

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КЛЮЧЕВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

В статье рассмотрены особенности построения ключевых усилителей мощности, предназначенных для переносной и высококачественной аппаратуры звуковоспроизведения. Приведены результаты моделирования усилителей класса D с внешним сигналом несущей частоты и усилителей UcD с самовозбуждением. Приведены сравнительные характеристики усилителей классов D и T, которые позволяют сделать обоснованный выбор схемных решений для конкретных применений.

**В. Макаренко**

### THE COMPARATIVE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF KEY AMPLIFIERS OF SOUND SIGNALS

**Abstract** - In article features of construction of key amplifiers of the capacity intended for portable and high-quality equipment of sound reproduction are considered. Results of modelling of amplifiers of class D with an external signal of bearing frequency and amplifiers UcD with self-excitation are represented. Comparative characteristics of amplifiers of classes D and T which allow to make the proved choice of circuit decisions for concrete applications are interpreted.

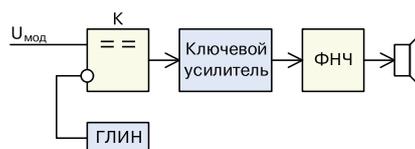
**V. Makarenko**

Следствием постоянной борьбы за повышение КПД и снижение нелинейных искажений, возникающих в усилителях мощности аналоговых сигналов, стал переход от линейного к ключевому режиму работы выходного каскада. В [1] рассмотрены основные характеристики различных режимов работы выходных каскадов усилителей мощности и особенности построения ключевых усилителей. Такие усилители называют еще импульсными или цифровыми. Их особенностью является то, что выходные транзисторы усилителя работают в ключевом режиме "открыт – закрыт". Чаще всего по такой схеме строятся усилители класса D, в которых управление выходными транзисторами осуществляется с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

С момента публикации [1] появились новые разработки, одной из которых стал предложенный компанией Philips Electronics (в настоящее время – NXP) в 2005 году усилитель звуковой частоты класса D с самовозбуждением ("самоосциллирующий"). В этом усилителе использована UcD-технология (Universal Class D) формирования сигнала управления выходными транзисторами [2]. Разработчиком усилителя является бельгиец Бруно Путцей (Bruno Putzeys). Из описания таких усилителей трудно понять, в чем их преимущества перед другими ключевыми усилителями, реали-

зованными на основе схем с самовозбуждением или с внешним возбуждением. Это и стало мотивацией написания данной статьи.

Чтобы сравнивать различные усилители с ШИМ-управлением, необходимо представлять, по каким функциональным схемам они реализуются. Существует несколько таких схем и их модификаций. Основное их отличие заключается в том, формируется ли ШИМ-сигнал с помощью внешнего генератора линейно-изменяющегося напряжения, или же схема усилителя работает в режиме самовозбуждения вследствие введения положительной обратной связи. В статье не рассматриваются так называемые цифровые усилители, в которых сигнал управления выходным ключевым каскадом формируется с применением сигма-дельта АЦП [1]. Упрощенная функциональная схема усилителя класса D с внешним генератором линейно-изменяющегося треугольного напряжения (ГЛИН) приведена на рис. 1. Для минимизации искажений, вносимых модулятором



**Рис. 1. Функциональная схема усилителя класса D с внешним генератором линейно-изменяющегося напряжения**

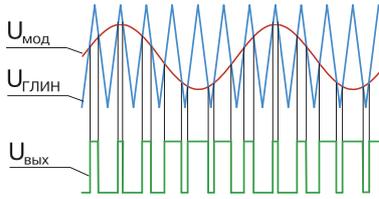


Рис. 2. Форма сигналов на входах и выходе ШИМ-модулятора

ШИМ-сигнала, состоящим из компаратора К и ГЛИН, необходимо применить симметричную модуляцию в соответствии с рекомендациями [3]. Формы сигналов на входах компаратора и на его выходе показаны на рис. 2.

Модификацией схемы рис. 1 является схема управления усилителя класса D (рис. 3), примененная в двухканальном усилителе TDA7490L, выпускаемом компанией STMicroelectronics. Сигнал на вход ШИМ-модулятора подается через неинвертирующий вход интегратора (INTEGRATOR1).

К инвертирующему входу интегратора кроме времязадающих элементов подключен резистор R17, через который в цепь ШИМ-модулятора и ключевого усилителя (PWM-stage1) для уменьшения нелинейных искажений вводится отрицательная обратная связь. Однако это не дает существенного улучшения характеристик. ИМС обеспечивает при мощности 1 Вт на нагрузке 8 Ом коэффициент гармоник 0.1%, а при мощности 30 Вт – 10%, что яв-

ляется весьма посредственным результатом.

Структурная схема UсD-усилителя приведена на рис. 4. Обратная связь с выхода ФНЧ подается через корректирующую цепь R1, R2, R3 и C1. Коэффициент усиления всего усилителя определяется отношением  $R_3/R_1$ . На частоте, на которой суммарный фазовый сдвиг ФНЧ и корректирующей цепи составляет 180 градусов, возникают автоколебания. Величины сопротивления резистора R2 и емкости конденсатора C2 выбираются таким образом, чтобы частота колебаний была в диапазоне 300...350 кГц. В [4] приведены характеристики усилителя Нурех UсD400, который обеспечивает при выходной мощности 200 Вт коэффициент гармоник, не превышающий 0.05%. Эти параметры во многом схожи с параметрами усилителя UсD, выполненного на дискретных элементах на демонстрационной плате UM10155 компании Philips [5]. Усилитель обеспечивает при выходной мощности 200 Вт КПД не менее 92% и коэффициент гармоник не более 0.03%.

Компания Texas Instruments предложила вариант усилителя класса D, получивший название PurePath™ HD [6]. Структурная схема усилителя PurePath™ HD приведена на рис. 5. Как видно из схемы, усилитель охвачен общей отрицательной обратной связью, поступающей через аналоговый петлевой фильтр с выхода ключевого усилителя на вход компаратора. Параметры фильтра определяют частоту,

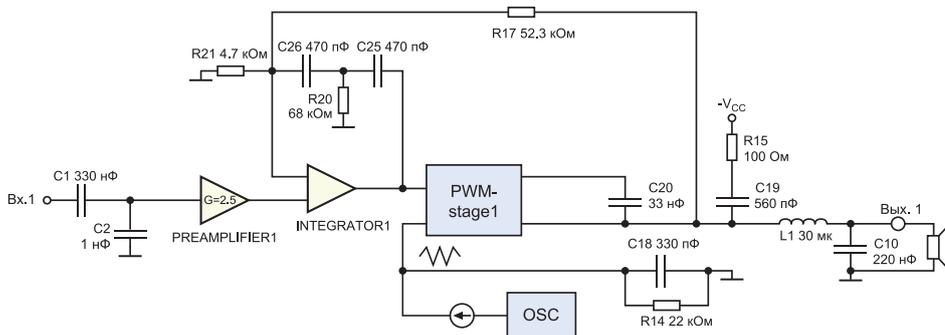


Рис. 3. Модификация ШИМ-модулятора с внешним ГЛИН в усилителе класса D TDA7490L

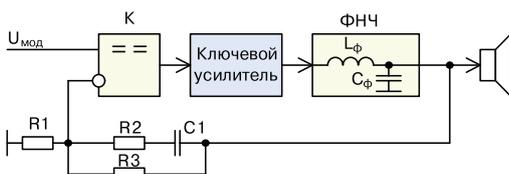


Рис. 4. Структурная схема UсD-усилителя

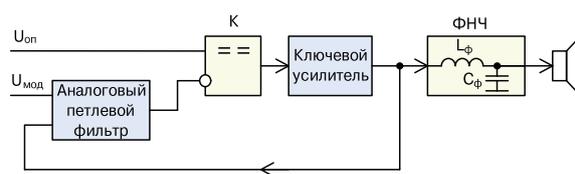


Рис. 5. Структурная схема усилителя PurePath™ HD

на которой фазовый сдвиг составляет 180 градусов, в результате чего и возникает автоколебательный процесс. Основное отличие усилителя PurePath™ HD заключается в том, что сигнал обратной связи снимается до выходного фильтра нижних частот. О характеристиках таких усилителей можно судить по ИМС типа TAS5631, представляющей собой стереофонический усилитель с максимальной выходной мощностью 300 Вт на канал. Усилитель обеспечивает коэффициент гармоник ( $K_r$ ) 0.03% при выходной мощности 1 Вт на нагрузке 4 Ом. При выходной мощности 100 Вт  $K_r=0.05\%$  и стремительно растет при увеличении мощности. Так при выходной мощности 200 Вт  $K_r$  составляет уже 0.6% на нагрузке 4 Ом и 10% – на нагрузке 8 Ом. Усилитель имеет ярко выраженный минимум искажений при выходной мощности 20...30 Вт (0.005%).

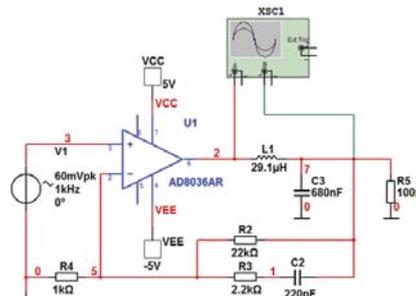
Все производители подобных усилителей заявляют, что такие параметры достигнуты благодаря их фирменной технологии. Так ли это, или параметры усилителей в основном определяются режимом работы выходных каскадов ключевых усилителей и параметрами транзисторов, используемых в них?

Для сравнения выберем усилитель класса D с внешним генератором линейно-изменяющегося треугольного напряжения и усилитель UcD. При этом будет использоваться один и тот же ключевой усилитель, а изменяться будет схема возбуждения ШИМ-модулятора. Моделирование проведем с помощью программы NI Multisim. Целью моделирования является выяснение того, какая из структурных схем позволяет реализовать усилитель с меньшими нелинейными искажениями.

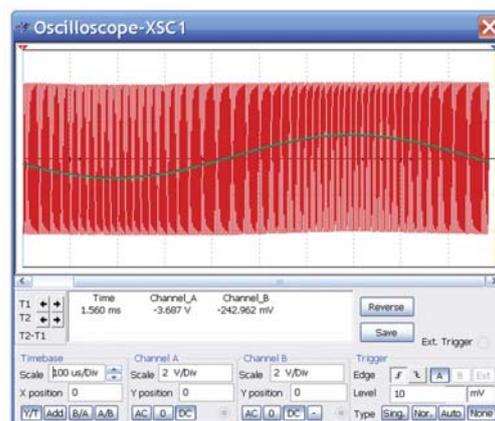
Принципиальная схема упрощенной модели усилителя UcD приведена на рис. 6, а. В схеме отсутствует мощный ключевой каскад, а в качестве компаратора используется быстродействующий ОУ компании Analog Devices типа AD8036AR с полосой пропускания 250 МГц и скоростью нарастания выходного напряжения 1500 В/мкс.

Параметры выходного фильтра ( $L1$ ,  $C3$ ) и цепи обратной связи ( $R2...R4$ ,  $C2$ ) взяты из [5]. Коэффициент усиления всей схемы определяется соотношением  $K_y = 1 + (R_2/R_4)$ .

На неинвертирующий вход усилителя  $U1$  подается гармонический сигнал амплитудой



а)



б)

Рис. 6. Принципиальная схема модели усилителя UcD (а) и осциллограммы сигналов на выходе усилителя и ФНЧ (б)

60 мВ. На осциллограммах (рис. 6, б) приведены формы сигналов на выходе усилителя  $U1$  (красная) и на выходе ФНЧ  $L1$ ,  $C3$  (зеленая) при сопротивлении нагрузки 100 Ом. Так как фильтр имеет малую крутизну спада АЧХ, а частота несущего колебания приблизительно равна 300 кГц, то на выходном сигнале виден ослабленный сигнал несущего колебания. Амплитуда сигнала на выходе LC-фильтра приблизительно равна 1 В. Попытка увеличить коэффициент усиления или амплитуду сигнала на входе до 130 мВ (при этом амплитуда сигнала на выходе равна 3 В) приводит к перемодуляции сигнала, как показано на рис. 7.

Для оценки уровня искажений проведем Фурье-анализ в ноде 7 (точка подключения входа В осциллографа к сопротивлению нагрузки). Для этого в меню Simulate/Analyses выбираем режим Fourier Analysis. Оставляем параметры анализа, установленные в программе NI Multisim по умолчанию: разрешение по частоте 1 кГц, число гармоник для анализа – 9 и частоту дискретизации 100 кГц. Выбираем для анализа напряжение  $V(7)$  в ноде 7 и нажи-

Таблица 1. Спектральный состав сигнала на выходе упрощенной модели усилителя UсD

№ гармоника	Частота, Гц	$U_{вх} = 60 \text{ мВ}, U_{вых} = 1 \text{ В}$		$U_{вх} = 130 \text{ мВ}, U_{вых} = 3 \text{ В}$	
		Нормализованная амплитуда	Нормализованная фаза	Нормализованная амплитуда	Нормализованная фаза
1	1000	1	0	1	0
2	2000	0.001148	-118	0.00476	-88.793
3	3000	0.002591	169.955	0.023824	172.261
4	4000	0.000733	2.0207	0.002736	-139.77
5	5000	0.000881	99.69	0.001994	143.942
6	6000	0.000369	-16.909	0.004299	119.721
7	7000	0.001515	125.241	0.006352	-14.035
8	8000	0.001507	-149.3	0.006305	11.4447
9	9000	0.001155	126.471	0.002943	101.696

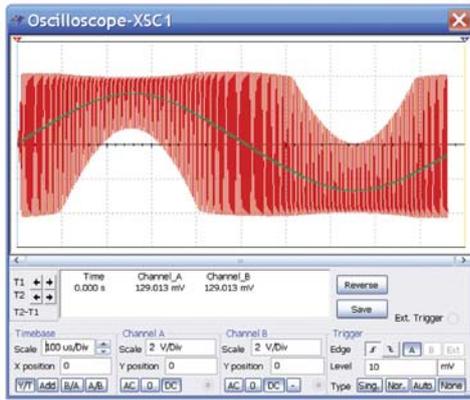


Рис. 7. Осциллограмма сигнала на выходе усилителя U1 при амплитуде входного сигнала 130 мВ

маем кнопку Simulate. Результаты анализа приведены в табл. 1.

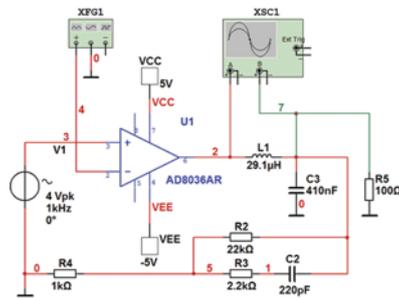
Как следует из табл. 1, при входном сигнале амплитудой 60 мВ уровень третьей гармоники составляет 0.0026 от уровня первой, а при входном сигнале 130 мВ – примерно в 10 раз больше. Кроме того, управлять таким сигналом мощным драйвером, включаемым между выходом усилителя U1 и нагрузкой, невозможно из-за провалов напряжения управления (рис. 7).

Для сравнения с усилителем класса D внесем небольшие изменения в схему. Отключим цепь ОС и подключим внешний генератор треугольного напряжения, в качестве которого используем функциональный генератор (рис. 8, а). С учетом напряжения питания ±5 В, установим амплитуду треугольного напряжения 5 В, а амплитуду модулирующего напряжения 4 В. При таких параметрах амплитуда сигнала на выходе LC-фильтра будет составлять примерно 3 В. В отличие от усили-

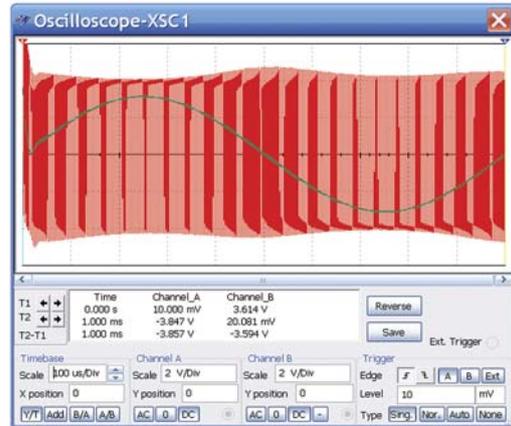
теля UсD на выходе усилителя U1 перемодуляция не наблюдается (рис. 8, б).

Результаты Фурье-анализа (табл. 2) показывают, что при амплитуде сигнала на входе, равной 1.3 В, уровень третьей гармоники составляет 0.068 от уровня первой, а при 4 В – 0.0064, т.е. практически в 10 раз меньше.

Причины этого явления не совсем ясны и требуют дополнительных исследований. Однако, сравнивая результаты моделирования двух ти-



а)



б)

Рис. 8. Принципиальная схема модели усилителя класса D с внешним ГЛИН (а) и осциллограммы входного и выходного сигналов (б)

Таблица 2. Спектральный состав сигнала на выходе усилителя класса D с внешним ГЛИН

№ гар- моники	Частота, Гц	$U_{вх} = 1.3 \text{ В}, U_{вых} = 1 \text{ В}$		$U_{вх} = 4 \text{ В}, U_{вых} = 3 \text{ В}$	
		Нормализованная амплитуда	Нормализованная фаза	Нормализованная амплитуда	Нормализованная фаза
1	1000	1	0	1	0
2	2000	0.00627	140.915	0.010024	-72.919
3	3000	0.068322	2.15113	0.006352	-120.87
4	4000	0.015881	-92.546	0.02391	-97.275
5	5000	0.016294	-77.403	0.005536	-124.86
6	6000	0.024523	-120.33	0.005352	173.275
7	7000	0.010822	-102.46	0.006015	-30.249
8	8000	0.010714	-46.226	0.006294	117.267
9	9000	0.031622	-132.98	0.015561	-2.8365

пов усилителей, можно сделать некоторые предварительные выводы. Благодаря введению общей отрицательной обратной связи с выхода на вход в усилителе UcD удается реализовать более линейный режим его работы и получить меньшее значение уровней гармонических составляющих. Однако в процессе моделирования и по результатам анализа различных источников информации удалось выяснить, что характеристики усилителя весьма критичны к параметрам выходного LC-фильтра и корректирующей цепи.

Для проверки работоспособности схемы при низкоомной нагрузке проведено моделирование схемы усилителя UcD с мощным выходным драйвером (рис. 9). При указанных на схеме номиналах элементов проведен Фурье-анализ выходного сигнала на нагрузке 4 Ом (рис. 10). Для сравнения с усилителем класса D на инвертирующий вход компаратора вместо сигнала обратной связи был подан сигнал от функционального генератора (аналогично рис. 8) и проведен Фурье-анализ выходного сигнала.

Анализ полученных результатов показал, что коэффициент гармоник на выходе модели усилителя UcD меньше почти в 40 раз в сравнении с усилителем класса D с внешним ГЛИН.

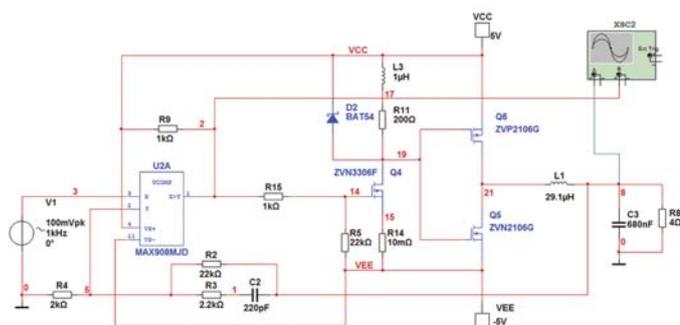


Рис. 9. Принципиальная схема модели усилителя UcD с мощным выходным драйвером

Конечно, это результаты анализа упрощенных моделей, поэтому они позволяют оценить преимущества усилителя UcD, но не дают однозначного ответа на вопросы, какие параметры компаратора и выходного драйвера в наибольшей степени влияют на вносимые усилителем искажения. Для этого требуется детальный анализ искажений, вносимых каждым из этих узлов.

Альтернативой усилителям класса D и UcD могут служить усилители класса T [1]. Прототип усилителя класса T, разработанный фирмой Power Acoustic, был впервые показан на выставке в Зинцхайме в апреле 2000 года. В усилителях, работающих в режиме класса D, нелинейные искажения на средних и верхних частотах звукового диапазона возрастают и могут стать недопустимо большими. Для уменьшения искажений разработчики фирмы Power Acoustic использовали в своих усилителях технологию пакетной коммутации TriPath, которую применяет в своих концентраторах данных фирма Cisco – монополист на рынке широкополосных телекоммуникационных роутеров. От названия этой технологии и произошло название усилителей. Компания Cisco отказалась передавать кому-либо полный алгоритм и топологию микросхемы, реализующей технологию TriPath, но согласилась производить и программировать микросхемы по специальным требованиям фирмы Power Acoustic. На опытном макете усилителя был показан минимальный КПД 75% (при малой мощности в нагрузке) и максимальный – около 90% (при максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку). Нелинейные искажения этого усилителя не превышали 0.08% при выходной мощности 100 Вт.



Рис. 10. Результаты Фурье-анализа сигнала на выходе усилителя UсD

В 2000 году при финансовой поддержке компаний Cisco, Intel и Texas Instruments была создана компания Tripath [1]. Специалистам компании удалось разработать полностью цифровой усилитель звука на базе собственной технологии DPP (Digital Power Processing) с параметрами, аналогичными параметрам разработанных фирмой Power Acoustic усилителей. Этот усилитель в интегральном исполнении и называется усилителем класса T.

КПД усилителей класса T типичен для импульсных усилителей класса D. Однако уровень нелинейных искажений в усилителях класса D на средних и высоких частотах может достигать единиц процентов, в то же время, уровень нелинейных искажений в пределах сотых долей процента удалось получить в усилителях класса T в широком диапазоне частот.

Принципиальное различие между усилителями классов D и T состоит в используемом методе модуляции. Если в усилителях класса D применяют ШИМ-модуляцию и фиксированную частоту несущего колебания, то в усилителях класса T выходные транзисторы коммутируются с изменяющейся по псевдослучайному закону (Dithering of the Switching Frequency) частотой, значение которой зависит от уровня входного сигнала. Такой способ модуляции аналогичен модуляции, используемой в технологии Spread Spectrum [1], и позволяет получить в ключевых усилителях очень малые нелинейные искажения при сохранении высокого КПД.

Так как выходные транзисторы усилителей класса T, как и усилителей класса D, работают в ключевом режиме, при их переключении возникают одинаковые искажения. Но благодаря тому, что в усилителе класса T спектр этих гармоник “размазывается” в широкой полосе частот, спектральная плотность гармоник информационного сигнала и комбинационных искажений имеет очень малое значение. На рис. 11 приведены спектры сигнала частотой 1 кГц на выходе усилителей класса D (а) и T (б) [1], а на рис. 12 – распределение энергии в спектре искажений этих же усилителей в широкой полосе частот.

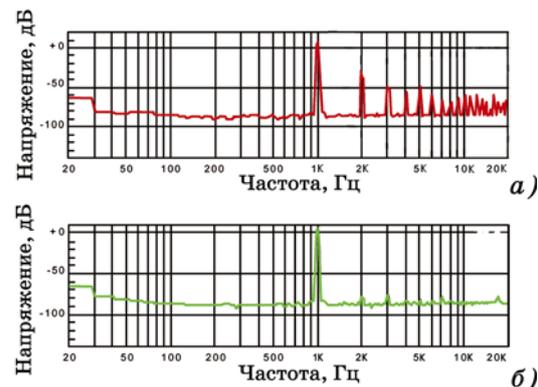
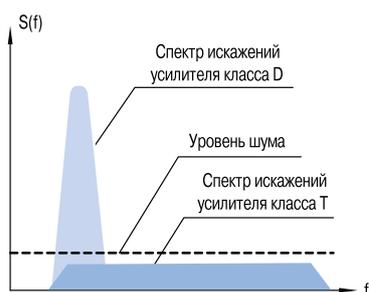


Рис. 11. Спектры искажений на выходе усилителей классов D (а) и T (б)

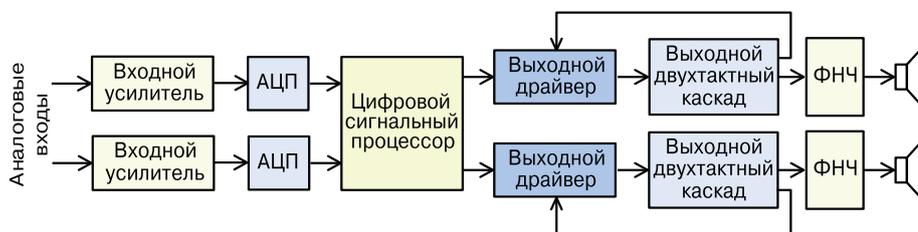
Структурная схема усилителя класса T показана на рис. 13 [1]. Схема содержит входной усилитель, АЦП и цифровой сигнальный процессор, выполняющий преобразование цифро-



**Рис. 12. Распределение энергии в спектре искажений на выходе усилителей классов D и T**

гармоник не дает полного представления об искажениях, вносимых усилителем. Человеческое ухо наиболее чувствительно к интермодуляционным искажениям. Для обеспечения высокого качества звучания и точности воспроизведения необходимо также, чтобы и коэффициент интермодуляционных искажений в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц не превышал 0.1%. Такие параметры удается реализовать только в усилителях класса T.

Однако в 2006 году появились разработки усилителя, названного NewClassD (NCD), а в



**Рис. 13. Структурная схема стереофонического усилителя класса T**

вого входного сигнала в сигналы управления мощным выходным двухтактным каскадом. Для согласования маломощного выхода цифрового сигнального процессора с входом выходного каскада используются выходные драйверы. Кроме того, в усилителе имеются сервисные и диагностические схемы, а также системы защиты от перегрузки по току и напряжению (на рис. 13 не показаны).

На выходе усилителя включен фильтр нижних частот (внешний для усилителей, выпускаемых компанией Tripath), который выделяет низкочастотную составляющую модулированного сигнала, восстанавливая звуковой сигнал.

Возможности усилителей класса T при увеличении выходной мощности можно проиллюстрировать на примере ИМС ТК2051, цифрового стереофонического усилителя, рассчитанного на долговременную работу при выходной мощности 50 Вт (номинальная мощность при нагрузке усилителя на сопротивление 8 Ом), в котором при выходной мощности 35 Вт коэффициент гармоник не превышает 0.01%.

Усилители класса T, как и все устройства цифровой обработки звука, чувствительны к перегрузкам. Если выходная мощность превышает 70% номинального значения, то коэффициент гармоник стремительно увеличивается. Зависимость коэффициента гармоник от частоты выражена значительно слабее. Однако коэффициент

конец 2009 г. – его более совершенной модификации NCDX [8]. По информации разработчиков этот усилитель обеспечивает наименьшие среди всех ключевых усилителей нелинейные искажения, не превышающие 0.0007% в полосе частот 20 Гц...20 кГц при выходной мощности 1 Вт на нагрузку 4 Ом, и имеет полосу пропускания по уровню -3 дБ от 1 Гц до 125 кГц. Особенности усилителей NCD мы рассмотрим в следующих публикациях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макаренко В. Цифровая обработка звуковых сигналов // ЭКИС – Киев: VD MAIS, 2003, №№ 10, 11, 12.
2. Поташов Р., Кузнецов С. Новые усилители класса D на основе технологии UcD // Новосты электроники, 2007, № 2.
3. Слепов Н.Н., Дроздов Б.В. Широотно-импульсная модуляция / Под. общ. редакцией А.А. Булгакова. – М.: Энергия, 1978. – 192 с.
4. <http://www.hardwareanalysis.com/content/article/1822.2/>.
5. [http://www.nxp.com/documents/user\\_manual/UM10155.pdf](http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10155.pdf).
6. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tas5613.pdf>.
7. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tas5631.pdf>.
8. <http://www.newclassd.com/>.