

ВОСПРИЯТИЕ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЧАСТОТЫ ОСНОВНОГО РЕЗОНАНСА ГОЛОВКИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ

О. Ф. ДЕМИДОВ, Ю. М. ИШУТКИН, А. М. ЛИХНИЦКИЙ

Рассматриваются искажения групповой задержки НЧ головки громкоговорителя в закрытом корпусе. Приведены результаты психофизических экспериментов, подтверждающие заметность этих искажений. Эксперименты выполнены на установке, в которой искажения имитируются всепропускающим фазовым корректором второго порядка. Показано, что выбором частоты основного резонанса и добротности НЧ головки можно ограничить искажения групповой задержки до допустимой величины.

Ограничение эффективно воспроизводимого диапазона частот акустической системы (АС) снизу является причиной значительных линейных искажений. Чем ближе составляющие спектра музыкального сигнала к частоте основного резонанса НЧ головки громкоговорителя и больше ее полная добротность, тем более выражены эти искажения.

Для уменьшения линейных искажений обычно понижают, насколько это возможно, частоту основного резонанса и выбирают значение добротности, которое несколько превышает критическое. Понижение частоты основного резонанса связано с выбором акустического оформления большого объема или увеличением массы подвижной системы НЧ головки, что требует усложнения или удорожания узла магнитная цепь - звуковая катушка. Одновременно происходит снижение эффективности НЧ головки, вызывающее необходимость увеличивать мощность усилителя, а это в конечном счете повышает стоимость АС. Поэтому при конструировании НЧ головки громкоговорителя должны быть правильно заданы частота основного резонанса и полная добротность, так как они по-существу определяют как качество звучания АС на НЧ, так и экономические характеристики акустической системы.

Несмотря на то, что в нашей стране и за рубежом выполнен ряд работ по изучению влияния частоты основного резонанса и добротности НЧ головки громкоговорителя на качество воспроизведения АС [1-3], практические рекомендации по выбору оптимальных значений этих параметров, основанные на результатах психофизических исследований, отсутствуют.

Решение поставленных вопросов особенно важно, так как до настоящего времени нет ясности, к чему стремиться при выборе резонансной частоты головки и ее полной добротности - добиваться получения максимально плоской АЧХ или минимизировать искажения процессов установления сигналов.

В последнее время отмечают большую значимость искажений процессов установления [3] в НЧ головке, чем отклонений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) от линейной. Об этом также свидетельствуют следующие наблюдения:

АЧХ акустической системы в помещении прослушивания заметно отличается от соответствующей характеристики, измеренной в свободном поле [4]. При этом появляется большое количество провалов на характеристике и наблюдается ее подъем в области НЧ, который может достигать 12 дБ. Вместе с тем для слушателя эти искажения оказываются менее заметными, чем небольшие изменения полной добротности НЧ головки и связанные с ними изменения АЧХ всего на 1-2 дБ. Это можно объяснить тем, что процессы установления,

возникающие в головке при воспроизведении атаки звуков, во времени опережают отражения от стен, пола и потолка и, достигая уха слушателя первыми, приобретают решающее значение в формировании их ощущений.

Серьезные экспериментальные исследования заметности переходных искажений в области частоты основного резонанса НЧ головки громкоговорителя выполнены авторами работы [2]. Однако в процессе экспериментов они определяли только влияние добротности на восприятие процессов установления. В результате возникала неопределенность в вопросе о том, что воспринимается экспертом: изменение тембра (изменение тенденции АЧХ за счет изменения полной добротности) или искажение процессов установления. Как будет показано ниже, искажение процессов установления в НЧ головках связано прежде всего со скоростью изменения фазы в области частоты основного резонанса. Поэтому в настоящей работе сделана попытка, сохраняя неизменной АЧХ и имитируя различные значения скорости изменения фазы НЧ головки громкоговорителя в области частоты основного резонанса, определить пороги заметности возникающих при этом искажений.

Линейные искажения закрытой АС

Наиболее распространенный вид акустического оформления - закрытое. Для свободного поля в области НЧ работа закрытой АС может быть описана с помощью передаточной функции

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + s\omega_H/Q_{\Pi} + \omega_H^2} \dots \dots \dots (1)$$

где S - независимая комплексная переменная;
 ω_H - резонансная частота незатухающих колебаний;
 Q_{Π} - полная добротность.

До настоящего времени основное внимание при совершенствовании систем звуковоспроизведения уделялось получению плоской АЧХ.

Рассмотрим искажения АЧХ, возникающие в закрытой АС. Для этого определим модуль передаточной функции - см. выражение (1):

$$|H(s)| = \left| \frac{s^2}{s^2 + s\omega_H/Q_{\Pi} + \omega_H^2} \right|_{s=j\omega} = \frac{\omega^2/\omega_H^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_H^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{Q_{\Pi}\omega_H}\right)^2}} \dots (2)$$

При $Q_{\Pi} = 1$ на частоте $\omega > \omega_H$ АЧХ системы максимально плоская, а ниже этой частоты наблюдается спад с крутизной 12 дБ/окт. При сопоставлении АЧХ закрытой системы с распределением энергии в спектре звучания музыкальных инструментов [5] оказывается, что звучание инструментов (за исключением органа) должно передаваться АС, имеющей частоту $f_H < 40$ Гц без заметных искажений. В том случае, когда воспроизводимые сигналы медленно изменяются во времени, рассматриваемая система может удовлетворить требованиям самого взыскательного слушателя. Однако реальные сигналы (звучание барабана, литавр, контрабаса при щипковом возбуждении) быстро изменяются во времени и, хотя основная часть энергии спектра приходится на линейный участок АЧХ НЧ головки, процессы установления существенно искажаются. Это связано с тем, что фазовые искажения НЧ головки, обусловленные ограничением АЧХ снизу, проявляются на частотах, существенно выше ω_H .

Таким образом, для неискаженного воспроизведения с помощью НЧ головки, кроме задания

неравномерности ее АЧХ, должно быть определено требование к фазовой характеристике.

Определим фазовую характеристику закрытой АС в области НЧ. Для этого выполним преобразование выражения (1) при $s = j\omega$:

$$\varphi(\omega) = \pi - \operatorname{arctg} \frac{\omega - \omega_K}{\omega_H/2Q_D} - \operatorname{arctg} \frac{\omega + \omega_K}{\omega_H/2Q_D} \dots \dots \dots (3)$$

где $\omega_K = \omega_H \sqrt{1 - 1/4Q_D^2}$ - резонансная частота затухающих колебаний. Однако более распространенным является представление фазовых искажений с помощью характеристик

$$\begin{aligned} t_\phi(\omega) &= -\varphi(\omega)/\omega; \\ t_r(\omega) &= -d\varphi(\omega)/d\omega \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

где t_ϕ - время фазовой задержки, с; t_r - время групповой задержки, с.

Тогда формальными условиями неискаженной передачи произвольного сигнала являются:

$$\begin{aligned} |H(s)| &= \text{const}; \\ t_\phi(\omega) &= \text{const}; \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

$t_r(\omega) = \text{const}$ - (условие фазовой линейности).

Гипотеза огибающей при моноуральном восприятии фазы

Существует предположение, что фазовые искажения в канале звукопередачи достаточно оценивать с помощью только характеристики групповой задержки $t_r(\omega)$. Так, в работе [6] показано, что заметны фазовые сдвиги лишь между теми спектральными составляющими сложного сигнала, которые принадлежат к одной частотной группе слуха. Можно количественно оценить допустимое отклонение от постоянной величины времени групповой задержки на основе данных [6].

Для этого рассмотрим различие АМ и ЧМ колебаний, использованных авторами работы [6] для сравнительного прослушивания. Это различие определяется тем, что при ЧМ фазы боковых составляющих сдвигаются на 90° . Увеличение фазы верхней боковой составляющей относительно несущей можно интерпретировать как групповое опережение t_{r1} , а нижней - как групповую задержку t_{r2} . Следовательно, можно записать

$$\begin{aligned} t_{r1} &= -0,25 (f_{в. б} - f_0)^{-1}; \\ t_{r2} &= 0,25 (f_0 - f_{н. б})^{-1}, \dots \dots \dots (6a) (6б) \end{aligned}$$

где $f_0, f_{в. б}, f_{н. б}$ - несущая частота, а также частоты верхней и нижней боковых составляющих модулированного колебания, Гц. Тогда воспринимаемое слушателем искажение групповой задержки

$$\Delta t_r = t_{r2} - t_{r1} \dots \dots \dots (6в)$$

Расстояние между боковыми составляющими модулированного колебания равно критической

полосе слуха, которая при $f_0 < 500$ Гц приблизительно постоянна и составляет 100 Гц. Подставляя в выражение (6) численные значения, получаем на частотах ниже 500 Гц допустимые искажения групповой задержки $\Delta t_r < 10$ мс.

Результаты эксперимента с АМ и ЧМ колебаниями можно интерпретировать, как способность слуха детектировать огибающую сигнала и его мгновенную частоту. Такая точка зрения была выдвинута в работах [7-9] и получила широкое распространение. Особенностью характеристик (огibaющей и мгновенной частоты) является их инвариантность по отношению к сдвигу фазы всех компонент спектра сигнала на одну и ту же величину. В то же время изменение групповой задержки в частотном интервале спектра сигнала может заметно влиять на форму последнего, т. е. на его огибающую. Представление уха как "детектора" огибающей и мгновенной частоты объясняет "фазовую глухоту" слушателей в тех случаях, когда

$$t_\phi(\omega) \neq \text{const}, \quad t_r(\omega) = \text{const}.$$

Таким образом, время групповой задержки является состоятельной оценкой фазовых искажений реального сигнала. Условия неискаженной передачи в этом случае принимают вид

$$|H(j\omega)| = \text{const}, \quad t_r(\omega) = \text{const} \dots \dots \dots (7)$$

для идеального канала звукопередачи и

$$\sqrt[\omega_1]{|H(j\omega)|} \leq \Delta_H; \quad \sqrt[\omega_2]{t_r(\omega)} \leq \Delta t$$

для реального канала.

$$\sqrt[\omega_1]{|H(j\omega)|} \quad \omega_1, \omega_2; \quad \sqrt[\omega_2]{t_r(\omega)}$$

Здесь ω_1 - изменение АЧХ в интервале ω_1 - изменение (искажение) времени групповой задержки, при этом в интервале $\Delta_H, \Delta t$ - допустимые значения показателей выражения (7). Из приведенного выше следует, что допустимые пределы фазовых искажений АС могут быть полностью заданы величиной Δt .

Рассмотрим следствие сделанного предположения, что органы слуха в основном чувствительны к искажениям групповой задержки. Для этого определим зависимость от частоты времени групповой задержки закрытой АС дифференцированием выражения (3): причем на частоте ω_k имеем

$$t_r(\omega) = \frac{\omega_H/2Q_n}{\left(\frac{\omega_H}{2Q_n}\right)^2 + (\omega - \omega_k)^2} + \frac{\omega_H/2Q_n}{\left(\frac{\omega_H}{2Q_n}\right)^2 + (\omega + \omega_k)^2}, \dots \dots \dots (9)$$

$$\max t_r \simeq \frac{2Q_n}{\omega_H}.$$

В соответствии с выражением (9) частотная характеристика групповой задержки представлена на рис. 1. Видно, что в области частоты основного резонанса наблюдается выраженный максимум групповой задержки, т. е. $t_r(\omega) \neq \text{const}$

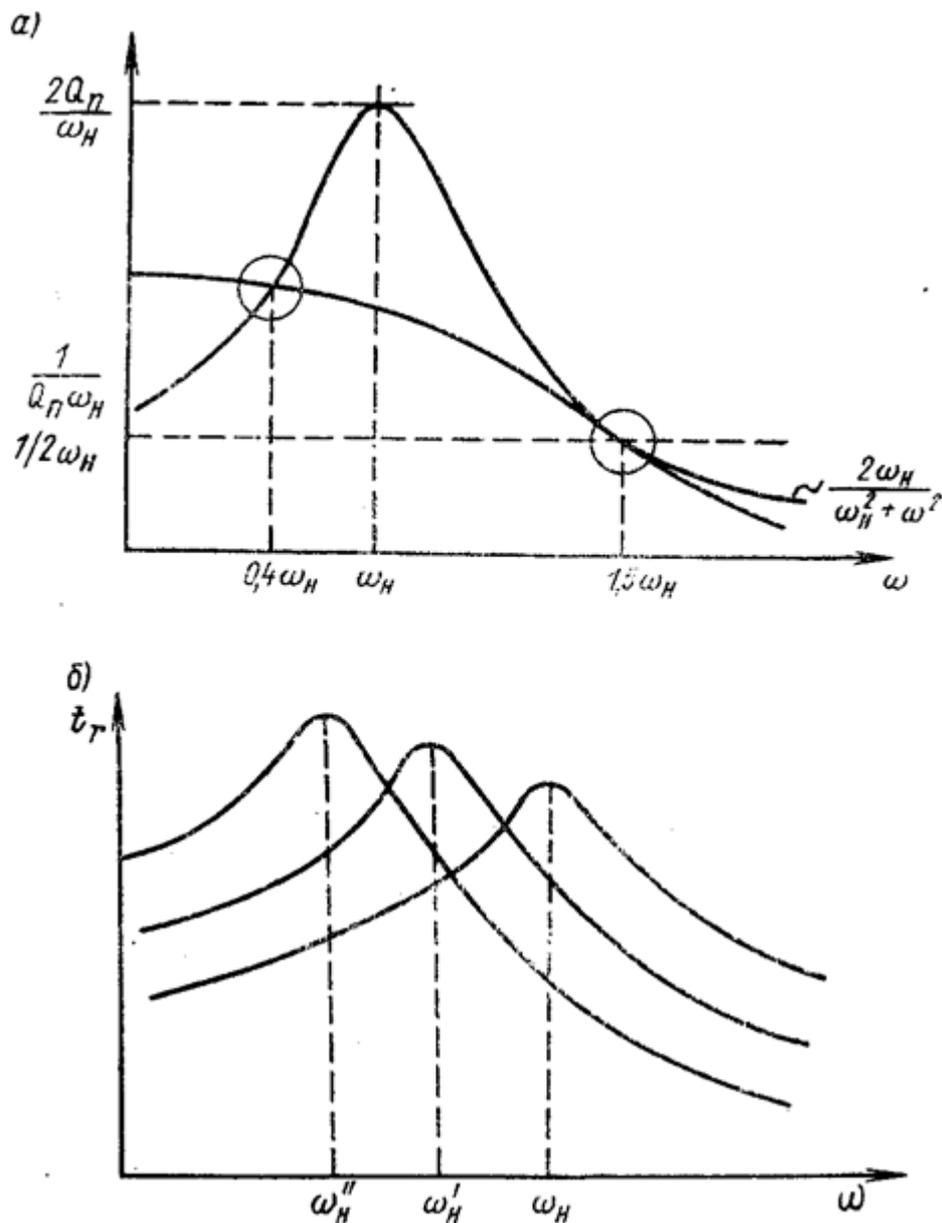


Рис. 1. Частотные характеристики групповой задержки, возникающей в закрытой АС:
 а) - в области частоты основного резонанса;
 б) - при различных значениях ω_k и $Q_L = \text{const}$

В качестве примера определим величину возникающих в области частоты основного резонанса искажений групповой задержки, используя типичные величины параметров закрытой АС: $\omega_H = 40$ Гц, $Q_L = 1$. Тогда по формуле (96) получим $\max t_g = 8$ мс. Это значит, что при спектре сигнала с нижней частотой ($\omega_{НЧ}$) примерно равной ω_k ($\omega_{НЧ} \cong \omega_k$) и верхней $\omega_{ВЧ}$, при которой $t_g < \max t_g$, АС искажает процессы установления, что выражается в "расплывании" огибающей на величину

$$\Delta t_g = \max t_g(\omega_k) - t_g(\omega_{ВЧ}),$$

где Δt_g - искажение времени групповой задержки равное ~ 7 мс, т. е. сопоставимое с порогом восприятия фазовых искажений, полученных поданным работы [2].

При воспроизведении реального сигнала его мгновенные спектры могут иметь различное положение относительно частоты основного резонанса. Поэтому полезно рассмотреть, как в этих случаях могут влиять на искажения групповой задержки изменения величин Q_L и ω_H .

Из рис. 1 следует:

- Если спектр передаваемого сигнала расположен выше ω_k ($\omega_{НЧ} \geq \omega_k$), то снижение частоты ω_H и увеличение Q_L приводят к уменьшению искажений групповой задержки Δt_g .
- Если частота ω_k находится в пределах передаваемой полосы, т. е. $\omega_{НЧ} \leq \omega_k < \omega_B$, то снижение ω_H и увеличение Q_L приводят к возрастанию искажений групповой задержки (см. рис. 1,б).

Таким образом, при использовании для определения оптимальных характеристик НЧ головки громкоговорителя дополнительного критерия заметности искажений групповой задержки нельзя считать очевидным [1], что АЧХ должна быть линейной до возможно более низких частот и снижение ω_H во всех случаях способствует повышению качества звучания АС [10], а также, что Q_L должна быть больше критической [11].

Приведенные ниже результаты исследований могут быть использованы для уточнения установившихся представлений по рассматриваемому вопросу.

Экспериментальная установка

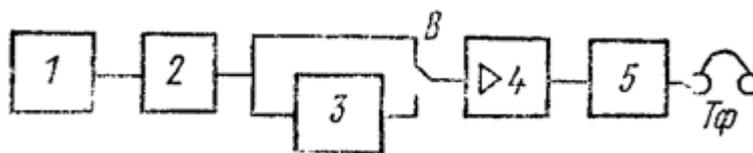


Рис. 2. Структурная схема установки для определения порога восприятия искажений групповой задержки (4 - усилитель; 5 - аттенюатор)

Схема установки для определения порога восприятия искажений групповой задержки (рис. 2) обеспечивает возможность непосредственного сравнения двух сигналов: стандартного (неискаженного) I и сигнала, подвергнутого фазовым искажениям, II. Сигнал от генератора синусоидальных колебаний 1 поступает на вход стробирующей системы 2 (№ 4440, фирма Брюль и Кьер). На выходе этой системы формируется радиоимпульс, состоящий из четырех периодов установленной на генераторе частоты (ω_0). При этом моменты включения и выключения сигнала совпадают с нулем фазы. Полученный таким образом сигнал может быть задан следующей спектральной функцией:

$$V(s) = \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \left(1 - e^{-\frac{2n\pi}{\omega_0} s} \right), \dots \dots \dots (10)$$

где ω_0 - несущая частота сигнала; n - число периодов сигнала.

Использование такого сигнала объясняется рядом его преимуществ:

- максимальная скорость установления;
- выраженный максимум спектральной плотности;
- спад выше и ниже частоты максимума спектральной плотности;
- сходство звучания с ударными инструментами.

Значения частоты ω_0 и число периодов $n = 4$ были выбраны по субъективному впечатлению сходства сигналов с звучанием большого и малого барабана. После стробирующей системы сигнал поступает на вход всепропускающего фазового корректора 2-го порядка 3.

Корректор (рис. 3) при неизменной (линейной) АЧХ поворачивает фазу спектральных

составляющих сигнала от 0 до 360°. При этом частота, на которой поворот фазы равен 180° (ω_k), и скорость изменения фазы в этой области ($\max \dot{t}_r$) устанавливаются экспериментатором с помощью R, C, R1 - R4.

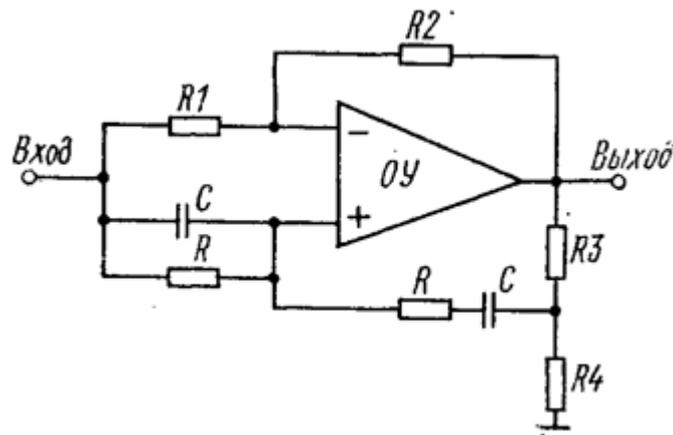


Рис. 3. Электрическая схема всепропускающего фазового корректора

Перестраиваемый фазовый корректор имеет следующие характеристики:

1. Передаточная функция

$$H(s) = \frac{s^2 - s\omega_n/Q_n + \omega_n^2}{s^2 + s\omega_n/Q_n + \omega_n^2}, \dots (11)$$

где $\omega_n = (RC)^{-1}$; $Q_n = (R_2/R_1 - 2)^{-1}$

при условии, что $K = \frac{5 - R_2/R_1}{R_2/R_1 + 1}$.

2. Амплитудно-частотная характеристика

$$|H(S)|_{s=j\omega} = \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \frac{\omega^3}{\omega_n^2 Q_n^2}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{Q_n^2 \omega_n^2}}} = 1. \dots (12)$$

3. Фазочастотная характеристика

$$\varphi(\omega) = -2 \left(\arctg \frac{\omega - \omega_k}{\omega_n/2Q_n} + \arctg \frac{\omega + \omega_k}{\omega_n/2Q_n} \right) \dots (13)$$

4. Частотная характеристика групповой задержки

$$t_r(\omega) = 2 \left[\frac{\omega_n/2Q_n}{\left(\frac{\omega_n}{2Q_n}\right)^2 + (\omega - \omega_k)^2} + \frac{\omega_n/2Q_n}{\left(\frac{\omega_n}{2Q_n}\right)^2 + (\omega + \omega_k)^2} \right], \dots (14)$$

где $\max t_r \approx \frac{40\pi}{\omega_B}$. при $\omega = \omega_k$

Из выражений (10), (14) следует, что характеристика групповой задержки повторяет по форме соответствующую характеристику НЧ головки громкоговорителя в закрытом корпусе. Следовательно, в качестве функционала, полностью характеризующего фазовые искажения как НЧ головки, так и всепропускающего фазового корректора, можно использовать значение максимальной групповой задержки ($\max t_r$) при заданной частоте этого максимума (ω_k). Всепропускающий фазовый корректор, реализованный в схеме рис.3 в диапазоне частот 0,5-5000 Гц имеет линейную АЧХ с отклонением не более $\pm 0,5$ дБ, допускает перестройку частоты максимума групповой задержки в пределах 20-80 Гц и величины максимальной групповой задержки в пределах 5-100 мс.

С выходов всепропускающего корректора или непосредственно стробирующей системы сигнал через усилитель и аттенюатор поступает на динамические головные телефоны типа ДТ-48 фирмы Веер (ФРГ). Уровень звукового давления у каждого уха слушателя с помощью аттенюатора устанавливался равным силе звука 65 фон.

Головные телефоны были выбраны в качестве источника звука, так как они меньше, чем головки громкоговорителя, искажают переходные процессы [3].

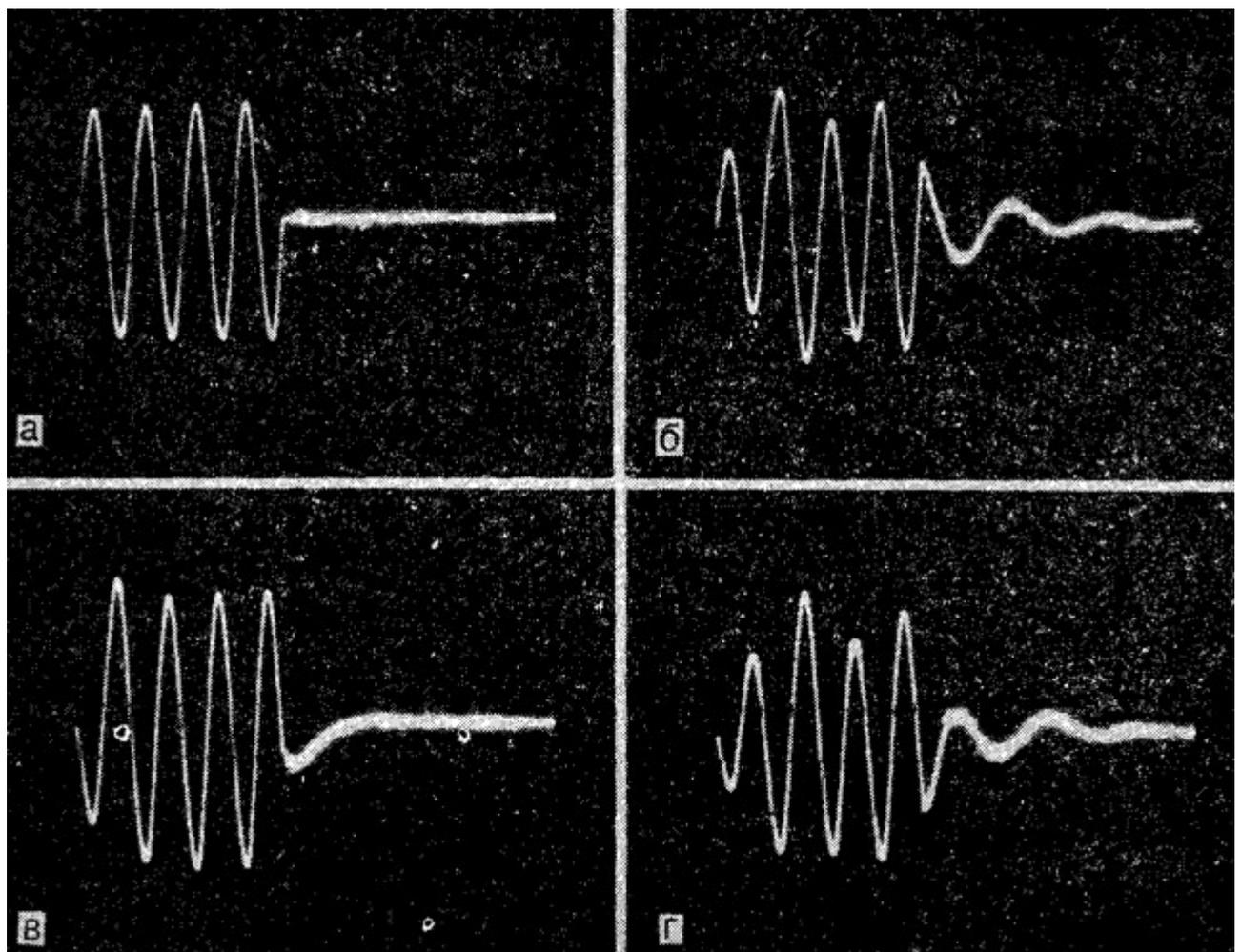


Рис. 4. Форма сигналов, используемых в эксперименте

На рис. 4 показаны формы сигналов на выходах стробирующей системы (а) и всепропускающего фазового корректора (б) при $f_k = 20$ Гц, $\max t_r = 60$ мс, $f_0 \sim 40$ Гц и эти же

сигналы на выходе головных телефонов (в) и (г). Последние были измерены с помощью искусственного уха № 4152 фирмы Брюль и Кьер.

Методика эксперимента

В эксперименте участвовало четверо испытуемых в возрасте от 20 до 35 лет. Каждому из них с интервалом 3с предъявлялись поочередно два сигнала - стандартный (I) и подвергнутый фазовым искажениям (II). Сигналы поступали одновременно к одному и другому уху испытуемого в виде последовательности, состоящей из 5 пар.

Испытуемый должен был при помощи переключателя изменять $\max t_{г}$ так, чтобы с уверенностью улавливать и последовательно отмечать моменты едва заметного появления (или исчезновения) искажений сигнала по сравнению со стандартным сигналом. При этом каждое пороговое значение $\max t_{г}$ фиксировалось экспериментатором. Средние значения этой величины при заданных $\omega_{н}$ и $\omega_{п}$ фиксировались экспериментатором в качестве индивидуального порога обнаружения искажений групповой задержки. Индивидуальные пороги были использованы для оценки вероятности группового порога обнаружения искажений групповой задержки в определенных координатах $\max t_{г}$.

Результаты экспериментов

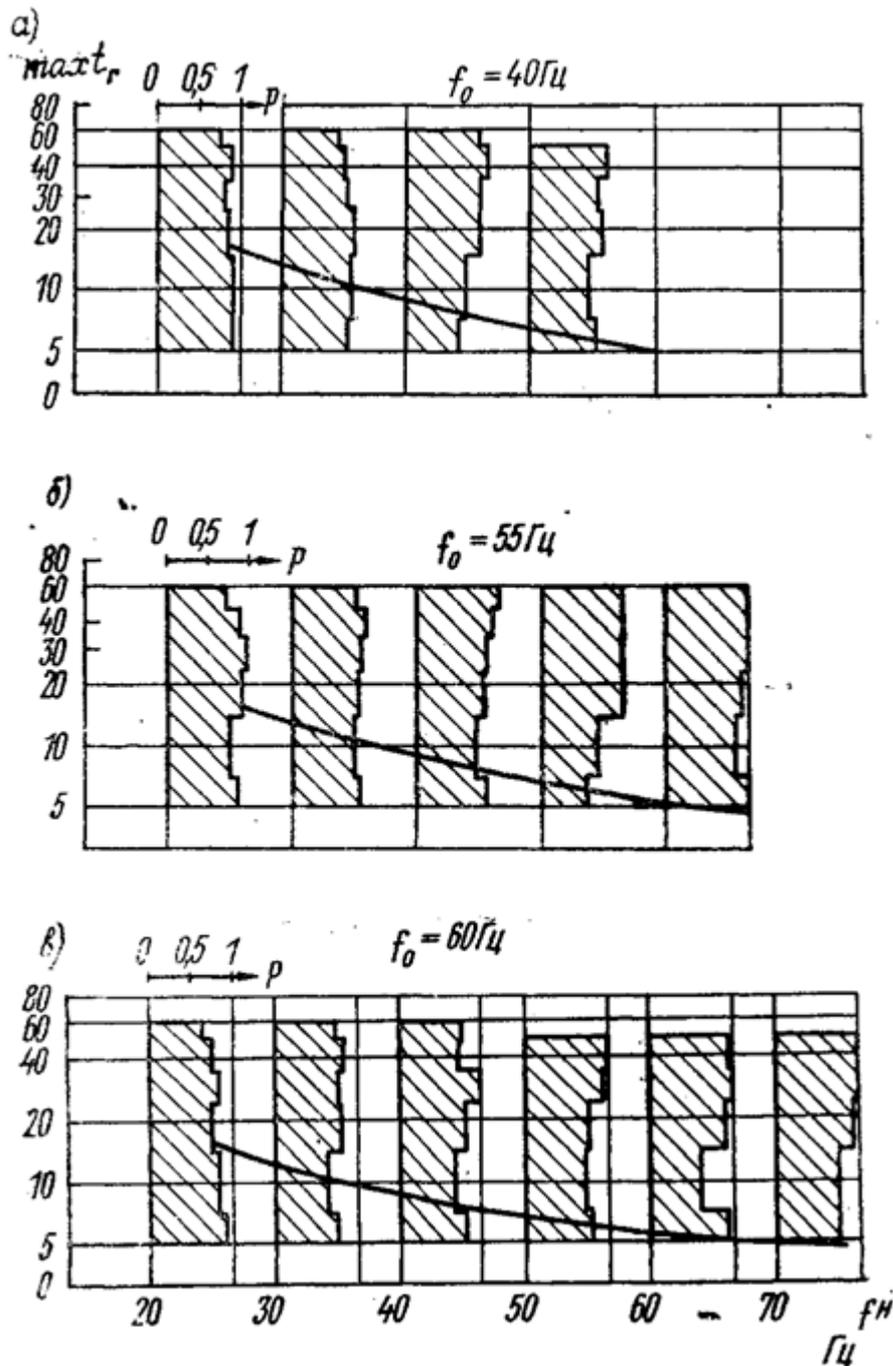


Рис. 5. Значения индивидуальных порогов восприятия искажений групповой задержки

На рис. 5 приведены зависимости вероятности восприятия искажений групповой задержки P (ширина столбика вдоль оси ординат) от частоты максимума и величины последнего. Результаты получены на частотах испытательного сигнала $f_0 = 40$ (а), 55 (б), 60 (в) Гц. На рис. 5 пунктиром показаны значения максимальной групповой задержки, соответствующие $Q_{\text{Л}} = 1$.

В процессе эксперимента установлено, что в области рассматриваемых значений полной добротности $P > 0,5$. При этом слушатели обнаруживают искажения величиной $\Delta t_{\text{Г}} \approx 5 \div 7$ мс (при $P = 0,75$).

Полученные результаты хорошо согласуются с данными работы [6]. Подтверждены ранее высказанные соображения о перераспределении заметности искажений групповой задержки на частоте $1,5 \omega_{\text{Н}}$ при изменении $Q_{\text{Л}}$ (увеличение $\max t_{\text{Г}}$ при $\omega_0 < 1,5 \omega_{\text{Н}}$ приводит к уменьшению, а при $\omega_0 > 1,5 \omega_{\text{Н}}$ к увеличению вероятности обнаружения искажений групповой

задержки).

В процессе экспериментов также установлено, что в области порога испытуемые затрудняются идентифицировать свои ощущения и отмечают лишь слабое различие сигналов. При несколько превышающей порог обнаружения искажений величине возникает ощущение повышения высоты искаженного сигнала относительно стандартного.

Аналогичные результаты были получены в работе [12] при имитации фазовых искажений двухполосной акустической системы в области стыковки АЧХ НЧ и ВЧ головок громкоговорителей. Авторы объясняют это преобразованием огибающей в мгновенную частоту при прохождении сигнала через цепь, вносящую искажения групповой задержки.

Обсуждение результатов

1. В проведенных опытах сигналы после всепропускающего фазового корректора претерпевали значительные искажения задержки фазы. Однако, если максимальное время групповой задержки меньше индивидуального порога, фазовые искажения слушателями не ощущались. Это подтверждает, что моноуральное восприятие фазы связано со способностью слуха детектировать огибающую и мгновенную частоту сигнала и нечувствительностью к изменениям фазы несущего колебания. Из этого также следует, что нет необходимости добиваться линейной фазовой характеристики акустических систем в области низких частот как это утверждается в работах [13, 14].

2. Результаты измерений порогов обнаружения искажений групповой задержки сопоставимы с реально наблюдаемыми временами задержки закрытых АС и, следовательно, должны учитываться при выборе параметров НЧ головки громкоговорителя.

3. Важность полученных результатов определяется также субъективно наблюдаемым амплитудно-частотным преобразованием, которое может проявляться в форме диссонирующих звучаний при воспроизведении реальных музыкальных программ.

4. Подтверждено (см. рис. 5) высказанное ранее предположение, что при равных значениях Q_{Π} вследствие увеличения максимальной групповой задержки при понижении частоты $\omega_{\text{Н}}$ наиболее заметными оказываются искажения, когда f_k приближается к нижней граничной частоте спектра воспроизводимых сигналов (т.е. $f_0 \cong 40$ Гц). На более высоких и более низких частотах по ранее рассмотренным причинам заметность уменьшается.

Выводы и рекомендации

Анализ полученных результатов и сопоставление их с характеристиками групповой задержки реальных НЧ головок громкоговорителей в закрытом корпусе позволяют сформулировать ряд рекомендаций по выбору оптимальных значений частоты $\omega_{\text{Н}}$ и добротности Q_{Π} , при которых заметность фазовых искажений может быть существенно ослаблена:

1. При выборе $\omega_{\text{Н}}$ НЧ головки в закрытом корпусе следует избегать значений, при которых $f_k = 40$ Гц, так как на этой частоте искажения групповой задержки наиболее заметны. Наилучшие результаты можно ожидать при снижении $\omega_{\text{Н}}$ до значений, при которых $f_k < 20-24$ Гц, а для акустических систем более низкого класса при $f_k > 60$ Гц.

2. Искажения групповой задержки могут быть ослаблены путем уменьшения Q_{Π} , причем для $f_k = 40$ Гц можно рекомендовать $Q_{\Pi} \cong 0,3 \div 0,5$. При понижении f_k до 20 Гц можно увеличить Q_{Π} до ~ 1 , а при $f_k = 60$ Гц и более следует выбирать Q_{Π} близким к 0,5. Предпочтительность АС с

Эта равной или меньше критической отмечается звукорежиссерами [4]. Хотя в этом случае АЧХ перестает быть линейной, субъективное впечатление о передаче переходных процессов НЧ головки улучшается [15].

3. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработку АС с фазоинверторами и систем с пассивными излучателями. Последние, несмотря на выраженное искажение фазовой задержки, имеют ряд преимуществ [1] по сравнению с закрытыми АС. При проектировании указанных АС должны быть минимизированы искажения групповой задержки, а не отклонения АЧХ от линейной, как это рекомендуется в работе [16].

Следует считать целесообразным применение электрических всепропускающих фазовых корректоров 2-го порядка на входе АС, с помощью которых может быть скорректировано время групповой задержки НЧ головки громкоговорителя в любом оформлении.

Необходимо отметить, что эксперименты были выполнены с использованием синтезированных сигналов. Поэтому полученные результаты следует рассматривать как предварительные. Для окончательных количественных оценок восприятия фазовых искажений НЧ головок следует продолжить исследования с использованием реальных музыкальных программ.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам ВНИИРПА им. А. С. Попова Ю. Н. Дианову и В. И. Суховскому за разработку экспериментальной установки и участие в психофизических экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Novak J. -JAES, 1959, v. 7, N 1, p. 29-37.
2. Керно Р. П. и др. Исследование и оценка переходных процессов громкоговорителей и акустических систем на качество воспроизведения низких частот. "Ученые записки Рижского политехнического института", 1968, № 31.
3. Скучик Е. Основы акустики. Том I. Перевод с нем. М., ИИЛ, 1958, с. 446-488.
4. Schulein R. B. -JAES, 1975, v. 23, N 3, p. 178-186.
5. Девис А. Современная акустика. М., ГОНТИ, 1938.
6. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации. Перевод, с нем. М., "Связь", 1978, с. 187-191.
7. Schroeder M. R. - "J. Acoust. Soc. Amer.", v. 31, p. 1579.
8. Boer E. - "Acustica", v. 11, p. 182-184.
9. Мауг Н. -JAES, 1980, v. 28, N 5, p. 331-336.
10. Small R. H. - JAES, 1972, v. 20, N 10, p. 798-808.
11. Allison R. F. -JAES, 1965, v. 13, N 1, p. 62-67.
12. Suzuki H., Shin do T. - JAES, 1980, v. 28, N 9, p. 570-574.
13. Heyser R. C - JAES, 1969, v. 17, N 1, 4.
14. Синьтиро И. Фазовые характеристики громкоговорителей. - "Хосо Гидзюцу", 1975, № И, с. 79-84.
15. Элкин Е. Г. М. Звук и изображение. Звукотехника в телевидении и кино. Перевод с англ. М., "Связь", 1978, с. 310.
16. Lamp to п. - "IEEE Transactions on Audio & Electroacoust", 1972, v. AU-20, N 5.

октябрь 1980г.