

Поиск оптимальных экземпляров высокочастотных излучателей звука

М. С. Шушнов, Т. В. Шушнова

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

Аннотация: В статье описана методика поиска оптимальных экземпляров высокочастотных излучателей звука на основе объективных измерений. Даны рекомендации по автоматизации процесса отбора. Выполнена постановка оптимизационной задачи отбора серийных экземпляров или моделей высокочастотных излучателей звука, составлена математическая модель алгоритма отбора.

Ключевые слова: звук, резонанс, искажения, купольная, динамическая головка, акустическая система, оптимизация.

Для цитирования: Шушнов М. С., Шушнова Т. В. Поиск оптимальных экземпляров высокочастотных излучателей звука // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19, № 3. С. 30–37. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-3-30-37>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Шушнов М. С., Шушнова Т. В., 2025

Статья поступила в редакцию 25.09.2024;
переработанный вариант – 24.01.2025;
принята к публикации 08.04.2025.

1. Введение

Актуальность анализа линейных искажений высокочастотных (ВЧ) излучателей звука стоит перед проектировщиком акустических систем (АС), если целью проектирования является разработка высококачественного технического решения. В ряде случаев при прослушивании музыки в бытовых условиях или при профессиональной деятельности звукорежиссера целью является воспроизведение максимально достоверной тембрально звуковой картины. Тембральный окрас при звуковоспроизведении частично определяется неравномерностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), примененной в конструкции АС динамической головки (ДГ).

2. Критерии отбора экземпляров высокочастотных излучателей звука

2.1. Отбор экземпляров по критерию неравномерности амплитудно-частотной характеристики

Поскольку неравномерность АЧХ ДГ имеет место в рабочем диапазоне рабочих частот, то ее можно охарактеризовать некоторой конечной величиной неравномерности создаваемого звукового давления ΔSPL . Однако для измерения ΔSPL требуется специальная акустическая камера, что при серийном производстве ДГ привело бы к существенному удорожанию стоимости изготовления ДГ, из-за чего ΔSPL в настоящее время при производстве ДГ не контролируется. Для ВЧ ДГ основную проблему при проектировании АС с низкой частотой

раздела представляет наличие основного резонанса подвижной системы ДГ. Из-за технологических погрешностей изготовления ДГ возможна ситуация с существенным изменением величины механической добротности Q_{MS} . Вариация Q_{MS} оказывает существенное влияние на форму (неравномерность) АЧХ ВЧ ДГ вблизи частоты основного резонанса F_S . В многополосных АС при высокой частоте раздела ВЧ относительно F_S наличие резонанса с высокой Q_{MS} скорее всего не скажет существенного влияния из-за достаточного подавления на частоте F_S в разделительном фильтре. К сожалению, в двухполосных АС с низкой частотой раздела подавление на частоте F_S может оказаться недостаточным, из-за чего на АЧХ АС появится неравномерность.

Контроль АЧХ представляет сложную метрологическую задачу, так как снятие АЧХ каждого экземпляра ВЧ ДГ при производстве требует специальной установки для выполнения акустических измерений и специально подготовленного помещения в виде акустической камеры. Подобный подход дорог в реализации и сложен в применении при массовом производстве продукции. Также при использовании коротких циклов тестирования внутри автоматизированного производственного цикла не существует возможности использовать методику по ГОСТ Р 53575-2009 [1] из-за длительности процессов тестирования и сложности этой методики.

Безусловным достоинством метода отбора экземпляров по критерию минимальной неравномерности АЧХ является оценка комплекса возможных технологических огрехов, допущенных при изготовлении экземпляра ВЧ ДГ. В то же время измерения АЧХ должны выполняться не сразу после изготовления ВЧ ДГ, а спустя некоторое время (обычно около 100 часов прогона), необходимое для достижения характеристик излучателя своих паспортных значений, и при подведении номинальной мощности к излучателю в течение этого времени, что делает метод оценки на основе анализа АЧХ неудобным при конвейерном процессе производства.

2.2. Отбор экземпляров по параметрам основного резонанса

Задача поиска оптимальных подходящих экземпляров высокочастотных динамических головок осложняется необходимостью контроля резонансной частоты F_S . Кроме этого, необходимо контролировать величину добротности подвижной системы динамической головки Q_{MS} , поскольку при высоком значении добротности подвижной системы на АЧХ проявляется резонансный пик. Наличие резонанса с высокой добротностью приводит к возникновению посторонних призвуков при звуковоспроизведении, что негативно сказывается в качестве звучания акустической системы. Поэтому задача поиска оптимальных экземпляров (моделей) динамических головок должна рассматриваться с учётом основного резонанса динамической головки F_S , который может иметь отклонение, но не превышающее верхнее допустимое значение $F_{S\max}$. Дополнительно задача поиска оптимальных экземпляров осложняется возможной нетехнологичностью при производстве динамических головок, в связи с этим будет иметь место существенное изменение параметров как резонансной частоты F_S , так и добротности механической системы Q_{MS} . При отборе экземпляров на стадии расчета конструкции АС руководствуются верхним допустимым значением частоты основного резонанса $F_{S\max}$ и верхним допустимым значением механической добротности $Q_{MS\max}$.

Рассмотрим задачу определения добротности механической системы Q_{MS} и резонансной частоты динамической головки F_S на примере из купольного ВЧ излучателя. Для определения основного резонанса динамической головки необходимо выполнить измерение импедансной характеристики $Z(F)$ (рис. 1). Для этого можно воспользоваться методом, описанным в [2]. Для измерения использовалось программное обеспечение justMLS из пакета LspCAD 6 [3]. Характер зависимости на рис. 1 определяется в области до основного резонанса, в основном, величиной сопротивления звуковой катушки по постоянному току. В области основного резонанса вид резонансной кривой может отличаться от показанного канонического вида, если в ДГ применены меры по снижению резонансных явлений, например, преду-

смотрена подкупольная акустическая камера. Наличие подкупольной камеры легко определяется по форме резонансной кривой как появление дополнительного резонанса на более низкой частоте при частичном подавлении основного резонанса ДГ. Наличие ферромагнитной жидкости в зазоре звуковой катушки ДГ влияет только на величину добротности механической системы, из-за чего резонанс проявляется в меньшей степени. Для ДГ с подкупольной камерой и без нее поведение импедансной характеристики в области частот выше основного резонанса практически полностью определяется величиной сопротивления по постоянному току R_E и индуктивностью звуковой катушки L_E .

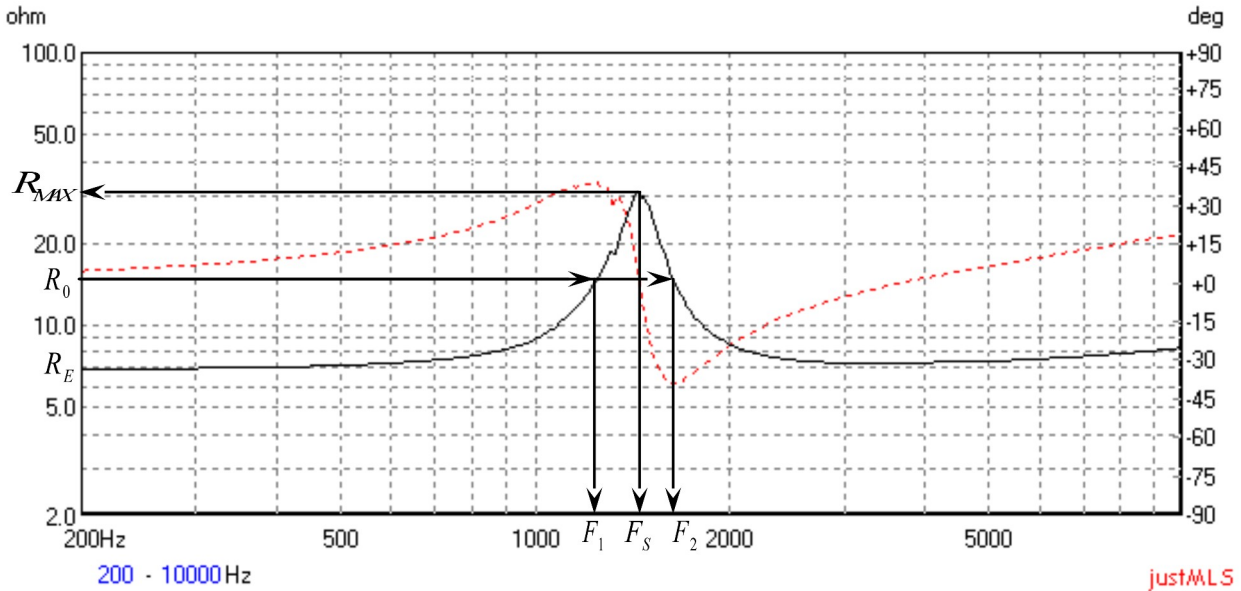


Рис. 1. Примерный вид импедансной характеристики купольного ВЧ излучателя

Расчёт добротности механической системы динамической головки Q_{MS} выполняется по формуле [1]

$$Q_{MS} = \frac{\sqrt{F_1 F_2}}{F_2 - F_1} \sqrt{\frac{R_0}{R_{MAX}}}, \quad (1)$$

где $R_0 = \frac{R_{MAX}}{R_E}$; $R_{MAX} = MAX(Z(F))$ – сопротивление ВЧ ДГ на частоте основного резонанса F_s ; $R_E = Z(0)$ – сопротивление звуковой катушки, измеренное на постоянном токе; F_1 и F_2 – вспомогательные частоты. Для нахождения F_1 и F_2 используется вспомогательный уровень R_X , который рассчитывается $R_X = \sqrt{R_{MAX} R_E}$.

При экспериментальном определении правильность значений F_1 и F_2 можно проверить по условию выполнения равенства

$$F_s \approx \hat{F}_s, \quad (2)$$

где $\hat{F}_s = \sqrt{F_1 F_2}$ – оценка резонансной частоты ДГ.

Если полученное по (2) значение $\hat{F}_s$ отличается от найденного F_s по зависимости $Z(F)$ более чем на несколько десятков Гц, то измерение $Z(F)$ следует выполнить заново.

3. Модификация задачи поиска оптимальных экземпляров (моделей) высокочастотных излучателей звука

Поскольку в [2] была рассмотрена подобная оптимизационная задача без учета параметров основного резонанса ВЧ ДГ, то модификация задачи поиска представляет практический интерес. В [4] рассмотрены вопросы влияния акустических свойств помещения, что не противоречит данной статье, так как в зависимости от назначения АС в оптимизационной задаче можно учитывать иной набор требуемых звуковых свойств.

Для постановки и решения задачи поиска оптимальных экземпляров ВЧ ДГ воспользуемся методами линейного программирования [5] и сформулируем оптимизационную задачу шире, чем это было показано в [2]. Учтем параметры основного резонанса в виде двух величин F_S и Q_{MS} , а также исключим возможное короткое замыкание и обрыв звуковой катушки путем учета R_E .

Поскольку неравномерность АЧХ частично учитывается через соответствие номинальным величинам параметров основного резонанса и индуктивности звуковой катушки ДГ, то для исключения дорогостоящего процесса акустических измерений неравномерности АЧХ в безэховой камере в оптимизационной задаче поиска экземпляров параметр АЧХ [8] учитывать не будем. В таком варианте становится возможным отбирать (проверять) экземпляры ВЧ ДГ на соответствие заявленным характеристикам, ориентируясь исключительно на электрические измерения, что возможно реализовать на полностью или частично автоматизированных сборочных линиях на этапе проверки работоспособности экземпляра без необходимости тестового прогона. Если задача решается на этапе проектирования АС, то задачу выбора оптимальных моделей ДГ будет необходимо дополнить набором психоакустических параметров, как это сделано в [2].

В [2] рассматривался отбор с учетом психоакустического восприятия качества звучания, но поскольку акустические измерения в настоящей статье не рассматриваются, то формулировку задачи отбора выполним только на основе измеряемых электрическим путем параметров ВЧ ДГ. Для известной модели ВЧ излучателя примем в качестве измеренных параметров F_S , Q_{MS} и L_E . Величину L_E можно вычислить по результатам измерения импедансной характеристики $Z(F)$ [1, 6, 8]:

$$L_E = \frac{\sqrt{(Z(F_L))^2 - R_E^2}}{2\pi F_L}. \quad (3)$$

где F_L – частота, на которой определяется индуктивность звуковой катушки ДГ. Для ВЧ ДГ F_L обычно выбирается равной 10 кГц.

При решении задачи поиска подходящих (оптимальных по сочетанию параметров) для применения в проекте АС необходимо обеспечить поиск экземпляров ВЧ ДГ, характеризующихся величиной:

$$V = F_S \cdot Q_{MS} \cdot L_E \cdot R_E. \quad (4)$$

Величина V определяется требованиями к допустимым значениям параметров в проекте F_S , Q_{MS} , L_E и R_E , тогда в решении используется значение V_0 :

$$V_0 = F_S \cdot Q_{MS} \cdot L_E \cdot R_E. \quad (5)$$

Значимость параметров в (3) отличается, а значит, величину S можно задать через коэффициенты значимости K_i , где i – номер параметра:

$$S = K_1 F_S + K_2 Q_{MS} + K_3 L_E + K_4 R_E \quad (6)$$

Запишем постановку оптимизационной задачи в виде:

$$\begin{cases} F = S \rightarrow \min \\ V = V_0 \end{cases}, \quad (7)$$

где F – целевая функция; V – ограничение.

Тогда

$$\begin{cases} F = K_1 F_S + K_2 Q_{MS} + K_3 L_E + K_4 R_E \rightarrow \min \\ F_S \cdot Q_{MS} \cdot L_E \cdot R = V_0 \end{cases} \quad (8)$$

В (8) имеется ряд ограничений по области допустимых значений величин исходя из требований к качественным свойствам ВЧ ДГ: $F_S \leq F_{S \max}$, $Q_{MS} \leq Q_{MS \max}$, $0 < R_E < \infty$, где $F_{S \max}$ и $Q_{MS \max}$ максимально допустимые в проекте величины. Для индуктивности L_E также существуют ограничения. Существенное отклонение L_E относительно номинального (проектного) значения приводят к рассогласованию компенсирующих индуктивность ВЧ ДГ цепей в составе фильтра пассивной АС, требует пересчета номиналов элементов цепи Цобеля [7]. В активных АС это же отклонение может приводить к изменению формы АЧХ системы в области ВЧ (подъем или спад). По этим причинам необходимо задать ограничение на максимальное и минимальное значение как $L_{E \min} \leq L_E \leq L_{E \max}$. Математическая модель после введения граничных условий в (8) имеет вид:

$$\begin{cases} F = K_1 F_S + K_2 Q_{MS} + K_3 L_E + K_4 R_E \rightarrow \min \\ F_S \cdot Q_{MS} \cdot L_E \cdot R = V_0 \\ F_S \leq F_{S \max} \\ Q_{MS} \leq Q_{MS \max} \\ 0 < R_E < \infty \end{cases} \quad (9)$$

Модель (9) содержит упрощенные граничные условия, так как не учитывает ограничения $F_S > 0$ и $Q_{MS} > 0$, так как это учтено в (2).

Поскольку из (9) видно, что система имеет бесконечное множество решений, то имеется оптимальное решение, то есть существуют оптимальные экземпляры ВЧ излучателей по критерию резонанса. В случае существенных отклонений в технологическом процессе изготовления элементов конструкции ВЧ ДГ, например, из-за вариации материала и массы купола, высоты звуковой катушки, коэрцитивной силы постоянного магнита и др., решение (9) дает результат в виде пригодности или непригодности экземпляра. Если требуется учитывать в отборе качество звучания, то условие (9) нужно дополнить подобно [2], но при этом задача отбора существенно усложнится, так как потребуются акустические измерения ДГ.

Для инициализации алгоритма отбора по модели (8) необходимо выполнить сбор исходных данных. Сбор исходных данных может быть выполнен статистически на этапе контроля качества продукции путем проведения необходимых и достаточных измерений F_S , Q_{MS} , L_E и R_E , составления таблицы соответствия серийного номера изделия его параметрам и усреднения результатов по условию годности экземпляров ВЧ ДГ. Либо исходные данные могут быть заданы на основе ожидаемых (проектных) величин или усредненных значений по условию пригодности для применения в проекте (соответствие требованиям технического задания).

Алгоритм (9) может быть реализован в табличном редакторе Excel. Первоначальная настройка алгоритма (9) должна оцениваться разработчиком ВЧ ДГ или проекта с применением ВЧ ДГ по критерию адекватности результата, что может потребовать дополнительные проверочные измерения прототипов изделий или результатов компьютерного моделирования с учетом параметров, отобранных по алгоритму экземпляров. Анализ статистики результатов применения (в виде натурального или математического моделирования) позволит дать ответ о достаточности алгоритма отбора (9), что при работе с серией однотипных изделий выполняется достаточно быстро и не потребует выборки большого числа изделий.

При серийном изготовлении ВЧ ДГ могут иметь технологические погрешности, но они не должны существенно изменять электрические параметры ВЧ ДГ. В случае существенных технологических отклонений, например при ошибочной сборке (из-за изменения массы подвижной системы (иной купол), снижение коэрцитивной силы постоянного магнита маг-

нитной системы ДГ (иной размер магнита или его сила), использования звуковой катушки с иным значением номинального импеданса) алгоритм (9) будет выдавать 100% негодных изделий, что позволит максимально быстро выявить проблему и остановить автоматизированный процесс сборки серии заведомо некондиционных ВЧ ДГ.

Экземпляры ВЧ ДГ, отобранные по алгоритму (9), могут считаться годными к применению в конструкции АС. Однако стоит внимательно подходить к оценке граничных условий и степени влияния параметров через коэффициенты значимости, а также алгоритм может быть модифицирован путем уточнения граничных условий.

5. Заключение

Поскольку в ближайшем будущем частично автоматизированные производства будут заменяться полностью автоматизированными производственными линиями, большие автоматизированные производственные комплексы будут подвергаться миниатюризации, то задачи контроля качества продукции без участия человека будут остро стоять перед производителями продукции. Решение задачи поиска подходящих (годных) экземпляров ВЧ ДГ (9) в процессе производства снизит процент брака и изделий с некондиционными параметрами, повысит качество производимой продукции, минимизирует затраты, связанные с контролем качества за счет автоматизации процесса.

В процессе проектирования новых изделий анализ набора ВЧ ДГ по усредненным характеристикам существенно сократит сроки проведения опытно-конструкторских работ, что отразится на себестоимости разработки новых моделей АС.

Литература

1. ГОСТ Р 53575-2009. Громкоговорители. Методы электроакустических испытаний. М.: Стандартинформ, 2020.
2. IJData: Products: LspCAD. URL: https://www.ijdata.com/LspCAD_justMLS.html (дата обращения: 18.09.2024).
3. Шушинов М. С., Шушинова Т. В. Анализ искажений современных высокочастотных излучателей звука. Вестник СибГУТИ. 2023;17(4):3-14. DOI:10.55648/1998-6920-2023-17-4-3-14.
4. Toole, Floyd. (2012). Loudspeakers and Rooms for Sound Reproduction-A Scientific Review. AES: Journal of the Audio Engineering Society. 54.
5. Бахтин В. И., Иванишко И. А., Лебедев А. В., Пиндрик О. И. Линейное программирование. – Минск: БГУ, 2012. – 39 с.
6. Меерсон А. М. Радиоизмерительная техника. – М.: Энергия, 1978. – 408 с.
7. The Crossover Design Cookbook Chapter 3: Speaker Motors and Crossovers. URL: <https://www.calsci.com/audio/X-Overs3.html> (дата обращения: 18.09.2024).
8. Standard Method of Measurement for In-Home Loudspeakers ANSI/CTA-2034-A. CONSUMER TECHNOLOGY ASSOCIATION 2015

Шушинов 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), тел. +7 913 9084822, 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), тел. +7 952 9348567,
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.

Search for optimal specimens of high-frequency sound emitters

Maxim S. Shushnov, Tatiana V. Shushnova

¹Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

Abstract: The article describes a methodology for finding optimal copies of high-frequency sound emitters based on objective measurements. Recommendations for automation of the selection process are given. The optimization problem of selecting serial copies or models of high-frequency emitters of sound was performed, a mathematical model of the selection algorithm was compiled.

Keywords: sound, resonance, distortion, dome, dynamic head, acoustic system, optimization.

For citation: Shushnov M. S., Shushnova T. V. Poisk optimal'nykh ekzempliarov vysokochastotnykh izluchateley zvuka [Search for optimal specimens of high-frequency sound emitters]. *Vestnik SibGUTI*, 2025, vol. 19, no. 3, pp. 30-37. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-3-30-37>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Shushnov M. S., Shushnova T. V., 2025

The article was submitted: 25.09.2024;
revised version: 24.01.2025;
accepted for publication 08.04.2025.

References

1. GOST R 53575-2009. Gromkogovoriteli. Metody elektroakusticheskikh ispytaniy [Loudspeakers. Methods of electroacoustic tests]. M.: Standartinform, 2020.
2. IJData: Products: LspCAD. URL: https://www.ijdata.com/LspCAD_justMLS.html (accessed: 18.09.2024.)
3. Shushnov M. S., Shushnova T. V. Analiz iskazhenij sovremennykh vysokochastotnykh izluchateley zvuka [Analysis of distortions of modern high-frequency emitters of sound] *Vestnik SibGUTI*. 2023;17(4):3-14. DOI:10.55648/1998-6920-2023-17-4-3-14
4. Toole, Floyd. (2012). Loudspeakers and Rooms for Sound Reproduction-A Scientific Review. AES: Journal of the Audio Engineering Society. 54.
5. Bahtin V. I., Ivanishko I. A., Lebedev A. V., Pindrik O. I. Linejnoe programmirovaniye [Linear programming]. – Minsk: BGU, 2012. – 39 p.
6. Meerson A. M. Radioizmeritel'naya tekhnika [Radio measuring equipment]. – M.: Energiya, 1978. – 408 p.
7. The Crossover Design Cookbook Chapter 3: Speaker Motors and Crossovers. URL: <https://www.calsci.com/audio/X-Overs3.html> (accessed: 18.09.2024).

8. Standard Method of Measurement for In-Home Loudspeakers ANSI/CTA-2034-A. CONSUMER TECHNOLOGY ASSOCIATION 2015

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), tel. +7 913 9084822, 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), tel. +7 952 9348567, e-mail: t.shushnova@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-9977-1818.