

# Анализ искажений современных высокочастотных излучателей звука

М. С. Шушнов, Т. В. Шушнова

Сибирский гос. унив. телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

*Аннотация:* В статье проведено сравнение нелинейных и линейных искажений современных динамических головок купольного типа и ленточного излучателя. Даны рекомендации по подбору высокочастотных головок для построения мониторинговой акустической системы ближнего поля. Выполнена постановка оптимизационной задачи отбора серийных экземпляров или моделей высокочастотных излучателей звука.

*Ключевые слова:* звук, психоакустика, искажения, купольная головка, динамическая головка, ленточный излучатель, аудиосистема, мониторинговая система, оптимизация.

*Для цитирования:* Шушнов М. С., Шушнова Т. В. Анализ искажений современных высокочастотных излучателей звука // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17, № 4. С. 3–14. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-4-3-14>.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Шушнов М. С., Шушнова Т. В., 2023

Статья поступила в редакцию 09.04.2023;  
принята к публикации 27.04.2023.

## 1. Введение

Актуальность анализа нелинейных и линейных искажений современных высокочастотных (ВЧ) излучателей купольного и ленточного типов стоит перед проектировщиком акустической системы, если целью проектирования является разработка технического решения, позволяющего слышать нюансы (недостатки) записи. Для звукорежиссера в процессе выполнения трудовых функций необходимо слышать неискаженную звуковую картину с хорошо заметными недостатками фонограммы. Поэтому при построении мониторинговой акустической системы субъективные критерии оценки качества звуковоспроизведения, такие как прозрачность, разборчивость, являются важными, а объективные характеристики, например, рабочий диапазон частот и коэффициент гармоник, часто не принимаются во внимание, поскольку являются малоинформативными.

Однако благодаря выявленным в профессиональной среде звукорежиссеров зависимостям между психоакустическими критериями и объективными электрическими характеристиками можно сделать вывод о необходимости снижения уровня гармонических искажений с целью получения «прозрачного», достоверного звука и недопущения превышения уровня нечетных гармоник над уровнем четных, так как в противном случае снижается разборчивость звуковоспроизведения [1–4], получения максимально ровной амплитудно-частотной характеристики для исключения перекаса тонального баланса.

## 2. Основные особенности и параметры современных высокочастотных излучателей звука

### 2.1. Ленточные излучатели

В ленточном динамике звуковая катушка и излучатель являются одним целым – проводящей лентой. Излучатель в ленточном исполнении – токопроводящая лента из металла (чаще всего применяется алюминий) толщиной от 5 до 50 мкм, находящаяся между мощными магнитами. Через ленту пропускается переменный ток, что приводит к ее колебаниям и излучению звуковой волны за счет эффективной площади ленты. Таким образом, основное отличие ленточного излучателя заключается в отсутствии «посредников» между звуковой катушкой и излучателем, малой массе ленты и позволяет воспроизводить тончайшие звуковые нюансы, что отмечается слушателями как «прозрачность», «легкость», «голографичность».

Однако лента имеет очень низкое сопротивление – порядка десятков мОм. Для согласования низкого сопротивления ленты с выходом УМЗЧ применяется понижающий трансформатор, благодаря которому входное сопротивление динамика  $Z_{НОМ}$  на рабочих частотах становится равным часто используемому номиналу 4–8 Ом.

Понижающий трансформатор обычно устанавливается внутри корпуса ленточного излучателя, из-за чего на самых низких частотах входное сопротивление ленточного излучателя с понижающим трансформатором очень мало и определяется в основном сопротивлением первичной обмотки трансформатора, которое находится в пределах 0.1–0.3 Ом. Понижающий трансформатор может вносить линейные и нелинейные искажения, поэтому его качество определяет частично качественные характеристики ленточного излучателя.

На рис. 1 показана кривая импеданса ленточного излучателя SRT-7 российской компании Viawave [5]. Кривая импеданса показывает, что в рабочем диапазоне входное сопротивление ленточного излучателя (с понижающим трансформатором) составляет единицы ом. Из рис. 1 хорошо видно, что на частотах ниже 1800 Гц импеданс  $Z_{НОМ}$  имеет подъем, связанный с резонансной частотой ленточного излучателя, с дальнейшим резким спадом до значения около 1 Ом. В пределах рабочего диапазона частот (1800–30000 Гц) импеданс  $Z_{НОМ}$  находится в пределах 6.5–12 Ом, что соответствует среднему номинальному значению 8 Ом. При работе в составе многополосной акустической системы ленточный излучатель необходимо отделять от выхода УМЗЧ по постоянному току, даже если УМЗЧ работает в составе с активным фильтром высоких частот (ФВЧ). В противном случае низкое сопротивление ленточного излучателя по постоянному току (по рис. 2 – около 1 Ом) может вызвать ложное срабатывание системы защиты выходного каскада УМЗЧ от перегрузки по току. В качестве разделительного элемента удобно использовать конденсатор, который может образовывать пассивный ФВЧ, либо использовать УМЗЧ с резисторно-конденсаторной связью с ленточным излучателем.

Следует отметить, что рост  $Z_{НОМ}$  в области ВЧ на рис. 1 свидетельствует об индуктивном характере входного сопротивления ленточного излучателя из-за влияния индуктивности первичной обмотки понижающего трансформатора.

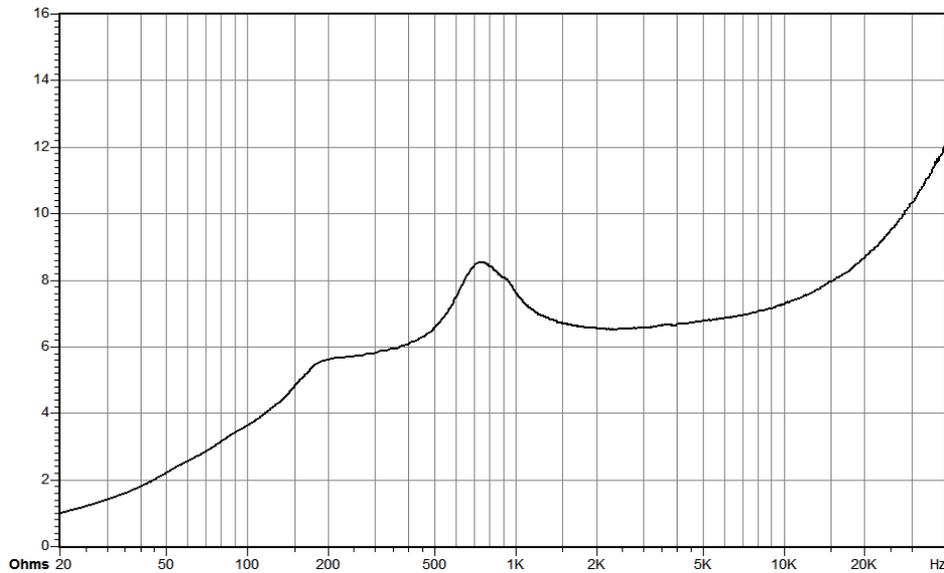


Рис. 1. Импеданс ленточного излучателя SRT-7 [5]

Производитель в [5] указывает на значение индуктивности  $L_E$ , равное 0.034 мГн, что хорошо согласуется с данными графика на рис. 1. Следует заметить, что индуктивность обычно приводит к снижению отдачи в области ВЧ и вызывает спад АЧХ (или неравномерность АЧХ  $\Delta SPL$ ) ленточного излучателя, хотя не является определяющей в формировании АЧХ.

В справочных данных на SRT-7 [5] (рис. 2) производитель приводит графики гармонических искажений по 2-й (H2) и 3-й (H3) гармонике.

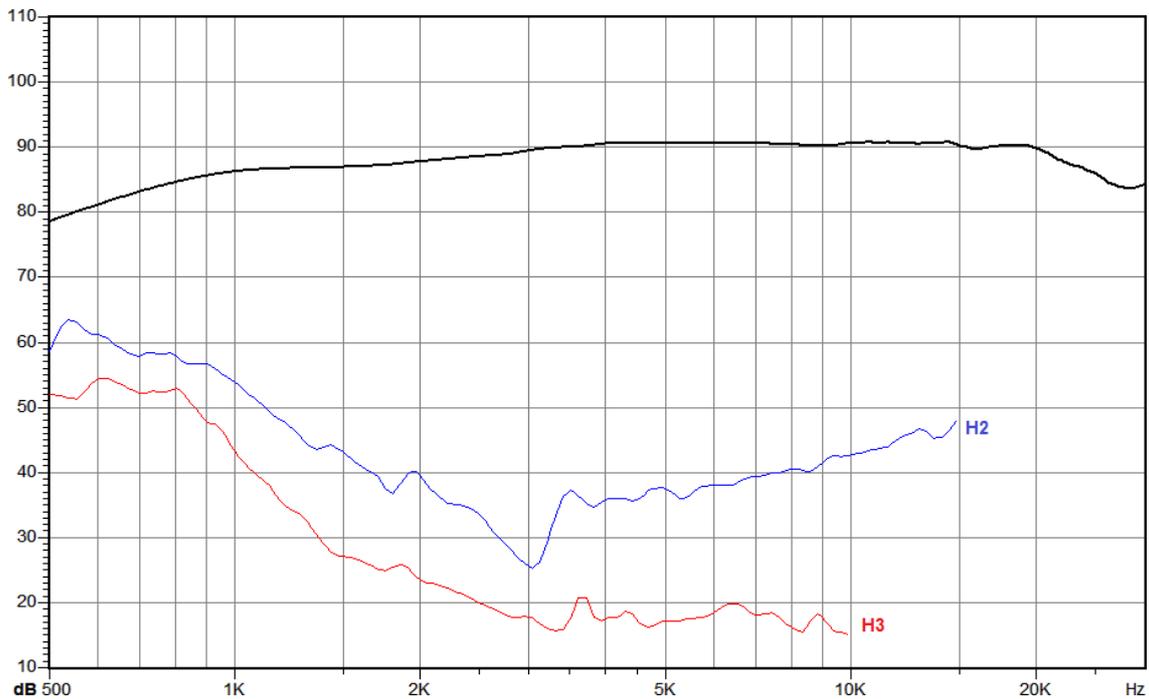


Рис. 2. Гармонические искажения в зависимости от частоты для SRT-7 при уровне звукового давления 90 дБ/м [5]

В рабочем диапазоне частот SRT-7 значение 2-й гармоники находится на уровне не более 43 дБ/м, а 3-й – не более 6 дБ/м. Чтобы определить привычные для понимания коэффициенты гармоник воспользуемся формулой пересчета:

$$K_{Г2} = \frac{U_2}{U_1} 100\% = \frac{10^{SPL_2/20}}{10^{SPL_1/20}} 100\%, \quad K_{Г3} = \frac{U_3}{U_1} 100\% = \frac{10^{SPL_3/20}}{10^{SPL_1/20}} 100\%, \quad (1)$$

где  $U_1, U_2, U_3$  – амплитуды напряжения 1-й, 2-й, 3-й гармоник;  $SPL_1, SPL_2, SPL_3$  – уровни звукового давления по 1-й, 2-й и 3-й гармоникам.

В результате пересчета на средней частоте рабочего диапазона частот ВЧ-излучателя SRT-7 (7–10 кГц) получим значения  $K_{Г2} = 0.46 \%$  и  $K_{Г3} = 0.007 \%$ . Легко заметить, что  $K_{Г3}$  находится на границе разрешающей способности современного измерительного оборудования и, скорее всего, определяется шумовой полкой измерительного комплекса (измерительного микрофона). Уровень  $K_{Г2}$  низок и находится на уровне ниже замечаемого человеческим слухом предела. Следует предположить, что уровни гармонических искажений при повышении громкости будут пропорционально расти, а преобладающей останется 2-я гармоника. Учитывая номинальную мощности SRT-7 17 Вт, достижимый уровень SPL будет равен  $95 + 10 \lg(17) = 107$  дБ, что не превышает комфортного уровня прослушивания 105–107 дБ. В то же время при длительной работе стандарт DIN15905-3 устанавливает допустимый уровень громкости не более 90 дБ. Такой уровень соответствует справочным значениям, рассчитанным выше по (1). Поскольку  $K_{Г2}$  и  $K_{Г3}$  SRT-7 ниже замечаемого предела в 0.5–2 %, то субъективная оценка звучания SRT-7 будет как «нейтральное», «неокрашенное», «мониторное», что соответствует [1] и подходит для задачи мониторинга звукового сигнала.

## 2.2. Купольные излучатели

Сегодня наиболее распространенным среди ВЧ-головок является купольный диффузор. Он может быть мягким (из текстиля, например шелка с пропиткой) или жестким – из металла или керамики. Конструкция типичного ВЧ-динамика отличается не только размером диффузора.

Купольные диффузоры, которые могут быть выпуклыми или, реже, вогнутыми, изготавливаются прессованием из натуральных или синтетических тканей с обязательной последующей пропиткой. Всё большее распространение получают диффузоры ВЧ-головок из синтетических полимерных пленок или металлической фольги. Для повышения жесткости диффузоры изготавливают методом осаждений из паровой фазы различных материалов: бора, бериллия и др. Существуют многочисленные примеры купольных диффузоров из керамики, которая, по сути, является окислом металлов, например, алюминия.

Подкупольное пространство часто заполнено звукопоглотителем для снижения влияния подкупольных отражений. Поскольку подкупольное пространство мало, то резонансная частота купольной головки может оказаться высокой. Для снижения резонансной частоты купольного ВЧ-излучателя применяется система звуковых каналов, расположенных в керне магнитной системы (полый керн или полый керн с присоединенным заглушенным объемом – акустической камерой). Также применяется метод снижения добротности резонанса купольного ВЧ-излучателя и индуктивности звуковой катушки. Для этого внутрь звуковой катушки помещается короткозамкнутый виток: крепится медное кольцо на керн магнитной системы или каркас звуковой катушки выполняется из алюминиевой фольги.

Таким образом, основное отличие купольного излучателя заключается в наличии «прямого» привода между звуковой катушкой и излучателем. Поскольку масса подвижной системы будет определяться материалом каркаса звуковой катушки, проводом обмотки и купола, то воспроизведение тончайших звуковых нюансов может осуществляться по-разному для разных моделей купольных ВЧ-головок. Звук купольных ВЧ-головок слушателями часто оценивается как «прозрачный», «мягкий», «объемный».

Звуковая катушка купольного ВЧ-динамика имеет сопротивление порядка единиц ом. Купольный ВЧ-излучатель можно подключить непосредственно к выходу УМЗЧ.

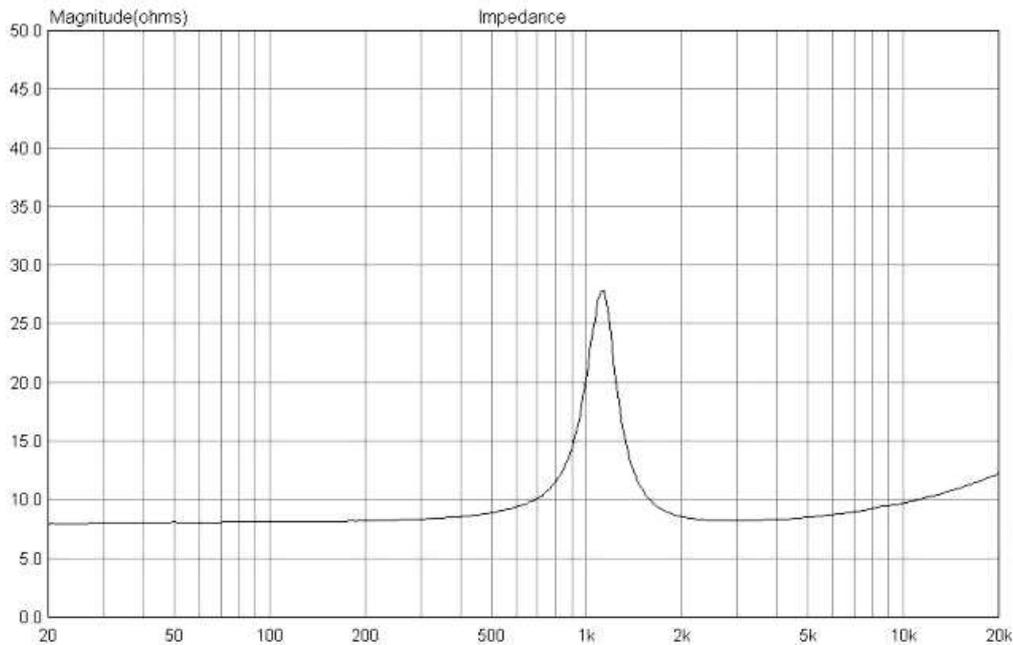


Рис. 3. Импеданс купольного ВЧ-излучателя Т26.8 [6]

На рис. 3 показана кривая  $Z_{НОМ}$  купольного ВЧ-динамика Т26.8 производства российской компании АСА лаб [6]. Из рис. 3 видно, что на частотах ниже 2000 Гц импеданс имеет подъем, связанный с резонансной частотой купольного излучателя, с дальнейшим резким спадом до значения около 7 Ом. В пределах рабочего диапазона частот (2000–20000 Гц) импеданс  $Z_{НОМ}$  находится в пределах 7–12 Ом, что соответствует среднему номинальному значению 8 Ом. При работе в составе многополосной акустической системы купольный ВЧ излучатель допустимо не отделять от выхода УМЗЧ по постоянному току. В качестве разделительного элемента можно использовать активный ФВЧ на входе УМЗЧ либо пассивный ФВЧ на выходе УМЗЧ, необходимый для ограничения рабочего диапазона частот ВЧ-излучателя.

Следует отметить, что рост импеданса  $Z_{НОМ}$  в области ВЧ на рис. 3 имеет примерно такой же характер, как для ленточного излучателя на рис. 2. Характер сопротивления купольной динамической ВЧ-головки так же индуктивный из-за индуктивности звуковой катушки.

Производитель в [6] указывает на значение индуктивности  $L_E$ , равное 0.041 мГн, что хорошо согласуется с данными графика на рис. 3. Следует заметить, что индуктивность обычно приводит к снижению отдачи в области ВЧ и вызывает спад АЧХ (или неравномерность АЧХ) купольного излучателя.

Стоит заметить, что чем меньше изменение импеданса  $\Delta Z_{НОМ}$  в диапазоне рабочих частот, тем потенциально ниже неравномерность АЧХ излучателя.

В справочных данных на Т26.8 [6] (рис. 4) производитель приводит графики гармонических искажений по 2-й (D2), 3-й (D3), 4-й (D4) и др. гармоникам.

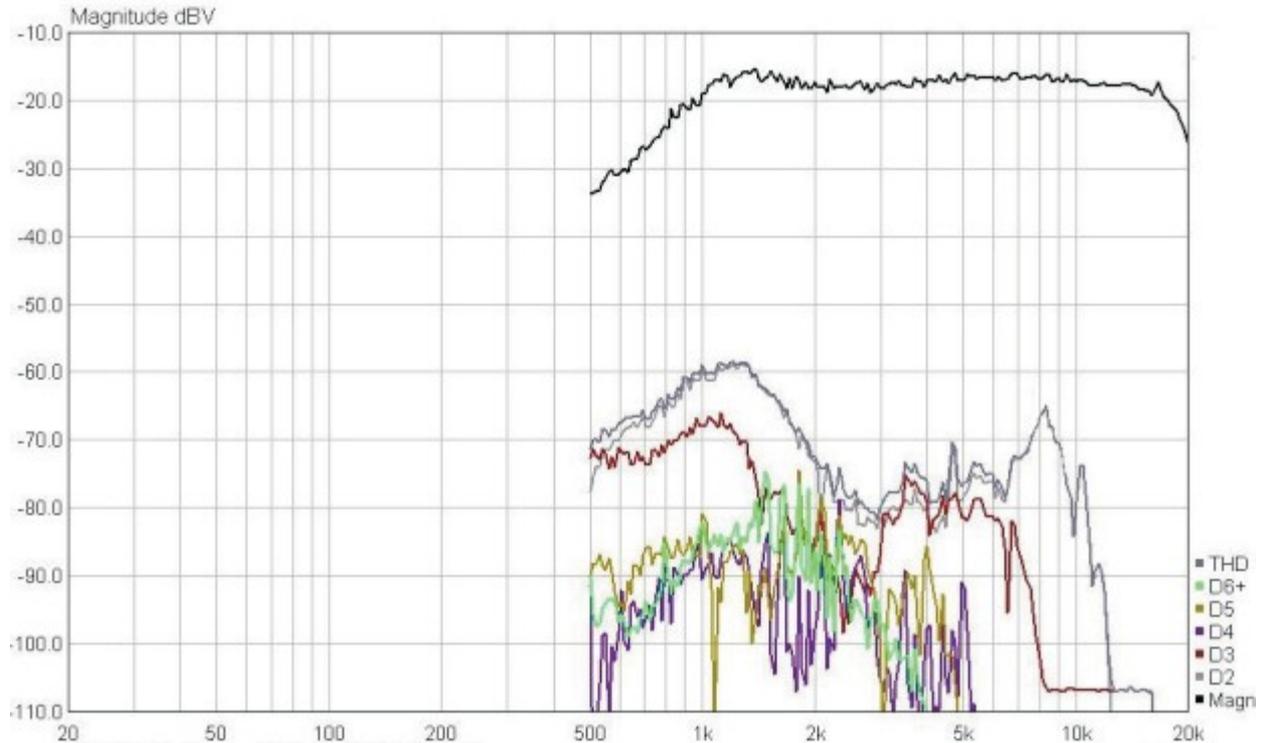


Рис. 4. Гармонические искажений от частоты для T26.8 при уровне звукового давления 90 дБ/м [6]

В рабочем диапазоне частот T26.8 относительно среднего уровня при измерениях -8 дБВ значение 2-й гармоники находится на уровне не более -57 дБВ, а 3-й – не более -74 дБВ. Чтобы определить привычные для понимания коэффициенты гармоник, воспользуемся формулой пересчета (1).

В результате пересчета на средней частоте рабочего диапазона частот ВЧ-излучателя T26.8 (7–10 кГц) получим значения  $K_{Г2} = 0.0013 \%$  и  $K_{Г3} = 0.000025 \%$ . Вклад более высоких гармоник незначителен и их можно не учитывать. Уровень  $K_{Г2}$  низок и находится ниже замечаемого человеческим слухом предела. Следует предположить, что уровни гармонических искажений при повышении громкости будут пропорционально расти, а преобладающей останется 2-я гармоника. Учитывая номинальную мощности T26.8, равную 100 Вт, достижимый уровень SPL будет равен  $95 + 10 \lg(100) = 110$  дБ, что превышает комфортный уровень прослушивания, составляющий 105–107 дБ. При уровне громкости не более 90 дБ значения  $K_{Г2}$  и  $K_{Г3}$  купольного ВЧ-динамика T26.8 будут ниже, чем у ленточного SRT-7, то есть еще ниже замечаемого предела в 0.5–2 %. Субъективная оценка звучания T26.8 будет такая же, как и для SRT-7: «нейтральное», «неокрашенное», «мониторное». Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что T26.8 тоже подходит для задачи мониторинга звукового сигнала.

Следует отметить, что в случае с T26.8 имеется небольшой запас ( $110 - 107 = 3$  дБ) по перегрузке по сравнению с SRT-7. Запас по перегрузке важен в студийной работе, для исключения выхода из строя динамической головки при резком увеличении уровня громкости (такие ситуации нередки в студийной практике). Но SRT-7 обладает большей чувствительностью – 95 дБ/Вт против 90 дБ/Вт для T26.8, что снижает требования к выходной мощности УМЗЧ в 3 раза.

### 3. Анализ АЧХ ВЧ-излучателей

В соответствии с правилами объективной оценки качества звуковоспроизведения сравним АЧХ ленточного излучателя SRT-7 (рис. 5) и купольного ВЧ-динамика Т26.8 (рис. 6).

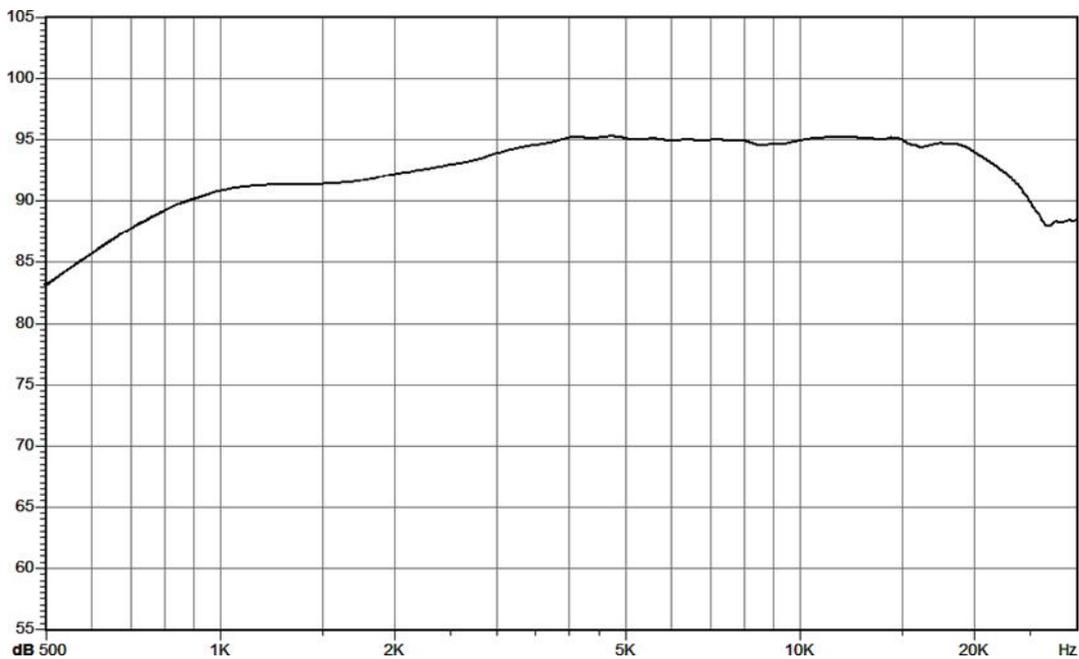


Рис. 5. АЧХ ленточного излучателя SRT-7 в горизонтальной плоскости при уровне звукового давления 90 дБ/м [5]

В пределах диапазона частот 2000–20000 Гц в направлении главной оси неравномерность АЧХ ( $\Delta SPL$ ) излучателя SRT-7 не превышает 3 дБ. В том же диапазоне частот купольная ВЧ-головка Т26.8 имеет неравномерность АЧХ не более 5 дБ. Большая неравномерность АЧХ Т26.8, скорее всего, связана с большей массой подвижной системы головки и большей индуктивностью звуковой катушки по сравнению с ленточным излучателем SRT-7.



Рис. 6. АЧХ купольной ВЧ-головки Т26.8 со сглаживанием 1/6 октавы при уровне звукового давления 90 дБ/м [6]

Следует заметить, что в конструкции Т26.8 отсутствует короткозамкнутое кольцо в магнитной системе, снижающее индуктивность звуковой катушки, применен цельный керн и отсутствует акустическая камера за керном. Например, аналогичная по размеру купола динамическая ВЧ-головка с шелковым куполом Н1149-06 27ТДС [7] производства норвежской компании SEAS при большей индуктивности звуковой катушки (0.05 мГн) имеет неравномерность АЧХ в пределах диапазона частот 2000–20000 Гц не более 4 дБ. В конструкции Н1149-06 27ТДС применен полый керн с присоединенным заглушенным объемом акустической камеры и особый мягкий подвес, что позволило снизить резонансную частоту головки и массу подвижной системы  $M_{ms}$  (Н1149-06 27ТДС имеет  $M_{ms}$  0.25 гр, а Т26.8 – 1.25 гр.). Снизить неравномерность АЧХ Т26.8 можно путем снижения массы подвижной системы за счет применения более тонкого материала купола, изменения конструкции подвеса, путем намотки звуковой катушки более легким проводом (алюминием) или с помощью модификации состава для пропитки текстильного купола. В ассортименте компании АСА лаб имеется модель купольной ВЧ динамической головки Т280.8 [8], конструкция подкупольного пространства которой схожа с Н1149-06 27ТДС, но неравномерность АЧХ все же не удалось уменьшить, хотя рабочий диапазон частот был расширен в области ВЧ за счет применения алюминиевого каркаса звуковой катушки.

#### 4. Оптимизационная задача поиска оптимальных экземпляров (моделей) высокочастотных излучателей звука

Поскольку при производстве высокочастотных излучателей имеет место технологический разброс электрических характеристик, различные модели излучателей имеют отличающиеся электрические характеристики, то существует задача поиска оптимальных экземпляров (моделей) высокочастотных излучателей.

Для решения задачи поиска оптимальных экземпляров высокочастотных излучателей для построения мониторной акустической системы можно воспользоваться методами математического моделирования.

Для формулировки оптимизационной задачи в рамках данной статьи необходимо учитывать только основные свойства и пренебрегать второстепенными.

В разделах 2 и 3 рассматривались три основных параметра в пределах диапазона рабочих частот излучателя:  $\Delta SPL$  – неравномерность АЧХ;  $K_{Г2}$  – величина 2-й гармоники;  $K_{Г3}$  – величина 3-й гармоники;  $\Delta Z_{НОМ}$  – девиация номинального импеданса. При поиске оптимума по справочным данным вместо  $\Delta Z_{НОМ}$  будем использовать значение  $L_E$ .

При решении оптимизационной задачи необходимо обеспечить поиск оптимальных [10, 11] излучателей, характеризующихся величиной:

$$V = \Delta SPL \cdot K_{Г2} \cdot K_{Г3} \cdot \Delta Z_{НОМ} . \quad (2)$$

Величина  $V$  определяется требованиями к допустимым значениям параметров в проекте  $\Delta SPL$ ,  $K_{Г2}$ ,  $K_{Г3}$  и  $\Delta Z_{НОМ}$ , тогда в решении используется значение  $V_0$ :

$$V_0 = \Delta SPL \cdot K_{Г2} \cdot K_{Г3} \cdot \Delta Z_{НОМ} . \quad (3)$$

Поскольку значимость параметров может отличаться, то можно задать величину  $S$  через коэффициенты значимости  $K_i$ , где  $i$  – номер параметра:

$$S = K_1 \Delta SPL + K_2 K_{Г2} + K_3 K_{Г3} + K_4 \Delta Z_{НОМ} . \quad (4)$$

Запишем постановку оптимизационной задачи в виде:

$$\begin{cases} F = S \rightarrow \min \\ V = V_0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $F$  – целевая функция;  $V$  – ограничение.

Тогда

$$\begin{cases} F = K_1 \Delta SPL + K_2 K_{Г2} + K_3 K_{Г3} + K_4 \Delta Z_{НОМ} \rightarrow \min \\ \Delta SPL \cdot K_{Г2} \cdot K_{Г3} \cdot \Delta Z_{НОМ} = V_0 \end{cases}. \quad (6)$$

В (6) очевидно, что  $\Delta SPL$ ,  $K_{Г2}$ ,  $K_{Г3}$  и  $\Delta Z_{НОМ} > 0$ , и с учетом психоакустических свойств необходимо выполнить условие  $K_{Г2} \geq K_{Г3}$ . После введения в (6) граничных условий получим математическую модель:

$$\begin{cases} F = K_1 \Delta SPL + K_2 K_{Г2} + K_3 K_{Г3} + K_4 \Delta Z_{НОМ} \rightarrow \min \\ \Delta SPL \cdot K_{Г2} \cdot K_{Г3} \cdot \Delta Z_{НОМ} = V_0 \\ \Delta SPL, K_{Г2}, K_{Г3}, \Delta Z_{НОМ} > 0 \text{ и } K_{Г2} \geq K_{Г3} \end{cases}. \quad (7)$$

Поскольку из (7) видно, что система имеет бесконечное множество решений, то имеется оптимальное решение, то есть существуют оптимальные экземпляры излучателей.

Сбор исходных данных для реализации математической модели (7) – необходимый этап работы при поиске оптимального решения. Осуществляется сбор может в процессе конвейерного производства на этапе контроля качества продукции путем проведения необходимых и достаточных измерений  $\Delta SPL$ ,  $K_{Г2}$ ,  $K_{Г3}$  и  $\Delta Z_{НОМ}$  и составления таблицы соответствия серийного номера изделия его параметрам. Для поиска (отбора) оптимальных экземпляров можно воспользоваться табличным редактором Excel, реализовав в нем алгоритм (7). При выполнении опытно-конструкторских работ на этапе поиска подходящих моделей ВЧ-излучателей исходные данные могут быть представлены в виде усредненных параметров. Для этого потребуется собрать на начальном этапе работы небольшое количество исходных данных для быстрой оценки правильности составленной модели, что тоже возможно сделать в Excel.

Отобранные экземпляры (модели) ВЧ-излучателей, удовлетворяющие (7), могут быть применены в конструкции мониторинной акустической системы только после анализа полученного результата решения разработчиком, так как в ряде случаев в (7) могут быть учтены не все важные параметры, тогда (7) необходимо дополнять.

## 5. Заключение

Несмотря на некоторую технологическую отсталость высокочастотных излучателей российского производства, построение мониторинной акустической системы ближнего поля с неравномерностью АЧХ в области ВЧ не хуже, чем у зарубежных аналогов, видится возможным. Так, популярная и недорогая модель активных мониторов производства Yamaha модели NS7 имеет неравномерность АЧХ в диапазоне частот 2000–20000 кГц не более 4–5 дБ [9]. Российские ВЧ-излучатели имеют схожие параметры неравномерности АЧХ, правда еще до учета неравномерности АЧХ, вносимой УМЗЧ и активным ФВЧ.

Характер подачи звукового материала сравниваемых в данной статье динамических головок STR-7 и T26.8 при оценке по психоакустическим критериям должен обеспечить возможность мониторинга звукового сигнала благодаря «нейтральной» подаче.

Для сохранения характера подачи необходимо на следующем этапе проектирования контролировать спектр искажений УМЗЧ и активного ФВЧ. Результирующие звуковые характе-

ристики мониторной акустической системы станет возможно оценить лишь после изготовления опытного образца.

Решение оптимизационной задачи поиска подходящих (оптимальных) экземпляров (моделей) ВЧ-излучателей по (7) в процессе производства или анализ по усредненным паспортным характеристикам значительно сократит сроки разработки на этапе опытно-конструкторских работ и снизит процент брака при массовом производстве продукции.

## Литература

1. *Keeperts D.* The warm, rich sound of valve guitar amplifiers. *Physics Education*. 52. 025010. 2017. DOI:10.1088/1361-6552/aa57b7.
2. *Li J.* Using Transistors to Emulate Vacuum Tube Sound Quality Based on Asymmetric Cycle Harmonic Injection Method. 752-753. 2019. DOI:10.1109/GCCE46687.2019.9015619.
3. *Bech S. and Zacharov N.* Perceptual Audio Evaluation – Theory, Method, and Application. John Wiley & Sons Ltd, 2006. DOI:10.1002/9780470869253.
4. *Раковский В. В.* Измерения в аппаратуре записи звука кинофильмов. М.: Искусство, 1962. 405 с.
5. Viawave SRT-7 sealed ribbon tweeter. «Viawave Audio» LLC, Russia, Petrozavodsk, 2019. URL: <http://viawave.ru/files/SRT-7.pdf> (дата обращения: 08.04.2023).
6. T26.8. Излучатель динамический высокочастотный. URL: [http://www.asalab.net/sites/default/files/image/T/t26/t26\\_8/t26\\_8.pdf](http://www.asalab.net/sites/default/files/image/T/t26/t26_8/t26_8.pdf) (дата обращения: 08.04.2023).
7. H1149-06 27TDC SEAS. URL: [http://www.seas.no/images/stories/prestige/pdfdatasheet/h1149\\_27tdc\\_datasheet.pdf](http://www.seas.no/images/stories/prestige/pdfdatasheet/h1149_27tdc_datasheet.pdf) (дата обращения: 08.04.2023).
8. T280.8. Излучатель динамический высокочастотный. URL: <http://www.asalab.net/sites/default/files/image/T/t28/t280/t280.8.pdf> (дата обращения: 08.04.2023).
9. Yamaha HS-series. Powered speaker system Owner's Manual. URL: [https://ru.yamaha.com/files/download/other\\_assets/4/793644/hs8i\\_en\\_om\\_c0.pdf](https://ru.yamaha.com/files/download/other_assets/4/793644/hs8i_en_om_c0.pdf) (дата обращения: 08.04.2023).
10. *Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю.* Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. 368 с.
11. *Леонова Н. Л.* Задачи линейного программирования и методы их решения: учебно-методическое пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. 75 с.

### **Шушнов Максим Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: efemerian@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1713-5177.

### **Шушнова Татьяна Владимировна**

старший преподаватель кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: t.shushnova@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-9977-1818.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

## Distortions Analysis of Modern Audio Tweeters

Maxim S. Shushnov, Tatiana V. Shushnova

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

**Abstract:** Nonlinear and linear distortions of modern dome-type tweeters and ribbon emitters are considered in this article. Recommendations for the selection of high-frequency heads for constructing a near-field monitor system are given. The statement of the optimization problem was carried out with the aim of selecting audio tweeters and ribbon emitters models or serial specimen.

**Keywords:** sound, psychoacoustics, distortion, dome tweeter, dynamic tweeter, ribbon emitter, audio system, monitor system, optimization.

**For citation:** Shushnov M. S., Shushnova T. V. Distortions analysis of modern audio tweeters (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2023, vol. 17, no. 4, pp. 3-14. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-4-3-14>.



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Shushnov M. S., Shushnova T. V., 2023

The article was submitted: 09.04.2023;  
accepted for publication 27.04.2023.

## References

1. Keeports, David. The warm, rich sound of valve guitar amplifiers. *Physics Education*. 52. 025010. 2017. DOI:10.1088/1361-6552/aa57b7.
2. Li, Jerry. Using Transistors to Emulate Vacuum Tube Sound Quality Based on Asymmetric Cycle Harmonic Injection Method. *2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, 2019, pp. 752-753. DOI:10.1109/GCCE46687.2019.9015619.
3. Soren Bech and Nick Zacharov. *Perceptual Audio Evaluation – Theory, Method, and Application*, John Wiley & Sons Ltd. 2006. DOI:10.1002/9780470869253.
4. Rakovskii V. V. *Izmereniya v apparature zapisi zvuka kinofil'mov* [Measurements in the technique of recording of the sound of films]. Moscow, Isskustvo, 1962. 405 c.
5. Viawave SRT-7 sealed ribbon tweeter. «Viawave Audio» LLC, Russia, Petrozavodsk, 2019, available at: <http://viawave.ru/files/SRT-7.pdf> (accessed 08.04.2023.)
6. T26.8. *Izluchatel' dinamicheskii vysokochastotnyy* [The dynamic high-frequency radiator], available at: [http://www.asalab.net/sites/default/files/image/T/t26/t26\\_8/t26\\_8.pdf](http://www.asalab.net/sites/default/files/image/T/t26/t26_8/t26_8.pdf) (accessed: 08.04.2023.)
7. H1149-06 27TDC SEAS, available at: [http://www.seas.no/images/stories/prestige/pdfdatasheet/h1149\\_27tdc\\_datasheet.pdf](http://www.seas.no/images/stories/prestige/pdfdatasheet/h1149_27tdc_datasheet.pdf) (accessed: 08.04.2023 r.)
8. T280.8. *Izluchatel' dinamicheskii vysokochastotnyy* [The dynamic high-frequency radiator], available at: <http://www.asalab.net/sites/default/files/image/T/t28/t280/t280.8.pdf> (accessed: 08.04.2023.)
9. *Yamaha HS-series. Powered speaker system Owner's Manual*, available at: [https://ru.yamaha.com/files/download/other\\_assets/4/793644/hs8i\\_en\\_om\\_c0.pdf](https://ru.yamaha.com/files/download/other_assets/4/793644/hs8i_en_om_c0.pdf) (accessed: 08.04.2023.)
10. Korbut A. A., *Finkel'shein U.U. Diskretnoye programmirovaniye* [Discrete programming]. Moscow, Nauka, 1969. 368 p.

11. Leonova N. L. *Zadachi lineynogo programmirovaniya i metody ikh resheniya: uchebno-metodicheskoye posobiye* [Tasks of linear programming and methods for their solutions: a training manual]. Saint Petersburg, Vysshaya shkola tekhnologii i energetiki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta promyshlennykh tekhnologii i dizaina, 2017. 75 p.

**Maxim S. Shushnov**

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Digital Television, Radio Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), e-mail: efemerian@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1713-5177.

**Tatiana V. Shushnova**

Senior lecturer of the Department of Digital Television, Radio Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), e-mail: t.shushnova@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-9977-1818.