

# Проектирование LC-фильтров для усилителей класса D

LC-фильтр является важнейшим элементом, помогающим снизить электромагнитное излучение усилителей класса D. В некоторых усилителях класса D такие фильтры также необходимы для обеспечения высокого КПД. В данной статье представлены варианты реализации и теория LC-фильтров для звуковых усилителей класса D в вариантах модуляции AD (традиционной) и BD (без фильтра).

## Реализация LC-фильтров

На рисунке 1 показана схема LC-фильтра для модуляции AD (традиционной), а на рисунке 2 – для модуляции BD (без фильтра) в усилителях класса D. Соответствующие рекомендованные номиналы компонентов для LC-фильтров Баттерворта приведены в таблице 1. Подробнее о методах модуляции смотрите в разделе «Типы модуляции класса D».

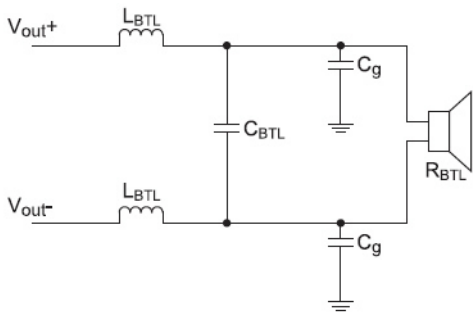


Рисунок 1. LC-фильтр BTL для модуляции AD

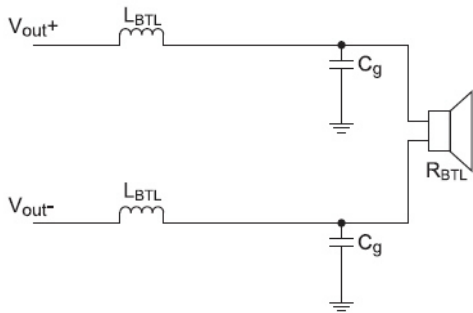


Рисунок 2. LC-фильтр BTL для модуляции BD

Таблица 1. Рекомендованные номиналы компонентов LC-фильтра Баттерворта

$R_{load}$ , Ом	$f_{cutoff}$ , кГц	$L_{btl}$ , мкГн	$C_{btl}$ , мкФ	$C_g$ , мкФ	Режим модуляции
8	28	33	-	1	BD
6	31	22	-	1,2	BD
4	31	15	-	1,8	BD
8	28	33	0,47	0,1	AD
6	31	22	0,68	0,1	AD
4	31	15	1,0	0,18	AD

## Терминология

Модуляция AD (традиционная) – схема модуляции с дифференциальным выходом, в которой каждый выходной сигнал смещён по фазе на 180° и изменяется от уровня земли до напряжения питания  $V_{CC}$ . Таким образом, дифференциальный выходной сигнал до фильтра изменяется в диапазоне  $+V_{CC} \dots -V_{CC}$ , при этом при скважности 0,5 после фильтрации получается нулевое напряжение на нагрузке. То есть эта схема модуляции отличается максимальным дифференциальным напряжением при выходном сигнале 0 В (скважность 0,5). Большое дифференциальное напряжение приводит к возникновению большого пикового выходного тока, что, в свою очередь, приводит к потерям в фильтре, увеличивая из-за этого потребляемый ток и снижая КПД. При традиционной схеме модуляции большой коммутационный ток рециркулирует в LC-фильтре вместо того, чтобы рассеиваться в громкоговорителе.

Модуляция BD (без фильтра) – схема модуляции, разработанная для значительного уменьшения или даже исключения выходного фильтра. Схема модуляции без фильтра минимизирует ток коммутации, что позволяет использовать громкоговоритель в качестве накопительного элемента вместо LC-фильтра и за счёт этого повысить КПД усилителя.

BTL (мостовая нагрузка) – конфигурация выхода усилителя мощности, используемая в основном в усилителях звукового диапазона. Нагрузка (например, громкоговоритель) включается между двумя выходами усилителя, соединяя две выходные клеммы. Это

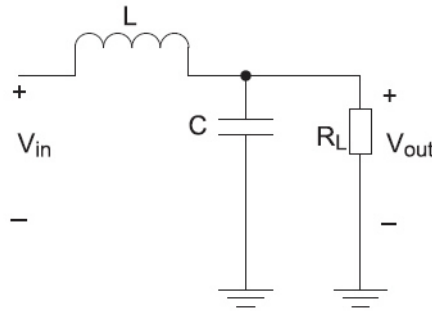
позволяет удвоить размах напряжения на нагрузке (по сравнению с усилителем с несимметричным выходом), если выходные сигналы находятся в противофазе.

EMI (электромагнитное излучение) – излучение электрической схемы, в которой происходит быстрое изменение сигнала, например выходного каскада звукового усилителя мощности класса D. Уровень электромагнитного излучения не должен превышать предела, заданного такими стандартами, как CISPR 22 или FCC часть 15 класс B.

SE (несимметричный) – простейший способ передачи электрических сигналов по проводам. По одному проводу передаётся изменяющееся напряжение, представляющее собой сигнал, а второй провод подключается к опорному напряжению, обычно к земле. Альтернативой несимметричному выходному каскаду является конфигурация с мостовой привязкой нагрузки (BTL). Несимметричный каскад проще в реализации; однако при этом сигнал нельзя передавать на большие расстояния, ухудшаются частотные характеристики и имеет место меньший размах напряжения (по сравнению с усилителями с BTL).

## АЧХ LC-фильтров

Выходной LC-фильтр ослабляет высокочастотную коммутационную составляющую сигнала усилителя класса D при несимметричной конфигурации (рисунок 3).



**Рисунок 3.** LC-фильтр для несимметричной конфигурации

Можно получить передаточную характеристику, используя выражение для делителя напряжения, в котором полное сопротивление нагрузки представляет собой параллельное включение  $R_L$  и  $C$ .

Эта передаточная характеристика упрощается до приведённого выражения.

$$\begin{aligned}
 H(s) &= \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \\
 &= \frac{1}{1 + s \times \frac{L}{R_L} + L \times C \times s^2} = \\
 &= \frac{1}{s^2 + s \times \frac{1}{R_L \times C} + \frac{1}{L \times C}}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Можно приравнять уравнение 1 и стандартное уравнение для АЧХ цепи второго порядка:

$$\begin{aligned}
 H(s) &= \frac{A}{s^2 + s \times \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} = \\
 &= \frac{1}{s^2 + s \times \frac{1}{R_L \times C} + \frac{1}{L \times C}}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где  $\omega_0 = 1/\sqrt{L \times C}$  — частота среза в радианах;

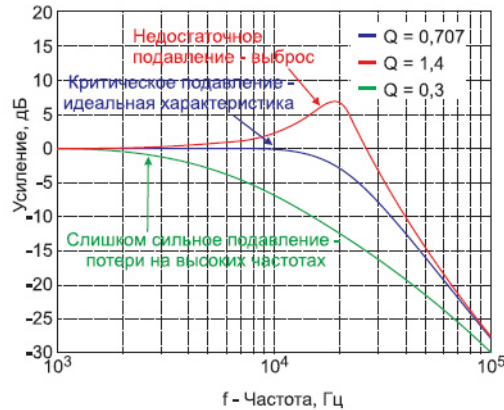
$Q = R_L \sqrt{C/L}$  и  $A = 1/(L \times C) = \omega_0^2$  — постоянная.

На частоте среза  $\omega = \omega_0$

$$|H(j\omega_0)| = \left| \frac{\omega_0^2}{-\omega_0^2 + j \times \frac{\omega_0^2}{Q} + \omega_0^2} \right| =$$

$$= |-j \times Q| = Q. \quad (3)$$

Критическое затухание наблюдается при  $Q = 1/\sqrt{2}$  и выброс наблюдается при  $Q > 1/\sqrt{2}$  (рисунок 4).



**Рисунок 4.** Влияние  $Q$  на АЧХ

Т1 не рекомендует использовать LC-фильтры с избыточными выбросами. Исследования показали, что высокочастотный звуковой сигнал неблагоприятно влияет на человеческое ухо. Кроме того, выброс значительной амплитуды может привести к отказу усилителя, приводя к срабатыванию цепей защиты по току или от короткого замыкания. Фильтр со слишком сильным подавлением может привести к потере высокочастотного звукового сигнала.

Т1 рекомендует использовать низкочастотный фильтр Баттерворта второго порядка, поскольку он обладает плоской амплитудной и фазовой характеристикой в полосе пропускания. Значения LC для фильтра Баттерворта можно получить из уравнений 4 и 5.

$$C = \frac{1}{\omega_0 \times R_L \times \sqrt{2}}. \quad (4)$$

$$L = \frac{R_L \times \sqrt{2}}{\omega_0}. \quad (5)$$

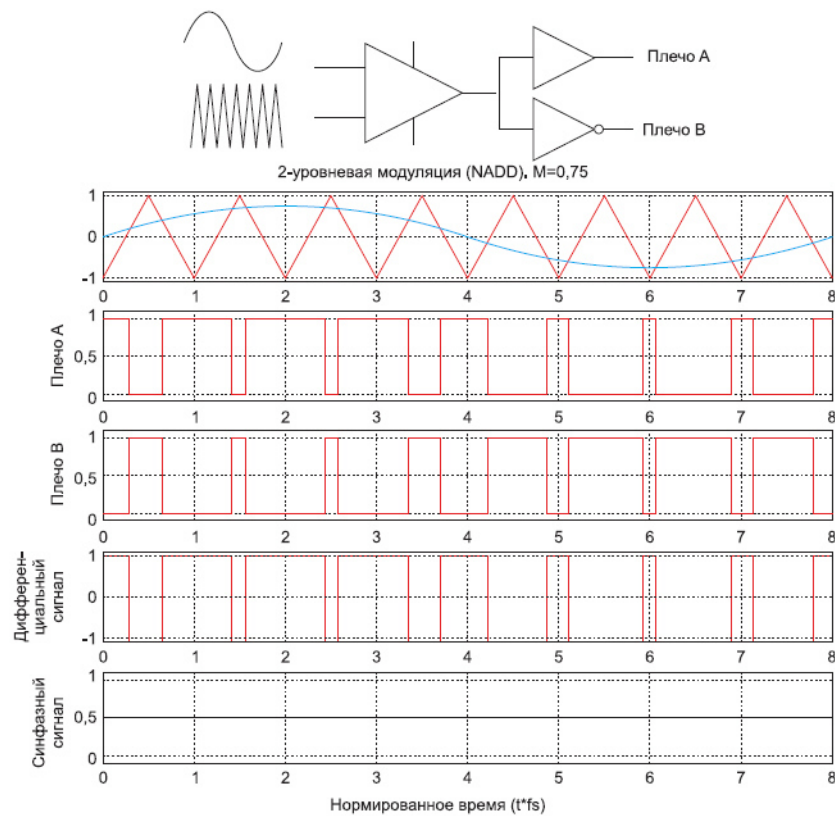
**Примечание.** Фильтры Баттерворта обладают критическим затуханием при  $Q = 1/\sqrt{2}$ .

## Типы модуляции класса D

Здесь описано, как аналоговые сигналы преобразуются в сигналы ШИМ для управления MOSFET-транзисторами в выходной мостовой схеме. Большинство усилителей класса D можно классифицировать по используемой методике модуляции — AD (традиционной) или BD (без фильтра).

### Модуляция AD (традиционная)

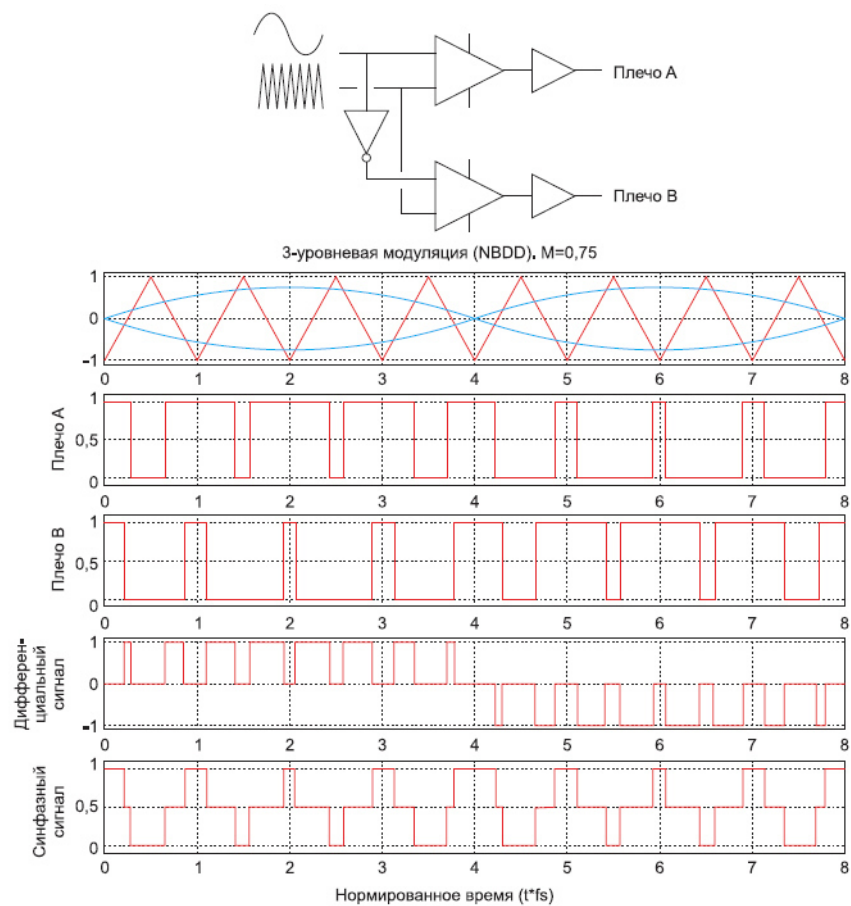
Традиционная методика коммутации (модуляция AD) использует сигнал переменной скважности прямоугольной формы, при этом его среднее значение соответствует входному аналоговому сигналу. Выходные сигналы при мостовой привязке нагрузки (BTL) (рисунок 5) инверсны по отношению друг к другу. При модуляции AD в выходном сигнале отсутствует значимая синфазная составляющая. Семейство устройств TPA312xD2 использует модуляцию AD. Все модуляторы TAS могут быть сконфигурированы под модуляцию AD.



*Рисунок 5. Модуляция AD (традиционная)*

### Модуляция BD (без фильтра)

При этой методике модулируется скважность разности выходных сигналов, при этом среднее значение соответствует входному аналоговому сигналу. Выходные сигналы при мостовой привязке нагрузки (BTL) (рисунок 6) не инверсны по отношению друг к другу. При модуляции BD в выходном сигнале присутствует значимая синфазная составляющая. Большинство усилителей ТРА используют модуляцию BD. Некоторые модуляторы TAS также могут быть сконфигурированы под модуляцию BD.

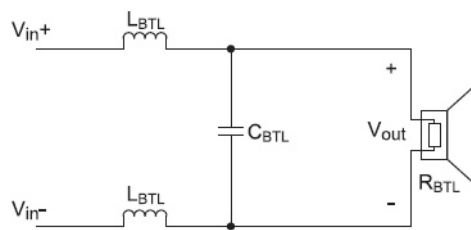


**Рисунок 6.** Модуляция ВД (без фильтра)

## Выходной LC-фильтр для мостовых усилителей

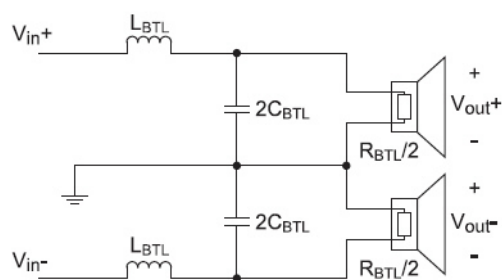
### LC-фильтр для модуляции АД (традиционной)

Для усилителей с мостовым подключением нагрузки (BTL) фильтр необходим для положительного и отрицательного выходных сигналов. На рисунке 7 показана топология LC-фильтра для модуляции АД.



**Рисунок 7.** LC-фильтр для модуляции АД

Поскольку  $V_{in+}$  и  $V_{in-}$  инверсны по отношению друг к другу, схема фактически симметрично эквивалентна двум несимметричным выходным каскадам, показанным на рисунке 8.



**Рисунок 8.** Эквивалентная схема для модуляции АД

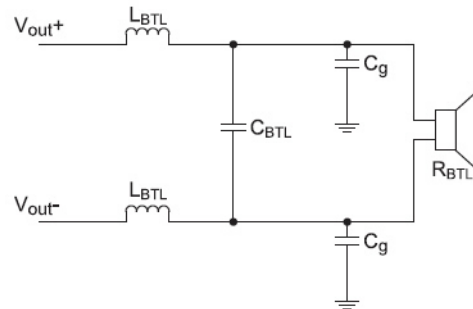
Рассчитываем значение LC для мостового режима, используя методы анализа для несимметричного режима:

1. Используя  $R_L = R_{\text{BTL}}/2$ , рассчитываем  $C$  и  $L$  для соответствующей частоты среза и коэффициента затухания, как в случае несимметричного режима.
2. Рассчитываем  $C_{\text{BTL}}$  и  $L_{\text{BTL}}$ , используя формулы 6 и 7 соответственно.

$$C_{\text{BTL}} = C/2. \quad (6)$$

$$L_{\text{BTL}} = L. \quad (7)$$

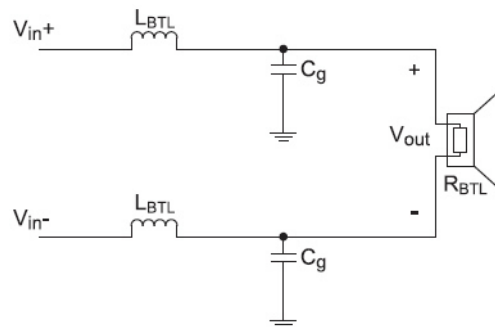
С каждой стороны  $R_{\text{BTL}}$  предусмотрены дополнительные конденсаторы, соединённые с землей и обеспечивающие развязку по высокой частоте. Эти дополнительные конденсаторы  $C_g$  должны составлять примерно 10% от двух  $C_{\text{BTL}}$  (рисунок 9).



**Рисунок 9.** Рекомендуемый фильтр низких частот для мостовых устройств с модуляцией AD

### LC-фильтр для модуляции BD (без фильтра)

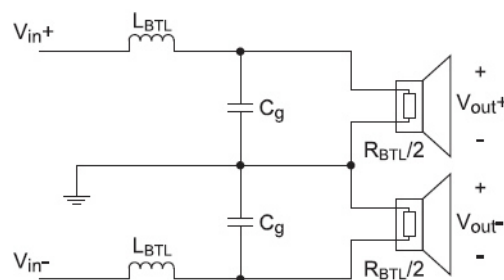
Выходной сигнал при модуляции BD содержит значительную дифференциальную и синфазную составляющие. Поэтому анализ необходимо проводить в два этапа. На рисунке 10 показана конфигурация LC-фильтра для модуляции BD.



**Рисунок 10.** LC-фильтр для модуляции BD

### Анализ дифференциального режима

При рассмотрении только дифференциальных сигналов  $V_{in+}$  и  $V_{in-}$  представляют собой входные напряжения, инверсные относительно друг друга, и схема снова является симметричным эквивалентом двух несимметричных выходных каскадов (рисунок 11). Анализ такой схемы смотрите в разделе «LC-фильтр для модуляции AD (традиционной)».



**Рисунок 11.** Эквивалентная схема для анализа дифференциального режима

Полное сопротивление для  $V_{in+}$  или  $V_{in-}$  составляет

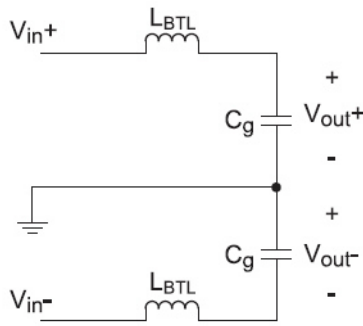
$$Z_{\text{Diff}}(s) = sL_{\text{BTL}} + \frac{R_{\text{BTL}}/2}{1 + sC_g R_{\text{BTL}}/2} \cdot (8)$$

Передаточная функция

$$H_{\text{Diff}}(s) = \frac{V_{\text{out}}(s)}{V_{\text{in}}(s)} = \frac{1}{1 + s \times \frac{L_{\text{BTL}}}{R_{\text{BTL}}/2} + L_{\text{BTL}} \times C_g \times s^2} \cdot (9)$$

### Анализ синфазного режима

При рассмотрении только синфазных сигналов  $V_{\text{in}+}$  и  $V_{\text{in}-}$  равны друг другу и  $R_{\text{BTL}}$  можно убрать. На рисунке 12 показана эквивалентная схема, подобная базовой LC-цепи.



**Рисунок 12.** Эквивалентная схема для анализа синфазного режима

Полное сопротивление для  $V_{\text{in}+}$  или  $V_{\text{in}-}$  составляет

$$Z_{\text{CM}}(s) = sL_{\text{BTL}} + \frac{1}{sC_g} \cdot (10)$$

Передаточная функция

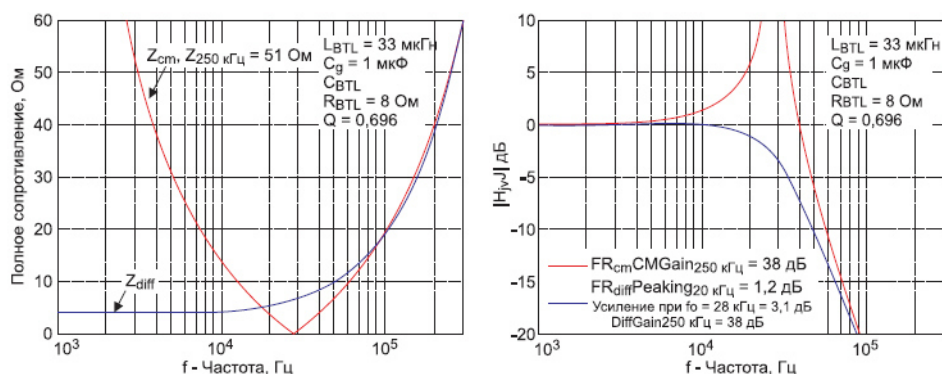
$$H_{\text{CM}}(s) = \frac{V_{\text{out}}(s)}{V_{\text{in}}(s)} = \frac{1}{1 + s^2 L_{\text{BTL}} C_g} \cdot (11)$$

### Выбор компонентов фильтра

Здесь описаны основные принципы выбора компонентов фильтра для модуляции AD и BD. В ряде таблиц (с таблицы 2 по 7) представлены рекомендованные номиналы компонентов фильтра для каждого типа модуляции и для трёх значений  $R_{\text{Load}}$  (громкоговорителей с сопротивлениями 8, 6 и 4 Ом). На рисунках 1–12 показаны суммарные уровни гармонических искажений в зависимости от частоты и мощности для каждого сочетания типа модуляции и  $R_{\text{Load}}$ .

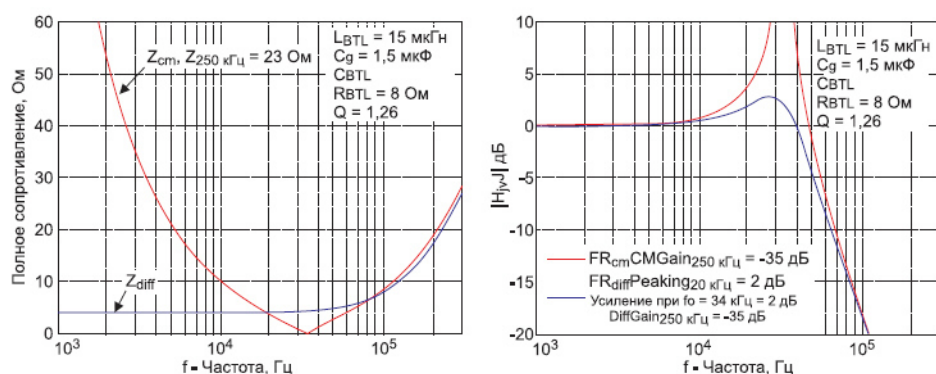
### Выбор компонентов фильтра для модуляции BD

Для модуляции BD TI рекомендует использовать фильтр Баттерворта. На рисунке 13 показаны примеры частотной характеристики полного сопротивления и коэффициента усиления для синфазного и дифференциального режимов.



**Рисунок 13.** Частотные характеристики полного сопротивления и усиления для фильтра Баттерворта

$Z_{cm}$  на 250 кГц представляет собой полное сопротивление для усилителя на частоте коммутации. Оно должно поддерживаться высоким, поскольку оно определяет ток коммутации, протекающий через LC-фильтр.  $CMGain_{250 \text{ кГц}}$  и  $DiffGain_{250 \text{ кГц}}$  представляют собой усиления для синфазного и дифференциального режимов на частоте коммутации. Предпочтительным является высокое значение ослабления – это обеспечивает достаточное подавление сигналов коммутации, которые определяют уровень электромагнитного излучения.



**Рисунок 14.** Зависимость полного сопротивления от частоты и передаточная характеристика фильтра с небольшим выбросом

**Примечание.** Усиление –40 дБ подразумевает ослабление сигнала коммутации в 100 раз.

$Peaking_{20 \text{ кГц}}$  представляет собой усиление на 20 кГц и связано с  $Q$  LC-фильтра.

Недостатком фильтра Баттерворта для громкоговорителей с сопротивлением 8 Ом является использование индуктивностей на 33 мкГн, которые имеют большие габариты. В большинстве звуковых устройств можно примириться с выбросами менее 2 дБ на 20 кГц, чтобы уменьшить размер индуктивностей. Допущение небольших выбросов также помогает увеличить затухание на частоте коммутации 250 кГц в усилителях класса D.

**Примечание.** Уменьшение размера индуктивностей в общем случае приводит к возрастанию суммарного коэффициента нелинейных искажений (THD) выходного звукового сигнала. Графическую зависимость суммарного коэффициента нелинейных искажений от частоты и мощности смотрите в главе А (SLOA119A, Appendix A, стр. 14).

## Выбор компонентов фильтра для модуляции AD

При модуляции AD в выходном сигнале отсутствует значимая синфазная составляющая, поэтому анализировать необходимо только полное сопротивление в дифференциальном режиме и передаточную характеристику. Можно использовать результаты для дифференциального режима при модуляции BD для определения номиналов компонентов фильтров для модуляции AD.

## Рекомендованные компоненты фильтра для модуляции BD

В таблицах 2–4 показаны рекомендованные компанией TI номиналы компонентов фильтра Баттерворта для модуляции BD и различных значений нагрузки (громкоговорителей с сопротивлением 8, 6 и 4 Ом).

**Таблица 2.** Модуляция BD для  $R_{bl} = 8 \text{ Ом}$

8 Ом								
Q	$f_0$ , кГц	Выброс на 20 кГц, дБ	$L_{BTL}$ , мкГн	$C_g$ , мкФ	$Z_{CM\_250}$ , Ом	$Gain_{CM\_250}$ , кГц, дБ	$Gain_{Diff\_250}$ , кГц, дБ	THD+N при 1 Вт, 1 кГц (1), %
0,7(2)	28	–1,2	33	1	51	–38	–38	0,050



0, 7(2)	41	–0,28	22	0,68	34	–31	–31	0,075
1,26	34	2	15	1,5	23	–35	–35	0,096

(1) Измерено с ТРА3106D1 EVM. В Приложении А (SLOA119A, Appendix A, стр. 14) смотрите зависимости для THD от частоты и THD от мощности

(2) Фильтры Баттерворта

**Таблица 3. Модуляция BD для  $R_{btl} = 6 \text{ Ом}$**

6 Ом								
Q	$f_o$ , кГц	Выброс на 20 кГц, дБ	$L_{BTL}$ , мкГн	$C_g$ , мкФ	$Z_{CM\_250}$ кГц, Ом	$Gain_{CM\_250}$ кГц, дБ	$Gain_{Diff\_250}$ кГц, дБ	THD+N при 1 Вт, 1 кГц (1), %
0, 7(2)	31	–0,75	22	1	34	–36	–36	0,063
0, 7(2)	45	–0,19	15	1	23	–29	–30	0,090
1,15	28	2	15	2	23	–38	–38	0,090
1,27	38	1,6	10	2	15	33	33	0,080

(1) Измерено с ТРА3106D1 EVM. В Приложении А (SLOA119A, Appendix A, стр. 14) смотрите зависимости для THD от частоты и THD от мощности

(2) Фильтры Баттерворта

**Таблица 4. Модуляция BD для  $R_{btl} = 4 \text{ Ом}$**

4 Ом								
Q	$f_o$ , кГц	Выброс на 20 кГц, дБ	$L_{BTL}$ , мкГн	$C_g$ , мкФ	$Z_{CM\_250}$ кГц, Ом	$Gain_{CM\_250}$ кГц, дБ	$Gain_{Diff\_250}$ кГц, дБ	THD+N при 1 Вт, 1 кГц (1), %
0, 7(2)	31	–0,85	15	2	23	–36	–36	0,090
0,94	23	0,29	15	3,3	23	–42	–42	0,090
0, 7(2)	46	–0,22	10	1	15	–29	–29	0,082
1,15	28	2	10	3,3	16	–38	–38	0,087

(1) Измерено с ТРА3106D1 EVM. В Приложении А (SLOA119A, Appendix A, стр. 14) смотрите зависимости для THD от частоты и THD от мощности

(2) Фильтры Баттерворта

## Выбор компонентов фильтра для модуляции AD

В таблицах 5–7 показаны рекомендованные Т1 номиналы компонентов фильтра Баттерворта для модуляции AD и различных значений нагрузки с мостовой привязкой (громкоговорителей с сопротивлением 8, 6 и 4 Ом).

**Таблица 5. Модуляция AD для  $R_{btl} = 8 \text{ Ом}$**

8 Ом							
Q	$f_o$ , кГц	Выброс на 20 кГц, дБ	$L_{BTL}$ , мкГн	$C_{BTL}$ , мкФ	$C_g$ , мкФ	$Gain_{Diff\_250}$ кГц, дБ	TND+N при 1 Вт, 1 кГц (1), %
0, 7(2)	28	–1,2	33	0,47	0,1	–38	0,0579
0, 7(2)	41	–0,28	22	0,33	0,068	–31	0,05638
1,26	34	2	15	0,68	0,1	–35	0,0856

(1) Измерено с ТРА3123D2EVM (конфигурация BTL). В Приложении А (SLOA119A, Appendix A, стр. 14) смотрите зависимости для THD от частоты и THD от мощности

(2) Фильтры Баттерворта

**Таблица 6. Модуляция AD для  $R_{btl} = 6 \text{ Ом}$**

6 Ом							
Q	$f_o$ , кГц	Выброс на 20 кГц, дБ	$L_{BTL}$ , мкГн	$C_{BTL}$ , мкФ	$C_g$ , мкФ	$Gain_{Diff\_250}$ кГц, дБ	TND+N при 1 Вт, 1 кГц (1), %

0, 7(2)	31	–0,75	22	0,68	0,1	–36	0,0648
0, 7(2)	45	–0,19	15	0,39	0,082	–30	0,0915
1,15	28	2	15	1,0	0,18	–38	0,0949
1,27	38	1,6	10	1,0	0,18	–33	0,1312

(1) Измерено с TPA3123D2EVM (конфигурация BTL). В Приложении А (SLOA119A, Appendix A, стр. 14) смотрите зависимости для THD от частоты и THD от мощности

(2) Фильтры Баттерворта

**Таблица 7. Модуляция AD для  $R_{btl} = 4 \text{ Ом}$**

4 Ом							
Q	$f_o$ , кГц	Выброс на 20 кГц, дБ	$L_{BTL}$ , мкГн	$C_{BTL}$ , мкФ	$C_g$ , мкФ	$Gain_{Diff\_250}$ кГц, дБ	TND+N при 1 Вт, 1 кГц <sup>(1)</sup> , %
0, 7(2)	31	–0,85	15	1,0	0,18	–36	0,0776
0,94	23	0,29	15	1,5	0,27	–42	0,07612
0, 7(2)	46	–0,22	10	0,56	0,1	–29	0,09049
1,15	28	2	10	1,5	0,27	–38	0,10625

(1) Измерено с TPA3123D2EVM (конфигурация BTL). В Приложении А (SLOA119A, Appendix A, стр. 14) смотрите зависимости для THD от частоты и THD от мощности

(2) Фильтры Баттерворта

## Выводы

Был представлен анализ LC- фильтров для усилителей класса D с модуляцией AD (традиционной) и BD (без фильтра). Хотя в общем случае выброс на частотной характеристике нежелателен, допущение небольшого выброса позволяет уменьшить размер и связанную с этим стоимость индуктивностей. Предложены различные номиналы компонентов фильтров, позволяющие разработчику системы проявить гибкость и подобрать оптимальные значения для конкретной конструкции.

Разработчик системы должен понимать необходимость компромисса между:

- стоимостью;
- характеристиками паразитного электромагнитного излучения;
- током покоя;
- искажениями звукового сигнала.

## Литература

1. Quek, Yang Boon и Belnap, Kevin. «Flat panel audio design — where only the screen is flat, not the audio, EMI Performance and LC Filters» («Звуковые устройства с плоской панелью, в которых только экран плоский, а не звук, характеристики электромагнитного излучения и LC-фильтры») //Audio Design, май 2006.
2. Score, Mike. «Filter-free design helps class-D audio amplifier implementations» («Бесфильтровая конструкция помогает при реализации звукового усилителя класса D») // Planet Analog, август 2004.
3. TPA3007D1, 6,5-Вт монофонический звуковой усилитель мощности класса D, SLOS418.
4. TPA3106D1, 40-Вт монофонический звуковой усилитель мощности класса D, SLOS516.
5. Руководство пользователя TPA3100D2 звукового усилителя мощности EVM с LC-фильтром, SLOU179.
6. Семейство устройств TPA312xD2, использующих модуляцию AD: TPA3120D2, TPA3122D2 и TPA3123D2.
7. SLOA119A. Проектирование LC-фильтров для усилителей класса D