

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНЦИФРЫ РОССИИ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Кафедра цифрового телевидения и метрологии
Дисциплина «Звуковое оборудование и аппаратно-
программные средства медиаиндустрии»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА АМ4
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО
ОФОРМЛЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ГОЛОВКИ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ

Выполнил:

Балан К.А.

Проверила:

Свинына О.А.

Санкт-Петербург

2025

1 Подготовка к выполнению лабораторной работы

В рамках лабораторной работы выполняются косвенные измерения электрических характеристик электродинамической головки громкоговорителя (ЭДГГ) в закрытом акустическом оформлении (ЗАО) и акустическом оформлении с фазоинвертором (АОФ).

Исходными данными для выполнения лабораторной работы являются частотные зависимости модуля и фазы полного входного электрического сопротивления, предоставленные преподавателем.

Рассчитаем номер варианта по формуле (1):

$$m = 1 + (A + B + C) \% 4, \quad (1)$$

где А, В и С — день (ДД), месяц (ММ) и год (ГГГГ) рождения соответственно; % — операция деления по модулю (вычисление остатка от деления одного числа на другое).

$$m = 1 + (21 + 11 + 2004) \% 4 = 1,$$

На основании варианта 1 определим параметры исследуемых ЭДГГ и акустических оформлений и файл, содержащий зависимость модуля и фазы полного входного электрического сопротивления, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для лабораторной работы

m	Имя файла	R _{ном} , Ом	D _D , мм	R _E , Ом	Тип АО	V _B , л	T _C , °C	p _{ATM} , гПа
1	AM4_driver01.mdat	4	53	3,5	ЗАО	2,5	21,6	1005

2. Исследование влияния закрытого акустического оформления на электрические характеристики ЭДГГ

Запустим ПО REW. С помощью пункта меню File — Open Measurement откроем файл «AM4_driver01.mdat», содержащий результаты измерений импеданса головки громкоговорителя в закрытом акустическом оформлении (ЗАО) и без него.

Выберем режим отображения всех частотных зависимостей модуля импеданса. С помощью кнопки Actions откроем диалоговое окно Actions for All Impedance. В появившемся диалоговом окне установим интервал сглаживания по частоте равным 1/24 октавы. Для выполнения сглаживания результатов измерений нажмём кнопку Apply smoothing. Закроем диалоговое окно Actions for All Impedance и перейдем обратно во вкладку Impedance & Phase.

Определим, какая из частотных зависимостей модуля импеданса соответствует ЭДГГ без акустического оформления, а какая – ЭДГГ в закрытом акустическом оформлении. Занесем их в отчет.

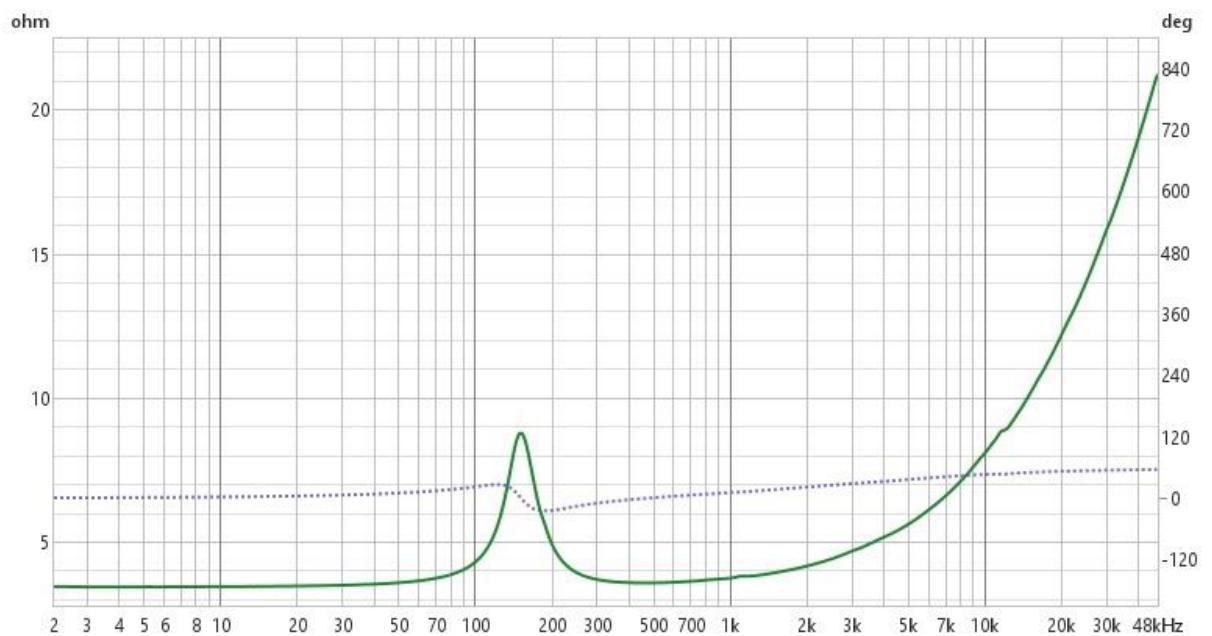


Рисунок 1 – Частотная зависимость модуля и фазы полного входного электрического сопротивления ЭДГГ без ЗАО

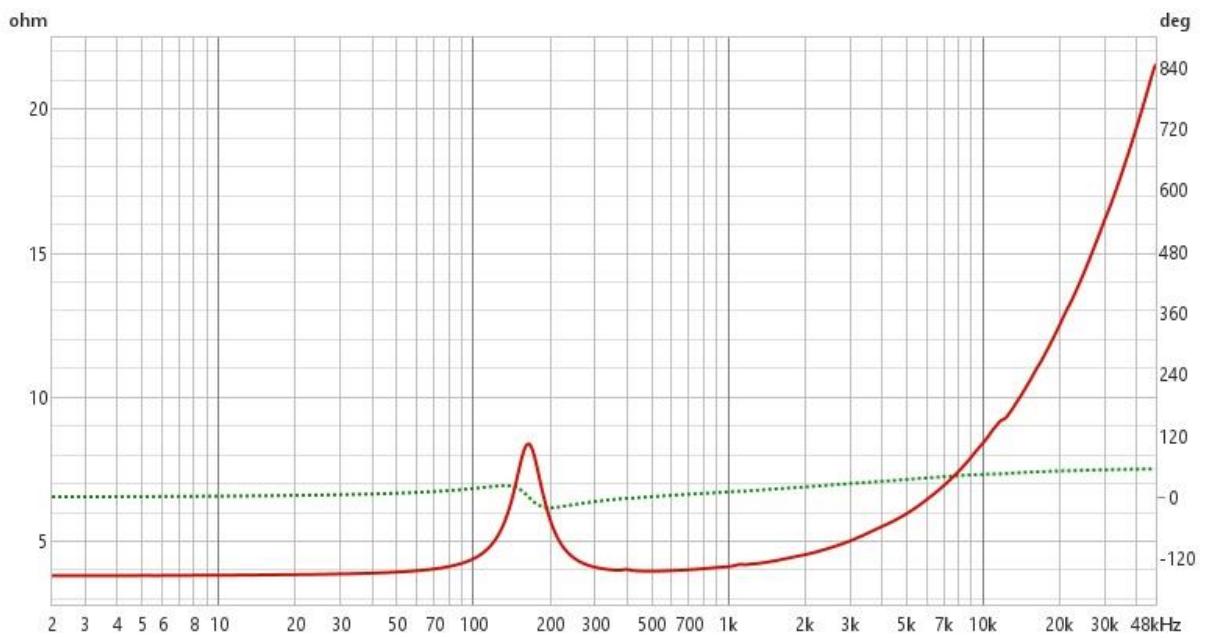


Рисунок 2 – Частотная зависимость модуля и фазы полного входного электрического сопротивления ЭДГГ с ЗАО

Сохраним измерения с помощью пункта меню File — Save all measurements или нажав кнопку Save All в основном окне ПО REW.

2.1 Определение частоты механического резонанса и добротности головки громкоговорителя

Определение параметров головки громкоговорителя без акустического оформления

По графику ФЧХ определим частоту механического резонанса подвижной системы $f_s = 151$ Гц.

По графику частотной зависимости модуля импеданса определим:

- величину электрического сопротивления звуковой катушки по постоянному току $R_E = 3,5$ Ом, как значение, которое $|Z_E|$ принимает в области низших частот звукового диапазона.
- максимальное значение $|Z_E|_{MAX} = 8,78$ Ом, которое сопротивление $|Z_E|$ принимает на частоте механического резонанса f_s .

Сопротивление $|Z_E|_{BW}$, по формуле (2):

$$|Z_E|_{BW} = \sqrt{|Z_E|_{MAX} \cdot R_E} = 5,54 \text{ Ом}, \quad (2)$$

По графику частотной зависимости модуля импеданса определим частоты f_1 и f_2 при которых сопротивление $|Z_E|$ принимает значение $|Z_E|_{BW}$:

- 1) частота $f_1 = 122,8$ Гц;
- 2) частота $f_2 = 189,3$ Гц.

Рассчитаем:

- 1) механическую добротность ЭДГГ Q_{MS} по формуле (3):

$$Q_{MS} = \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{f_2 - f_1} \sqrt{\frac{|Z_E|_{max}}{R_E}} = 3,63, \quad (3)$$

2) электрическую добротность ЭДГГ Q_{ES} по формуле (4):

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS}}{\frac{|Z_E|_{max}}{R_E} - 1} = 2,41, \quad (4)$$

3) полную добротность ЭДГГ Q_{TS} по формуле (5):

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS}Q_{ES}}{Q_{MS} + Q_{ES}} = 1,45, \quad (5)$$

Определение параметров головки громкоговорителя в закрытом акустическом оформлении

Сделаем активной карточку, содержащую результаты измерений импеданса исследуемой ЭДГГ в закрытом акустическом оформлении и, согласно методике выше, получим:

- частота механического резонанса ЭДГГ в ЗАО $f_c = 165$ Гц;
- максимальное значение $|Z_E|_{MAX} = 8,36$;
- сопротивление $|Z_E|_{BW} = 5,41$;
- механической добротности акустической системы $Q_{MC} = 3,17$;
- электрической добротности $Q_{EC} = 2,28$;
- полной добротности $Q_{TC} = 1,33$.

2.2 Определение эквивалентного объема головки громкоговорителя

На основании результатов, полученных в ходе выполнения п. 2.1, рассчитаем эквивалентный объем ЭДГГ по формуле (6):

$$V_{AS} = V_B \left[\left(\frac{f_C}{f_S} \right)^2 - 1 \right] = 0,49 \text{ л}, \quad (6)$$

где V_B — внутренний объем ящика с учетом вытесненного головкой громкоговорителя объема воздуха; f_C и f_S — частота механического резонанса ЭДГГ при измерении в акустическом оформлении и без него соответственно.

На основании полученного значения эквивалентного объема, рассчитаем ожидаемое значение полной добротности ЭДГГ в ящике объемом V_B по формуле (7):

$$Q_{TC\ 2} = Q_{TS} \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_B}} = 1,45, \quad (7)$$

3 Исследование влияния акустического оформления с фазоинвертором на электрические характеристики ЭДГГ

Значения для АОФ указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для лабораторной работы

m	Имя *.mdat файла	R _{ном} , Ом	D _D , мм	R _E , Ом	Тип АО	V _B , л	T _C , °C	p _{атм} , гПа
1	AM4_driver03	4	80	3,5	АОФ	4,84	21,2	1004

Запустим ПО REW. С помощью пункта меню File — Open Measurement откроем файл «AM4_driver03.mdat», содержащий результаты измерений импеданса головки громкоговорителя в акустическом оформлении с фазоинвертором (АОФ) и без него.

Выберем режим отображения всех частотных зависимостей модуля импеданса (вкладка All Impedance). С помощью кнопки Actions откроем диалоговое окно Actions for All Impedance. В появившемся диалоговом окне установим интервал сглаживания по частоте равным 1/24 октавы; для выполнения сглаживания результатов измерений нажмём кнопку Apply smoothing.

Закроем диалоговое окно Actions for All Impedance. Перейдём обратно во вкладку Impedance & Phase. Определим, какая из частотных зависимостей модуля импеданса соответствует ЭДГГ без акустического оформления, какая — ЭДГГ в АОФ, а какая — ЭДГГ в АОФ с закрытым фазоинвертором. Присвоим измерительным карточкам соответствующие имена. Занесем их в отчет.

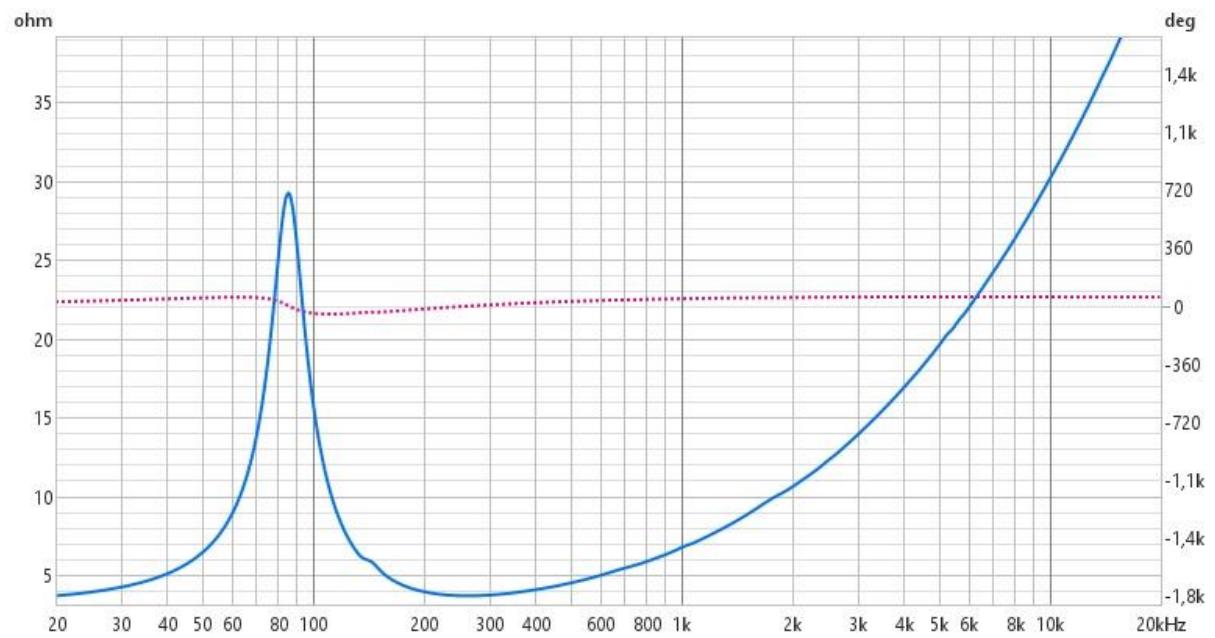


Рисунок 3 – Частотная зависимость модуля и фазы полного входного электрического сопротивления ЭДГГ без АОФ

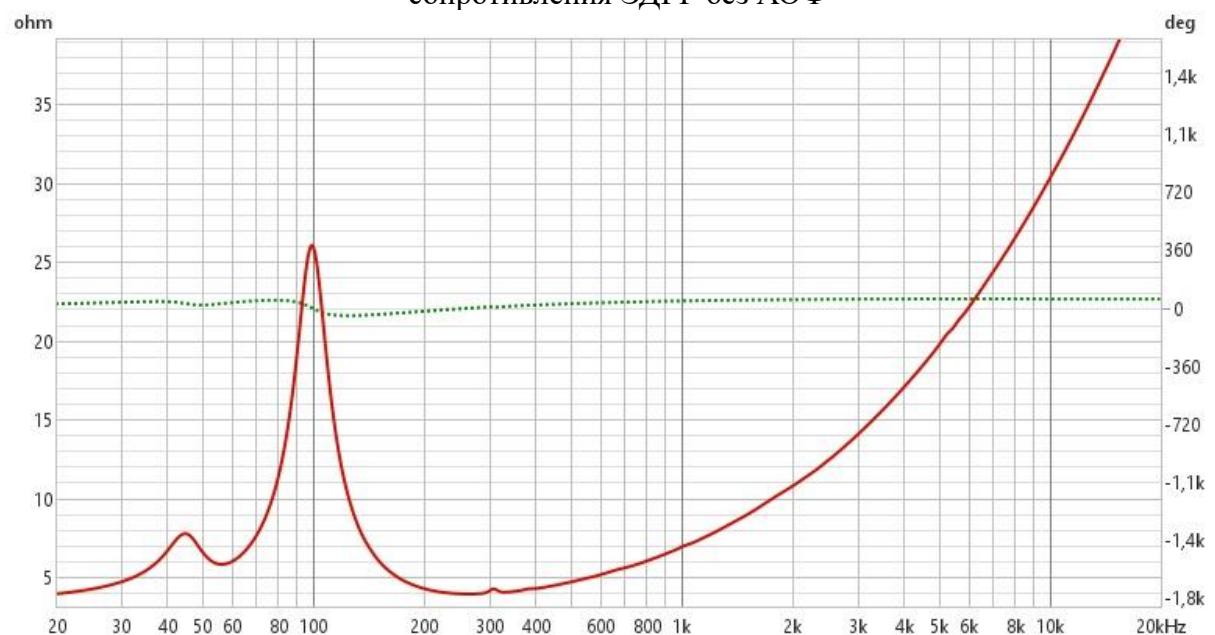


Рисунок 4 – Частотная зависимость модуля и фазы полного входного электрического сопротивления ЭДГГ с АОФ

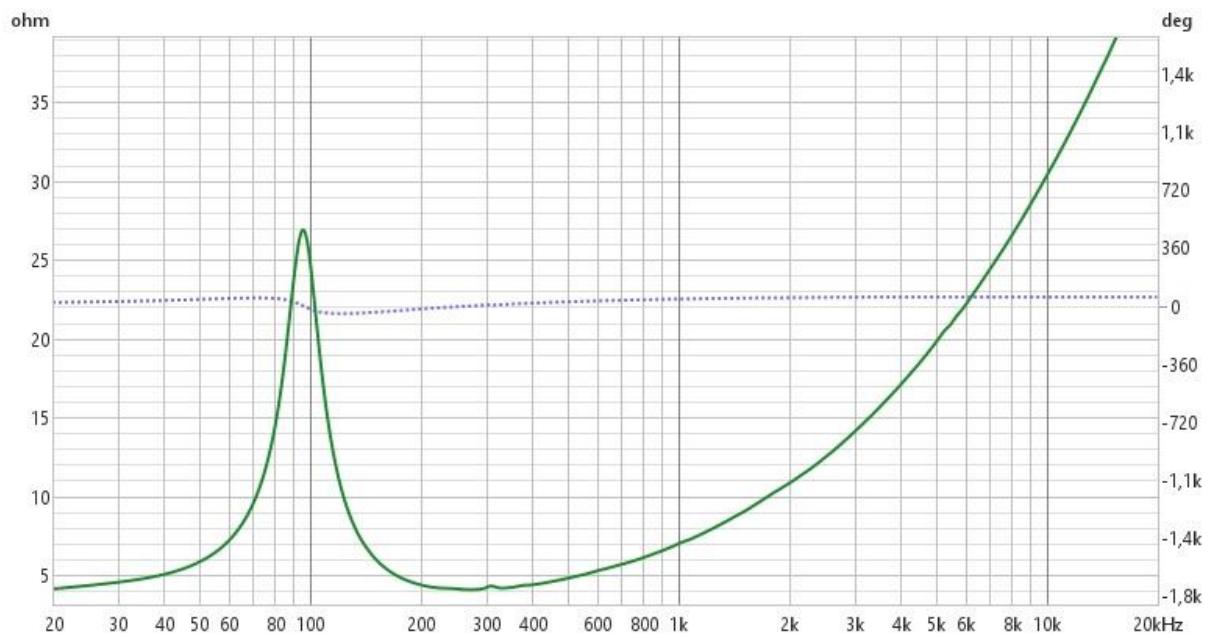


Рисунок 5 – Частотная зависимость модуля и фазы полного входного электрического сопротивления ЭДГГ с АОФ с закрытым фазоинвертором

Сохраним измерения с помощью пункта меню File — Save all measurements или нажав кнопку Save All в основном окне ПО REW.

3.1 Определение частоты механического резонанса и добротности головки громкоговорителя

Определение параметров головки громкоговорителя без акустического оформления

Сделаем активной карточку, содержащую результаты измерений импеданса исследуемой ЭДГГ без АОФ и согласно методике выше, получим:

- частота механического резонанса ЭДГГ в ЗАО $f_s = 85,7 \text{ Гц}$;
- максимальное значение $|Z_E|_{\text{MAX}} = 29,23$;
- сопротивление $|Z_E|_{\text{BW}} = 10,11$;
- механической добротности акустической системы $Q_{MC} = 5,05$;
- электрической добротности $Q_{EC} = 0,69$;
- полной добротности $Q_{TC} = 0,61$.

Определение параметров головки громкоговорителя в акустическом оформлении с закрытым фазоинвертором

Сделаем активной карточку, содержащую результаты измерений импеданса исследуемой ЭДГГ с АОФ с закрытым фазоинвертором, согласно методике выше, получим:

- частота механического резонанса ЭДГГ в ЗАО $f_c = 95,6 \text{ Гц}$;
- максимальное значение $|Z_E|_{\text{MAX}} = 26,04$;
- сопротивление $|Z_E|_{\text{BW}} = 9,55$;
- механической добротности акустической системы $Q_{MC} = 5,35$;
- электрической добротности $Q_{EC} = 0,83$;
- полной добротности $Q_{TC} = 0,72$.

3.2 Определение параметров головки громкоговорителя в акустическом оформлении с фазоинвертором

Сделаем активной карточку, содержащую результаты измерений импеданса исследуемой ЭДГГ в АОФ с открытым фазоинвертором.

Выполним измерение частот $f_L = 45,5$ Гц и $f_H = 99,5$ Гц, соответствующих максимумам частотной зависимости модуля импеданса.

Рассчитаем частоту резонанса акустического оформления с фазоинвертором по формуле (8):

$$f_B = \sqrt{f_L^2 + f_H^2 - f_C^2} = 53,21 \text{ Гц}, \quad (8)$$

где f_C — частота механического резонанса ЭДГГ с закрытым фазоинвертором, Гц.

Рассчитаем частоту механического резонанса ЭДГГ в АОФ по формуле (9):

$$f_{SB} = \frac{f_L * f_H}{f_B} = 85,08 \text{ Гц}, \quad (9)$$

Рассчитаем механическую Q_{MB} , электрическую Q_{EB} и полную Q_{TB} добротности ЭДГГ в АОФ по формулам (10)–(12):

$$Q_{MB} = \frac{f_S}{f_{SB}} Q_{MS} = 4,88, \quad (10)$$

$$Q_{EB} = \frac{f_S}{f_{SB}} Q_{ES} = 0,73, \quad (11)$$

$$Q_{TB} = \frac{f_S}{f_{SB}} Q_{TS} = 0,63, \quad (12)$$

3.3 Определение эквивалентного объема головки громкоговорителя

На основании результатов, полученных в ходе выполнения п. 3.2, рассчитаем эквивалентный объем ЭДГГ по формуле (13):

$$V_{AS} = V_B \left[\left(\frac{f_C}{f_{SB}} \right)^2 - 1 \right] = 1,27 \text{ л}, \quad (13)$$

4 Анализ результатов измерений

Заполним табл.1 и табл.2 по результатам измерений.

Таблица 3 – Результаты измерения характеристик ЭДГГ в ЗАО

ЭДГГ без АО			ЭДГГ в ЗАО		
Параметр	Ед.изм.	Значение	Параметр	Ед.изм.	Значение
f_S	Гц	151	f_C	Гц	165
R_E	Ом	3,5	R_E	Ом	3,5
$ Z _{MAX}$	Ом	8,78	$ Z _{MAX}$	Ом	8,36
f_1	Гц	122,8	f_1	Гц	129,8
f_2	Гц	189,3	f_2	Гц	207,3
Q_{MS}	–	3,63	Q_{MC}	–	3,17
Q_{ES}	–	2,41	Q_{EC}	–	2,28
Q_{TS}	–	1,45	Q_{TC}	–	1,33
V_{AS}	л	0,49	Q_{TC2}	–	1,45

Таблица 4 – Результаты измерения характеристик ЭДГГ в АОФ

ЭДГГ без АОФ			ЭДГГ в АОФ, Ф закрыт			ЭДГГ в АОФ, Ф открыт		
Параметр	Ед.изм.	Значение	Параметр	Ед.изм.	Значение	Параметр	Ед.изм.	Значение
f_S	Гц	85,7	f_C	Гц	95,6	f_L	Гц	45,5
R_E	Ом	3,5	R_E	Ом	3,5	f_H	Гц	99,5
$ Z _{MAX}$	Ом	29,23	$ Z _{MAX}$	Ом	26,04	f_B	Гц	53,21
f_1	Гц	63,6	f_1	Гц	76,5	f_{SB}	Гц	85,08
f_2	Гц	111,9	f_2	Гц	126,7	Q_{MB}	–	4,88
Q_{MS}	–	5,05	Q_{MC}	–	5,35	Q_{EB}	–	0,73
Q_{ES}	–	0,69	Q_{EC}	–	0,83	Q_{TB}	–	0,63
Q_{TS}	–	0,61	Q_{TC}	–	0,72	V_{AS}	л	1,27

Проанализируем полученные результаты измерений электрических характеристик ЭДГГ в различных акустических оформлениях.

1) Как меняется частота механического резонанса и полная добротность ЭДГГ при размещении ее в закрытом ящике? Чем обусловлены изменения параметров ЭДГГ?

При помещении головки в закрытый ящик частота её механического резонанса повышается, а полная добротность увеличивается. Это связано с тем, что воздух внутри герметичного корпуса оказывает дополнительное упругое противодействие движению диффузора, фактически усиливая жёсткость подвеса. Повышение жёсткости напрямую приводит к росту резонансной частоты. Увеличение добротности объясняется тем, что

дополнительная упругость от сжимаемого воздуха вносит больший вклад, чем потери в системе

2) Исходя из каких соображений необходимо выбирать внутренний объем ЗАО? Считаете ли Вы, что объем исследованного ЗАО был выбран корректно?

Объём ЗАО подбирается на основе параметров Тиля–Смолла, а также с учётом желаемых характеристик: глубины НЧ-воспроизведения, плавности АЧХ и компактности корпуса. Целевой показатель — обычно $Q_{TC} \approx 0,7–1,0$. В нашем случае рассчитанное значение $Q_{TC2} = 1,33$, что значительно выше оптимального. Это говорит о том, что корпус оказался слишком мал, что привело к излишнему усилению резонанса и ухудшению переходной характеристики. Следовательно, объём выбран неудачно.

3) Сравните значения полной добротности ЭДГГ в ЗАО, полученные в результате измерений (Q_{TC}) и расчетов (Q_{TC2}); сформулируйте выводы о сходимости результатов.

Сравнение измеренного (Q_{TC}) и расчетного (Q_{TC2}) значений полной добротности показало, что их расхождение составляет менее 10%. Такой уровень соответствия можно считать удовлетворительным, что свидетельствует о корректности проведенных измерений, достоверности исходных параметров головки и применимости используемой теоретической модели (модели Тиля-Смолла) для данного оформления.

4) Чем обусловлено, что на частотной зависимости полного входного электрического сопротивления ЭДГГ в АОФ наблюдается два резонансных пика вместо одно? Какие элементы ЭДГГ и/или акустического оформления вступают в резонанс на частоте: f_L ; f_H ?

В АОФ система становится двухзвенной: помимо подвижной системы динамика, в игру вступает воздушный резонатор. Из-за этого возникают два резонанса. Нижний пик на частоте $f_L = 45,5$ Гц обусловлен резонансом массы воздуха в трубе фазоинвертора и упругости воздушной «пружины» в ящике. Верхний пик на $f_H = 99,5$ Гц соответствует резонансу самой головки при

наличии акустической нагрузки от корпуса и взаимодействия с фазоинвертором.

5) Как меняется частота механического резонанса и полная добротность ЭДГГ при размещении ее в АОФ? Чем обусловлены изменения параметров ЭДГГ?

В АОФ система приобретает два резонанса, а эффективная частота воспроизведения может оказаться ниже исходного f_s . Полная добротность при этом, как правило, снижается. Это улучшает контроль над движением диффузора и повышает КПД в области низких частот. Причина — взаимодействие головки с резонансом фазоинвертора, который частично берёт на себя излучение звука на резонансной частоте f_B , разгружая сам диффузор.

6) Исходя из каких соображений необходимо выбирать частоту резонанса АОФ f_B ? Считаете ли Вы, что частота резонанса исследованного АОФ была выбрана корректно?

Частоту f_B обычно выбирают близкой к f_s или немного ниже, чтобы обеспечить плавное расширение НЧ-диапазона и ровную АЧХ. В идеале пики импеданса должны быть примерно равными по высоте, а провал между ними — чётко выраженным. В нашем случае пики сильно различаются по амплитуде, а форма импедансной кривой указывает на расстройку. Это позволяет сделать вывод, что $f_B = 53,2$ Гц была выбрана неоптимально.

7) Исходя из каких соображений необходимо выбирать внутренний объем АОФ? Считаете ли Вы, что объем исследованного АОФ был выбран корректно?

Объём корпуса АОФ связан с параметрами головки и целевой частотой настройки фазоинвертора. Он должен обеспечивать баланс между эффективностью, искажениями и компактностью. В нашем случае наблюдается явный дисбаланс: пики импеданса разной высоты, слабо выраженный минимум между ними, а также «горб» на АЧХ — всё это свидетельствует о том, что объём корпуса подобран некорректно для данной головки.

8) Исходя из каких соображений необходимо выбирать площадь поперечного сечения трубы фазоинвертора?

Площадь сечения подбирается, чтобы избежать турбулентных шумов и нелинейных искажений при высоких уровнях звукового давления. Слишком узкая труба вызывает завихрения и свист, особенно на больших амплитудах; слишком широкая — требует чрезмерной длины для достижения нужной f_B . Оптимальное сечение рассчитывается исходя из максимальной ожидаемой скорости воздушного потока (обычно не более 5–10 м/с), объема корпуса, требуемой частоты настройки и конструктивных ограничений.