

# Поиск оптимальных экземпляров низкочастотных динамических головок

М. С. Шушнов, Т. В. Шушнова, А. М. Оноприенко, Н. О. Абросимова

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики

*Аннотация:* В статье рассмотрены параметры Тиля – Смолла и влияние их отклонений на амплитудно-частотную характеристику акустической системы фазоинверторного типа. Особое внимание уделено методам практического определения эквивалентного объема низкочастотных динамических головок. Выполнена оценка абсолютной точности определения эквивалентного объема для методов добавочной массы и добавочного объема. Предложена схема измерений методом добавочного объема и алгоритм отбора по результатам измерений годных экземпляров низкочастотных динамических головок. Выполнена постановка оптимизационной задачи отбора серийных экземпляров или моделей низкочастотных динамических головок.

*Ключевые слова:* звук, психоакустика, эквивалентный объем, резонанс, частота, динамическая головка, параметры, мониторинг, оптимизация.

*Для цитирования:* Шушнов М. С., Шушнова Т. В., Оноприенко А. М., Абросимова Н. О. Поиск оптимальных экземпляров низкочастотных динамических головок // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19, № 2. С. 40–55. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-2-40-55>.



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Шушнов М. С., Шушнова Т. В.,  
Оноприенко А. М., Абросимова Н. О., 2025

Статья поступила в редакцию 05.08.2024;  
принята к публикации 18.10.2024.

## 1. Введение

Задача оптимального подбора и оптимизации акустического оформления низкочастотных (НЧ) динамических головок остро стоит перед проектировщиком акустической системы, если целью проектирования является разработка технического решения, позволяющего слышать нюансы (недостатки) записи. Мониторные акустические системы (МАС) в процессе профессиональной деятельности звукорежиссера должны обеспечивать неискаженное и максимально достоверное звуковоспроизведение, чтобы дать возможность услышать «погрешности» фонограммы. К НЧ динамикам двухполосных систем (АС) предъявляется ряд противоречивых требований, что существенно осложняет процесс конструирования. Динамики НЧ двухполосной МАС должны работать не только в НЧ области, но и воспроизводить существенную часть среднечастотного (СЧ) диапазона с приемлемой неравномерностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). В то же время, эффективное воспроизведение НЧ динамиком зависит как от его конструкции и от акустического оформления, в котором работает динамик, так и от свойств помещения, где АС установлена.

Одновременное выполнение ряда противоречивых требований к НЧ звену МАС приводит к неоднозначным результатам, из-за чего поиск оптимального решения при выборе типа динамика и его акустического оформления является не тривиальной задачей. Методика расчетов на основе параметров Тиля – Смолла характеризует поведение динамической

головки только в области ее основного резонанса, что не дает полной картины при сведении АЧХ НЧ и высокочастотного (ВЧ) звена МАС. Сведение НЧ и ВЧ звеньев осуществляется по анализу АЧХ головок, причем для НЧ головки параметры Тиля – Смолла [1–3] в этом анализе не учитываются. Таким образом, задача поиска оптимального экземпляра НЧ головки является комплексной задачей.

## 2. Основные особенности и параметры современных низкочастотных динамических головок

### 2.1. Параметры Тиля – Смолла

Параметрами Тиля – Смолла определяется поведение динамической головки (ДГ) вблизи области её основного резонанса, что позволяет оценивать нижнюю границу диапазона воспроизводимых частот. Эти параметры даются производителями как справочные, но являются усредненными. Большинство параметров определяются исключительно на резонансной частоте динамика, хотя они применимы ко всему диапазону частот, где динамик работает в поршневом режиме.

В ряде работ [1–3] по анализу свойств ДГ на основе параметров Тиля – Смолла установлена взаимосвязь между электромеханическими характеристиками, акустическим оформлением и формой, результирующей АЧХ в области НЧ. В реальности всегда имеется некоторая степень отклонения результирующих характеристик АС относительно расчетных, что считается обычным явлением вследствие технологического разброса параметров ДГ. В последние годы ведутся работы по уточнению связи электромеханических параметров ДГ, учету нелинейных свойств магнитных материалов и термодинамических процессов с результирующей АЧХ и переходной характеристикой на основе нелинейных порт-Гамильтоновых систем [4], что в будущем потребует разработки методик определения ряда дополнительных параметров НЧ ДГ.

В настоящее время наиболее часто встречается фазоинверторная (ФИ) система в качестве акустического оформления НЧ. Хотя данный вид акустического оформления не лишен недостатков, именно он позволяет существенно повысить отдачу ДГ в области НЧ. Настройка порта ФИ выполняется с учетом объема корпуса АС, демпфирования внутреннего объема корпуса АС и справочных параметров Тиля – Смолла ДГ. В зависимости от настройки порта ФИ в значительной степени отличается форма результирующей АЧХ АС в области НЧ. При существенных отклонениях параметров Тиля – Смолла относительно расчетных, АЧХ существенно меняется, что приводит к росту неравномерности АЧХ. Для МАС неравномерность АЧХ является важным качественным критерием. Это же требование касается и соответствия (единообразия) АЧХ разных экземпляров МАС, что при студийной работе является важным, так как приветствуется использование согласованной пары МАС. В настоящее время отбор согласованной пары МАС осуществляется после стадии изготовления на основе измерения и сравнительного анализа соответствия АЧХ разных экземпляров МАС, что повышает сложность производства. Также возможна ситуация, когда из серии произведенных МАС не найдется достаточного числа согласованных пар, что потребует увеличения затрат на производство из-за производства дополнительных экземпляров МАС. Для недопущения данной ситуации на стадии контроля качественных характеристик измерения параметров ДГ интересным представляется идея анализа электрических и акустических свойств до этапа завершающей сборки МАС.

Для проектирования и анализа акустического оформления НЧ ДГ используются основные параметры ДГ:

$S_D$  – эффективная площадь диффузора,  $m^2$  (в поршневом режиме работы  $S_D = 0.25 \pi d^2$ , где  $d$  – диаметр диффузора ДГ, измеренный по подвесу);

$F_S$  – резонансная частота, Гц;

$C_{MS}$  – гибкость подвеса подвижной системы динамика, м / Н;

$R_{MS}$  – механическое сопротивление подвеса подвижной системы (определяет «потери» в подвесе), Н·с/м;

$M_{MS}$  – масса подвижной системы (включая, т.н. присоединенную массу движущегося вместе с диффузором ДГ воздуха), кг;

$L_E$  – индуктивность звуковой катушки (зависит от частоты, как правило, измеряется на частоте 1 кГц), Гн;

$R_E$  – активное сопротивление звуковой катушки, Ом (измеряется на постоянном токе);

$BL$  – коэффициент электромеханической связи (индукция поля в магнитном зазоре умноженная на длину провода звуковой катушки), Тл · м.

В режиме малого сигнала, когда можно пренебречь нелинейными эффектами в ДГ, параметры Тила – Смолла определяются по соотношениям из [2].

Резонансная частота ДГ в области основного резонанса определяется:

$$F_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{MS}M_{MS}}} \quad (1)$$

Электрическая добротность на частоте  $F_S$

$$Q_{ES} = \frac{2\pi F_S M_{MS} R_E}{(BL)^2} \quad (2)$$

Механическая добротность на частоте  $F_S$

$$Q_{MS} = \frac{2\pi F_S M_{MS}}{R_{MS}} \quad (3)$$

Полная добротность на частоте  $F_S$

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS} Q_{ES}}{Q_{MS} + Q_{ES}} \quad (4)$$

Эквивалентный объём воздуха (в м<sup>3</sup>)

$$V_{AS} = \rho c^2 S_D^2 C_{MS} \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, равная 1,18421 кг/м<sup>3</sup> (при температуре воздуха 25 °С и влажности 0 %);  $c$  – скорость распространения звука в воздухе (около 346 м / с при 25 °С).

Обычно  $V_{AS}$  представляют не в кубических метрах, а в литрах, поскольку так удобнее при расчете корпуса АС.

При массовом производстве ДГ измерение фундаментальных параметров не выполняется, так как их определить невозможно, а контролю подвергается, и то не всегда, только состояние звуковой катушки путем измерения  $R_E$  на постоянном токе.

На практике собственная резонансная частота в области основного резонанса ДГ может быть определена по характеристике импеданса  $Z(F)$ , пример которой для НЧ ДГ В1632.4 показан на рис. 1. Последнее условие измерения требует наличия специально подготовленного помещения (акустической безэховой камеры), что не всегда оправдано и выполнимо, из-за чего прибегают к измерениям в условиях заглушенной камеры (помещения) с достаточным объемом воздуха, так как при работе в сильно ограниченном объеме  $F_S$  зависит его физических свойств [5].

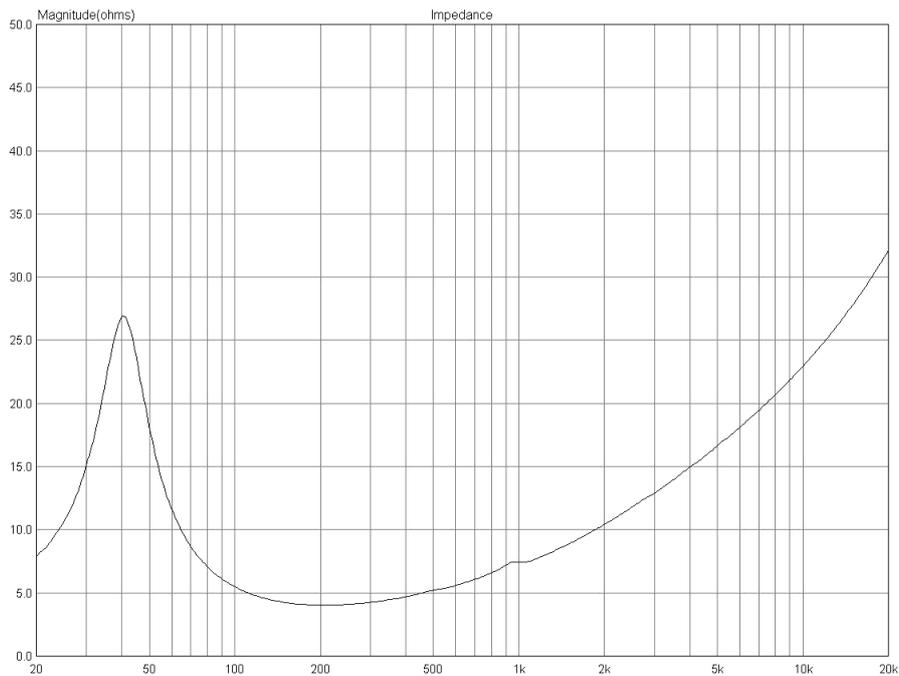


Рис. 1. Импеданс НЧ ДГ В1632.4 по справочным данным из [6]

Следует заметить, что параметры Тиля – Смолла не дают достаточной информации о АЧХ НЧ ДГ для определения допустимой частоты раздела в многополосной АС. Стоит обратить внимание на неоднородность тренда импедансной характеристики в окрестности частоты 1 кГц (рис. 1), которая свойственна всем диффузорным НЧ ДГ. Видимая «засечка» имеет связь с АЧХ (рис. 2), а явление паразитного резонанса, лежащее в причине ее появления, описано в [4]. Частота паразитного резонанса зависит от конструкции размеров диффузора ДГ. Хотя не все модели НЧ ДГ имеют ярко выраженную неравномерность на АЧХ из-за этого явления, что легко проследить, сопоставляя рис. 1 с рис. 3, учитывать наличие паразитного резонанса вблизи середины рабочего диапазона частот ДГ стоит при отборе экземпляров для МАС.

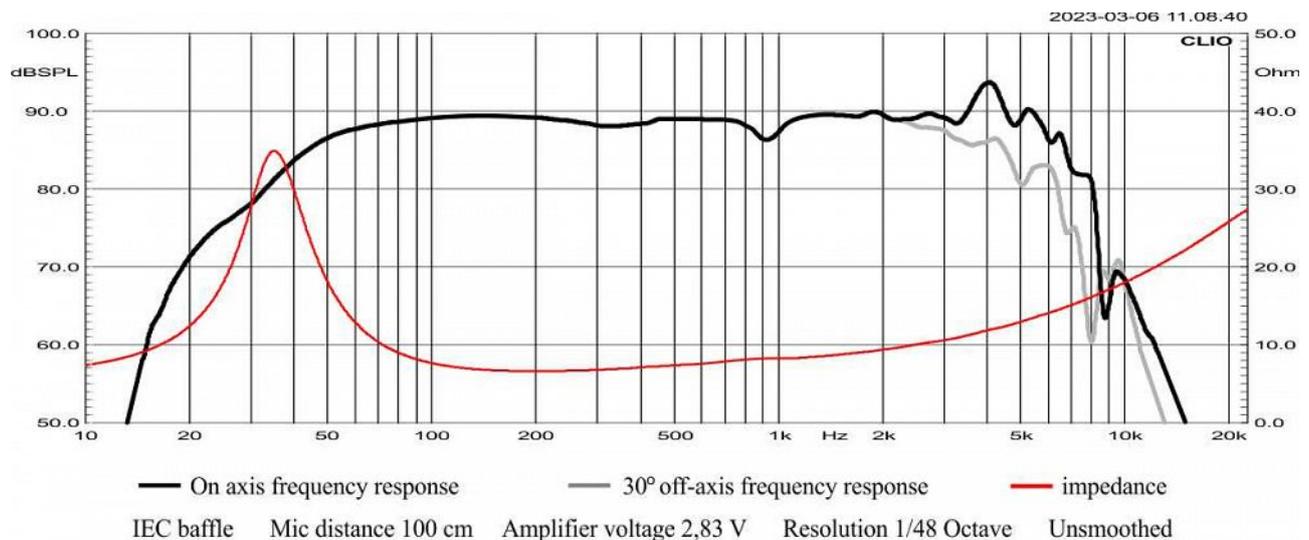


Рис. 2. Импеданс и АЧХ ДГ W.18.200.8.MCX\_v2 [7]

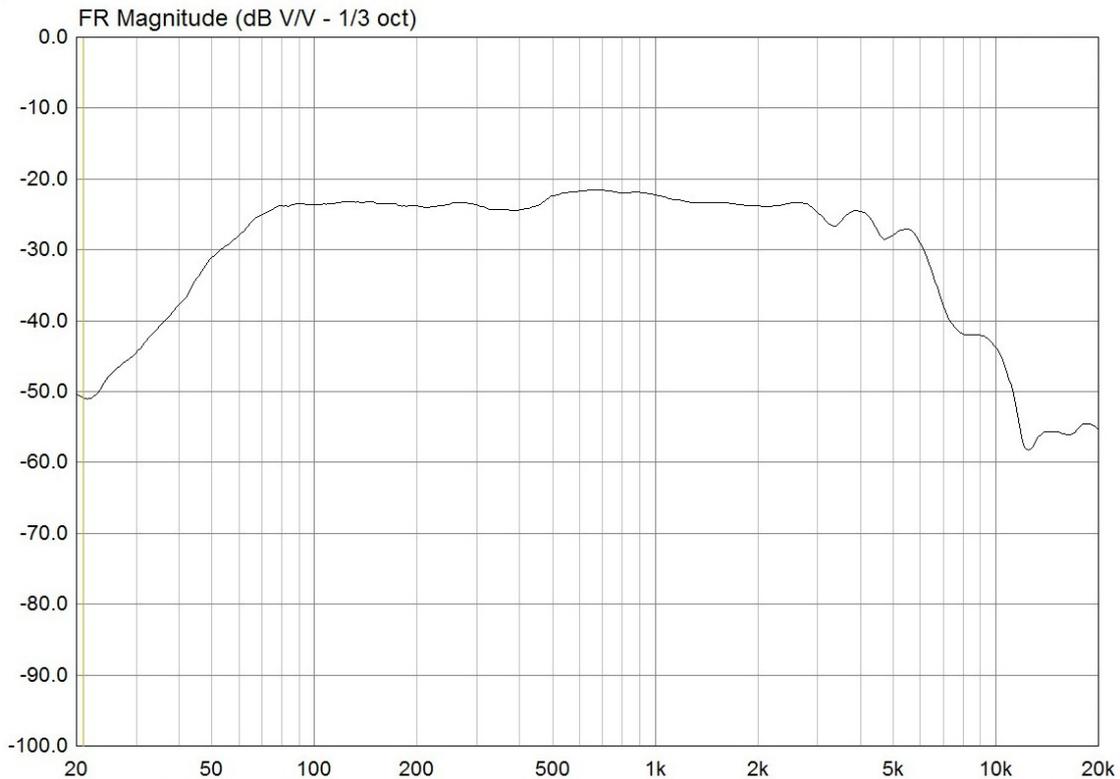


Рис. 3. АЧХ НЧ ДГ В1632.4 по справочным данным из [6]

В настоящее время применяется чаще всего ФИ для акустического оформления НЧ ДГ. Для точной настройки объема корпуса АС в соответствии со справочными данными предварительно выполняется анализ влияния акустического оформления на свойства НЧ ДГ. При сборке МАС необходимо выполнение соотношений параметров Тила – Смолла объемных характеристик корпуса АС и порта ФИ. Последние два требования легко выполняются при изготовлении корпуса и ФИ. В отношении параметров Тила – Смолла ситуация иная, так как даже при незначительных отклонениях результирующая АЧХ ДГ с учетом акустического оформления может претерпеть существенные изменения (рис. 4).

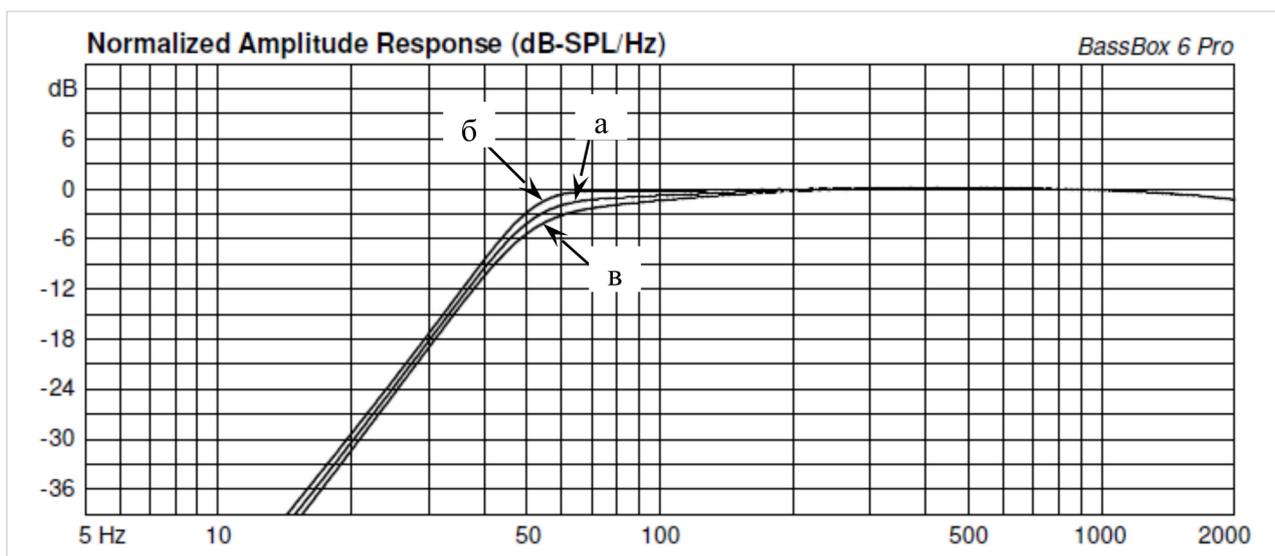


Рис. 4. АЧХ АС на основе В1632.4 в области НЧ при отклонении  $F_s$ :  
а) номинал 44 Гц, б) отклонение +4 Гц, в) отклонение -4 Гц

На рис. 4 показаны АЧХ АС с ФИ при отклонении только  $F_S$  на  $\pm 4$  Гц относительно номинального значения, построенные в программе-симуляторе BassBox 6 Pro. Из рис. 4 видно, что отклонение  $F_S$  существенно влияет на форму и неравномерность АЧХ АС с ФИ, что для МАС с заявленными характеристиками АЧХ недопустимо. Таким образом, на этапе производства (отбора экземпляров) НЧ ДГ необходимо проверять  $F_S$  экземпляра ДГ относительно проектного номинала.

Отклонение  $F_S$  связано с изменением гибкости  $C_{MS}$  и/или массы подвижной системы  $M_{MS}$ , которые сложно контролировать в процессе производства комплектующих подвижной системы ДГ, а изменение  $C_{MS}$  приводит к изменению эквивалентного объема присоединенного воздуха  $V_{AS}$  (5), что требует корректировки габаритов (объема короба) корпуса АС. Последнее выполнить невозможно при серийном изготовлении МАС, так как сопряжено с изменением ее конструкции и геометрических размеров корпуса. Поскольку в (1) разнонаправленное отклонение  $C_{MS}$  и  $M_{MS}$  может дать неизменную  $F_S$ , то для контроля нормативных параметров Тиля – Смолла недостаточно измерения только  $F_S$ , и необходим, в том числе, контроль  $V_{AS}$ . Стоит заметить, что в соответствии с (2) – (4)  $M_{MS}$  определяет добротности ДГ, нахождение которых требует дополнительных вычислений.

## 2.2. Практические методики оценки параметров Тиля – Смолла

Как было определено ранее, контроль относительно номинала должны подвергаться  $V_{AS}$  и  $F_S$ . Для практического определения этих параметров требуется разработка методики тестирования экземпляров ДГ, которая при малых затратах могла бы гарантировать соответствие параметров ДГ номинальным с некоторой точностью и являлась бы пригодной для применения на автоматизированных линиях сборки ДГ.

### 2.2.1 Практическая оценка $V_{AS}$ методом добавочной массы

Данная методика известна в любительских кругах, она предусматривает измерение электрических величин в два этапа. Для определения  $V_{AS}$  необходима добавочная масса, прикрепляемая к диффузору ДГ на время проведения второго этапа измерений. Изменения осуществляются без использования измерительного короба. ДГ должна быть закреплена на держателе диффузором вверх со «свободным пространством» спереди и за диффузором, а в центре диффузора на время проведения второго этапа измерений надежно закрепляется добавочная масса по условию изменения  $F_S$  с массой на 20–40%. При этом  $V_{AS}$  определяется по (5) при константах  $\rho$  и  $c$  при нормальных условиях

$$V_{AS} = 1.4 \cdot 10^{-5} \cdot S_D \cdot C_{MS}. \quad (6)$$

Поскольку в (2) при измерении серии ДГ одного типа  $S_D$  не меняется, то вычисление  $V_{AS}$  сводится к нахождению  $C_{MS}$ .

$$C_{MS} = \frac{1}{4\pi^2 M} \frac{(F_S + F_{SM})(F_S - F_{SM})}{F_S^2 F_{SM}^2}, \quad (7)$$

где  $M$  – добавочная масса в кг, а  $F_{SM}$  – частота основного резонанса ДГ с добавочной массой.

Рассмотрим методику проведения измерений для определения  $V_{AS}$ . Измерения сводятся к снятию импедансных характеристик ДГ для случаев работы без добавочной массы и с добавочной массой. Пример смоделированных зависимостей  $Z(F)$  для НЧ ДГ В1632.4 показан на рис. 5, что отлично согласуется с результатами натуральных измерений.

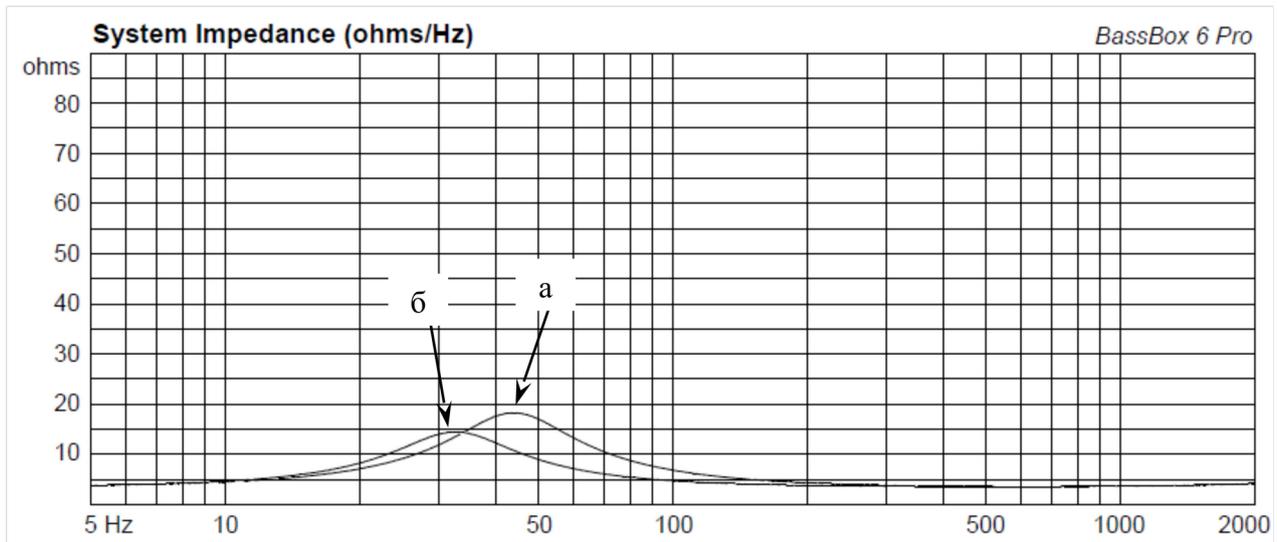


Рис. 5. Импедансная характеристика В1632.4:  
а) случай без добавочной массы, б) случай с добавочной массой 20 гр

Частота основного резонанса  $F_S$  определяется по пиковому значению  $Z(F)$  в области НЧ для случая без добавочной массы. Частота основного резонанса ДГ в области НЧ с добавочной массой  $F_{SM}$  определяется аналогично. Заметим, что пики  $Z(F)$  при измерениях неравны, так как добавочная масса влияет на добротности ДГ.

### 2.2.2. Оценка абсолютной погрешности определения $V_{AS}$ метода добавочной массы

Выполним оценку абсолютной погрешности [8] метода добавочной массы, используя (6) и (7). Для этого запишем полное уравнение для расчета  $V_{AS}$

$$V_{AS} = \frac{1.4 \cdot 10^{-5} S_D (F_S + F_{SM})(F_S - F_{SM})}{4\pi^2 M F_S^2 F_{SM}^2}. \quad (8)$$

Так как выражение (8) имеет степенную зависимость, прологарифмируем его

$$\ln V_{AS} = \ln(1.4 \cdot 10^{-5} S_D) - \ln(4\pi^2 M) + \ln(F_S + F_{SM}) + \ln(F_S - F_{SM}) - 2 \ln F_S - 2 \ln F_{SM}. \quad (9)$$

Продифференцируем (9)

$$\frac{dV_{AS}}{V_{AS}} = \frac{d(1.4 \cdot 10^{-5} S_D)}{S_D} - \frac{d(4\pi^2 M)}{M} + \frac{d(F_S + F_{SM})}{F_S + F_{SM}} + \frac{d(F_S - F_{SM})}{F_S - F_{SM}} - 2 \frac{dF_S}{F_S} - 2 \frac{dF_{SM}}{F_{SM}}. \quad (10)$$

Перейдем в (10) от бесконечно малых приращений-дифференциалов к конечным приращениям  $\Delta F_S$ ,  $\Delta F_{SM}$ ,  $\Delta S_D$  и  $\Delta M$ :

$$\frac{\Delta V_{AS}}{V_{AS}} = \frac{\Delta S_D}{S_D} - \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta(F_S + F_{SM})}{F_S + F_{SM}} + \frac{\Delta(F_S - F_{SM})}{F_S - F_{SM}} - 2 \frac{\Delta F_S}{F_S} - 2 \frac{\Delta F_{SM}}{F_{SM}}. \quad (11)$$

Учтем, что  $\Delta F_S$ ,  $\Delta F_{SM}$ ,  $\Delta S_D$  и  $\Delta M$  – величины алгебраические, и могут быть как положительными, так и отрицательными. Так как главной целью является выявление максимально возможной погрешности, нас будет интересовать наихудшая ситуация. Поэтому в (11) заменим все минусы на плюсы, тогда получим

$$\delta V_{AS} = \frac{\Delta S_D}{S_D} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta(F_S + F_{SM})}{F_S + F_{SM}} + \frac{\Delta(F_S - F_{SM})}{F_S - F_{SM}} + 2 \frac{\Delta F_S}{F_S} + 2 \frac{\Delta F_{SM}}{F_{SM}}. \quad (12)$$

Выражение (12) является относительной погрешностью определения  $V_{AS}$ . Для нахождения абсолютной величины погрешности помножим (12) на определенное (вычисленное) значение по результатам измерений и расчетов  $\langle V_{AS} \rangle$ , тогда

$$\Delta V_{AS} = \langle V_{AS} \rangle \left( \frac{\Delta S_D}{S_D} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta(F_S + F_{SM})}{F_S} + \frac{\Delta(F_S - F_{SM})}{F_{SM}} + 2 \frac{\Delta F_S}{F_S} + 2 \frac{\Delta F_{SM}}{F_{SM}} \right). \quad (13)$$

Абсолютная погрешность (13) является верхней оценкой, когда все отклонения максимальны. На практике согласно теории ошибок более точное значение определяется по методу средних квадратов. Тогда абсолютную погрешность определения  $V_{AS}$  от  $F_S$ ,  $F_{SM}$ ,  $S_D$  и  $M$  в (13) найдем как

$$\Delta V_{AS} = \langle V_{AS} \rangle \sqrt{\left( \frac{\Delta S_D}{S_D} \right)^2 + \left( \frac{\Delta M}{M} \right)^2 + \left( \frac{\Delta(F_S + F_{SM})}{F_S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta(F_S - F_{SM})}{F_{SM}} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta F_S}{F_S} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta F_{SM}}{F_{SM}} \right)^2}. \quad (14)$$

При достоверно известных  $S_D$  и  $M$  можно считать  $\frac{\Delta S_D}{S_D} \rightarrow 0$  и  $\frac{\Delta M}{M} \rightarrow 0$ , тогда (14)

можно записать как

$$\Delta V_{AS} = \langle V_{AS} \rangle \sqrt{\left( \frac{\Delta(F_S + F_{SM})}{F_S} \right)^2 + \left( \frac{\Delta(F_S - F_{SM})}{F_{SM}} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta F_S}{F_S} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta F_{SM}}{F_{SM}} \right)^2}. \quad (15)$$

Проверим (18) на основе измеренных значений параметров резонансной частоты НЧ ДГ. Вычислим погрешность измерений  $V_{AS}$  (8) по (17) приняв вычисленный  $\langle V_{AS} \rangle = 18$  л для площади диффузора  $S_D = 136,5$  см<sup>2</sup> и добавленной массы  $M = 20$  г. При этих условиях были определены также  $F_S = 44$  Гц и  $F_{SM} = 31$  Гц с  $\Delta F_S = \Delta F_{SM} = \pm 1$  Гц. Тогда

$$\Delta V_{AS} = 1,64 \text{ л.}$$

Найденное значение достаточно велико и составляет величину до 10 % от определенного номинала  $V_{AS}$ .

### 2.2.3. Практическое нахождение $V_{AS}$ методом добавочного объема

Для использования метода добавочного объема необходимо выполнить измерение частоты основного резонанса ДГ  $F_S$  для случаев без акустического оформления и резонансной частоты ДГ  $F_{SB}$  с акустическим оформлением в виде закрытого ящика, который выполняет функцию измерительного короба известного объема  $V_B$ . Вычисление  $V_{AS}$  основано на влиянии акустического оформления на параметры Тила – Смолла. Таким образом, этот метод, как и добавочной массы, является косвенным. Для проведения измерений важно зафиксировать ДГ в измерительном ящике, обеспечив герметичность. Для удобства временного монтажа ДГ можно располагать магнитом наружу, что технологичнее при проверке автоматизированным комплексом, а подключение измерительного кабеля к контактам звуковой катушки ДГ снаружи короба не приведет к нарушению герметичности измерительного короба.

Измерение  $F_{SB}$  выполняется аналогично  $F_S$  по условию пика импедансной характеристики в области НЧ. Затем находится эквивалентный объем по формуле

$$V_{AS} = V_B \left( \left( \frac{F_{SB}}{F_S} \right) - 1 \right). \quad (16)$$

После нахождения  $V_{AS}$  можно вычислить  $Q_{MS}$ ,  $Q_{TS}$  и  $Q_{ES}$ . Методика измерения полностью аналогична описанной ранее.

### 2.2.4. Оценка абсолютной погрешности $V_{AS}$ методом добавочного объема

Поскольку (16) имеет двойственную зависимость от  $F_S$  и  $F_{SB}$ , необходимо оценить абсолютную погрешность определения  $V_{AS}$  методом добавочного объема.

Погрешность определения  $V_{AS}$  от  $\Delta F_S$ ,  $\Delta F_{SB}$  и  $\Delta V_B$  найдем как средний квадрат аналогично изложенному в параграфе 2.2.2 для (16). Пропуская промежуточные вычисления, получим

$$\Delta V_{AS} = \langle V_{AS} \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta V_B}{V_B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_{SB}}{F_{SB}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_S}{F_S}\right)^2}. \quad (17)$$

Определим погрешность измерений (19), приняв  $V_B = \text{const}$  (объем короба фиксирован при измерениях, из-за чего  $\frac{\Delta V_B}{V_B} \rightarrow 0$ ), тогда среднеквадратичное значение абсолютной погрешности определения  $\langle V_{AS} \rangle$  по результатам проведенных измерений и вычислений можно найти как

$$\Delta V_{AS} = \langle V_{AS} \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta F_{SB}}{F_{SB}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_S}{F_S}\right)^2}. \quad (18)$$

Проверим (18) на основе измеренных значений параметров резонансной частоты НЧ ДГ. Вычислим абсолютную погрешность измерений  $V_{AS}$  (19) по (29), приняв измерительный объем  $V_B = 30$  л., а определенное значение  $\langle V_{AS} \rangle = 18$  л. При этих условиях были определены также  $F_S = 44$  Гц и  $F_{SB} = 55$  Гц с  $\Delta F_S = \Delta F_{SB} = \pm 1$  Гц. Тогда

$$\Delta V_{AS} = 0,52 \text{ л.}$$

При сравнении абсолютных погрешностей методов добавочной массы и добавочного объема очевидно, что метод добавочного объема дает в несколько раз меньшую погрешность определения  $\Delta V_{AS}$ . Кроме этого, метод добавочного объема более удобен на практике при серийных замерах параметров ДГ на этапе производства, так как не требует закрепления дополнительных элементов на диффузоре ДГ. Для подтверждения правильности вывода на рис. 6 показаны графики результирующих АЧХ НЧ ДГ В1632.4 в акустическом оформлении ФИ при симметричном отклонении  $V_{AS}$ .

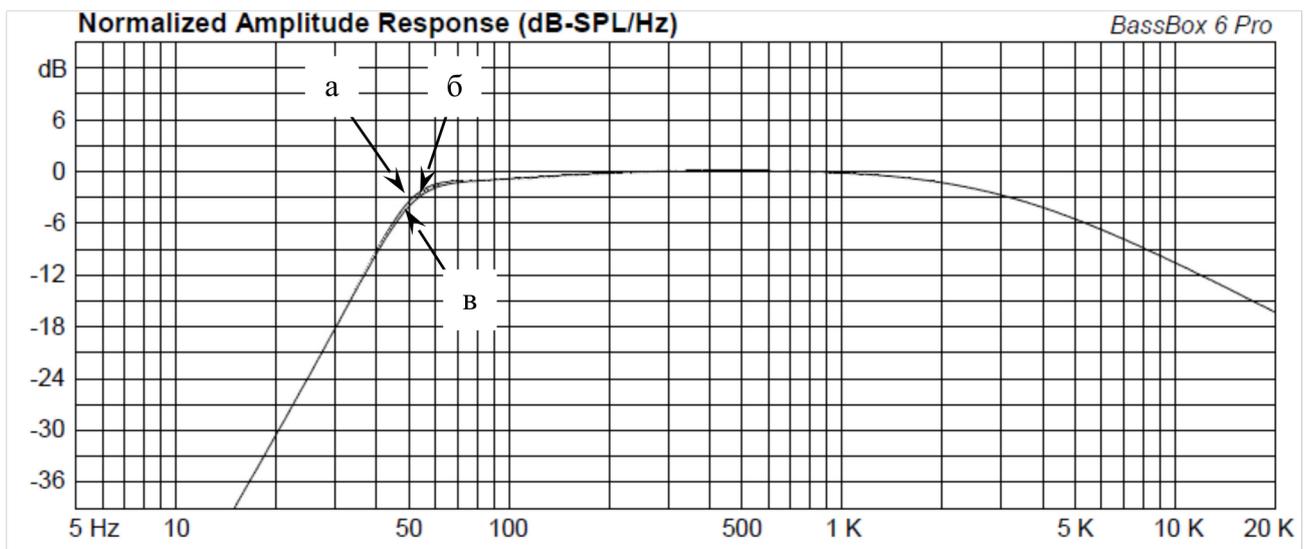


Рис. 6. Вид АЧХ В1632.4 в ФИ оформлении при настройке ФИ на 50 Гц при значениях  $V_{AS}$ : а) 17 л; б) 18 л; в) 19 л

Как видно из рис. 6, отклонение  $V_{AS}$  на  $\pm 1$  л несущественно сказывается на форме АЧХ и абсолютное отклонение АЧХ от окрестности частоты настройки ФИ МАС (около 50 Гц) составляет не более  $\pm 1$  дБ, что допустимо для МАС ближнего поля.

### 3. Схема измерения и алгоритм определения пригодности экземпляров при массовом производстве

В соответствии с соотношением (8) для определения  $V_{AS}$  необходимо измерение  $F_{SB}$ , выполняется аналогично  $F_S$ . Структурная схема формирования массива данных измерений  $Z(F)$  и расчета  $V_{AS}$  приведена на рис. 7. Рассчитанный  $V_{AS}$  следует понимать как  $\langle V_{AS} \rangle$ , то есть определенный с некоторой абсолютной погрешностью  $\Delta V_{AS}$ .

Предел частот свип-генератора (рис. 7) выбран, опираясь на паспортные значения резонансных частот НЧ ДГ с диаметром диффузора 10 – 50 см. При измерениях ДГ иного размера предел частот может быть изменен.

При технологическом процессе контроля качества производимых ДГ в ходе конвейерного производства необходимо предусматривать два этапа измерений: этап измерений 1 с ДГ в «свободном» пространстве и этап измерений 2 с ДГ в добавочном объеме (рис. 7). На этапе измерений 1 ДГ закрепляется на подвесе, который может быть представлен в виде зажима с тросовым креплением, выполняется снятие зависимости  $Z(F)$  и формирование массива данных  $Z, F$ . На этапе измерений 2 ДГ закрепляется в герметичном (закрытом) коробе известного объема, который может быть представлен в виде фанерного ящика с надежным прилеганием по контуру фланцевого крепления ДГ (резиновая прокладка), выполняется снятие зависимости  $Z(F)$  и формирование массива данных  $Z, F$  в добавочном объеме  $V_B$ . После по результатам измерений выполняется поиск резонансных частот  $F_S$  и  $F_{SB}$  и расчет  $V_{AS}$ .

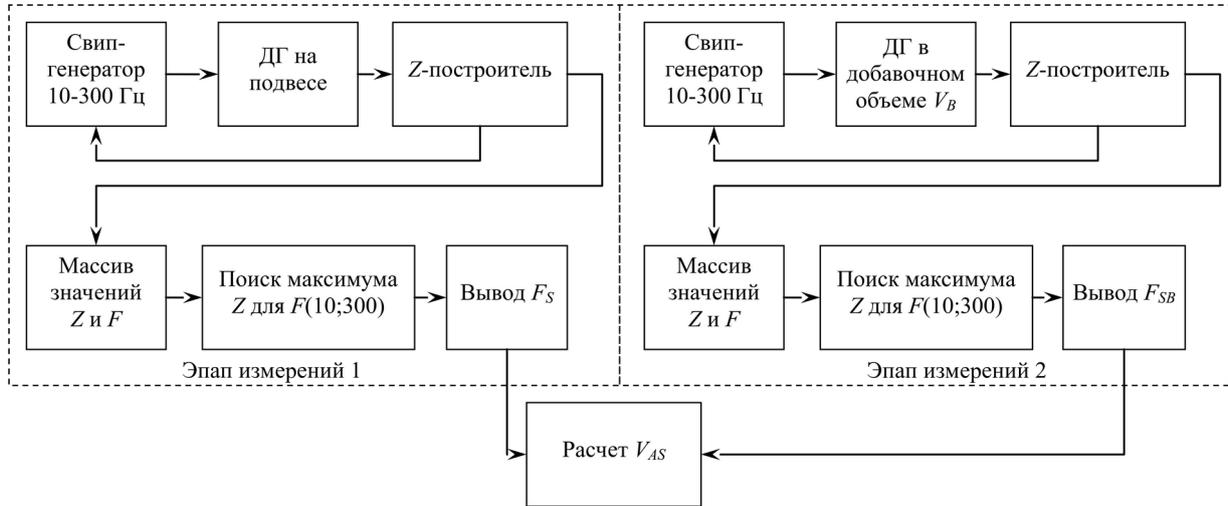


Рис. 7. Структурная схема формирования массива  $Z, F$  для поиска  $F_S$  и  $F_{SB}$  и расчет  $V_{AS}$ .

В зависимости от требуемой точности определения  $F_S$  выбирается инкремент частоты свип-генератора  $\Delta F$ , который определяет максимальную погрешность как

$$\Delta F_S = \Delta F_{SB} = 2\Delta F. \quad (19)$$

Последнее справедливо для НЧ ДГ с низкой  $Q_{TS}$ , так как возможно появление пары близких значений  $Z$  в массиве  $Z, F$ , что даст две оценки частоты резонанса ДГ  $F_{S1}$  и  $F_{S2}$ . В этом случае требуется либо уменьшение инкремента  $\Delta F$  и повторения измерений, что приведет к росту размера массива, либо определение резонансной частоты геометрически:

$$\overline{F_S} = \sqrt{\overline{F_{S1}} \overline{F_{S2}}}, \quad (20)$$

где  $\overline{F_{S1}}$  и  $\overline{F_{S2}}$  – оценки частот основного резонанса ДГ из  $Z$  массива измерений ДГ на подвесе. Аналогичная ситуация возможна при определении  $F_{SB}$ , тогда

$$\overline{F_{SB}} = \sqrt{\overline{F_{SB1}} \overline{F_{SB2}}}, \quad (21)$$

где  $\overline{F_{S1}}$  и  $\overline{F_{S2}}$  – оценки частот основного резонанса ДГ из  $Z$  массива измерений ДГ в добавочном объеме  $V_B$ .

В (20) и (21) при  $\Delta F \rightarrow 0$  можно считать  $\overline{F_S} \rightarrow F_S$ ,  $\overline{F_{SB}} \rightarrow F_{SB}$ . Однако  $\Delta F \rightarrow 0$  на практике не реализуемо, так как ведет к бесконечному размеру массива данных измерений  $Z$ , и требуется выбрать конечное значение  $\Delta F_S = \Delta F_{SB}$ .

Далее по (16) и известным  $F_S$ ,  $F_{SB}$  выполняется расчет  $\langle V_{AS} \rangle$ , а полученное значение сравнивается с целевым проектным значением  $V_{AS}$ . Предельные условия отклонения  $\min V_{AS}$ ,  $\max V_{AS}$  в проекте определяются на основании моделирования (на этапе конструирования МАС) исходя из допустимого отклонения АЧХ МАС при серийном производстве.

Алгоритм определения пригодности экземпляра ДГ показан на рис. 8. Данный алгоритм является процедурой в программной части программно-аппаратного комплекса по рис. 6. при проведении измерений параметров ДГ на этапе производства ДГ.

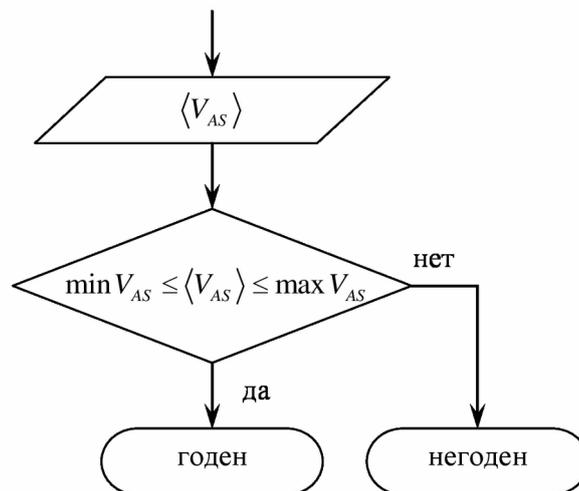


Рис. 8. Алгоритм определения пригодности ДГ на основании сравнения  $\langle V_{AS} \rangle$

### 3.1. Выбор инкремента частоты свип-генератора $\Delta F$

В ходе анализа результатов моделирования АЧХ при фиксированном акустическом оформлении НЧ ДГ (аналогично рис. 4 и рис. 7) было установлено, что отклонение  $F_S$  менее 1 Гц не приводит к существенным отличиям результирующих АЧХ (разброс SPL вблизи частоты настройки ФИ не превышает 1 дБ).

В разделах 2.2.2 и 2.2.4 принимались  $\Delta F_S = \Delta F_{SB} = \pm 1$  Гц. Поскольку результат по абсолютной погрешности удовлетворил, то можно определить достаточную точность определения  $F_S = \pm 1$  Гц и  $F_{SB} = \pm 1$  Гц, а инкремент частоты свип-генератора по (9) будет равен 0,5 Гц.

При иных начальных условиях может требоваться изменить шаг частоты свип-генератора для снижения абсолютной погрешности  $\Delta V_{AS}$ . Эту оценку следует выполнить до начала работы алгоритма пригодности (рис. 8).

#### 4. Оптимизационная задача поиска экземпляров (моделей) низкочастотных динамиков

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

Для решения задачи поиска оптимальных экземпляров НЧ ДГ для построения мониторинной акустической системы воспользуемся методами математического моделирования.

Для формулировки оптимизационной задачи в рамках данной статьи необходимо учитывать только основные свойства НЧ ДГ в виде параметров Тилля – Смолла.

В разделах 2 и 3 рассматривались четыре основных параметра в пределах диапазона рабочих частот излучателя:  $V_{AS}$  – эквивалентный объем;  $R_E$  – сопротивление звуковой катушки по постоянному току;  $L_E$  – индуктивность звуковой катушки;  $F_S$  – частота основного резонанса НЧ ДГ. При поиске оптимума по экспериментальным данным вместо  $L_E$  можно использовать значение  $\Delta Z_{НОМ}$ , понимая последнее как абсолютное отклонение от типового (усредненного проектного значения)  $Z_{НОМ}$  на частоте вблизи середины рабочего диапазона частот НЧ ДГ (часто на частоте 1 кГц).

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

$$V = V_{AS} \cdot R_E \cdot L_E \cdot F_S. \quad (22)$$

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

$$V_0 = V_{AS} \cdot R_E \cdot L_E \cdot F_S. \quad (23)$$

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

$$S = K_1 V_{AS} + K_2 R_E + K_3 L_E + K_4 F_S \quad (24)$$

Запишем постановку оптимизационной задачи в виде:

$$\begin{cases} F = S \rightarrow \min \\ V = V_0 \end{cases}, \quad (25)$$

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

Тогда

$$\begin{cases} F = K_1 V_{AS} + K_2 R_E + K_3 L_E + K_4 F_S \rightarrow \min \\ V_{AS} \cdot R_E \cdot L_E \cdot F_S = V_0 \end{cases}. \quad (26)$$

В (26) очевидно, что  $V_{AS}$ ,  $R_E$ ,  $L_E$  и  $F_S > 0$ . Также для учета психоакустических свойств необходимо выполнить условие  $K_{Г2} \geq K_{Г3}$ , где  $K_{Г2}$ ,  $K_{Г3}$  – коэффициенты гармонических искажений ДГ. После введения в (26) граничных условий и дополнения по  $K_{Г2}$ ,  $K_{Г3}$  получим математическую модель:

$$\begin{cases} F = K_1 V_{AS} + K_2 R_E + K_3 L_E + K_4 F_S + K_5 K_{Г2} + K_6 K_{Г3} \rightarrow \min \\ V_{AS} \cdot R_E \cdot L_E \cdot F_S \cdot K_{Г2} \cdot K_{Г3} = V_0 \\ V_{AS}, R_E, L_E, F_S, K_{Г2}, K_{Г3} > 0 \text{ и } K_{Г2} \geq K_{Г3} \end{cases}. \quad (27)$$

Поскольку из (27) видно, что система имеет бесконечное множество решений, то имеется оптимальное решение, то есть существуют оптимальные экземпляры НЧ ДГ для МАС.

Сбор исходных данных для реализации математической модели (27) – необходимый этап работы при поиске оптимального решения. Осуществляться сбор может в процессе конвейерного (массового) производства на этапе контроля качества продукции (ОТК или QC производителя) путем проведения необходимых и достаточных измерений  $V_{AS}$ ,  $R_E$ ,  $L_E$ ,  $F_S$ ,  $K_{Г2}$ ,  $K_{Г3}$  и составление таблицы соответствия серийного номера изделия его параметрам.

Для поиска (отбора) оптимальных экземпляров можно воспользоваться табличным редактором Excel, реализовав в нем алгоритм (27). При выполнении опытно-конструкторских работ на этапе поиска подходящих моделей НЧ ДГ 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 возможно сделать с помощью Excel.

Отобранные экземпляры (модели) НЧ ДГ, удовлетворяющие (27), могут быть применены в конструкции МАС только после анализа полученного результата решения разработчиком, так как в ряде случаев в (27) могут быть учтены не все важные параметры, тогда (27) необходимо дополнять.

## 5. Заключение

Рассмотренные выше методы определения пригодности экземпляров НЧ ДГ для построения мониторной АС ближнего поля могут быть применены на этапе производства ДГ для отбора пригодных экземпляров (контроля качества производимой продукции) с целью достижения декларируемых технических характеристик и акустических свойств мониторной АС.

Для сохранения характера подачи необходимо на следующем этапе проектирования контролировать спектр искажений УМЗЧ в области низких и средних частот и схемы активной фильтрации. Результирующие звуковые характеристики мониторной акустической системы станет возможно оценить лишь после изготовления опытного образца, поэтому контроль качества путем прослушивания необходимо.

Решение оптимизационной задачи поиска подходящих (оптимальных) экземпляров (моделей) НЧ ДГ по методике из главы 4 в процессе производства или анализ по усредненным паспортным характеристикам значительно сократит сроки разработки на этапе опытно-конструкторских работ и поможет уменьшить процент брака (некондиционных изделий) при массовом производстве продукции.

## Литература

1. *Electroacoustic Devices : Microphones and Loudspeakers* / Edited by Glen Ballou. – Burlington, MA : Focal, 2009. DOI:10.4324/9780240812687.
2. Small, Richard H. *Vented-Box Loudspeaker Systems–Part 1: Small-Signal Analysis*. JAES Volume 21 Issue 5 pp. 363-372; June 1973.
3. Small, Richard H. *Vented-Box Loudspeaker Systems-Part 2: Large-Signal Analysis*. JAES Volume 21 Issue 6 pp. 438-444; August 1973.
4. Falaize, Antoine & Hélie, Thomas. (2020). *Passive modelling of the electrodynamic loudspeaker: from the Thiele–Small model to nonlinear port-Hamiltonian systems*. Acta Acustica. 4. 1. 10.1051/aacus/2019001.
5. Suyatno, W P Putrie, S Indrawati, Prajitno G. (2021). *The Vented-box Effect on Thiele-Small Parameter Loudspeaker*. Journal of Physics: Conference Series. 1825. 012002. DOI:10.1088/1742-6596/1825/1/012002.
6. B1632.4. Головка динамическая низкочастотная. URL: [http://www.asalab.net/sites/default/files/image/B/B1632/b1632\\_4/b1632.pdf](http://www.asalab.net/sites/default/files/image/B/B1632/b1632_4/b1632.pdf) (дата обращения: 08.06.2024 г.)

7. W.18.200.8.MCX\_v2. Midwoofer cone driver W.18.200.8.MCX\_v3. URL: <https://stx.pl/en/w-18-200-8-mcx-v2.html> (дата обращения: 08.06.2024 г.)
8. Аксенова Е. Н., Гасников Н. К., Калашников Н. П. Методы оценки погрешностей результатов прямых и косвенных измерений в лабораториях физического практикума: Учебно-методическое пособие. – М.: МИФИ, 2009. – 24 с.
9. Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. – 368с.
10. 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), 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.

#### **Онопrienко Анна Михайловна**

старший преподаватель кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. +7 951 3958257, e-mail: anna\_barabanova@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-9972-423X.

#### **Абросимова Надежда Олеговна**

аспирант 2-го года обучения, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. +7 (913) 392-16-02, e-mail: skachok94@mail.ru, ORCID ID: 0009-0000-3057-8215.

*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 Models of Low-Frequency Speakers**

Maxim S. Shushnov, Tatiana V. Shushnova,  
Anna M. Onoprienko, Nadezhda O. Abrosimova

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

*Abstract:* The article discusses the parameters of the Thiele-Small and the influence of their deviations on the amplitude-frequency characteristics of the bass-reflex speaker system. Particular attention is paid to the methods of practical determination of the equivalent volume of low -frequency dynamic heads. The absolute accuracy of determining the equivalent volume for

methods of additional mass and additional volume has been assessed. The measurement scheme is proposed by the method of additional volume and selection algorithm based on the results of measurements of suitable specimens of low-frequency speaker. The settings of the optimization problem of selecting serial specimens or models of low-frequency speakers were performed.

**Keywords:** sound, psychoacoustic, equivalent volume, resonance, frequency, speaker, parameters, monitor, optimization.

**For citation:** Shushnov M. S., Shushnova T. V., Onoprienko A. M., Abrosimova N. O. Poisk optimal'nykh ekzempliarov nizkochastotnykh dinamicheskikh golovok [Search for Optimal Models of Low-Frequency Speakers]. *Vestnik SibGUTI*, 2025, vol. 19, no. 2, pp. 40-55. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-2-40-55>.



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0  
License

© Shushnov M. S., Shushnova T. V.,  
Onoprienko A. M., Abrosimova N. O. 2025

The article was submitted: 05.08.2024;  
accepted for publication 18.10.2024.

## References

1. *Electroacoustic Devices : Microphones and Loudspeakers* / Edited by Glen Ballou. – Burlington, MA : Focal, 2009. DOI:10.4324/9780240812687.
2. Small, Richard H. *Vented-Box Loudspeaker Systems–Part 1: Small-Signal Analysis*. JAES Volume 21 Issue 5 pp. 363-372; June 1973.
3. Small, Richard H. *Vented-Box Loudspeaker Systems-Part 2: Large-Signal Analysis*. JAES Volume 21 Issue 6 pp. 438-444; August 1973.
4. Falaize, Antoine & Hélie, Thomas. (2020). *Passive modelling of the electrodynamic loudspeaker: from the Thiele–Small model to nonlinear port-Hamiltonian systems*. *Acta Acustica*. 4. 1. 10.1051/aacus/2019001.
5. Suyatno, W P Putrie, S Indrawati, Prajitno G. (2021). *The Vented-box Effect on Thiele-Small Parameter Loudspeaker*. *Journal of Physics: Conference Series*. 1825. 012002. DOI:10.1088/1742-6596/1825/1/012002.
6. B1632.4. Golovka dinamicheskaya nizkochastotnaya [Low-frequency dynamic driver], available at: [http://www.asalab.net/sites/default/files/image/B/B1632/b1632\\_4/b1632.pdf](http://www.asalab.net/sites/default/files/image/B/B1632/b1632_4/b1632.pdf) (accessed: 08.06.2024.)
7. W.18.200.8.MCX\_v2. Midwoofer cone driver W.18.200.8.MCX\_v3, available at: <https://stx.pl/en/w-18-200-8-mcx-v2.html> (accessed: 08.06.2024.)
8. Aksenova E.N., Gasnikov N.K., Kalashnikov N.P. *Metody ocenki pogreshnostej rezul'ta-tov pryamyh i kosvennyh izmerenij v laboratoriyah fizicheskogo praktikuma: Uchebno-metodicheskoe posobie [Methods for evaluating errors in the results of direct and indirect measurements in the laboratories of the physical workshop: a training manual]*. – M.: MIFI, 2009. – 24 p.
9. Korbut A.A., Finkel'shein U.U. *Diskretnoye programmirovaniye [Discrete programming]*. M.: Nauka, 1969. – 368p.
10. 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]*. SPb.: VSHTe SPbGUPTD, 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), 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.

**Anna M. Onoprienko**

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. +7 951 3958257, e-mail: anna\_barabanova@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-9972-423X.

**Nadezhda O. Abrosimova**

postgraduate student of the 2nd year of study at Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), tel. +7 913 3921602, e-mail: skachok94@mail.ru, ORCID ID: 0009-0000-3057-8215.