

ВЫБОР КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ В УСИЛИТЕЛЯХ ЗВУКА

В статье проведен анализ влияния разделительных цепей в усилителях звуковой частоты на величину нелинейных искажений, вносимых усилителями. Результаты моделирования в программе Multisim позволяют сделать вывод о необходимости устанавливать значение входного сопротивления не менее 100 кОм в первых каскадах усилителей, что позволяет обеспечить низкий уровень нелинейных искажения на нижних частотах рабочего диапазона.

В. Макаренко

Многослойные керамические конденсаторы (MLCC) чрезвычайно популярны во многих приложениях из-за их малых габаритных размеров и относительно низкой стоимости. Конденсаторы MLCC подразделяются на разные классы в первую очередь от их температурной стабильности. Керамику II класса часто называют "с высоким k", где k – относительная диэлектрическая проницаемость (диэлектрическая постоянная) диэлектрического материала между пластинами конденсатора. Диэлектрическая постоянная конденсаторов этого класса колеблется от 3000 (X7R) до 18 000 (Z5U) [1].

Конденсаторы 1 класса COG (NPO) имеют относительную диэлектрическую проницаемость в диапазон от 6 до 200, что обеспечивает высокую температурную стабильность емкости.

В табл. 1 приведены значения относительной диэлектрической проницаемости некоторых распространенных диэлектрических материалов, используемые в конденсаторах [1].

В портативных устройства заманчиво использовать MLCC с высоким k из-за их небольшого размера и стоимости. Однако важно помнить, что их относительная диэлектрическая проницаемость очень высока и емкость изменяется в зависимости от приложенного напряжения и температуры довольно значительно. Это изменение емкости в первую очередь связано с использованием большие концентрации титаната бария в диэлектрике [1].

Титанат бария по своей природе является сегнетоэлектриком, у которого при увеличении напряженности электрического поля внутри материала

SELECTING CAPACITOR TO MINIMIZE DISTORTION IN AUDIO AMPLIFIERS

Abstract - The article analyzes the influence of separation circuits in audio frequency amplifiers on the magnitude of nonlinear distortions introduced by amplifiers. The simulation results in the Multisim program allow us to conclude that it is necessary to set the input resistance value of at least 100 kOhm in the first amplifier stages, which makes it possible to ensure a low level of non-linear distortion at the lower frequencies of the operating range.

Таблица 1. Относительная диэлектрическая

проницаемость диэлектрических материалов

V. Makarenko

Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость
Вакуум	1
Полиэтилен сульфид	3
Полиэтилентерефталат	3.3
Полипропилен	2.2
Пропитанная бумага	2 6
Полиэтилентерефталат (майлар, лавсан)	3.1
Слюда	6.8
Оксид алюминия	8.5
Пятиокись тантала	27.7
Параэлектрическая керамика (класс I)	5 90
Титанат стронция	310
Титанат бария (класс II)	30008000

уменьшается его относительная диэлектрическая проницаемость, что в свою очередь приводит к уменьшению емкости. Изменение емкости под действием переменного напряжения приводит к искажению тока, протекающего через конденсатор.

Изменение емкости в зависимости от приложенного напряжения может быть доминирующим источником искажений в области низких частот, где импеданс конденсатора относительно высок. На высоких частотах искажения менее заметны из-за более низкого импеданса конденсатора, что приводит к незначительному падению напряжения на конденсаторе.

ЭКиС

В [1] рекомендуется уменьшать искажения путем минимизации падения напряжения на разделительных конденсаторах. Один из способов сделать это – увеличить сопротивление цепи, подключенной после конденсатора. Там же приводятся результаты измерения искажений плюс шум (THD+N), полученные с помощью оценочного модуля АЦП TLV320ADC5140 компании Texas Instruments с разделительным конденсатором X7R 0805 емкостью 4.7 мкФ. Этот АЦП имеет программируемый входной импеданс, который можно установить равным 2,5, 10 или 20 кОм. На рис. 1 показаны результаты измерений с этим конденсатором при изменении входного импеданса АЦП и уровне входного сигнала 1 В с.к.з.



Рис. 1. Зависимость искажений от входного сопротивления АЦП для разделительного конденсатора X7R 0805 емкостью 4.7 мкФ

Следует заметить, что данные на рис. 1 для частоты 10 Гц не совсем корректны, так как при входном сопротивлении 2.5 кОм, частотная характеристика в области НЧ линейна выше 30 Гц, а на частоте 10 Гц спад АЧХ составляет 5 дБ.

Проверим эти зависимости с помощью моделирования в программе Multisim. На рис. 2 приведена простейшая модель повторителя напряжения с одним разделительным конденсатором на входе для исследования зависимости искажений от сопротивления нагрузки, включенной после разделительного конденсатора.

Искажения операционного усилителя при отсутствии разделительного конденсатора, измеренные с помощью преобразования Фурье на частоте 20 Гц, составляют 2.64·10⁻¹¹%. Искажения ОУ настолько малы, что их можно не учитывать при анализе иска-



Рис. 2. Модель для анализа искажений, вносимых разделительным конденсатором

жений, вносимых разделительным конденсатором.

Однако, при увеличении сопротивления резистора R1 следует учесть, что входной ток (типовое значение) равен примерно 10 мкА. Т.е. максимальное значение входного сопротивления не должно превышать 1.2 MOм, чтобы ОУ работал на линейном участке амплитудной характеристики.

Для проверки использован керамический конденсатор MLCC компании КЕМЕТ, класс II, 10 мкФ, 6.3 В, X5R из библиотеки MANUFACTURER CAPA-SITOR (рис. 3), в которой представлены модели с реальными параметрами.

В табл. 2 приведена зависимость искажений на выходе усилителя от значения сопротивления R3.

Таблица 2. Зависимость искажений, вносимых разделительным конденсатором, от сопротивления нагрузки на частоте 10 Гц

R1, кОм	Кг, %	Кг, дБ
10	0.504	-5.951
20	0.19	-14.425
30	0.098	-20.175
51	0.039	-28.179
75	0.019	-34.425
100	0.011	-39.172
150	0.0054	-45.352
200	0.0033	-49.63
510	0.00067	-63.479
1000	0.00025	-72.041



		Component:		Symbol (IEC 60617)	OK
Master Database	~	10 uF [C0805C106K9PACTU]	Π.		Close
Group:		10 pF [C1206C100K2GACTU]	^		
MA Basic	~	10 pF [C1206C100K5GACTU]			Search
amily:		10 pF [C1206C100KBGACTU]		×	Detail repo
RATED_VIRTUAL RPACK SWITCH ETRANSFORMER	^	10 pF [C1210C100K2GACTU] 10 pF [C1210C100K5GACTU] 10 pF [C1210C100KBGACTU] 10 pF [C1812C100KBGACTU] 10 pF [C1825C100KBGACTU]			⊻iew mode ∐elp
INON_IDEAL_RLC 낮 RELAY SOCKETS SCHEMATIC_SYMBOLS RESISTOR 나 CAPACITOR MUDUCTOR 나 CAP ELECTROLIT		10 pF [C1822C100KBGACTU] 10 pF [C222C100KBGACTU] 10 pF [C222SC100KBGACTU] 10 pF [CA064C100K1GACTU] 10 pF [CA064C100K4GACTU] 10 pF [CA064C100K4GACTU] 10 uF [12TPC10M] 10 uF [16TQC10M] 10 uF [35TQC10M]		Function: Capacitor, Ceramic, SMD, MLCC, Stable, Class II, 10 uF, +/-10% T 0805 (2012 metric) The model for this device is desig Model manufacturer/ID: KEMET / C0805C106K9PAC/KEM	Temperature ol, 6.3V, XSR, ned to be most

Рис. 3. Выбор конденсатора из библиотеки MANUFACTURER CAPASITOR

На рис. 4 приведен график зависимости коэффициента нелинейных искажений от величины сопротивления резистора нагрузки, включенного после разделительного конденсатора.

Из полученных результатов можно сделать вы-



Рис. 4. График зависимости коэффициента нелинейных искажений от величины сопротивления резистора нагрузки

вод о том, что наблюдается нелинейная зависимость искажений от сопротивления нагрузки. Причем, чем больше сопротивление резистора нагрузки, тем меньше вносимые конденсатором нелинейные искажения.

При анализе искажений, вносимых другими типами конденсаторов, закономерность сохраняется, а величина искажений отличается незначительно.

На рис. 5 приведены графики зависимости величины нелинейных искажений от частоты для конденсатора MLCC емкостью 10 мкФ при сопро-



Рис. 5. Графики зависимости величины нелинейных искажений от частоты для конденсатора MLCC емкостью 10 мкФ при сопротивлениях резистора нагрузки 10 и 100 кОм



<i>f</i> , Гц	K _{r,} %	<i>К</i> _{г,} дБ	K _{r,} %	<i>К</i> _{г,} дБ
<i>,</i> .	<i>С</i> ₁ =10 мкФ,	<i>R</i> ₁ =10 кОм	<i>С</i> ₁ =10 мкФ,	<i>R</i> 1=100 кОм
20	0.504	-5.951	0.0113	-38.938
40	0.189	-14.471	0.0028	-51.057
80	0.058	-24.731	0.00069	-63.223
160	0.016	-35.918	0.00017	-75.391
320	0.004	-47.959	0.000043	-87.331
640	0.001	-60	0.00001	-100
1280	0.00023	-72.765	0.000003	-110.458
1300	0.00028	-71.057	0.00089	-61.012
1400	0.000079	-82.047	0.000015	-96.478
1500	0.000069	-83.223	0.000015	-96.478
2500	0.000055	-82.615	0.000015	-96.478

Таблица 3. Зависимость искажений, вносимых разделительным конденсатором MLCC емкостью
10 мкФ, от частоты сигнала при сопротивлениях нагрузки 10 и 100 кОм

тивлениях резистора нагрузки 10 и 100 кОм.

Влияет ли величина емкости на зависимость *К*_г от частоты при разных сопротивлениях нагрузки?

Проведем исследование зависимости от частоты величины нелинейных искажений, вносимых конденсатором MLCC емкостью 4.7 мкФ. КЕМЕТ, класс II, 4.7 мкФ, 10 B, X5R, 0603.

На рис. 6 приведены графики зависимости величины нелинейных искажений от частоты для конденсатора емкостью 4.7 мкФ при сопротивлениях резистора нагрузки 10 и 100 кОм.

Как на рис. 5, так и на рис. 6 наблюдается рост величины нелинейных искажений вблизи частот 1300 Гц, причем при увеличении емкости разделительного конденсатора это выброс значительно больше. Природа такого выброса непонятна. А так как измерения нелинейных искажений чаще всего проводят на частоте 1000 Гц, то это явление в из-

Таблица 4. Зависимость искажений, вносимых разделительным конденсатором MLCC емкост	ъю
4.7 мкФ, от частоты сигнала при сопротивлениях нагрузки 10 и 100 кОм	

<i>f</i> , Гц	K _r , %	<i>К</i> г, дБ	K _r , %	<i>К</i> г, дБ	
	С ₁ =4.7 мкФ	, <i>R</i> ₁ =10 кОм	<i>С</i> ₁ =4.7 мкФ,	<i>R</i> ₁ =100 кОм	
20	0.929	-0.64	0.0467 -26.614		
40	0.167	-15.546	0.011 -39.172		
80	0.036	-28.874	0.0028	-51.057	
160	0.0083	-41.618	0.00069	-63.223	
320	0.002	-53.979	0.00017	-75.391	
640	0.00048	-66.375	0.000043	-87.331	
1280	0.0001	-80	0.00001	-100	
1300	0.0026	-51.701	0.0000092	-100.724	
1320	0.0001	-80	0.000016	-95.918	
1350	0.0001	-80	0.000019	-94.425	
1370	0.0001	-80	0.000089	-101.012	
1400	0.0001	-80	0.000016	-95.918	
1500	0.00088	-81.11	0.000052	-85.68	
2500	0.000039	-88.179	0.00001	-100	



Рис. 6. Графики зависимости величины нелинейных искажений от частоты для конденсатора емкостью 4.7 мкФ при сопротивлениях резистора нагрузки 10 и 100 кОм

вестных автору источниках не зафиксировано. В остальном закономерности зависимости величины нелинейных искажений от частоты схожи с данными, приведенными в [1]. Различаются только абсолютные значения величины нелинейных искажений.

Фактически на уровень нелинейных искажений на разных частотах влияет постоянная времени разделительной цепи $\tau = R_1C_1$. Это легко проверить путем моделирования. Для примера проведем анализ величины нелинейных искажений на частоте 1000 Гц для цепи с постоянной времени $\tau = 47$ мс при двух значениях емкости разделительного конденсатора – 4.7 и 10 мкФ при сопротивлении резистора нагрузки 10 и 4.7 кОм, соответственно.

Анализ показал, что искажения для таких значений параметров разделительной цепи составляют -73.765 и -73.473 дБ, соответственно. Т.е. различия настолько незначительны, что ими можно пренебречь. Причем эти различия вызваны отличием параметров конденсаторов 4.7 и 10 мкФ, хоть они и незначительны.

ЭКиС

В [1] приведены зависимости величины нелинейных искажений от амплитуды входного сигнала. Такая зависимость отсутствует в пределах линейной части амплитудной характеристики усилителя. Для модели на рис. 2 при амплитуде входного сигнала 10 мВ и 3 В искажения на выходе ОУ не отличались.

Для выяснения вопроса, влияет ли тип используемого конденсатора на зависимость величины нелинейных искажений от частоты, проведем моделирование с использованием различных типов конденсаторов.

На рис. 7. приведены графики зависимости величины нелинейных искажений от частоты для конденсатора емкостью 10 мкФ различных типов при сопротивлениях резистора нагрузки 10 кОм.

Как следует из рис. 7, независимо от типа конденсатора наблюдается зависимость величины нелинейных искажений от постоянной времени входной цепи. При постоянной времени 100 мс (соответствует емкости разделительного конденсатора 10 мкФ и сопротивлению резистора нагрузки 10 кОм) получить нелинейные искажения при использова-

f Eu	<i>К</i> г, %	<i>К</i> г, дБ	<i>K</i> _Γ , %	<i>К</i> г, дБ	<i>К</i> г, %	<i>К</i> г, дБ
7, ГЦ	MLCC, 10V	, X5R, 0805	Электролити	ический, 16 В	Пленочный, SMD,	полиэстер, 100 В
20	0.504	-5.951	0.4488	-6.959	0.4492	-6.951
40	0.189	-14.471	0.098	-20.175	0.098	-20.175
80	0.058	-24.731	0.0229	-32.803	0.0229	-32.803
160	0.016	-35.918	0.0056	-45.036	0.0056	-45.036
320	0.004	-47.959	0.0014	-57.077	0.00136	-57.329
640	0.001	-60	0.00034	-69.37	0.00034	-69.37
1280	0.00023	-72.765	0.000085	-81.412	0.000089	-81.012
1300	0.00028	-71.057	0.000085	-81.412	0.00088	-81.11
1400	0.000079	-82.047	0.000076	-82.384	0.000076	-82.384
1500	0.000069	-83.223	0.000062	-84.152	0.000064	-83.876
2500	0.000055	-82.615	0.000055	-85.193	0.000054	-85.352

Таблица 5. Зависимость искажений, вносимых разделительным конденсатором емкостью 10 мкФ и сопротивлении нагрузки 10 кОм, от частоты входного сигнала для конденсаторов различных типов



ctive Analysis:					
Interactive Simulation	Fourier				
DC Operating Point	Analysis parameters Output Analysis options Summa	ary			
AC Sweep	Sampling options				
Fransient	Frequency resolution (fundamental frequency):	20		Hz	Estimate
DC Sweep	Number of harmonics:	9			
Single Frequency AC	Stop time for sampling (TSTOP):	0.1			
Parameter Sweep	Edda temperaturate analysis	0.1		I	Estimate
Noise	colt transient energiss				
Monte Carlo	Results				
Fourier	Display phase Display	Chart	and Granh	~	
Temperature Sweep	Display as bar graph				
Distortion	Vertical scale:	Linear		~	
sensitivity					
Worst Case	More options				
voise rigure	Pegree of polynomial for interpolation:		10		
Transfer Eurotion					
Transfer Punction	Sampling frequency:		250000	Hz	
Ratchad					
liter-Defined					

Рис. 7. Графики зависимости величины нелинейных искажений от частоты для конденсатора емкостью 10 мкФ различных типов при сопротивлениях резистора нагрузки 10 кОм

нии одного разделительного конденсатора менее -85 дБ невозможно. Необходимо либо увеличивать емкость конденсатора, либо сопротивление резистора для снижения уровня нелинейных искажений.

Следует помнить, что при измерении нелинейных искажений на разных частотах, необходимо задавать не только частоту генератора входного сигнала, но и в параметрах Фурье-анализа устанавливать такое же значение частоты (Frequency resolution). Кроме того необходимо увеличить время анализа (Stop time for sampling) до 0.1 с для анализа искажений на низких частотах, как показано на рис. 8.

В усилителях звуковой частоты, как правило, используется не один разделительный конденсатор. Поэтому представляет интерес исследовать усилитель с несколькими разделительными конденсаторами. На рис. 9 приведена модель малошумящего микрофонного усилителя, который содержит 4 разделительных конденсатора.

Усилитель имеет линейную АЧХ в диапазоне от 5 Гц до 218 кГц и вносит на частоте 1 кГц искажения 0.0061%, а на частоте 50 Гц – 1.15%. АЧХ усилителя приведена на рис. 10.

После замены всех резисторов, подключенных к правым выводам конденсаторов (рис. 11), на резисторы с сопротивлением 100 кОм и конденсаторов 10 мкФ на конденсаторы с емкостью 1 мкФ величина нелинейных искажений составила на частоте 1 кГц 0.0033%, а на частоте 50 Гц – 0.083%. Т.е. искажения на частоте 50 Гц уменьшились в 14 раз, что весьма существенно.

Однако, при проверке величины искажений при изменении сопротивлений резисторов R7 и R8 обнаружен странный эффект. При замене сопротивления резистора R7 на 10 кОм вместо 100 кОм получено значение нелинейных искажений на частоте 50 Гц

Active Analysis:					
Interactive Simulation DC Operating Point	Fourier Analysis parameters Output Analysis options Summa	iry			
AC Sweep Transient DC Sweep Single Frequency AC Parameter Sweep Noise	Sampling options Frequency resolution (fundamental frequency): Number of harmonics: Stop time for sampling (TSTOP): Edit transient analysis	20 9 0.1		Hz s	Estimate Estimate
Monte Carlo Fourier Temperature Sweep Distortion Sensitivity	Results Display phase Display: Display as bar graph Vertical scale: Normalize graphs Vertical scale:	Chart a	and Graph	~ ~	
Noise Figure Pole Zero Transfer Function Trace Width	More options Degree of polynomial for interpolation: Sampling frequency:		10 250000	Hz	
Batched User-Defined					

Рис. 8. Окно настройки Фурье-анализа при частоте входного сигнала 20 Гц





Рис. 9. Модель малошумящего микрофонного усилителя



Рис. 10. АЧХ микрофонного усилителя

равное 0.018%, а при аналогичной замене сопротивления R8 – 0.059%. После замены сопротивлений двух этих резисторов одновременно уровень искажений составил 0.004%. Линейность АЧХ сохраняется в этом случае от 42 Гц в области низких частот.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для уменьшения нелинейных искажений в области низких частот необходимо в разделительных цепях первого каскада устанавливать (по возможности) резисторы с как можно большим значением номинального сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zak Kaye Selecting capacitors to minimize distortion in audio applications. – Analog Design Journal, 3Q, 2020. pp. 1-5. // https://www.ti.com/lit/pdf/slyt796



Рис. 11. Модель усилителя с разделительными конденсаторами 1 мкФ и резисторами нагрузки 100 кОм