

# УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ КЛАССА D: СИГНАЛЫ УПРАВЛЕНИЯ



В. Голуб, к. т. н.  
info@vdm.kiev.ua

Усилители мощности класса D широко применяются в современных высококачественных аудиосистемах. Для управления усилителями используются сигналы с импульсной модуляцией. О том, какие типы модуляции используются в усилителях класса D, какой тип оптимален в том или ином случае, какие микросхемы для реализации различных способов модуляции предлагают производители, рассказывается в данной статье.

## УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ КЛАССА D

Современный усилитель мощности (УМ), используемый в высококачественных аудиосистемах, – это усилитель класса D (Class D amplifier) [1–5]. Он известен также как переключающий усилитель (Switching amplifier). Теоретически, такой УМ имеет КПД, достигающий 100%, и не вносит искажений в исходный сигнал. Снижение КПД и наличие реальных искажений обусловлены не принципом построения УМ, а неполным совершенством его элементов и используемых режимов работы.

Описываемый УМ имеет две разновидности (рис.1). Одна из них – с управлением аналоговым сигналом (рис.1а), другая – цифровым (рис.1б). В состав УМ входят:

**ИМ с аналоговым управлением** (рис.1а) – импульсный модулятор, преобразующий аналоговый сигнал в двухуровневую импульсно-модулированную последовательность, модулируемый параметр которой (частота, длитель-

ность импульсов) пропорционален преобразуемому аналоговому сигналу;

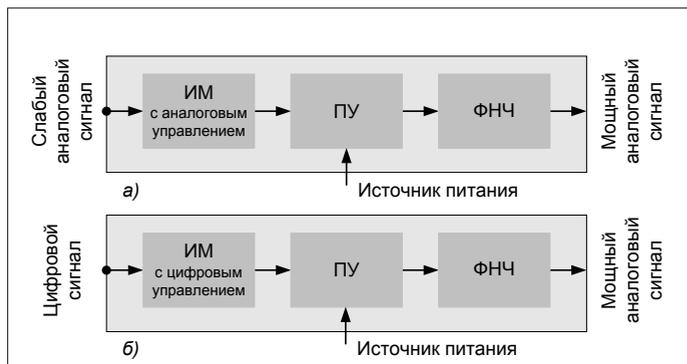
**ИМ с цифровым управлением** (рис.1б) – импульсный модулятор, преобразующий цифровой сигнал в такую же двухуровневую импульсно-модулированную последовательность, как и в ИМ с аналоговым управлением;

**ПУ** (рис.1а,б) – переключающее устройство, управляемое импульсно-модулированной последовательностью и производящее (с помощью ФНЧ) преобразование мощности, потребляемой от источника питания, в мощность аналогового сигнала нагрузки. ПУ коммутирует постоянное напряжение источника питания и повторяет на своем выходе форму напряжения входной импульсно-модулированной последовательности, поступающей с выхода модулятора;

**ФНЧ** (рис.1а,б) – фильтр, выделяющий усиленный аналоговый сигнал из состава импульсно-модулированной последовательности, которая поступает с выхода ПУ. ФНЧ должен не только фильтровать, но и не потреблять энергию фильтруемого сигнала [5].

УМ выпускаются в виде микросхем (МС), в состав которых входит ПУ и иногда – модулятор. Модулятор может быть и внешним и располагаться, например, в процессоре. ФНЧ – как правило, достаточно габаритное устройство, содержащее дроссели и конденсаторы. Оно подключается к ПУ извне. В ПУ используются обычно полевые транзисторы, имеющие МОП-структуру (MOSFET) и обладающие, соответственно, почти нулевым напряжением насыщения (в открытом состоянии) и высоким быстродействием при переключении.

Мощность усиленного аналогового сигнала на выходе УМ может находиться в пределах от единиц до десятков ватт (а иногда и больше). Например, из продукции фирмы Analog Devices к менее мощным относятся МС УМ семейства SSM23xx (SSM2301/2/4/6, SSM2311), к более мощным – AD199x (AD1991, AD1990/2/4), а также новые ADAU1513 и ADAU1590/2 [6–12].



**Рис. 1. Структурные схемы усилителей мощности класса D с аналоговым (а) и цифровым (б) управлением. ИМ – импульсный модулятор, ПУ – переключающее устройство**

## ИМПУЛЬСНО-МОДУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ

Как уже говорилось, входным (управляющим) сигналом ПУ (см. рис.1) является двухуровневый сигнал импульсной моду-



ляции (ИМ), представляющий собой модулированную последовательность импульсов. Модуляция может заключаться в изменении длительности импульсов, следующих с постоянной частотой, или в изменении частоты следования при постоянной длительности импульсов. Первый вид модуляции – это широтно-импульсная модуляция (ШИМ – Pulse Width Modulation, PWM) или, иначе, модуляция длительности (Pulse Duration Modulation, PDM). Второй – частотно-импульсная модуляция (ЧИМ – Pulse Frequency Modulation, PFM). В последнее время для управления ПУ применяются ШИМ и сигма-дельта модуляция (СДМ), которую можно считать квантованной разновидностью ЧИМ.

Сигналы ИМ являются дискретными отсчетами аналогового (модулирующего) сигнала, которые удовлетворяют условиям теоремы Котельникова (в случае ШИМ), или ее разновидности, соответствующей переменным интервалам дискретизации (в случае ЧИМ) [13].

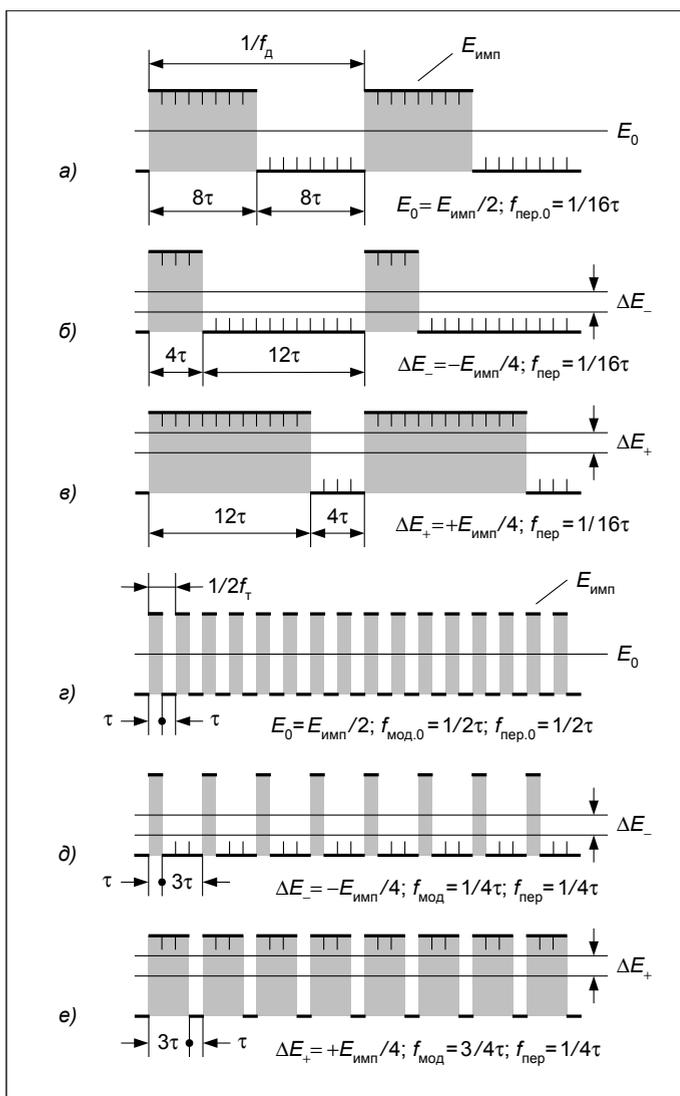
Сигналы ИМ представляют собой сумму двух групп составляющих. Одна из них – это сам модулирующий (аналоговый) сигнал, который, вместе со смещением, сохраняется в составе ИМ сигнала. Другая группа – более высокочастотные составляющие, которые обеспечивают сигналу его импульсно-модулированную форму. После ПУ высокочастотные составляющие фильтруются в ФНЧ, и на выходе УМ формируется усиленный низкочастотный аналоговый сигнал.

### СИГНАЛ ШИМ

Первый из рассматриваемых видов модуляции, ШИМ, имеет две разновидности – непрерывную и прерывистую [14]. При первой из них длительность импульсов ШИМ может изменяться непрерывно, пропорционально аналоговому модулирующему сигналу, а при второй – дискретно. В соответствии с современной терминологией, последнюю разновидность можно считать квантованной ШИМ. Каждый импульс в случае такой ШИМ состоит из одного или целого числа одинаковых "квантов". Соответственно, "квант" является минимально-возможным приращением импульса.

Квантованными в сигнале ШИМ являются не только импульсы, но и промежутки между ними, а также, в сумме, – интервал дискретизации (период следования импульсов). При ШИМ он является постоянным, независимым от уровня модулирующего сигнала. Кванты импульсов и промежутков обозначим, соответственно, как "1" и "0", их длительности –  $\tau$ , а длительность интервала дискретизации –  $T$ . Величина, обратная  $T$ , является частотой дискретизации ( $f_d$ ).

Непрерывную ШИМ применяют обычно в модуляторе с аналоговым входом, а квантованную – с цифровым, путем преобразования из исходного цифрового сигнала (ЦС). Квантованную ШИМ можно характеризовать тем же цифровым кодом, что и ЦС. Поэтому ее также называют цифровой ШИМ (Digital PWM).



**Рис.2. Сигналы квантованной ШИМ (а, б, в) и СДМ (г, д, е): немодулированные (а, г), с отрицательным (б, д) и положительным (в, е) уровнями модуляции**

Длительность интервала дискретизации квантованной ШИМ равна

$$T = 1/f_d = 2^N \tau \quad (1)$$

и является постоянной величиной (рис.2а,б,в). Длительность же импульсов ШИМ пропорциональна значениям отсчетов аналогового сигнала (в сумме со смещением) и изменяется в пределах:

$$0 \leq \tau_{\text{имп}} \leq (2^N - 1)\tau < T. \quad (2)$$

В (1) и (2):  $\tau$  – указанная выше длительность квантов "1" и "0",  $2^N$  – их суммарное количество на интервале, а  $N$  – число разрядов ЦС и соответствующего ему сигнала квантованной ШИМ. Отметим, что  $(2^N - 1)$  в (2) является максимальным значением  $N$ -разрядного кода (значение  $2^N$  соответствует следующему,  $N+1$ , разряду). Поскольку при ШИМ квантование производится во времени (квантуется интервал дискретизации), можно говорить о частоте квантования сигнала ШИМ, которая, согласно (1), равна

$$f_{\tau} = 1/\tau = 2^N f_d \quad (3)$$

Для упрощения сигнал ШИМ на рис.2 показан для N=4 и, соответственно, 2<sup>N</sup>=16. В реальных устройствах N=16 и более.

Отметим также, что ШИМ может быть как односторонней (ОШИМ), так и двухсторонней (ДШИМ). При ОШИМ импульс располагается обычно в начале интервала дискретизации (см. рис.2), а при ДШИМ – в его середине или, например, в виде двух равных частей – в конце предыдущего и в начале текущего интервалов [3, 15, 16]. ДШИМ, в отличие от ОШИМ, не приводит к нелинейным искажениям сигнала.

### СИГНАЛ СДМ

Вторым из рассматриваемых видов ИМ является сигма-дельта модуляция (СДМ) [17–19]. Сигнал СДМ, как и сигнал ШИМ, состоит из "квантов" "1" и "0" длительностью τ.

Особенность сигнала СДМ в том, что он, по сравнению с сигналом ШИМ, является как бы дробленным во времени (рис.2г,д,е), с образованием более коротких циклов импульсной последовательности. "Дробленные" циклы имеют, соответственно, большую, чем при ШИМ, частоту следования, достигающую величины f<sub>τ</sub>/2 (максимальное значение). Указанное "дробление" расширяет спектр сигнала СДМ, поэтому его называют также Spread Spectrum (с расширенным спектром) [11].

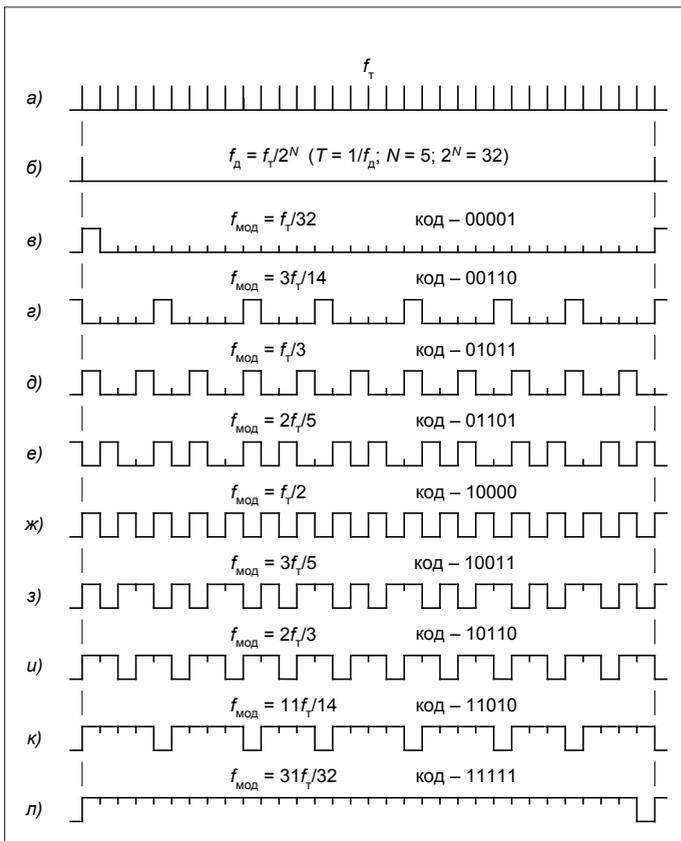


Рис.3. Сигналы модулятора СДМ на интервале дискретизации АЦП, равном 1/f<sub>д</sub>

Для упрощения рисунка сигнал СДМ приведен с одинаковыми длительностями импульсов и промежутков между ними, которым соответствуют значения ΔE<sub>-</sub>=-E<sub>имп</sub>/4 (д) и ΔE<sub>+</sub>=+E<sub>имп</sub>/4 (е) относительно E<sub>0</sub>=E<sub>имп</sub>/2 (г), где E<sub>имп</sub> – амплитуда импульсов. В общем случае длительности могут изменяться (как, например, на рис.3 в примере сигма-дельта АЦП).

Несущие колебания (без модуляции) для СДМ (рис.2,г), как и для ШИМ (см. рис.2,а), имеют скважность, равную двум, но частоты у них разные (при одних и тех же значениях τ):

$$f_{\text{ШИМ.0}} = f_d = f_{\tau}/2^N; \quad (4)$$

$$f_{\text{СДМ.0}} = f_{\tau}/2, \quad (5)$$

где f<sub>д</sub> и f<sub>τ</sub> определяются выражениями (1) и (3). В соответствии с (4) и (5),

$$f_{\text{СДМ.0}} = 2^{N-1} f_{\text{ШИМ.0}} \gg f_{\text{ШИМ.0}} \quad (6)$$

Несущее колебание СДМ состоит из последовательности циклов, состоящих из одного "1" и одного "0" (рис. 2,г, 3,ж). Частота несущего колебания, согласно (5), вдвое меньше частоты квантования f<sub>τ</sub>.

Средняя частота модулятора, пропорциональная модулирующему сигналу (в сумме со смещением), равна

$$f_{\text{мод}} = f_{\tau} n_1 / (n_1 + n_0), \quad (7)$$

где n<sub>1</sub> и n<sub>0</sub> – количество "1" и "0" соответственно, в пределах одного и того же интервала. В случае использования модулятора СДМ в составе сигма-дельта АЦП, им может быть интервал дискретизации T = 1/f<sub>д</sub> (см. рис.3). Максимальное значение f<sub>мод</sub> определяется максимально возможным значением кода ЦС, равным (2<sup>N</sup>-1) при разрядности N:

$$0 \leq f_{\text{мод}} \leq f_{\tau} (2^N - 1) / 2^N < f_{\tau} \quad (8)$$

При частоте f<sub>мод</sub> < f<sub>τ</sub>/2, соответствующей отрицательному уровню модулирующего сигнала (относительно смещения), сигнал СДМ характеризуется циклами, состоящими из одного "1" и нескольких "0" (рис. 2,д, 3,в,г,д,е). Такой сигнал, с одним "1" в импульсе, подобный сигналу ЧИМ, называют сигналом квантованной ЧИМ.

При частоте f<sub>мод</sub> > f<sub>τ</sub>/2, соответствующей положительному уровню модулирующего сигнала, сигнал СДМ характеризуется циклами, которые состоят из нескольких "1" и одного "0" (рис. 2,е, 3,з,и,к,л). Такой сигнал также можно считать сигналом квантованной ЧИМ, однако он имеет существенное отличие, обусловленное наличием в импульсе нескольких "1" при одном "0" между импульсами.

Наряду с частотой модуляции f<sub>мод</sub> ("информационной" частотой, пропорциональной модулирующему сигналу), для характеристики модулированных сигналов используется частота переключений f<sub>пер</sub> (см. рис.2). Для сигнала

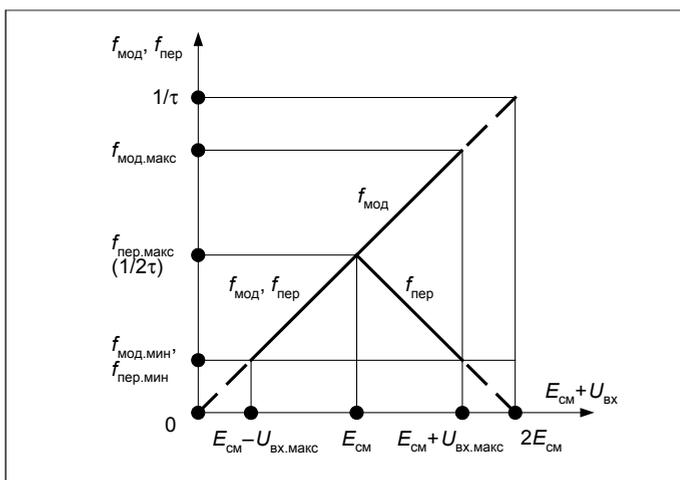


ШИМ она равна частоте дискретизации (4), а для сигнала СДМ находится в пределах

$$0 < f_{\text{пер}} \leq f_{\tau}/2 \quad (9)$$

и характеризует, как и при ШИМ, частоту, обусловленную циклом изменения уровней сигнала от "0" к "1" и обратно. При этом максимальное значение  $f_{\text{пер}}$  (9) для СДМ, в отличие от  $f_{\text{мод}}$  (8), равно  $f_{\tau}/2$ , а минимальное может быть больше или меньше, чем при ШИМ ( $f_{\text{д}}$ ), и даже быть близким к нулю – в зависимости от выбираемого уровня аналогового сигнала. Для сигнала СДМ с малым уровнем модуляции частота переключений максимальна:  $f_{\text{пер}} \rightarrow f_{\tau}/2$  (рис.3,ж), а при максимальном уровне независимо от того, положительный он или отрицательный,  $f_{\text{пер}} \rightarrow 0$  (рис.3,в,л).

Частота  $f_{\text{пер}}$  имеет существенное значение для УМ класса D, так как влияет, с одной стороны, на величину мощности, рассеиваемой в транзисторах при их переключении (чем меньше  $f_{\text{пер}}$ , тем меньше рассеиваемая мощность), и, с другой, – на возможность разнесения спектров составляющих аналогового сигнала и продуктов модуляции (импульсных составляющих сигнала). Последнее необходимо для фильтрации аналогового сигнала на выходе УМ.



**Рис.4. Зависимость частот модуляции ( $f_{\text{мод}}$ ) и переключений ( $f_{\text{пер}}$ ) СДМ от входного модулирующего сигнала**

Посмотрим, как  $f_{\text{мод}}$  и  $f_{\text{пер}}$  зависят от уровня модулирующего сигнала (рис.4). Частота  $f_{\text{мод}}$  может изменяться от 0 и почти до  $f_{\tau}$ , пропорционально уровню сигнала, а частота  $f_{\text{пер}}$  иначе: сначала увеличивается до значения  $f_{\tau}/2$ , соответствующего  $E_{\text{см}}$ , а затем линейно уменьшается до нуля. В этом существенное преимущество сигналов СДМ перед сигналами ЧИМ, у которых  $f_{\text{пер}}$  растет так же, как и  $f_{\text{мод}}$ . Соответственно,

сигнал СДМ обладает существенно более узким спектром, чем его аналог с ШИМ.

У сигнала СДМ есть еще одна особенность, обусловленная двумя основными режимами его работы, зависящими от применения. В одном из режимов важно представление сигнала квантами ("1", "0") – для возможности подсчета количества "1", пропорционального, согласно (7), модулирующему сигналу. Этот режим используется в сигма-дельта АЦП [17–19]. В другом режиме важна возможность выделения аналогового сигнала, который входит в состав сигнала СДМ, путем фильтрации последнего. Этот режим СДМ используется в УМ класса D. Соответственно, в первом режиме используется полный, или почти полный, диапазон (шкала) входного сигнала – от 0 до  $2E_{CM}$ , в другом – неполный, показанный на рис.4 жирными линиями, в пределах от  $E_{CM} - U_{вх.макс}$  до  $E_{CM} + U_{вх.макс}$ , где  $U_{вх.макс} < E_{CM}$ .

В УМ класса D двум значениям входного сигнала,  $E_{CM} - U_{вх.макс}$  и  $E_{CM} + U_{вх.макс}$ , соответствует одно и то же значение  $f_{пер.мин}$ , которое должно быть больше верхней частоты входного аналогового сигнала  $F_B$ :

$$f_{пер.мин} > F_B \quad (10)$$

При выполнении условия (10) возможна фильтрация сигнала на выходе УМ.

Модулятор СДМ, как и ШИМ, может быть двух видов (см. рис.1) – с аналоговым и цифровым входами. Первый из них применяется обычно в сигма-дельта АЦП, а также в рассматриваемых ниже ИС, относящихся к УМ класса D. Можно также использовать модуляторы СДМ с цифровым входом, подобные тем, что применяются в интерполирующих ЦАП [20].

### СРАВНЕНИЕ ШИМ И СДМ

Сигнал ШИМ как непрерывный, так и квантованный, обладает частотой дискретизации  $f_d$ , определяемой (1) и (3). Частоте дискретизации соответствует равная ей частота переключений

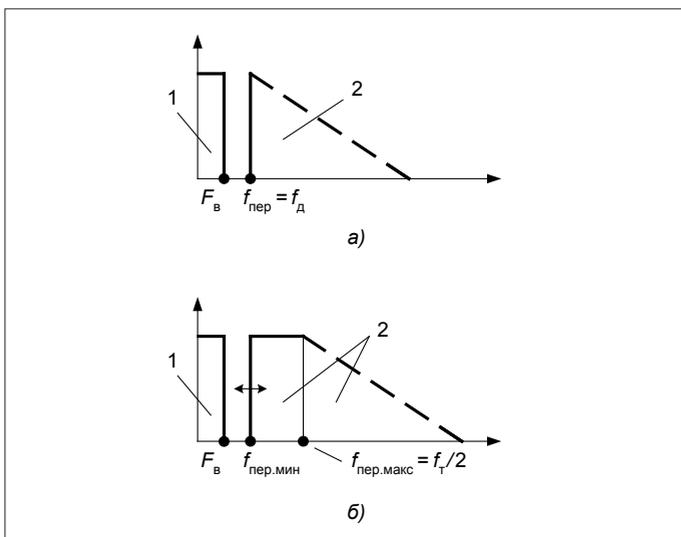


Рис.5. Полосы частот сигналов ШИМ (а) и СДМ (б): 1 – аналоговой (модулирующей) составляющей; 2 – импульсных продуктов модуляции

Таблица 1. Новые УМ класса D серии ADAU15xx фирмы Analog Devices

Параметры		MC		
		ADAU 1513	ADAU 1590	ADAU 1592
Модулятор на входе	ШИМ <sup>1</sup>	Есть	Нет	
	сигма-дельта	Нет	Есть	
Число выходных стереоканалов		2		
Диапазон частот, Гц		20–20000		
Выходная мощность (на нагрузку каждого канала), Вт <sup>2</sup>	4 Ом <sup>3</sup>	19 / 23	12,5 / 15,5	19,5 / 24
	6 Ом <sup>4</sup>	14,5 / 17,5	9 / 11,5	14,5 / 18
	8 Ом <sup>5</sup>	11 / 14	7 / 9	12 / 15
КПД, %		90 <sup>6</sup>	87 <sup>7</sup>	87 <sup>8</sup>
Частота, МГц	дискретизации	9		
	тактовая	н/д		
Напряжение питания, В	низкое	3,0–3,6		
	высокое <sup>10</sup>	9–18	9–15	9–18
Ток потребления, мА	низкий	3,1		
	высокий <sup>10,11</sup>	40		
Температура окружающей среды, °С		–40...85		
Тип корпуса (количество выводов) <sup>12</sup>		TQFP EP (48), LFCSVP VQ (48)		
Последний выпуск Data Sheets		Rev. 0, 5/07	Rev. 0, 5/07	Rev. A, 9/07

<sup>1</sup> В составе процессора ADAV4201. <sup>2</sup> При уровне нелинейных искажений и шумов 1% / 10%. <sup>3,4,5</sup> При напряжениях питания 15, 12, 18 В, соответственно. <sup>6,7,8</sup> При мощности 23, 15,5 и 24 Вт, соответственно. <sup>9</sup> Определяется процессором ADAV4201. <sup>10</sup> Питание выходных каскадов. <sup>11</sup> Без нагрузки. <sup>12</sup> С теплоотводящими пластинами со стороны печатной платы.

$f_{пер} = f_d = const$ . Для сигнала СДМ частота  $f_{пер}$  зависит от уровня входного сигнала и находится в пределах от  $f_{пер.мин}$  до  $f_T/2$ , где  $f_{пер.мин}$  может быть численно равной  $f_d$  или иметь другое значение (рис.5). Уменьшение амплитуды сигнала (пунктирная линия на рис.5) соответствует гармоникам составляющих с частотами  $f_{пер}$  ( $f_{пер.мин}$ ,  $f_{пер.макс}$ ).

Частоты  $f_{пер}$  ( $f_{пер.мин}$ ,  $f_{пер.макс}$ ) являются также частотами переключений для транзисторов, которые используются в ПУ (см. рис.1). Поэтому, чтобы снизить мощность рассеивания, обусловленную их переключением, целесообразно использовать сигнал ШИМ с  $f_d$  и обеспечить полноценную фильтрацию с применением дросселей.

Если же УМ не обладает большой мощностью, а аппаратура при этом должна быть малогабаритной (например, мобильные телефоны), используются сигналы СДМ с увеличенной частотой переключений – с нижним пределом  $f_{пер.мин} > f_d$ . Последнее достигается при меньшем  $U_{вх.макс}$  (см. рис.4), определяющим нижний предел диапазона частот переключений. При этом используется упрощенная фильтрация на выходе УМ (без применения дросселей).

Для более мощных УМ также возможно применение сигнала СДМ, если транзисторы, используемые в ПУ, являются достаточно быстродействующими. При этом дроссели фильтров могут иметь меньшие габариты, чем при управлении сигналом ШИМ.

### МС ФИРМЫ ANALOG DEVICES

Фирмой Analog Devices разработаны и выпускаются УМ класса D – MC AD1991, MC серии AD1990/2/4 и новой серии SSM2301/2/4/6, SSM2311. Последними разработками являются три новые MC – ADAU1513 (Class-D Audio Power Stage, без



**Таблица 2. Новые процессоры фирмы Analog Devices для обработки аудиосигналов**

Параметры		ИМС								
		Аудио			ТВ аудио					
		ADAU 1401	ADAU 1701	ADAU 1702	ADAV 400	ADAV 4101	ADAV 4201	ADAV 4312	ADAV 4322	ADAV 4412
Аналоговые каналы	АЦП	2 (стерео)						4 (два стерео)		
	ЦАП	4 (два стерео)			8	6	4	11	7	
Разрядность АЦП, ЦАП		24								
ШИМ выходы		Нет				4 <sup>1</sup>	Нет		8 <sup>2</sup>	
Диапазон температур, °С		-40... 105	0-70			н/д				
Тип корпуса		LQFP (48)			LQFP (80)					
Оценочная плата		Есть	Есть	Есть	Есть	н/д				
Последний выпуск Data Sheets		Rev. 0, 7/07	Rev. 0, 10/06	Rev. 0, 10/06	Rev. A, 7/07	н/д				

<sup>1,2</sup> Два и четыре стереоканала, соответственно (с дифференциальными выходами).

**Таблица 3. Бесфильтровые УМ класса D серии SSM23xx фирмы Analog Devices**

Параметры <sup>2</sup>	ИМС				
	SSM2301	SSM2302	SSM2304	SSM2306	SSM2311
Моно/Стерео	Моно		Стерео		Моно
Мощность (в одном канале), Вт <sup>1</sup>	1,4		2,0		3,0
КПД, %	85 <sup>2</sup>		75 <sup>2</sup> ; 85 <sup>3</sup>		89 <sup>3</sup>
Гармонические искажения + шум, % <sup>4</sup>	0,1; 0,04		0,2; 0,25		0,4; 0,02
Напряжение питания, В	2,5-5				
Ток потребления (без нагрузки), мА <sup>5</sup>	4,2	8,0	7,0	6,5	5,5
Температура окружающей среды, °С	-40...85				
Корпус (в скобках – количество выводов)	LFCSP_VD (8) MSOP (8)	LFCSP_VD (16)			WLCSP (9)
Последний выпуск Data Sheets	Rev. A, 10/07	Rev. 0, 6/06	Rev. 0, 12/06	Rev. 0, 4/07	Rev. PrA, 10/07

<sup>1</sup> Указана максимальная мощность, другие значения – в Data Sheet. <sup>2</sup> При указанной в таблице мощности. <sup>3</sup> При мощности 1,4 Вт. <sup>4</sup> Для двух значений мощности, указанных в Data Sheets. <sup>5</sup> При напряжении питания 5 В.

модуляторов) и ADAU1590/2 (Class-D Audio Power Amplifiers, с модуляторами), относящиеся к серии ADAU15xx, а также MC SSM2311 [6–11].

В ADAU1513 реализуется квантованная ШИМ, а в ADAU1590/2 – СДМ. MC ADAU1513 использует сигнал ШИМ, поступающий с выхода процессора ADAV4201, а ADAU1590/2 содержит в своем составе модулятор СДМ, который подключается, например, к выходу ЦАП другого процессора – ADAV4101 (рис.6). Характеристики MC ADAU15xx приведены в табл.1. MC ADAU1513 и ADAU1592 близки по выходным параметрам, а ADAU1590 имеет меньшую выходную мощность (при более низком напряжении питания).

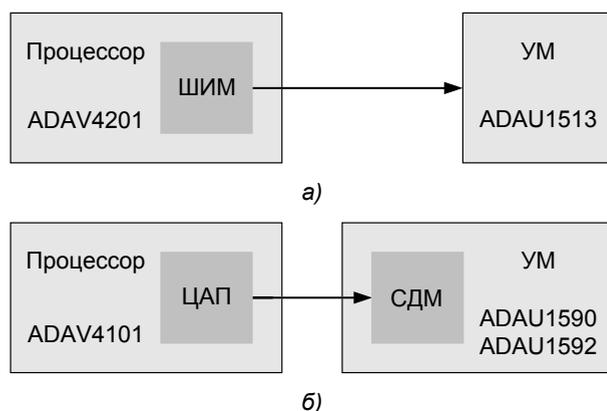
Наряду с серией MC ADAU15xx, фирмой Analog Devices разработаны две серии процессоров – ADAU1xxx (ADAU14xx, ADAU17xx) и ADAV4xxx (табл.2). Первая из них предназначена для цифровой обработки аудиосигналов (ADAU..., Audio), а вторая – специально для аудиосигналов телевизионных систем (ADAV..., Advanced TV).

MC процессоры содержат АЦП и ЦАП (на входе и выходе) и собственно процессор, в котором происходит высококачественная цифровая обработка аудиосигналов. В некоторых из MC процессоров на выходе содержатся ШИМ-модуляторы: ADAV4201 (два канала, стерео), ADAV4412 и ADAV4422 (по четыре канала). На выходе других процессоров расположены ЦАП: ADAV4101 (два канала, стерео), ADAV4312 и ADAV4322 (по четыре канала).

Отметим, что в ADAU1590/2 имеется двухсторонний ограничитель входного сигнала (Slicer), который служит для

защиты модуляторов СДМ от перегрузок по входу ( $\pm U_{вх.макс}$ ). Кроме того, во всех трех MC серии ADAU15xx предусмотрена защита как от перегрузок по выходу (например, от коротких замыканий), так и от перегрева.

На выходе MC УМ – четыре полумоста (на двух транзисторах каждый), образующих два мостовых стереовыхода (каждый с удвоенным выходным напряжением и без начальной постоянной составляющей). Два УМ ADAU1513 можно использовать в четырехканальном режиме при работе с одним процессором ADAV4201. ИМС ADAU1513, в отличие от ADAU1590/2, содержит внутренний тактовый генератор, предусматривающий внешнее подключение кварцевого или другого резонатора с частотой, например, 24,576 МГц. При этом обеспечивается  $f_r = 2,288$  МГц



**Рис.6. Процессоры аудиосигналов и усилители мощности класса D с модуляторами ШИМ (а) и СДМ (б)**

при  $f_{\text{пер.макс}} = f_r/2 = 6,144$  МГц. Для УМ ADAU1590/2 предусмотрена возможность параллельного включения двух выходов для одной, более мощной, монофонической нагрузки.

Помимо аналоговых входов и выходов (АЦП, ЦАП) и ШИМ на выходе, процессоры ADAV4xxx снабжены также цифровыми входами и выходами. Наряду с процессорами ADAV4xxx (серия Advanced TV), фирма выпускает процессоры ADAU1401, ADAU1701 и ADAU1702 из числа MC серии ADAU1xxx, причем ADAU1401 является новой [10,11] (см. табл.2).

В заключение отметим, что для MC описанных УМ используются корпуса типов LFCSP\_VQ, TQFP\_EP, а для MC процессоров – типа LQFP (см. табл. 1 и 2). Первые два из них снабжены теплоотводящими пластинами (Exposed Pad). Монтаж ИМС рассмотрен в [12].

Для ADAU1513, ADAU1590 и ADAU1592, а также для других MC, выпускаются оценочные платы [11].

Упомянутые MC УМ AD1991, AD1990/2/4, SSM2301/2/4/6 и SSM2311 фирмы Analog Devices рассмотрены (кроме новой SSM2311) в [4]. В табл.3 приведены параметры MC серии SSM23xx.

Таким образом, сегодня выпускается целый ряд микросхем для усилителей мощности класса D [6]. Будем надеяться, что приведенная в статье информация поможет потребителю выбрать те из них, которые наилучшим образом отвечают его задачам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Gaalas E.** Class D Audio Amplifiers: What, Why, and How. – Analog Dialogue, 40–06, June 2006 (www.analog.com/analogdialogue).
2. Analog Devices' Engineer-to-Engineer Note EE-242: PMW and Class-D Amplifiers with ADSP-BF535 Blackfin® Processors / by A. V. Prubhugaonkar, Rev. 2, 2006 (www.analog.com).
3. MAXIM's Application Note 3977: Class D Amplifiers: Fundamentals of Operation and Recent Developments, Dec. 15, 2006 (www.maxim-ic.com).
4. **Макаренко В.** Цифровая обработка звуковых сигналов. – ЭЖиС. – Киев, VD MAIS: 2003, № 10, с. 40–44, № 11, с. 10–16, № 12, с. 26–31.
5. **Голуб В.** Статьи в "CHIP NEWS Украина": 2005, № 2, с. 58–63; 2006, № 2, с. 85–88, 90–96; 2006, № 3, с. 48–53; 2006, № 8, с. 56–60; 2007, № 1, с. 16–22.
6. Микросхемы Analog Devices. Каталог продукции, поставляемой фирмой VD MAIS, сентябрь 2007.
7. Analog Devices' Press Releases: Analog Devices' Audio ICs Deliver Audiophile Sound for HDTV Experience; The Digital Entertainment Paradox: Analog Technology Defines the HDTV Experience. Norwood,

MA, Oct. 1, 2007 (www.analog.com).

8. Advanced Television Solutions, 9/07 (www.analog.com/Advantiv).
9. Analog Devices' Audio/Video Products: Audio Amplifiers; Audio Signal Processors (www.analog.com).
10. Analog Devices' Product Descriptions: ADAU1401; ADAU1513; ADAU1590; ADAU1592; ADAU1701; ADAU1702; ADAV4101; ADAV4201; ADAV4312; ADAV4322; ADAV4412; ADAV4422; SSM2301; SSM2302; SSM2304; SSM2306; SSM2311 (www.analog.com).
11. Analog Devices' Data Sheets: ADAU1401, Rev. 0, 7/07; ADAU1513, Rev. 0, 5/07; ADAU1590, Rev. 0, 5/07; ADAU1592, Rev. A, 9/07; ADAU1701, Rev. 0, 10/06; ADAU1702, Rev. 0, 10/06; SSM2301, Rev. A, 10/07; SSM2302, Rev. 0, 6/06; SSM2304, Rev. 0, 12/06; SSM2306, Rev. 0, 4/07; SSM2311, Rev. PrA, 10/07; EVAL-ADAU1513/ADAU1590/ADAU1592, Rev. 0, 10/07; EVAL-ADAU1701EB/EVAL-ADAU1702EB, Rev. 0, 1/07; EVAL-ADAU1513/ADAU1590/ADAU1592, Rev. 0, 10/07 (www.analog.com).
12. Analog Devices' Application Notes: AN-772. A Design and Manufacturing Guide for the Lead Frame Chip Scale Package (LFCSP) / by Gary Griffin, Rev. 0, 2006; AN-923. Designing a System Using the ADAU1701/ADAU1702 in Self-Boot Mode / by J. Lewis, Rev. 0, 2007 (www.analog.com).
13. **Голуб В.С.** Обобщение дискретизации сигналов с АМ и ВМ отсчетами. – Радиотехника, 1985, № 12, с. 55–58.
14. **Лэнди Р., Дэвис Д., Албрехт А.** Справочник радиоинженера. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961 (5.7. Импульсная модуляция, с. 188–192).
15. **Кончаловский В. Ю.** и др. Электрические измерительные преобразователи. – М.-Л.: Энергия, 1967.
16. **Голуб В.С.** Мгновенная и средняя частота колебаний и интегрирующие ЧМ и ЧИМ модуляторы. – Радиотехника, 1982, № 9, с. 48–50.
17. **Шахнович И.** Сигма-дельта АЦП: Архитектура, принципы, компоненты. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, № 4, с. 18–22.
18. **Голуб В.** Цифровая обработка сигналов: Сигма-дельта АЦП. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, № 4, с. 22–26.
19. **Голуб В.** Сигма-дельта модуляторы и АЦП. – Электронные компоненты – Украина, 2007, № 5/6, с. 43–52.
20. Analog Devices' Tutorial MT-017: Oversampling Interpolating DACs / by W. Kester, Rev. 0, Jan. 5, 2006 (Sigma-Delta DACs, fig. 5A). – www.analog.com.