

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 вещание»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9DA

ИССЛЕДОВАНИЕ 1-БИТНОЙ СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯЦИИ

Выполнил:

Балан К.А.

Проверила:

Свиньина О.А.

Санкт-Петербург

2025

Оглавление

3.1 Регулировочная характеристика входных усилителей	3
3.2. Регулировочная характеристика выходных усилителей.....	4
3.3 Разница коэффициентов усиления между каналами	5
3.4. Амплитудная характеристика тракта ЦАП — АЦП	6
4.1. Зависимость коэффициента искажения и шума от частоты.....	8
4.2. Зависимость коэффициента искажения и шума от уровня испытательного сигнала.....	10
4.3. Интермодуляционные искажения	12
5.1. Уровень шума в ненагруженном канале.....	13
5.2. Спектр шума в ненагруженном канале	14
5.3. Отношение сигнал/шум.....	15
5.4. Динамический диапазон	16
6. Разделение каналов (переходное затухание).....	17
7.1. Калибровка аудиоинтерфейса.....	19
7.2. Измерение эффективного диапазона частот	20
7.4. Измерение амплитудно-частотной характеристики с коррекцией	21

3.1 Регулировочная характеристика входных усилителей

Частота: 997 Гц.

Уровень сигнала: нормальный уровень измерения: -20 dBFS rms.

Таблица 1 – Значения уровней входного сигнала и коэффициента усиления

Положение регулятора		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Уровень входного сигнала, dBFS	L канал	-69.85	-66.27	-63.12	-56.06	-54.25	-50.81	-42.36	-35.52	-30.03	-25.49	-20.24
	R канал	-71.58	-67.56	-62.43	-56.18	-53.38	-50.19	-40.99	-35.56	-30.72	-25.80	-20.17
Коэффициент усиления, dB	L канал	-49.85	-46.27	-43.12	-36.06	-34.25	-30.81	-22.36	-15.52	-10.03	-5.49	-0.24
	R канал	-51.58	-47.56	-42.43	-36.18	-33.38	-30.19	-20.99	-15.56	-10.72	-5.80	-0.17

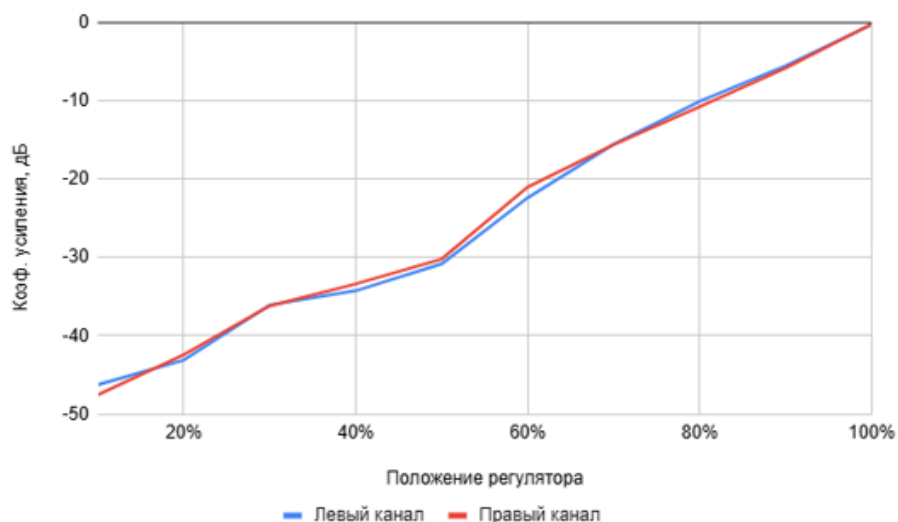


Рисунок 1 – График зависимости коэффициента усиления от положения регулятора

3.2. Регулировочная характеристика выходных усилителей

Частота: 997 Гц.

Уровень сигнала: нормальный уровень измерения: -20 dBFS rms.

Таблица 2 – Значения уровней входного сигнала и коэффициента усиления

Положение регулятора		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Уровень сигнала, dBFS	L канал	-94.76	-68.83	-54.46	-45.95	-39.17	-33.94	-30.43	-26.81	-24.44	-21.82	-19.84
	R канал	-95.60	-69.87	-53.64	-45.13	-38.54	-33.50	-30.21	-26.89	-23.35	-21.32	-19.54
Коэффициент усиления, dB	L канал	-74.76	-48.83	-34.46	-25.95	-19.17	-13.94	-10.43	-6.81	-4.44	-1.82	0.84
	R канал	-75.60	-49.87	-33.64	-25.13	-18.54	-13.50	-10.21	-6.89	-3.35	-1.32	0.54

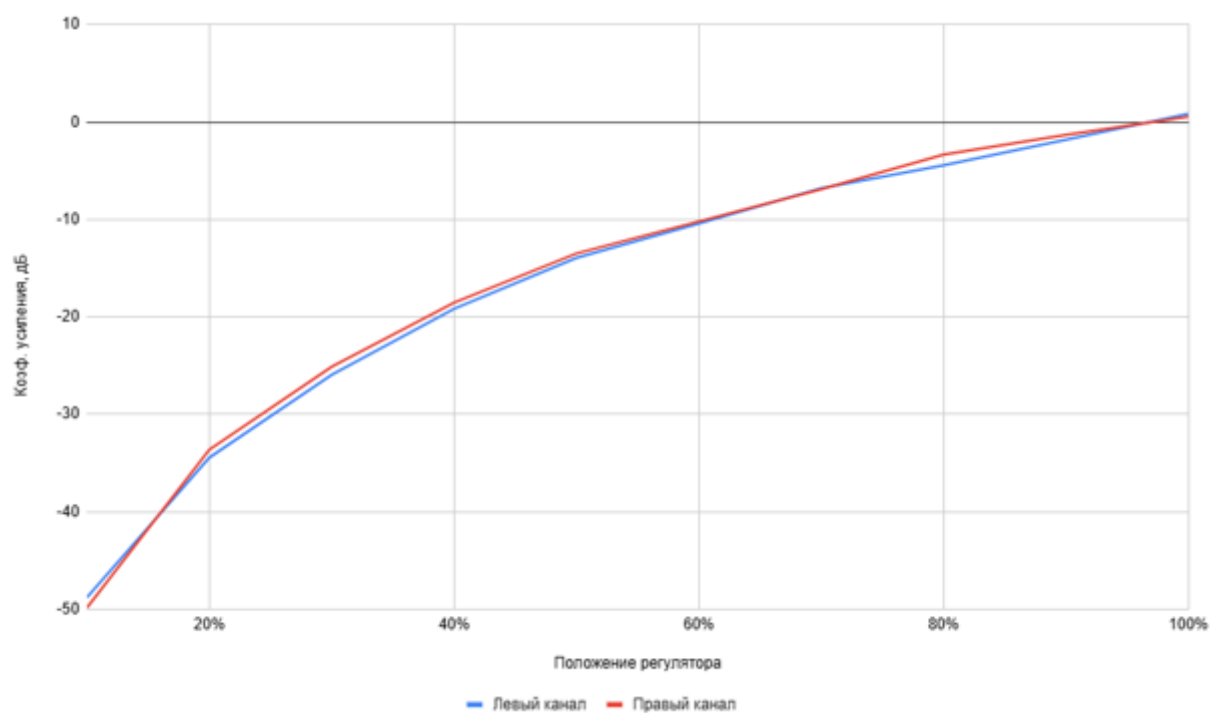


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента усиления от положения регулятора

3.3 Разница коэффициентов усиления между каналами

Таблица 3 – Разница коэффициентов усиления между левым и правым каналом

Положение регулятора		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Разница Коэффициентов усиления	Входные усилители, dB	1,73	1,29	-0,69	0,12	-0,87	-0,62	-1,37	0,04	0,69	0,31	-0,07
	Выходные усилители, dB	0,84	1,04	-0,82	-0,82	-0,63	-0,44	-0,22	0,08	-1,09	-0,5	0,3

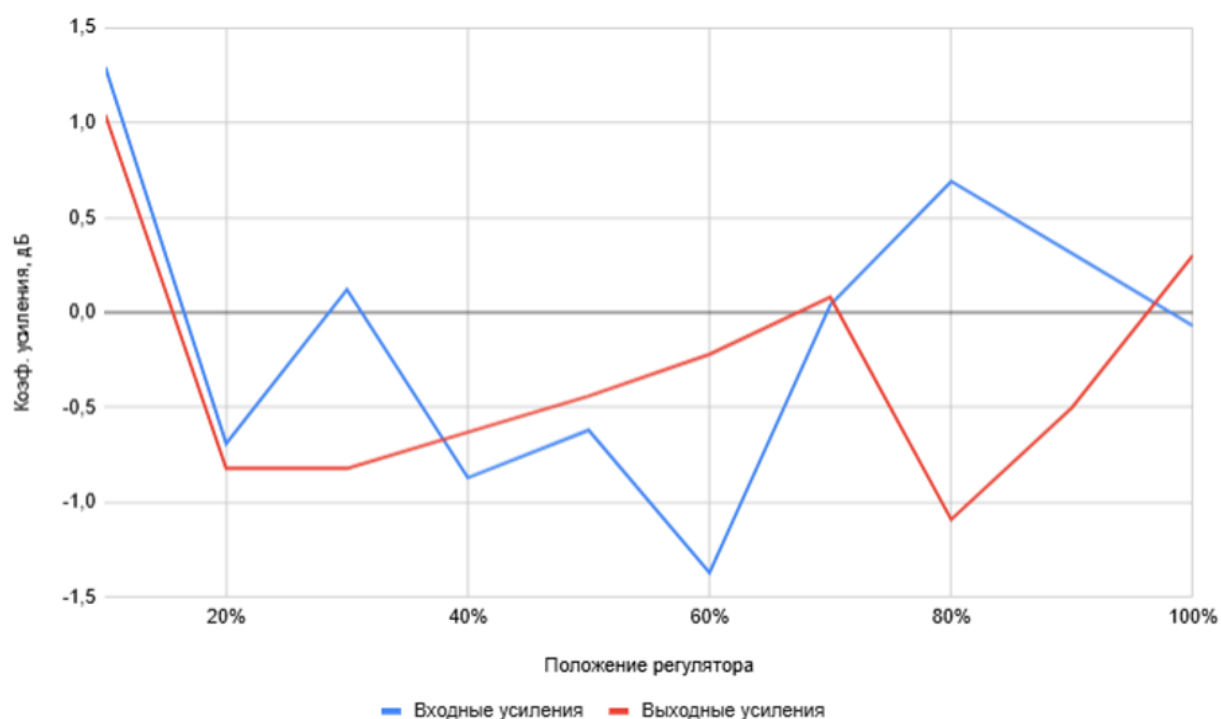


Рисунок 3 – График зависимости разности коэффициента усиления между левым и правым каналом от положения регулятора

3.4. Амплитудная характеристика тракта ЦАП — АЦП

Частота: 997 Гц.

Уровень сигнала: нормальный уровень измерения: –20 dBFS rms.

Таблица 4 – Уровни входного сигнала левого и правого аудиоинтерфейсов

Уровень сигнала, dBFS	Уровень L канала, dBFS	Уровень R канала, dBFS	Уровень сигнала, dBFS	Уровень L канала, dBFS	Уровень R канала, dBFS
0	-0.79	-0.98	-48	-48.8	-48.99
-1	-1.79	-1.97	-51	-51.81	-51.99
-2	-2.79	-2.98	-54	-54.81	-54.99
-3	-3.79	-3.98	-57	-57.8	-57.99
-4	-4.79	-4.98	-60	-60.8	-60.97
-5	-5.8	-5.98	-63	-63.76	-63.96
-6	-6.8	-6.98	-66	-66.76	-66.89
-9	-9.8	-9.99	-69	-69.68	-69.83
-12	-12.8	-12.99	-72	-72.46	-72.71
-15	-15.8	-15.99	-75	-75.17	-75.41
-18	-18.8	-18.99	-76	-76.05	-76.16
-21	-21.8	-21.99	-77	-77.02	-77.09
-24	-24.8	-24.99	-78	-77.63	-77.94
-27	-27.8	-27.99	-79	-78.28	-78.64
-30	-30.8	-30.99	-80	-79.14	-79.11
-33	-33.8	-33.99	-81	-79.77	-80.03
-36	-36.8	-36.99	-82	-80.40	-80.6
-39	-39.8	-39.99	-83	-81.2	-81.05
-42	-42.8	-42.99	-84	-81.9	-81.6
-45	-45.8	-45.99			

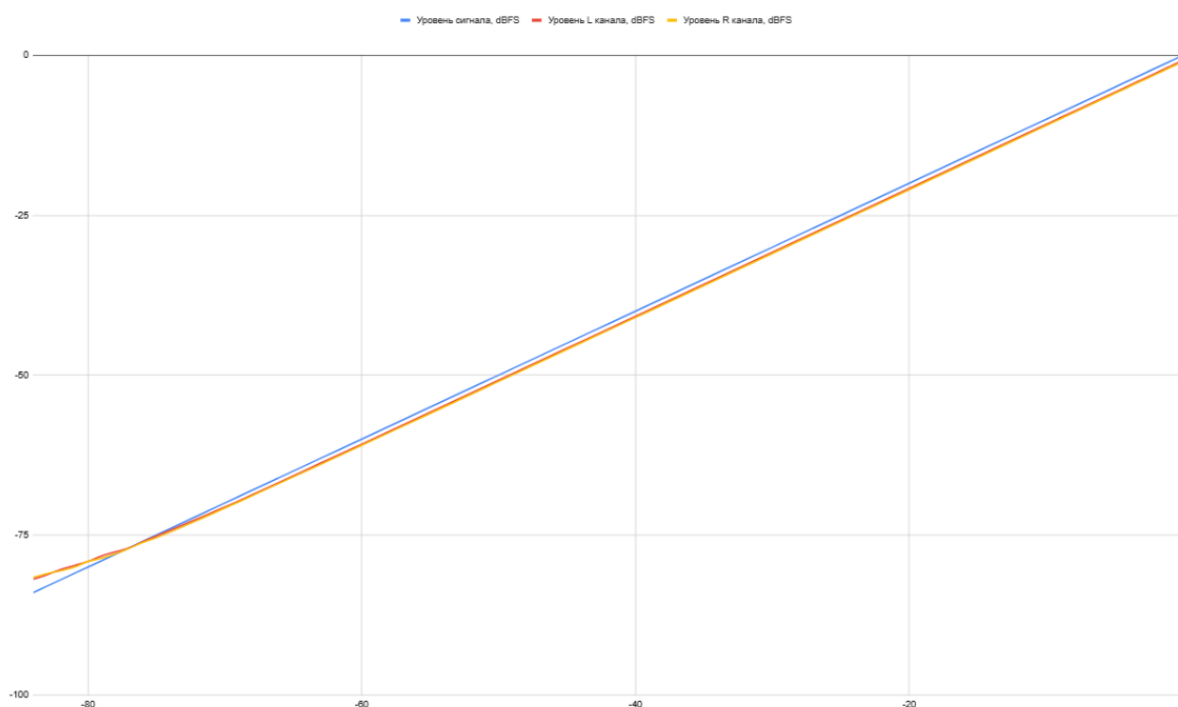


Рисунок 4 – График зависимости уровней сигнала левого и правого каналов от входного уровня сигнала

Вывод: Регулировочные характеристики входных и выходных усилителей демонстрируют монотонное изменение коэффициента усиления в зависимости от положения регулятора, что соответствует ожидаемому поведению аналоговых управляющих элементов. Незначительные различия коэффициентов усиления между левым и правым каналами (в пределах $\pm 1,7$ дБ) свидетельствуют о хорошей сбалансированности стереотракта. Амплитудная характеристика ЦАП–АЦП тракта линейна в широком диапазоне уровней (от -80 dBFS до 0 dBFS), подтверждая корректную работу цифровой и аналоговой частей интерфейса без признаков преждевременного ограничения или нелинейных искажений. Это согласуется с теорией цифровой обработки сигнала, где линейность тракта является необходимым условием для точного воспроизведения и измерения.

4.1. Зависимость коэффициента искажения и шума от частоты

Частота: частоты стандартного 1/3-октавного ряда от 20 до 16000 Гц.

Уровень сигнала: 1) –1 dBFS rms; 2) –20 dBFS rms.

Таблица 5 – Зависимость уровня искажений и шума канала L от частоты сигнала

Уровень сигнала, dBFS	Частота сигнала, Гц	Уровень искажения и шума L канала, dBFS	Уровень сигнала, dBFS	Частота сигнала, Гц	Уровень искажения и шума L канала, dBFS
-1	20	-41,2	-20	20	-59,0
	25	-41,2		25	-59,0
	31,5	-41,2		31,5	-59,0
	40	-41,2		40	-59,0
	50	-41,2		50	-59,0
	63	-41,2		63	-59,0
	80	-41,2		80	-59,0
	100	-41,2		100	-59,0
	125	-41,2		125	-59,0
	160	-41,2		160	-59,0
	200	-41,2		200	-59,0
	250	-41,2		250	-59,0
	315	-41,2		315	-59,0
	400	-41,2		400	-59,0
	500	-41,2		500	-59,0
	630	-41,2		630	-59,0
	800	-41,2		800	-59,0
	1000	-41,2		1000	-59,0
	1250	-41,2		1250	-59,1
	1600	-41,2		1600	-59,0
	2000	-41,2		2000	-59,1
	2500	-41,2		2500	-59,0
	3150	-41,2		3150	-59,1
	4000	-41,2		4000	-59,0

	5000	-41.2		5000	-59,1
	6300	-41,2		6300	-59,0
	8000	-41.2		8000	-59,2
	10000	-44.1		10000	-61,7
	12500	-85.1		12500	-70,7
	16000	-84.9		16000	-70,4

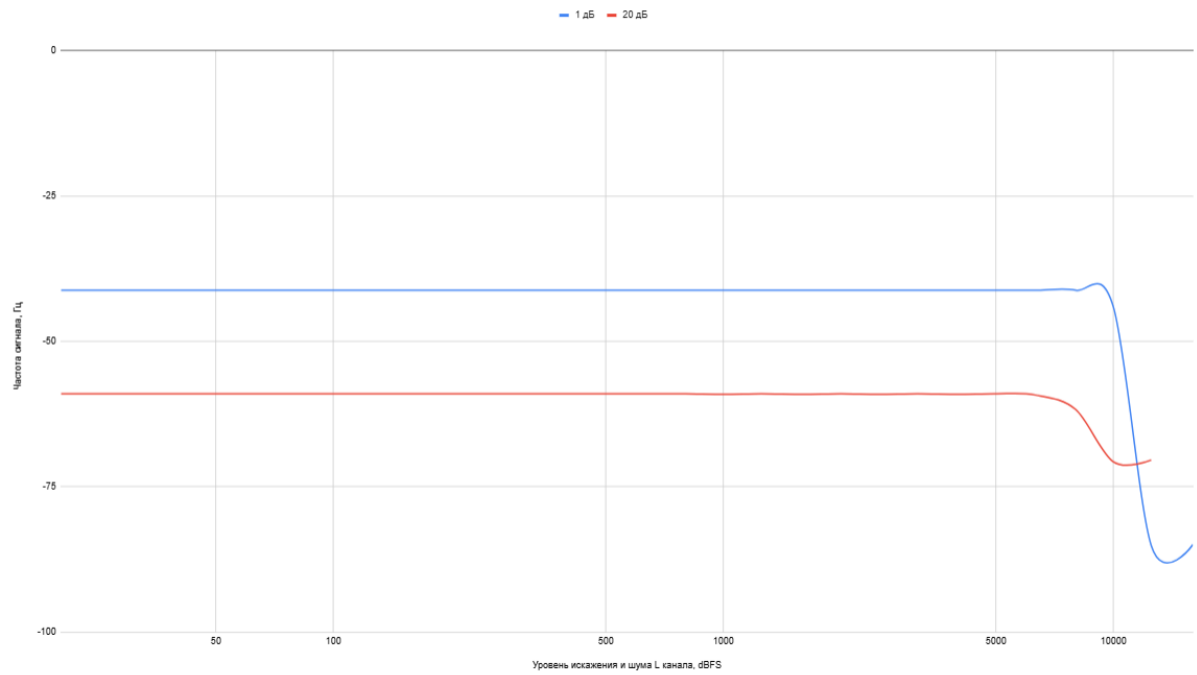


Рисунок 5 – График зависимости уровня искажения и шума левого канала от частоты сигнала

4.2. Зависимость коэффициента искажения и шума от уровня испытательного сигнала

Частота: 997 Гц.

Таблица 6 – Зависимость уровня искажений и шума канала L от уровня сигнала

Уровень сигнала, dBFS	Уровень искажения и шума L канала, dB	Уровень сигнала, dBFS	Уровень искажения и шума L канала, dB
0	-39,0	-48	-40,8
-1	-41,2	-51	-37,8
-2	-41,2	-54	-34,8
-3	-43,0	-57	-31,8
-4	-43,9	-60	-28,8
-5	-44,8	-63	-25,9
-6	-45,7	-66	-22,7
-9	-48,6	-69	-20,0
-12	-51,6	-72	-16,9
-15	-54,5	-75	-14,0
-18	-57,3	-76	-13,0
-21	-59,8	-77	-12,0
-24	-61,1	-78	-11,2
-27	-60,5	-79	-10,2
-30	-58,3	-80	-9,4
-33	-55,7	-81	-8,5
-36	-52,8	-82	-7,7
-39	-49,8	-83	-6,9
-42	-46,8	-84	-6,1
-45	-43,8		

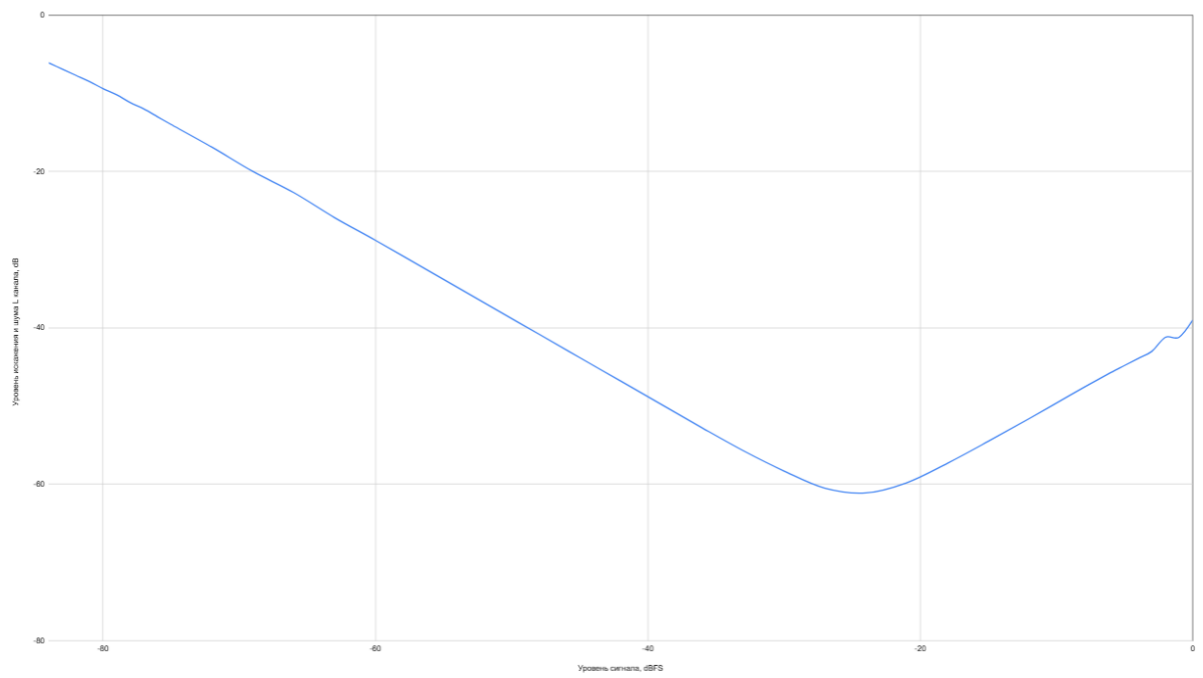


Рисунок 6 – График зависимости уровня искажения и шума от уровня испытательного сигнала

4.3. Интермодуляционные искажения

Сигнал А — близкий тон: сумма двух синусоидальных сигналов с частотами 18 кГц и 20 кГц и одинаковыми амплитудами (1:1).

Сигнал В — расширенный тон: сумма двух синусоидальных сигналов с частотами 41 Гц и 7993 Гц и соотношением амплитуд 4:1.

Уровень сигнала: 0 dBFS pk.

Таблица 7 – Коэффициенты интермодуляционных искажений каналов L и R

Коэффициент интермодуляционных искажений	Уровень сигнала А, dBFS	Уровень сигнала В, dBFS
L канал	-18.3	-11.9
R канал	-21.3	-10.5

Вывод: Коэффициент искажений и шума остаётся практически постоянным на уровне $-41,2$ dBFS при входном сигнале -1 dBFS и -59 dBFS при -20 dBFS в диапазоне до 8 кГц, что указывает на высокое качество АЦП/ЦАП и низкий уровень шумов. Рост искажений на частотах выше 10 кГц (особенно при 0 dBFS) обусловлен ограничениями антиалиасинговых фильтров и эффектами квантования в сигма-дельта модуляторе — это согласуется с теорией передискретизации и шейпинга шума. Интермодуляционные искажения находятся на низком уровне ($-18...-21$ dBFS), что подтверждает достаточный запас по перегрузке и линейность устройства даже при подаче сложных многотональных сигналов.

5.1. Уровень шума в ненагруженном канале

Испытательный сигнал - цифровой ноль.

Таблица 8 - Уровень шума в ненагруженном канале

Канал	Уровень шума (dB A)
L	-89.72
R	-89.95

5.2. Спектр шума в ненагруженном канале

Испытательный сигнал - цифровой ноль.

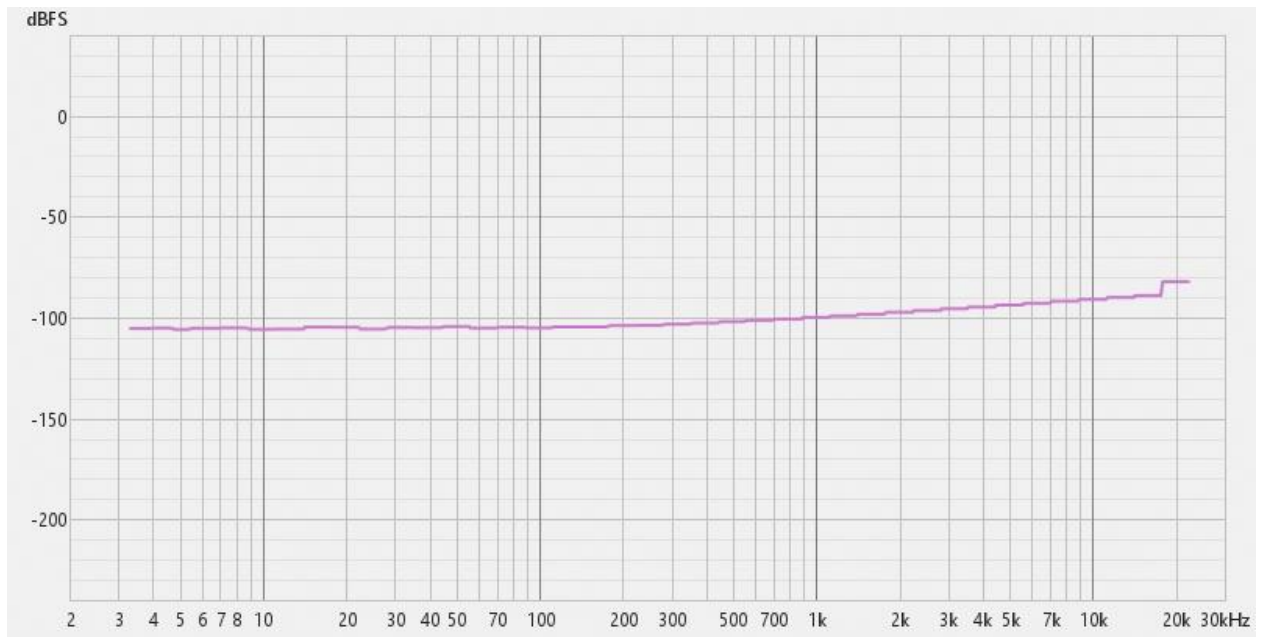


Рисунок 7 – Шум в ненагруженном правом канале



Рисунок 8 – Шум в ненагруженном левом канале

5.3. Отношение сигнал/шум

Сигнал А: полная амплитуда; частота сигнала равна 997 Гц.

Сигнал В: цифровой ноль.

Таблица 9 – Отношение сигнал/шум

Канал	Сигнал А	Сигнал В	Уровень сигнал/шум
L	-0,33	-89,75	89,42
R	-0,95	-85,10	84,15

5.4. Динамический диапазон

Частота: 997 Гц.

Таблица 10 – Динамический диапазон

Уровень сигнала: –60 dBFS rms. Канал	Шум и искажения, дБ	Динамический диапазон, дБ	Динамический диапазон, дБ CCIR-RMS
L	-84,45	91,6	87,52
R	-83,86	90,2	86,94

Вывод: Уровень шума в ненагруженных каналах составляет около –89,7 дБ, что соответствует хорошему уровню внутреннего шума аудиоинтерфейса. Спектр шума равномерен в слышимом диапазоне с характерным ростом на ультразвуковых частотах — типичное поведение для сигма-дельта архитектуры, где шум квантизации сдвигается в высокочастотную область. Отношение сигнал/шум превышает 84 дБ, а динамический диапазон достигает 87 дБ в левом канале, что соответствует характеристикам профессионального оборудования.

6. Разделение каналов (переходное затухание)

Частота: частоты стандартного 1/3-октавного ряда от 20 до 16000 Гц.

Уровень сигнала: **–20 dBFS rms.**

Таблица 11 – Уровни переходного затухания каналов R и L

Частота сигнала, Гц	Уровень переходного затухания L канала, dB	Частота сигнала, Гц	Уровень переходного затухания R канала, dB
20	63.47	20	68,01
25	63.45	25	68,01
31,5	63.41	31,5	68,02
40	63.41	40	67,98
50	63.41	50	67,96
63	63.41	63	67,91
80	63.41	80	67,89
100	63.41	100	67,97
125	63.41	125	68,04
160	63.41	160	67,85
200	63.43	200	67,76
250	63.43	250	67,85
315	63.45	315	67,99
400	63.43	400	68,10
500	63.41	500	68,28
630	63.41	630	68,39
800	63.41	800	68,48
1000	63.41	1000	68,27
1250	63.42	1250	68,03
1600	63.41	1600	68,07
2000	63.41	2000	68,09
2500	63.39	2500	68,9
3150	63.33	3150	68,10
4000	63.28	4000	68,11
5000	63.23	5000	68,12

6300	63.18	6300	66,91
8000	63.10	8000	66,77
10000	62.92	10000	65,93
12500	62.81	12500	65,37
16000	62.69	16000	64,10

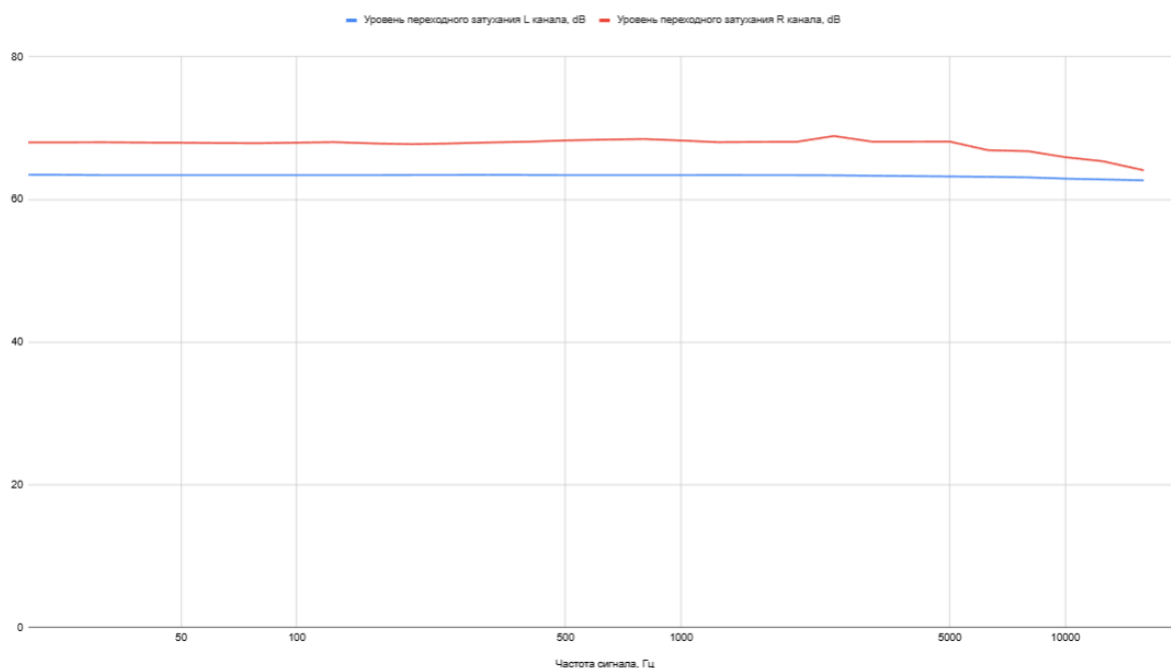


Рисунок 9 – График зависимости уровня переходного затухания от частоты сигнала

Вывод: Переходное затухание между каналами превышает 62 дБ на частотах до 16 кГц, что указывает на высокую степень межканальной развязки. Незначительное снижение затухания на высоких частотах (до ~62–64 дБ) может быть связано с паразитными ёмкостными связями в аналоговой части. Тем не менее, полученное значение достаточно для практического применения в стереофонических системах, где рекомендуемый уровень разделения составляет не менее 50–60 дБ. Таким образом, стереотракт демонстрирует хорошую независимость каналов.

7.1. Калибровка аудиоинтерфейса

Синусоидальный сигнал качающейся частоты.

Частота развертки: от 0 Гц до 24 кГц.

Уровень сигнала: -12 dBFS rms

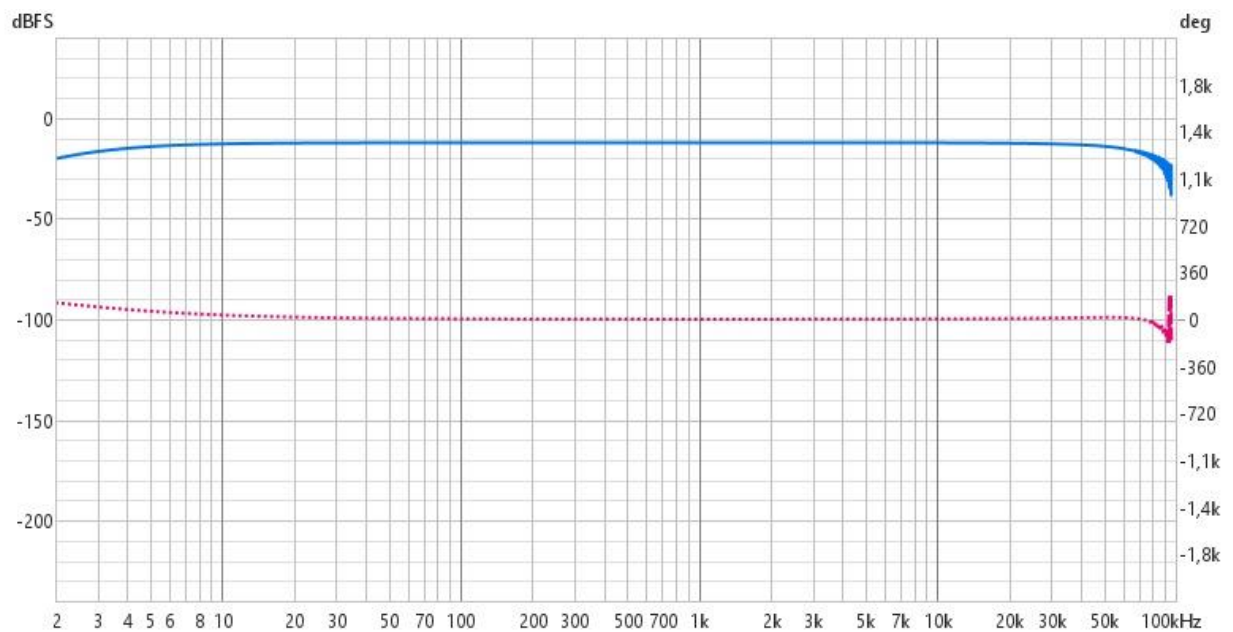


Рисунок 10 – Графики АЧХ и ФЧХ для левого канала

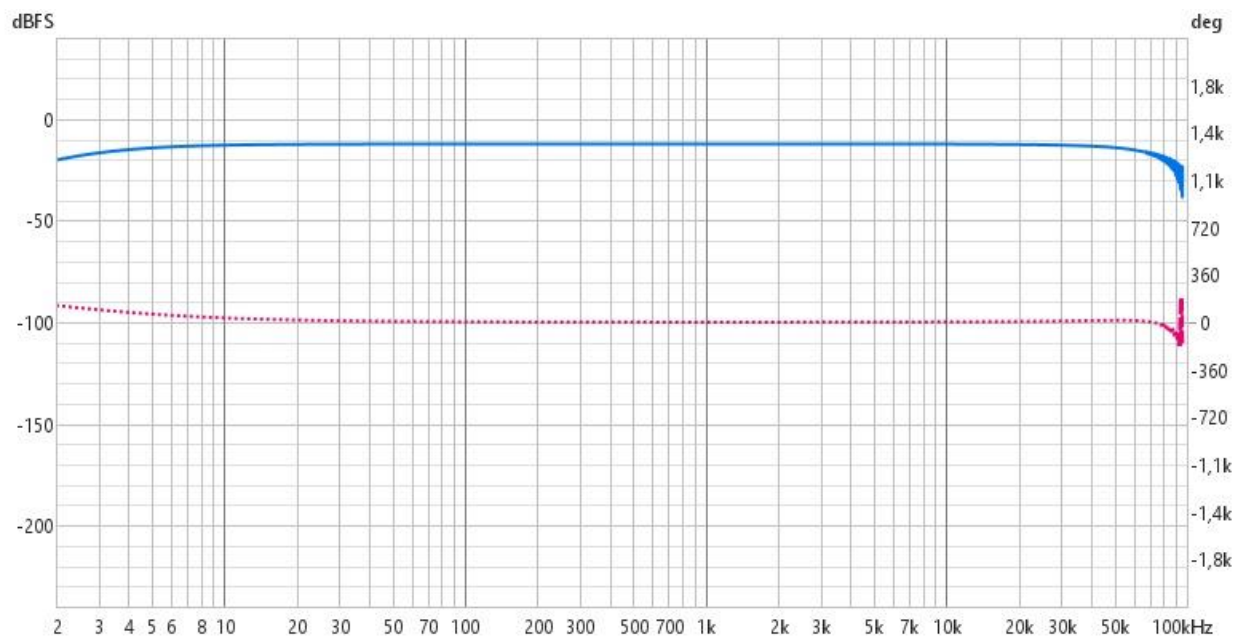


Рисунок 11 – Графики АЧХ и ФЧХ для правого канала

7.2. Измерение эффективного диапазона частот

Таблица 12 – Эффективный диапазон частот каналов L и R

Каналы	Опорный уровень	Верхняя f	Нижняя f	Эффективный диапазон
L	-12,0 dBFS	23,1 кГц	5,6 Гц	23094,4 Гц
R	-12,5 dBFS	23,3 кГц	6,1 Гц	23293,9 Гц

7.4. Измерение амплитудно-частотной характеристики с коррекцией

Синусоидальный сигнал качающейся частоты.

Частота развертки: от 0 Гц до 24 кГц.

Уровень сигнала: –12 dBFS rms

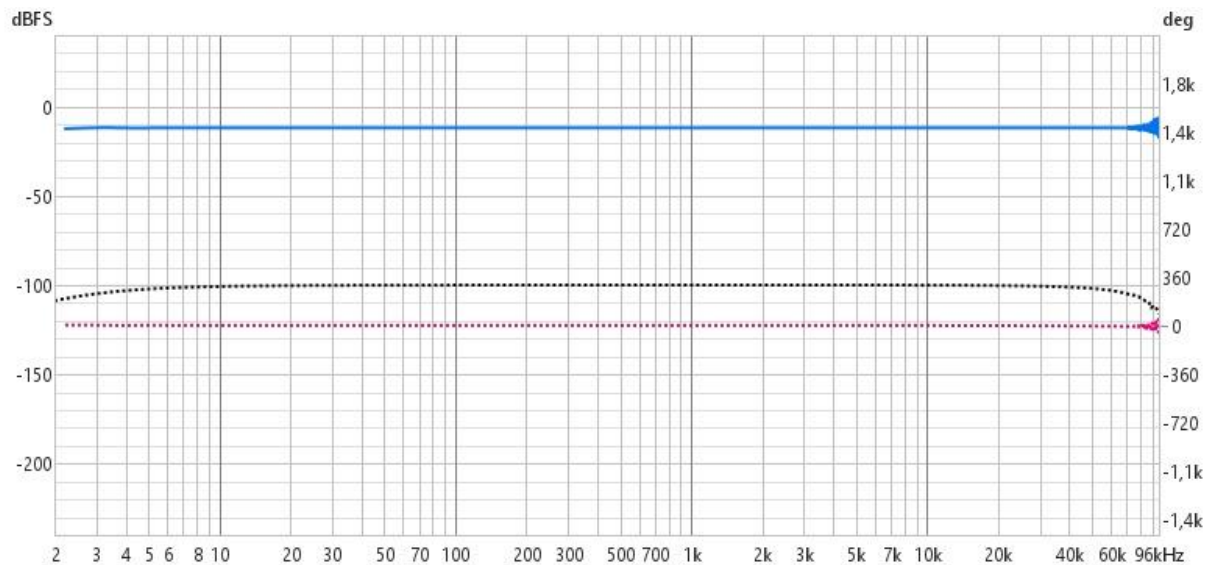


Рисунок 12 – Графики АЧХ и ФЧХ с коррекцией левого канала

Вывод: Эффективный диапазон частот составляет около 5,6 Гц – 23,3 кГц, что соответствует стандарту высококачественного аудиовоспроизведения (шире диапазона 20 Гц – 20 кГц). Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), полученные при калибровке и с коррекцией, демонстрируют плоский отклик в слышимом диапазоне с плавным спадом выше 20 кГц — типичное поведение для цифровых аудиосистем с фильтрацией Найквиста. Это подтверждает корректную работу реконструктивных фильтров ЦАП и согласуется с теорией дискретных систем, где АЧХ идеального интерфейса должна иметь минимальные отклонения в полосе пропускания. Следовательно, аудиоинтерфейс обеспечивает точную передачу спектрального состава сигнала без значимых частотных искажений.