

Передаточная функция приведенной на рисунке 6 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.

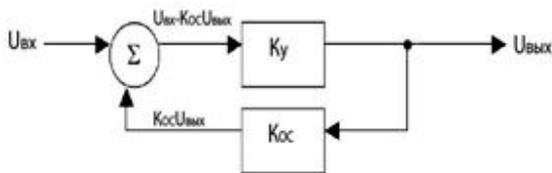


Рисунок 6 – Схема ООС

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:

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

При введении петли ООС, после суммирующего узла имеем сигнал:

$$U_c = U_{ВХ} - K_{OC} \cdot U_{ВЫХ}, \quad (3)$$

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:

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

На рисунке 7 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 7а и 8а сплошной тонкой линией показан исходный сигнал, тонкой прерывистой линией сигнал на выходе усилительного элемента, неохваченного пет-

лей ООС и толстой линией показан сигнал для усилителя с введенной ООС.

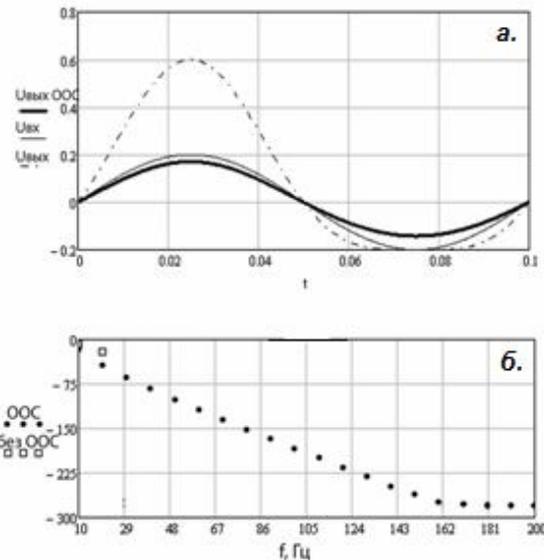


Рисунок 7 – Осциллограммы сигналов (а) и спектр гармонических искажений (б)

На рисунке 7б и 8б показаны спектры каскадов охваченного ООС (●) и без введения ООС (□). Отметим, что в спектре выходного сигнала (рисунок 7б) 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 8) петля ООС порождает множество 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,

## РАЗДЕЛ IV. ИЗМЕРЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭКОЛОГИИ, НАУКАХ О ЧЕЛОВЕКЕ И ОБЩЕСТВЕ

«мутное», «лишенное воздушности» звучание, приведет к утомляемости и отсутствию вовлеченности у слушателя в прослушиваемый музыкальный материал.

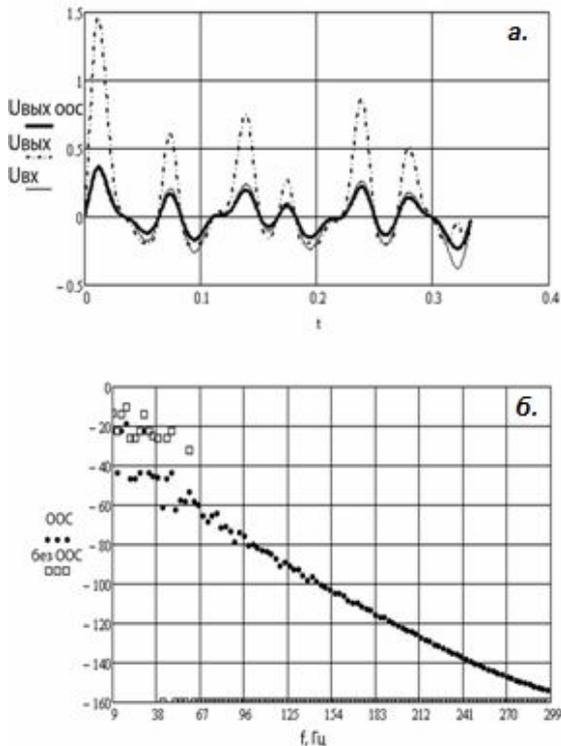


Рисунок 8 – Осциллограммы сигналов (а) и спектр гармонических искажений (б) при воздействии четырехтональным сигналом

Таким образом, при проектировании звуковоспроизводящей техники кроме стандартного набора, должны учитываться следующие требования:

- Гармонические искажения, вносимые в сигнал не должны превышать по интенсивности ауральные гармоники.
- Минимизировать шум, коррелированный с музыкальным сигналом, который вносит петля ООС.

### Экспериментальная часть

Приведенные требования выполнимы, например, в одноконтурных усилителях на электровакуумных приборах, которые обладают наибольшей линейностью передаточной характеристики среди прочих активных элементов [1]. Для проведения гармонического анализа с учетом особенностей слухового восприятия был специально разработан двухкаскадный усилитель на электровакуумных триодах прямого накала, обладающих высокой линейностью (ГМ – 70 в оконечном каскаде, триод 300В в каскаде усиления напряжения). Разработанный уси-

литель мощности обладает следующими характеристиками. Выходная мощность на нагрузке 8 Ом – 25 Вт, при КГИ не более 0,5 %, полоса воспроизводимых частот 15 Гц – 25 кГц, неравномерность в полосе пропускания не более 3 дБ. Усилитель построен на двух трансформаторных каскадах без применения ООС. Схема установки для проведения анализа продуктов гармонических искажений приведена на рисунке 9.

Особенностью установки является применение кварцевого фильтра для лучшего подавления гармоник, присутствующих в выходном сигнале генератора. Рису-

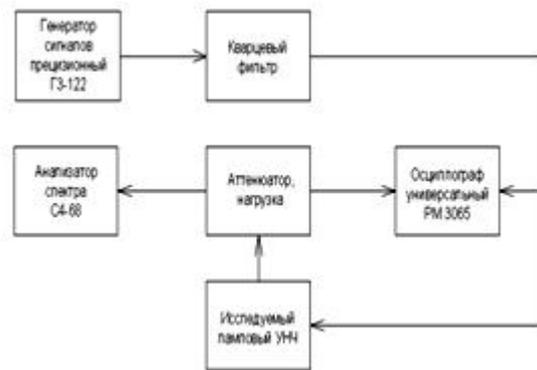


Рисунок 9 – Блок-схема измерительной установки

нок 10 иллюстрирует линейность проходной динамической характеристики активного элемента каскада усиления напряжения.

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 11 представлены результаты гармонического анализа при различных уровнях выходной мощности.

Как видно из представленных графиков, ауральные гармоники по интенсивности на всех уровнях мощности превышают уровни гармоник, создаваемых усилителем на 15 – 20 дБ, таким образом, оставаясь неслышимыми.

Ввиду полного отсутствия ООС высокочастотный шум, коррелированный с сигналом отсутствует.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихницкий, А.М. Когда лампа лучше, чем транзистор // А.М. Лихницкий. - *Аудио Магазин*. – 1996. -№ 1. – С. 43-49.
2. Чивер, Д. Новая методика тестирования усилителей мощности звуковой частоты, основанная на психоакустических данных и лучше коррелирующая с качеством звука: Дипломная работа / Д. Чивер, Даниэль Х. Чивер. Нью Хэмпширский Университет. - Нью Хэмпшир, 2001. – 44 с.

АНАЛИЗ ПСИХОАКУСТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙ ТЕХНИКИ

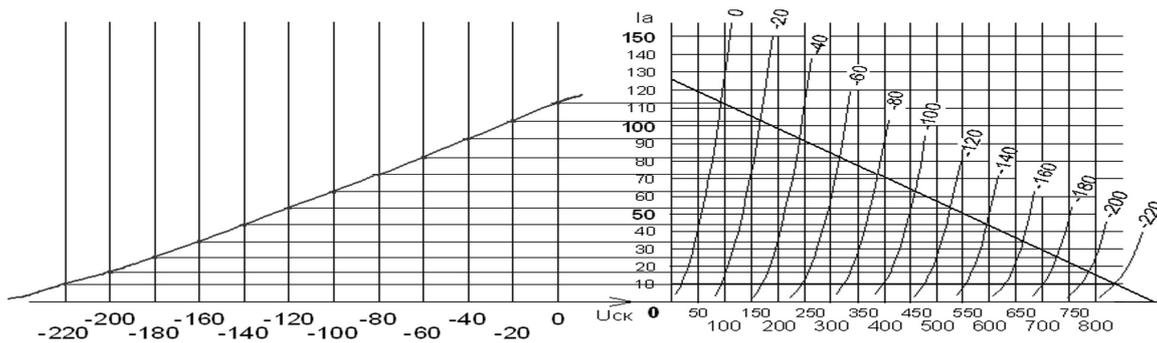


Рисунок 10 – Проходная динамическая характеристика триода каскада усиления напряжения

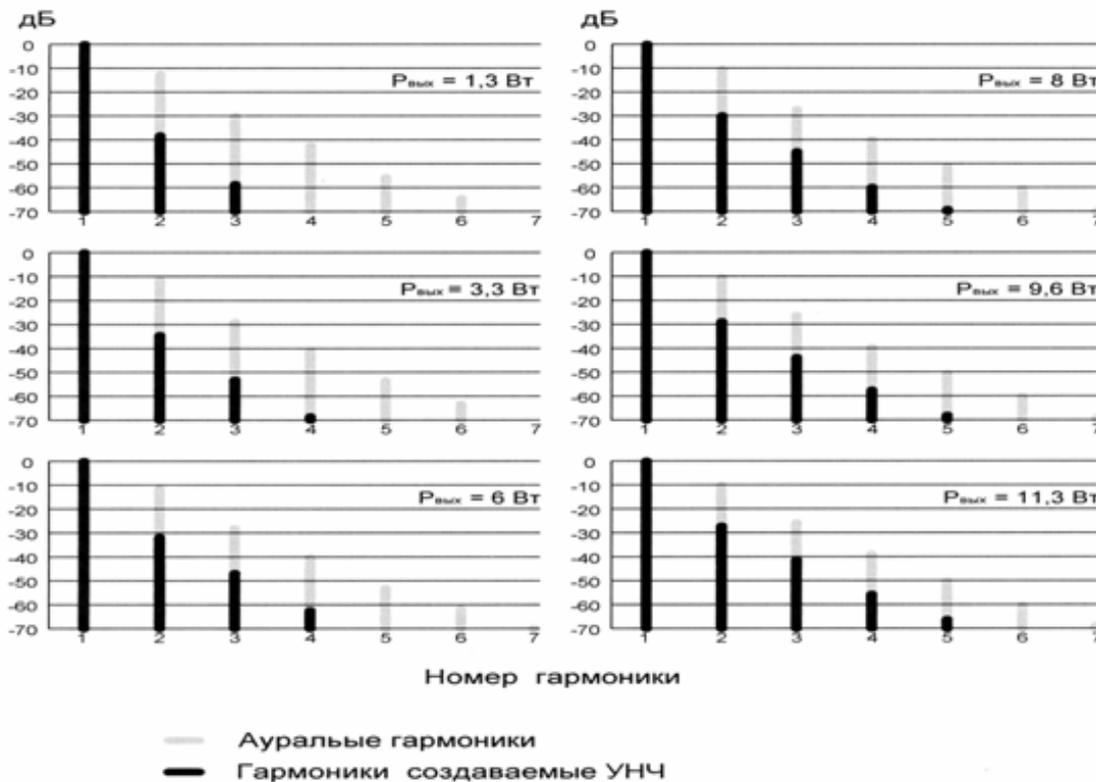


Рисунок 11 – Результаты гармонического анализа разработанного УНЧ

3. Greenhill, Larry. Byston 3B-ST power amplifier // L. Greenhill - Stereophile Magazine. Vol. 19, № 10, OCTOBER 1996, p. 284.
4. Harley, R. Cary Audio Design CAD-300SEI integrated amplifier // R. Harley.- Stereophile Magazine. Vol. 18, № 9, SEPTEMBER 1995, pp. 145-148.
5. Moller, A. R. Acoustic reflex in man./ A. R. Moller J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 34, pp. 1524-1534, 1962.
6. Olsen, Harry F. Music, Physics and Engineering. / F.H. Olsen - Dover Publications, Inc., N.Y., 2nd Ed., 1967.
7. Schreeder, Manfred R. Model's of hearing // R. M. Schreeder - Proceedings of the IEEE, Vol. 63, № 9, SEPTEMBER 1975, pp.1332 - 1350.
8. Tartini, G. Trattato di musica secondo la vera scienza dell'armonia. / G. Tartini. - Padua, Italy, 1754.

К.т.н., доцент **Завьялов С.А.**, тел. 8-913-97-00-482, e-mail: zavyalov62@mail.ru; ассистент **Мурасов К.В.**, тел. 8-906-99-33-964; e-mail: murasov\_k@yahoo.com, Омский государственный технический университет (г. Омск).