

ОЗМ (Цифровий звук)

Аналог та цифра

Зміст

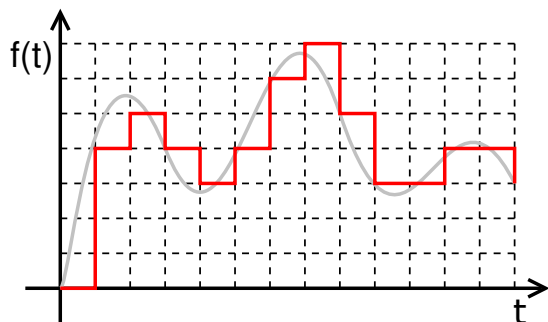
1	Цифровий звук	1
1.1	Оцифрування звуку	1
1.1.1	Параметри оцифрування	1
1.1.2	Антиалайзинг і дитеринг	2
1.1.3	Якість звуку	2
1.2	Подальша робота з цифровим звуком	2
1.3	Застосування	2
1.4	Див. також	3
1.5	Література	3
2	Цифровий сигнал	4
2.1	Переваги цифрового сигналу	4
2.2	Недоліки цифрового сигналу	4
2.3	Посилання	4
2.4	Див. також	4
3	Семпл	5
3.1	Види семплів	5
3.2	Посилання	5
4	Аналого-цифровий перетворювач	6
4.1	Розрядність	6
4.2	Типи перетворення	6
4.2.1	Лінійні АЦП	7
4.2.2	Нелінійні АЦП	7
4.3	Точність	7
4.3.1	Похибки квантування	7
4.3.2	Нелінійність	7
4.3.3	Апертурна похибка	8
4.4	Частота дискретизації	8
4.5	Накладення спектрів (Аліасинг)	8
4.6	Підмішування псевдовипадкового сигналу (dither)	9
4.7	Передискретизація	9

4.8	Типи АЦП	9
4.9	Застосування АЦП в звукозаписі	11
4.10	Інші застосування	11
4.11	Див. також	11
4.12	Примітки	11
4.13	Посилання	12
4.14	Література	12
5	Звукова плата	13
5.1	Історичний нарис	13
5.2	Різновиди звукових плат	13
5.3	Будова звукової карти	14
5.3.1	Звукові канали та поліфонія	14
5.4	Зовнішній інтерфейс	14
5.5	Див. також	15
5.6	Література	15
5.7	Посилання	15
6	Синтезатор	16
6.1	Історичний нарис	16
6.1.1	Перші програмні синтезатори	16
6.1.2	Початок комерціалізації	17
6.1.3	Поліфонічні синтезатори	18
6.1.4	Радянські синтезатори	18
6.1.5	Поява цифрових синтезаторів	18
6.2	Типи синтезу звуку	19
6.2.1	Напрямки синтезу звуку	19
6.3	Різновиди синтезаторів	19
6.4	Керування роботою синтезатора	20
6.5	MIDI-контроль	21
6.6	Синтезатори у музичній практиці	22
6.7	Література	22
6.8	Див. також	23
6.9	Примітки	23
6.10	Посилання	23
7	Частота дискретизації	24
7.1	Аудіо	24
7.2	Джерела	24
8	Герц	25
8.1	Кратні і частинні одиниці	25
8.2	Див. також	25

9	Фільтрація звуку	26
9.1	Види фільтрів	26
9.2	Література	26
10	Цифрова обробка сигналів	27
10.1	Принципи цифрової обробки сигналів	27
10.2	Основні застосування	27
10.3	Основні перетворення	28
10.4	Див. також	28
10.5	Посилання	28
11	ЦАП	29
11.1	Використання	29
11.2	Див. також	29
12	Звуковий ефект	30
12.1	Технічні ефекти	30
12.2	Див. також	31
12.3	Посилання	31
13	Компресія звуку	32
13.1	Призначення	32
13.2	Основні параметри	32
13.3	Багатосмуговий компресор	33
13.4	Різновиди пристроїв динамічної обробки звукового сигналу	33
13.5	Джерела	33
13.6	Джерела, дописувачі та ліцензії тексту і зображень	34
13.6.1	Текст	34
13.6.2	Зображення	34
13.6.3	Ліцензія вмісту	36

Розділ 1

Цифровий звук



Звукова хвиля (сіра), представлена в цифровому вигляді (червона)

Цифровий звук англ. *Digital audio* — спосіб зберігання звуку у формі цифрового сигналу. У ширшому сенсі — цифрові технології обробки, зберігання та відтворення звуку.

Цифровий звуковий сигнал — це двійкові дані, де інформація кодується за допомогою семплів (числових значень форми хвилі на кожен момент часу). Кожен семпл є набором бітів (значень 0 або 1). Зазвичай використовуються 16-бітні або 24-бітні сигнали. Кількість семплів на секунду в цифровому сигналі визначається частотою дискретизації (*sample rate*), яка вимірюється в герцах. Чим вища частота дискретизації — тим вищі частоти може містити звуковий сигнал.

Цифровий звук принципово відрізняється від аналогового. В аналогових звукових системах (наприклад при записі на грамофонні платівки, магнітофонні касети тощо), акустичні коливання повітря перетворюються на аналогічні за формою електричні за допомогою мікрофона та зберігаються, а відтворення звуку відбувається зворотнім шляхом — через підсилювач та конвертацію в акустичні коливання через гучномовець.

Цифровий звук, натомість, перетворює акустичні коливання у двійкові дані (1/0).

1.1 Оцифрування звуку

Перетворення аналогового сигналу в цифровий відбувається з допомогою спеціального пристрою «аналогово-цифрового перетворювача» (наприклад, звукова карта комп'ютера). Окрім того, цифровий сигнал часто генерують з допомогою цифрових синтезаторів. Для програвання цифрового сигналу він знову перетворюється у аналоговий, і передається на гучномовець.

1.1.1 Параметри оцифрування

Аналогово-цифровий перетворювач здійснює заміри амплітуди звукового сигналу з певною частотою дискретизації (*sample rate*) та з певною роздільністю (*bit resolution*). Відповідно основними якісними характеристиками цифрового аудіо є такі:

- **Частота дискретизації**, що визначає частоту, з якою здійснюються заміри амплітуди сигналу і вимірюється у Герцах або кілогерцах (кГц). Згідно з теоремою Котельникова, частота дискретизації повинна бути щонайменше вдвічі більшою за найвищу частоту корисного сигналу. Оскільки людина сприймає звуки частотою до 20 кГц, то для якісного аудіо частота дискретизації повинна бути щонайменше вдвічі вищою за цю частоту.
- **Амплітудна роздільність**, що визначає точність, з якою здійснюються заміри амплітуди сигналу. Амплітудна роздільність вимірюється у кількості бітів, що відводяться для запису значення амплітуди (семплу). Оскільки 1 біт = одному розряду у двійковій системі, ця величина називається **розрядністю**, а кількість можливих значень амплітуди x та кількість розрядів наступним у описується відношенням $x = 2^y$. Тобто, наприклад, 16 бітова розрядність забезпечує запис $2^{16} = 65\,536$ рівнів амплітуди.

Підвищення обох параметрів уможливають якісніше оцифрування звуку, проте збільшують і обсяги

даних. Тому на практиці вживаються різні стандарти дискретизації та розрядності. Наприклад, стандартний Audio CD має частоту дискретизації 44,1 кГц (44,100 семпли в секунду) та 16-бітову розрядність для кожного каналу (стерео). Натомість DVD-Audio може використовувати частоту дискретизації до 192 кГц, а розрядність — до 24 біт.

1.1.2 Антиалайзинг і дитеринг

Якщо записаний сигнал включає частоти, вищі за максимально припустиму граничну частоту (англ. *Nyquist frequency*), при його оцифруванні виникає ефект накладання спектрів частот (англ. *aliasing*). Для запобігання цього ефекту необхідний фільтр захисту накладання спектрів, що обмежує спектр сигналу граничною частотою.

Іншим небажаним ефектом при оцифруванні звуку є шум квантування, що виникає внаслідок округлення значень амплітуди. Шум квантування сприймається як доволі неприємне спотворення на частоті 3-5 кГц. Для зменшення цього ефекту використовується дитеринг, ефект додавання до сигналу псевдовипадкового сигналу. Хоча загальний рівень шумів при дитерингу збільшується, суб'єктивно сприйманий неприємний ефект — зменшується.

1.1.3 Якість звуку

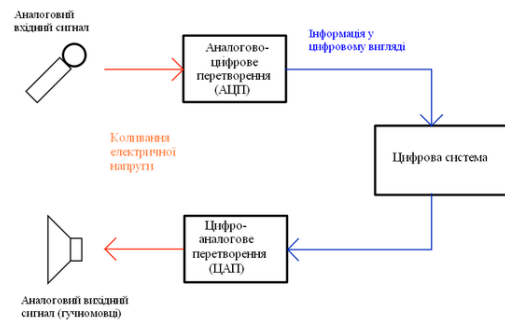
Завданням як аналогової, так і цифрової систем є відтворення звуку з максимальною якістю. Проте існують ряд перешкод для досягнення бажаного результату:

- **Аналоговий рівень власних шумів**, який залежить від ємності та індуктивності, що обмежують смугу пропускання системи, а також опору, що обмежує амплітуду.
- **Цифровий шум квантизації**, який залежить від частоти дискретизації, що обмежує смуги пропускання, а також розрядності, що обмежує динамічний діапазон.

Для досягнення вищої якості запису необхідні високоякісні компоненти, що збільшує загальну вартість обладнання.

1.2 Подальша робота з цифровим звуком

Після оцифрування, оцифрований звуковий сигнал може бути підданий цифровій обробці, що може включати застосування фільтрів або звукових ефектів.



Огляд цифро <-> аналогового перетворення

Далі цифрове аудіо може бути збережене або передане. Зберігання цифрового аудіо здійснюється на компакт-дисках, iPod, жорстких дисках або будь-яких інших цифрових носіях інформації. Для зменшення обсягу файлів звичайно застосовується стиснення звукових даних — у таких форматах як MP3, Ogg Vorbis або AAC.

Останнім етапом роботи з цифровим аудіо є зворотна конвертація в аналоговий формат за допомогою Цифро-аналогового перетворювача (DAC). Як і АЦП, ЦАП працює із заданою частотою модуляції (*sampling rate*) та розрядністю (*bit resolution*), причому частота модуляції може відрізнятися від застосованої при АЦП. В цьому випадку здійснюються процеси передискретизації, підвищення або зниження частоти модуляції.

1.3 Застосування

Експериментальні цифрові звукозаписи існували з 1960-х. Комерційне продукування цифрових записів класичної та джазової музики починається на початку 1970-х, піонерами були японські компанії Denon, BBC та британський лейбл Decca. Перший 16-бітний PCM-запис у США був зроблений в 1976 році. В більшості випадків мікшування звуку не застосовувалось; цифровий стереозапис виготовлявся та використовувався як незмінний майстер-запис для наступного комерційного використання та позначався як «DDD». Перший повністю цифровим (DDD) альбомом попмузики став «*Vop Till You Drop*» гурту Ry Cooder, записаний в 1978.

Цифровий звук виявився корисним для запису, обробки, масового виробництва та поширення аудіо. В сучасності поширення музики через інтернет-магазини залежить від цифрового запису та алгоритмів компресії звуку. Поширення звукової інформації у вигляді аудіофайлів значно дешевше ніж її поширення у вигляді фізичних об'єктів. В той же час, таке поширення дає можливість сумісного використання файлів через реєр-то-реєр мережі, що в багатьох країнах вважається піратством, шкідливим для

бізнесу.

1.4 Див. також

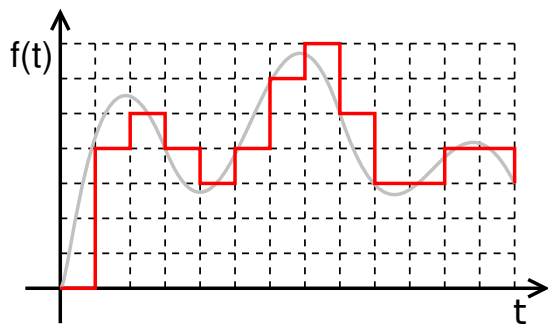
- *DAB*
- Цифрові звукові формати

1.5 Література

- *Р. Петелин, Ю.Петелин.* Музыкальный компьютер. Секреты мастерства СПб: БХВ-Санкт-Петербург, Арлит, 2003. — 686 с.
- *Питер Кирн.* Цифровой звук. ISBN 978-5-8459-1324-1
- *Borwick, John, ed., 1994: Sound Recording Practice* (Oxford: Oxford University Press)
- *Ifeachor, Emmanuel C., and Jervis, Barrie W., 2002: Digital Signal Processing: A Practical Approach* (Harlow, England: Pearson Education Limited)
- *Rabiner, Lawrence R., and Gold, Bernard, 1975: Theory and Application of Digital Signal Processing* (Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.)
- *Watkinson, John, 1994: The Art of Digital Audio*(Oxford: Focal Press)

Розділ 2

Цифровий сигнал



Оцифрований аналоговий сигнал

Цифровий сигнал — дискретний сигнал з певним значенням інформативного параметра, яке визначається у цифровій формі. Цифрові сигнали є цифровим зображенням дискретного сигналу, який часто відображається шляхом квантування аналогового сигналу.

В комп'ютерах та інших цифрових системах, цифровий сигнал є хвилиною, що переключається між двома рівнями напруги (0 та 1). У більшості комп'ютерних програм цифровий сигнал зображається у вигляді двійкових чисел і тому точність квантизації вимірюється у бітах. Так, наприклад, 4-бітова система забезпечить підтримку $2^4 = 16$ дискретних значень, 7-бітова — $2^7 = 128$, 16-бітова — $2^{16} = 65536$ дискретних значень і т. д.

Цифрові технології отримали широке розповсюдження у 1990-ті роки і включають у себе різноманітні медіа пристрої. Сучасні телекомунікації та побутова електроніка працює майже виключно на цифрових технологіях.

2.1 Переваги цифрового сигналу

Перевагами цифрового сигналу над аналоговими є^[1]:

- більша захищеність від дії шумів, наводок і перешкод;

- невеликі відхилення від дозволених значень ніяк не викривляє цифровий сигнал, так як завжди існують зони допустимих відхилень;
- дозволяє складнішу і багатоступеневу обробку
- більш довге зберігання без втрат
- якісніша передача
- цифрові пристрої легше проектувати, відлагоджувати. Їхня поведінка більш точно прогнозується та розраховується.

2.2 Недоліки цифрового сигналу

Цифровий сигнал^[1] передає інформацію кількома (переважно двома) своїми рівнями і зміною цих рівнів, а аналоговий більш ємний, оскільки несе інформацію кожним поточним своїм значенням. Крім того, цифровий сигнал потребує перебування в певному рівні деякий період часу, інакше його неможливо буде розпізнати. Тому цифрові пристрої працюють повільніше за аналогові і швидкість передачі та обробки інформації аналоговими пристроями завжди може бути більша. Крім того в природі всі сигнали є аналоговими, для їх перетворення необхідно використовувати спеціальну апаратуру (аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі).

2.3 Посилання

[1] Лекція 1: Базові поняття цифрової електроніки// Intuit.ru (рос.)

2.4 Див. також

- Аналоговий сигнал

Розділ 3

Семпл

Семпл (англ. *sample*) — відрізок аудіо-інформації, вирізаний або записаний з якого-небудь існуючого джерела — наприклад, звук акустичного музичного інструменту, звук техногенного чи природного походження, звук, вирізаний з наявної аудіокомпозиції чи відеофільму тощо. Семпли використовують для створення нового звучання або створення впізнаваних елементів композиції.

Пристрій для запису, редагування та відтворення семплів називається семплером. Дієслівна форма терміну «семпл» — семплувати — означає робити запис семплу.

3.1 Види семплів

Записаний семпл може бути редагованим, відтвореним, або відтвореним продовжено (т.зв. «луп»). До типів семплів відносяться:

- **Лупи (*Loops*)**. Партії барабанів багатьох сучасних записів в реальності є множиною коротких семплів ударів. Існує багато бібліотек таких семплів, вони ліцензовані таким чином, що користувач може використовувати їх безкоштовно. Такі бібліотеки можуть бути завантажені в семплера. Лупи можуть використовуватися не тільки в партії барабанів. В деяких композиціях використовуються остинато, що створюється, як лупи інших музичних інструментів.
- **Семпли музичних інструментів**. Іноді семпл являє собою фразу, зіграну на акустичному інструменті. Семплери здатні відтворити таку музичну фразу від будь-якої ноти. Такі семпли використовуються в багатьох семплах. Існують професійні бібліотеки такого роду семплів, які записуються в спеціалізованих студіях, для чого запрошуються музиканти-інструменталісти високого гатунку.
- **Ресемпловані звукові доріжки**, створені на робочій станції. Для збереження поліфонії, в деяких випадках можна записати декілька звукових доріжок (напр. доріжки фортепіано, струн-

них, та голосу) як єдиний семпл. Це дозволяє вивільнити додаткові ресурси інструменту для генерації додаткових звукових елементів.

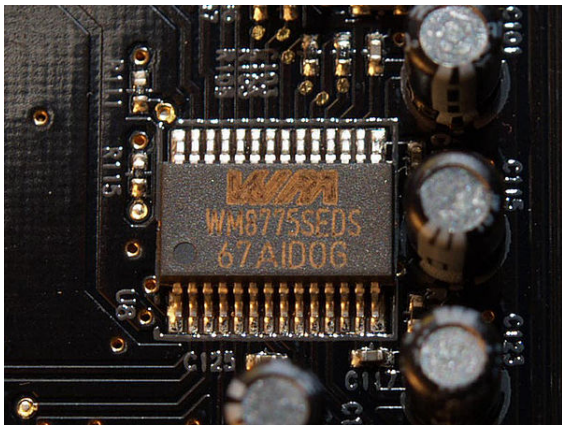
- **Семпли записів**. В ряді музичних напрямків поширеним прийомом є семплування фрази з відомого запису і використання її як елементу композиції.
- **Семпли вимовленого слова** взяті з кіно, ТВ, та інших немусичних медіа, звичайно застосовувані для гумористичного ефекту або ефекту середовища.
- **Звуки, немусичні** в традиційному розумінні — ані мелодичні, ані перкусивні — однак корисні своїм особливим тембром або емоційним наповненням. Найпоширеніші приклади — сирени, клаксони, постріл рушниць, спів птахів тощо

3.2 Посилання

<http://www.djone.ru/school/368/>

Розділ 4

Аналого-цифровий перетворювач



4-х каналний стерео мультимплексний АЦП WM8775SEDS виготовлений Wolfson Microelectronics і розміщений на звуковій карті Sound Blaster X-Fi.

Аналого-цифровий перетворювач, АЦП (англ. *Analog-to-digital converter, ADC*) — пристрій, що перетворює вхідний аналоговий сигнал в дискретний код (цифровий сигнал), який кількісно характеризує амплітуду вхідного сигналу. Зворотне перетворення здійснюється за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП).

Як правило, АЦП — електронний пристрій, що перетворює електричну напругу в двійковий цифровий код. Проте, деякі неелектронні пристрої, такі як перетворювач кут-код, слід також відносити до АЦП.

4.1 Розрядність

Розрядність АЦП характеризує кількість дискретних значень, які перетворювач може видати на виході. Вимірюється в бітах. Наприклад, АЦП, здатний видати 256 дискретних значень (0..255), має розрядність 8 бітів, оскільки

$$2^8 = 256$$

Розрядність може бути також визначена в величинах вхідного сигналу і виражена, наприклад, в вольтях.

Розрядність за напругою дорівнює напрузі, що відповідає максимальному вихідному коду, який ділиться на кількість вихідних дискретних значень. Наприклад:

- Приклад 1
 - Діапазон вхідних значень = від 0 до 10 вольт
 - Розрядність АЦП 12 бітів: $2^{12} = 4096$ рівнів квантування
 - Розрядність за напругою: $(10-0)/4096 = 0.00244$ вольт = 2.44 мВ
- Приклад 2
 - Діапазон вхідних значень = від -10 до +10 вольт
 - Розрядність АЦП 14 бітів: $2^{14} = 16384$ рівнів квантування
 - Розрядність за напругою: $(10-(-10))/16384 = 20/16384 = 0.00122$ вольт = 1.22 мВ

На практиці розрядність АЦП обмежена співвідношенням сигнал/шум вхідного сигналу. При великій інтенсивності шумів на вході АЦП розрізнення сусідніх рівнів вхідного сигналу стає неможливим, тобто погіршується розрядність. При цьому реальний досяжний дозвіл описується ефективною кількістю розрядів (effective number of bits — ENOB), яка менше, ніж реальна розрядність АЦП. При перетворенні сильно зашумленого сигналу молодші біти вихідного коду практично непридатні, оскільки містять шум. Для досягнення заявленої розрядності співвідношення С/Ш вхідного сигналу повинне бути приблизно 6 дБ на кожен біт розрядності.

4.2 Типи перетворення

4.2.1 Лінійні АЦП

Більшість АЦП вважаються лінійними, хоча аналого-цифрове перетворення по суті є нелінійним процесом (оскільки операція перетворення безперервного сигналу в дискретний — операція необоротна і, отже, нелінійна). Термін *лінійний* стосовно АЦП означає, що діапазон вхідних значень, що відображається на вихідне цифрове значення, зв'язаний за лінійним законом з цим вихідним значенням, тобто вихідне значення k досягається при діапазоні вхідних значень від

$$m(k + b)$$

до

$$m(k + 1 + b)$$

де m і b — деякі константи. Константа b , як правило, має значення 0 або -0.5 . Якщо $b = 0$, АЦП називають *mid-rise*, якщо ж $b = -0.5$, то АЦП називають *mid-tread*.

4.2.2 Нелінійні АЦП

Якби густина ймовірності амплітуди вхідного сигналу мала рівномірний розподіл, те співвідношення сигнал/шум (стосовно шуму квантування) було б максимально можливим. З цієї причини зазвичай перед квантуванням за амплітудою сигнал пропускають через безінерційний перетворювач, передавальна функція якого повторює функцію розподілу самого сигналу. Це покращує достовірність передачі сигналу, оскільки найважливіші області амплітуди сигналу квантуються з кращою розрядністю. Відповідно, при цифро-аналоговому перетворенні потрібно буде обробити сигнал функцією, зворотною функції розподілу початкового сигналу.

Це той же принцип, що і використовуваний в компандерах, які застосовуються у магнітофонах і різних комунікаційних системах, він направлений на максимізацію ентропії.

Наприклад, голосовий сигнал має лапласовий розподіл амплітуди. Це означає, що близько нуля, амплітуда несе більше інформації, ніж в області з більшою амплітудою. З цієї причини логарифмічні АЦП часто застосовуються в системах передачі голосу для збільшення динамічного діапазону значень, що передаються без зміни якості передачі сигналу в області малих амплітуд.

8-бітові логарифмічні АЦП з μ -законом або μ -законом забезпечують широкий динамічний діапазон і мають високий дозвіл в найкритичнішому діапазоні малих амплітуд; лінійний АЦП з подібною якістю передачі повинен був би мати розрядність близько 12 біт.

4.3 Точність

Є декілька джерел похибки АЦП. Похибки квантування і (вважаючи, що АЦП повинен бути *лінійним*) нелінійності властиві будь-якому аналого-цифровому перетворенню. Крім того, існують так звані *апертурні помилки* які є наслідком джитера (англ. *jitter*) тактового генератора, вони виявляються при перетворенні сигналу в цілому (а не одного відліку).

Ці похибки вимірюються в одиницях, званих *МЗР* — молодший значущий розряд. У приведеному вище прикладі 8-бітового АЦП помилка в 1 МЗР становить $1/256$ від повного діапазону сигналу, тобто 0.4 %.

Похибка повної шкали - відносна різниця між реальним і ідеальним значеннями межі шкали перетворення (FSO, англ. *Full-Span Output*) при відсутності зміщення нуля. Ця похибка є мультиплікативною складовою повної похибки. Іноді вказується відповідним числом МЗР.

Похибка зсуву нуля - значення $U_{вх}$, коли вхідний код ЦАП дорівнює нулю. Є адитивною складовою повної похибки^[1].

4.3.1 Похибки квантування

Похибки квантування є наслідком обмеженої розрядності АЦП. Цей недолік не може бути усунений при жодному типі аналого-цифрового перетворення. Абсолютна величина помилки квантування при кожному відліку знаходиться в межах від нуля до половини МЗР.

Як правило, амплітуда вхідного сигналу значно більша, ніж МЗР. В цьому випадку помилка квантування не корельована з сигналом і має рівномірний розподіл. Її середньоквадратичне значення збігається з середньоквадратичним відхиленням розподілу, який дорівнює $\frac{1}{\sqrt{12}} \text{LSB} \approx 0.289 \text{ LSB}$. У випадку 8-бітового АЦП це складе 0.113 % від повного діапазону сигналу.

4.3.2 Нелінійність

Усім АЦП властиві помилки, пов'язані з нелінійністю, які є наслідком фізичної недосконалості АЦП. Це призводить до того, що передавальна характеристика (у вказаному вище сенсі) відрізняється від лінійної (точніше від *бажаної* функції, оскільки вона не обов'язково лінійна). Помилки можуть бути зменшені шляхом калібрування.

Важливим параметром, що описує нелінійність, є *інтегральна нелінійність* (INL) і *диференціальна нелінійність* (DNL).

4.3.3 Апертурна похибка

Припустимо ми оцифруємо синусоїдальний сигнал $x(t) = A \sin 2\pi f_0 t$. В ідеальному випадку відліки беруться через рівні проміжки часу. Проте, в реальності час моменту узяття відліку схильний до флуктуацій внаслідок тремтіння фронту синхросигналу (*clock jitter*). Вважаючи, що невизначеність моменту часу взяття відліку порядку Δt , отримуємо, що помилка, обумовлена цим явищем, може бути оцінена як

- $E_{ap} \leq |x'(t)\Delta t| \leq 2A\pi f_0 \Delta t$

Легко бачити, що помилка відносно невелика на низьких частотах, проте на великих частотах вона може істотно зрости. Ефект апертурної похибки може бути проігнорований, якщо її величина порівняно невелика в порівнянні з помилкою квантування. Таким чином, можна встановити такі вимоги до тремтіння фронту сигналу синхронізації:

- $\Delta t < \frac{1}{2^q \pi f_0}$

де q — розрядність АЦП.

З цієї таблиці можна зробити висновок про доцільність застосування АЦП певної розрядності з урахуванням обмежень, що накладаються тремтінням фронту синхронізації (*clock jitter*). Наприклад, безглуздо використовувати прецизійний 24-бітовий АЦП для запису звуку, якщо в система розподілу синхросигналу не в змозі забезпечити ультрамалої невизначеності.

4.4 Частота дискретизації

Аналоговий сигнал є неперервною функцією часу, в АЦП він перетворюється в послідовність цифрових значень. Отже, необхідно визначити частоту вибірки цифрових значень з аналогового сигналу. Частота, з якою проводяться вибірки, отримала назву *частота дискретизації* (*Sampling rate*) АЦП.

Безперервно змінний сигнал з обмеженою спектральною смугою піддається **оцифровці** (тобто значення сигналу вимірюються через інтервал часу T — період дискретизації) і початковий сигнал може бути *точно* відновлений з дискретних в часі значень шляхом інтерполяції. Точність відновлення обмежена помилкою квантування. Проте, відповідно до теореми Котельникова-Шеннона точне відновлення можливе тільки якщо частота дискретизації вища, ніж подвоєна на максимальна частота в спектрі сигналу.

Оскільки реальні АЦП не можуть провести аналого-цифрове перетворення миттєво, вхідне аналогове значення повинне утримуватися постійним принаймні від початку до кінця процесу перетворення (цей інтервал часу називають *час перетворення*). Це завдання вирішується шляхом використання спеціальної схеми на вході АЦП — пристрій вибірки-зберігання (ПВЗ, рос. *УВХ*). ПВЗ, як правило, зберігає вхідну напругу в конденсаторі, сполученому з входом через аналоговий ключ: при замиканні ключа відбувається вибірка вхідного сигналу (конденсатор заряджає до вхідної напруги), при розмиканні — зберігання. Багато АЦП, виконані у вигляді інтегральних мікросхем містять вбудовані ПВЗ.

4.5 Накладення спектрів (Аліасинг)

Всі ЦАП працюють шляхом вибірки вхідних значень через фіксовані інтервали часу. Отже, вихідні значення є неповною картиною того, що подається на вхід. Дивлячись на вихідні значення, немає ніякої можливості встановити, як поведився вхідний сигнал між вибірками. Якщо відомо, що вхідний сигнал змінюється достатньо повільно відносно частоти дискретизації, то можна припустити, що проміжні значення між вибірками знаходяться десь між значеннями цих вибірок. Якщо ж вхідний сигнал змінюється швидко, то ніяких припущень про проміжні значення вхідного сигналу зробити не можна, а отже, неможливо однозначно відновити форму початкового сигналу.

Якщо послідовність цифрових значень, що видаються АЦП, де-небудь перетвориться назад в аналогову форму цифро-аналоговим перетворювачем, бажано, щоб отриманий аналоговий сигнал був максимально точною копією початкового сигналу. Якщо вхідний сигнал змінюється **швидше**, ніж робляться його відліки, то точне відновлення сигналу неможливе, і на виході ЦАП буде присутній помилковий сигнал. Помилкові частотні компоненти сигналу (які відсутні у спектрі початкового сигналу) отримали назву *alias* (помилкова частота, побічна низькочастотна складова). Частота помилкових компонент залежить від різниці між частотою сигналу і частотою дискретизації. Наприклад, синусоїдальний сигнал з частотою 2 кГц, дискретизований з частотою 1.5 кГц був би відтворений як синусоїда з частотою 500 Гц. Ця проблема отримала назву *накладення частот* (*aliasing*).

Для запобігання накладання спектрів сигнал, що подається на вхід АЦП, повинен бути пропущений через фільтр низьких частот для придушення спектральних компонент, частота яких перевищує половину частоти дискретизації. Цей фільтр отримав назву *anti-aliasing* (антіаліасинговий) фільтр, його застосування надзвичайно важливо при побудові ре-

альних АЦП.

Хоча накладання спектрів в більшості випадків є небажаним ефектом, його можна використовувати на благо. Наприклад, завдяки цьому ефекту можна обійтися без перетворення частоти вниз при оцифруванні вузькосмугового високочастотного сигналу (див. змішувач (радіотехніка)).

4.6 Підмішування псевдовипадкового сигналу (dither)

Деякі характеристики АЦП можуть бути покращені шляхом використання методики підмішування псевдовипадкового сигналу (т.зв. дитеринг, англ. *dither*). Вона полягає в додаванні до вхідного аналогового сигналу випадкового шуму (білий шум) невеликої амплітуди. Амплітуда шуму, як правило, вибирається на рівні половини МЗР. Ефект від такого додавання полягає в тому, що стан МЗР випадковим чином переходить між станами 0 і 1 при дуже малому вхідному сигналі (без додавання шуму МЗР був би в стані 0 або 1 довготривало). Для сигналу з шумом, що підмішується, замість простого округлення сигналу до найближчого розряду відбувається випадкове округлення вгору або вниз, причому середній час, протягом якого сигнал закруглений до того або іншого рівня залежить від того, наскільки сигнал близький до цього рівня.

Таким чином, оцифрований сигнал містить інформацію про амплітуду сигналу з роздільною здатністю краще, ніж МЗР, тобто відбувається збільшення ефективної розрядності АЦП. Негативною стороною методики є збільшення шуму у вихідному сигналі. Фактично, помилка квантування **розмивається** по декількох сусідніх відліках. Такий підхід є бажанішим, ніж просте округлення до найближчого дискретного рівня. В результаті використання методики підмішування псевдовипадкового сигналу ми маємо точніше відтворення сигналу в часі. Малі зміни сигналу можуть бути відновлені з псевдовипадкових стрибків МЗР шляхом фільтрації. Крім того, якщо шум детермінований (амплітуда шуму, що додається, точно відома у будь-який момент часу), то його можна відняти з оцифрованого сигналу, заздалегідь збільшивши його розрядність, тим самим майже повністю позбавитися від доданого шуму.

Звукові сигнали дуже малих амплітуд, оцифровані без псевдовипадкового сигналу, сприймаються на слух дуже спотвореними і неприємними. При підмішуваному псевдовипадковому сигналі дійсний рівень сигналу представлений середнім значенням декількох послідовних відліків.

Дуже схожий процес, також званий *dither* або дифузія помилок, застосовується для представлення півтонів

зображень в комп'ютерній графіці при малій кількості бітів на піксел. При цьому зображення стає зашумленим, але візуально сприймається реалістичніше, ніж те саме зображення отримане простим квантуванням.

4.7 Передискретизація

Як правило, сигнали оцифровуються з мінімально необхідною частотою дискретизації з міркувань економії, при цьому шум квантування є білим, тобто його спектральна щільність потужності рівномірно розподілена по всій смузі. Якщо ж оцифрувати сигнал з частотою дискретизації, набагато більшою, ніж за теоремою Котельникова-Шеннона, а потім піддати цифровій фільтрації для придушення спектру поза частотною смугою початкового сигналу, то співвідношення сигнал/шум, буде кращим, ніж при використанні всієї смуги. Таким чином можна досягти ефективної точності більшої, ніж розрядність АЦП.

Передискретизація також може бути використана для пом'якшення вимог до крутизни переходу від смуги пропускання до смуги придушення антиаліасингового фільтру. Для цього сигнал оцифровують, наприклад, на удвічі більшій частоті, потім проводять цифрову фільтрацію, придушуючи частотні компоненти поза смугою початкового сигналу, і, нарешті, знижують частоту дискретизації шляхом децимації.

4.8 Типи АЦП

Нижче перераховані основні способи побудови електронних АЦП:

- **АЦП прямого перетворення** або **паралельний АЦП** містить по одному компаратору на кожен дискретний рівень вхідного сигналу. У будь-який момент часу тільки компаратори, відповідні рівням нижче за рівень вхідного сигналу, видадуть на своєму виході сигнал перевищення. Сигнали зі всіх компараторів поступають на логічну схему яка видає цифровий код, залежний від того, скільки компараторів показали перевищення. Паралельні АЦП дуже швидкі, але зазвичай мають розрядність не більше 8 бітів (256 компараторів), оскільки, мають велику і дорожу схему. АЦП цього типу мають дуже великий розмір кристала мікросхеми, високу вхідну ємність, і можуть видавати короткочасні помилки на виході. Часто використовуються для відео або інших високочастотних сигналів.
- **АЦП послідовного наближення** або **АЦП з порозрядним врівноваженням** містить ком-

паратор, допоміжний ЦАП і регістр послідовного наближення. АЦП перетворить аналоговий сигнал в цифровий за N кроків, де N — розрядність АЦП. На кожному кроці визначається по одному біту шуканого цифрового значення, починаючи від СЗР і закінчуючи МЗР. Послідовність дій за визначенням чергового біта полягає в наступному. На допоміжному ЦАП виставляється аналогове значення, утворене з бітів, вже визначених на попередніх кроках; біт, який повинен бути визначений на цьому кроці, виставляється в 1, молодші біти встановлені в 0. Отримане на допоміжному ЦАП значення порівнюється з вхідним аналоговим значенням. Якщо значення вхідного сигналу більше значення на допоміжному ЦАП, то визначуваний біт отримує значення 1, інакше 0. Таким чином, визначення підсумкового цифрового значення нагадує двійковий пошук. АЦП цього типу володіють одночасно високою швидкістю і хорошою розрядністю.

- **АЦП диференціального кодування** (англ. *delta-encoded ADC*) містять реверсивний лічильник, код з якого поступає на допоміжний ЦАП. Вхідний сигнал і сигнал з допоміжного ЦАП порівнюються на компараторі. Завдяки негативному зворотному зв'язку з компаратора на лічильник код на лічильнику постійно міняється так, щоб сигнал з допоміжного ЦАП якомога менше відрізнявся від вхідного сигналу. Після деякого часу різниця сигналів стає менше, ніж МЗР, при цьому код лічильника прочитується як вихідний цифровий сигнал АЦП. АЦП цього типу мають дуже великий діапазон вхідного сигналу і високу розрядність, але час перетворення залежить від вхідного сигналу, хоч і обмежено зверху. У гіршому разі час перетворення рівний $T_{max} = (2^q) / f_c$, де q — розрядність АЦП, f_c — частота тактового генератора лічильника. АЦП диференціального кодування зазвичай є хорошим вибором для оцифровки сигналів реального світу, оскільки більшість сигналів у фізичних системах не схильні до стрибкоподібних змін. У деяких АЦП використовується комбінований підхід: диференційне кодування і послідовне наближення; це особливо добре працює у випадках, коли відомо, що високочастотні компоненти в сигналі відносно невеликі.
- **АЦП порівняння з зубчастим сигналом** містять генератор напруги зубчастої форми, компаратор і лічильник часу. Зубчастий сигнал лінійно наростає до деякого рівня, потім швидко спадає до нуля. У момент початку наростання запускається лічильник часу. Коли пилоподібний сигнал досягає рівня вхідного сигналу, компаратор спрацьовує і зупиняє лічильник;

значення прочитується з лічильника і подається на вихід АЦП. Цей тип АЦП є найпростішим за структурою і містить мінімальне число елементів. Разом з тим прості АЦП цього типу володіють досить низькою точністю і чутливі до температури і інших зовнішніх параметрів. Для збільшення точності генератор пилоподібного сигналу може бути побудований на основі лічильника і допоміжного ЦАП, проте така структура не має жодних переваг в порівнянні з АЦП послідовного наближення і АЦП диференціального кодування.

- **АЦП з урівноваженням заряду** (до них відносяться АЦП з двостадійною інтеграцією, АЦП з багатостадійною інтеграцією і деякі інші) містять генератор стабільного струму, компаратор, інтегратор струму, тактовий генератор і лічильник. Перетворення відбувається в два етапи (*двостадійне інтегрування*). На першому етапі значення вхідного сигналу перетвориться в струм, який подається на інтегратор струму (заряд інтегратора спочатку рівний нулю); цей процес триває протягом часу TN , де T — період тактового генератора, N — константа (велике ціле число, визначає час накопичення заряду). Коли накопичення заряду закінчене, вхід інтегратора відключається від входу АЦП і підключається до генератора стабільного струму. Полярність генератора така, що він зменшує заряд, накопичений в інтеграторі. Процес розряду триває до тих пір, поки заряд в інтеграторі не зменшиться до нуля. Час розряду вимірюється шляхом рахунку тактових імпульсів від моменту початку розряду до досягнення нульового заряду на інтеграторі. Порахована кількість тактових імпульсів і буде вихідним кодом АЦП. Можна показати, що кількість імпульсів n , пораховане за час розряду, дорівнює: $n = U_{вх} N (RI_0)^{-1}$, де $U_{вх}$ — вхідна напруга АЦП, N — число імпульсів, етапу накопичення (визначено вище), R — опір резистора, що перетворює вхідну напругу в струм, I_0 — струм генератора стабільного струму. Таким чином, потенційно нестабільні параметри системи (перш за все, місткість конденсатора інтегратора) не входять в підсумковий вираз. Це є наслідком *двостадійності* процесу: похибки, введені на першому і другому етапах взаємно віднімаються. Не пред'являються жорсткі вимоги навіть до довготривалої стабільності тактового генератора і напруги зсуву компаратора. Фактично, принцип двостадійної інтеграції дозволяє перетворити співвідношення двох аналогових величин (вхідного і зразкового струму) у співвідношення числових кодів (n і N в термінах, визначених вище) практично без внесення додаткових помилок. Типова розрядність АЦП цього типу становить від 10 до 18 двійкових розрядів. Додатковою перевагою є можливість побудови

перетворювачів, нечутливих до періодичних завад (наприклад, завад від мережевого живлення) завдяки точній інтеграції вхідного сигналу за фіксований часовий інтервал. Недоліком даного типу АЦП є низька швидкість перетворення. АЦП з урівноваженням заряду використовуються у вимірювальних приладах високої точності.

- **Конвеєрні АЦП** використовують два або більше кроків-піддіапазонів. На першому кроці проводиться грубе перетворення (з низькою розрядністю). Далі визначається різниця між вхідним сигналом і аналоговим сигналом, відповідним результату грубого перетворення (з допоміжного ЦАП, на який подається грубий код). На другому кроці знайдена різниця подається перетворенню, і отриманий код об'єднується з грубим кодом для набуття повного вигідного цифрового значення. АЦП цього типу швидкі, мають високу розрядність і невеликий розмір корпусу.
- **Сигма-Дельта АЦП** (звані також Дельта-Сигма АЦП) проводять аналого-цифрове перетворення з частотою дискретизації, що у багато разів перевищує потрібну і шляхом фільтрації залишає в сигналі тільки потрібну спектральну смугу.

Неелектронні АЦП зазвичай будуються на тих же принципах.

Комерційні АЦП

Як правило, випускаються у вигляді мікросхем.

Для більшості АЦП розрядність становить від 6 до 24 біт, частота дискретизації до 1 МГц. Мега- і гігагерцові АЦП також доступні (лютий 2002). Мегагерцові АЦП потрібні в цифрових відеокамерах, пристроях відеозахоплення і цифрових ТБ тюнерах для оцифровки повного відеосигналу. Комерційні АЦП зазвичай мають вихідну помилку від ± 0.5 до ± 1.5 МЗР.

Найбільш дорога частина мікросхем — це виводи, оскільки вони вимушують робити корпус мікросхеми більше, і кожен вивід повинен бути приєднаним до кристала. Для зменшення кількості виводів часто АЦП, що працюють на низьких частотах дискретизації, мають послідовний інтерфейс.

Часто АЦП мають декілька аналогових входів, підключених усередині мікросхеми до єдиного АЦП через аналоговий мультиплексор. Різні моделі АЦП можуть включати пристрої вибірки-зберігання, інструментальні підсилювачі або високовольний диференціальний вхід і інші подібні ланцюги.

4.9 Застосування АЦП в звукозаписі

Див. також: Цифровий звук

АЦП вбудовані у велику частину сучасної звукозаписної апаратури, оскільки обробка звуку робиться, як правило, на комп'ютерах; навіть при використанні аналогового запису АЦП необхідний для переведення сигналу в РСМ-потік, який буде записаний на компакт-диск.

Сучасні АЦП, використовувані в звукозаписі, можуть працювати на частотах дискретизації до 192 кгц. Поширена думка, що даний показник надмірний і використовується з чисто маркетингових міркувань (про це свідчить теорема Котельникова-Шеннона). Можна сказати, що звуковий аналоговий сигнал не містить стільки інформації, скільки може бути збережене в цифровому сигналі при такій високій частоті дискретизації, і часто для Hi-fi аудіотехніки використовується частота дискретизації 44.1 кгц (стандартна для CD) або 48 кгц (типова для представлення звуку в комп'ютерах). Проте, широка смуга спрощує і здешевлює реалізацію антиаліасингових фільтрів.

Аналого-цифрові перетворювачі для звукозапису мають широкий діапазон цін — від \$100 до \$10,000 і вище за двохканальний АЦП.

4.10 Інші застосування

Аналого-цифрове перетворення використовується скрізь, де потрібно обробляти, зберігати або передавати сигнал в цифровій формі. Швидкі відео АЦП використовуються, наприклад, в ТБ-тюнерах. Повільні вбудовані 8, 10, 12, або 16-бітові АЦП часто входять до складу мікроконтролерів. Дуже швидкі АЦП необхідні у цифрових осцилографах.

4.11 Див. також

- ЦАП
- Квантування (обробка сигналів)

4.12 Примітки

[1] Статические параметры

4.13 Посилання

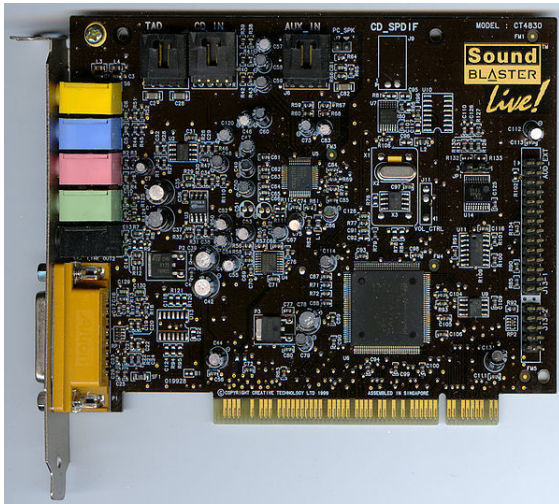
- Вольфганг Райс Wolfgang Reis, WBC GmbH Журнал *Компоненты и технологии*, № 3 2005 Будова і принципи дії аналого-цифрових перетворювачів різних типів.
- Learning by Simulations A simulation showing the effects of sampling frequency and ADC resolution.
- «Understanding analog to digital converter specifications» article by Len Staller 2005-02-24.
- «Understanding Flash ADCs» Tutorial on how flash analog-to-digital converters (ADCs) work.

4.14 Література

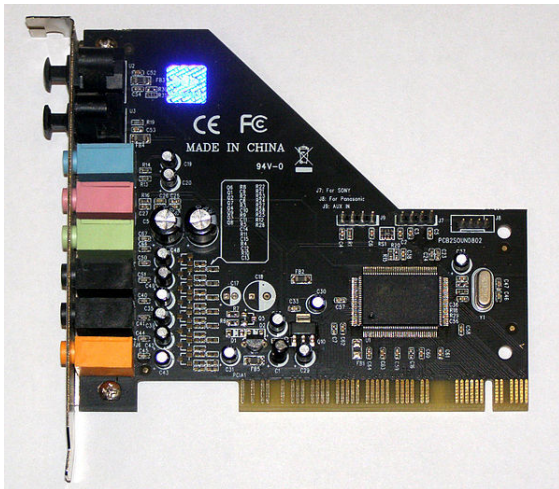
- Хоровиц П., Хилл У. *Искусство схемотехники*: В 3-х томах: Т. 2. Пер. с англ.— 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Мир, 1993.—371 с., ил. ISBN 5-03-002338-0.
- S. Norsworthy, R. Schreier, G. Temes, *Delta-Sigma Data Converters*. ISBN 0-7803-1045-4.
- Mingliang Liu, *Demystifying Switched-Capacitor Circuits*. ISBN 0-7506-7907-7.
- Behzad Razavi, *Principles of Data Conversion System Design*. ISBN 0-7803-1093-4.
- David Johns, Ken Martin, *Analog Integrated Circuit Design*. ISBN 0-471-14448-7.
- Phillip E. Allen, Douglas R. Holberg, *CMOS Analog Circuit Design*. ISBN 0-19-511644-5.

Розділ 5

Звукова плата



Звукова карта Creative Labs Sound Blaster Live!



Дешева звукова плата C-Media з оптичним входом та виходом.

Звукова́ плата́ (також звукова карта, аудіоплата, аудіокарта, звуковий контролер, аудіоконтролер) (англ. *sound card*) — електротехнічний пристрій, що дозволяє працювати зі звуком на комп'ютері (виводити на акустичні системи та записувати в комп'ютері).

5.1 Історичний нарис

Оскільки IBM-PC проектувалася не як мультимедійна машина, а інструмент для рішення наукових і ділових завдань, звукова плата на ньому не була передбачена. Єдиний звук, що видавав комп'ютер — був звук вбудованого динаміка, що повідомляв про несправності.

В 1988 році фірма Creative Labs випустила пристрій *Creative Music System* (C/MS, пізніше також продавалася за назвою *Game Blaster*) на основі двох мікросхем звукогенератора Philips SAA 1099, кожна з яких могла відтворювати по 6 голосів одночасно. Приблизно в цей же час, AdLib випустила свою карту, однойменну з назвою фірми, на основі мікросхеми YM3812 фірми Yamaha. Цей синтезатор для генерації звуку використав принцип частотної модуляції (FM, frequency modulation).

Незабаром Creative випустили карту на тій же мікросхемі, повністю сумісну з AdLib, але переважаючи її за якістю звучання. Ця плата стала основою стандарту Sound Blaster, який у 1991 році Microsoft включила в стандарт Multimedia PC (MPC). Однак ці карти мали ряд недоліків: штучне звучання інструментів і більші обсяги файлів, одна хвилина якості AUDI-CD займала порядку 10 Мегабайт.

Зі зростанням потужності процесорів, поступово стала відмирати шина ISA, на якій працювали всі попередні звукові карти, багато виробників перемкнулися на випуск карти для шини PCI. В 1998 році компанія Creative знову робить широкий крок у розвитку звуку й випуском карти Sound Blaster Live! на аудіопроесорі EMU10K, установлює новий стандарт для IBM PC, що залишається, в удосконаленому вигляді, й донині.

5.2 Різновиди звукових плат

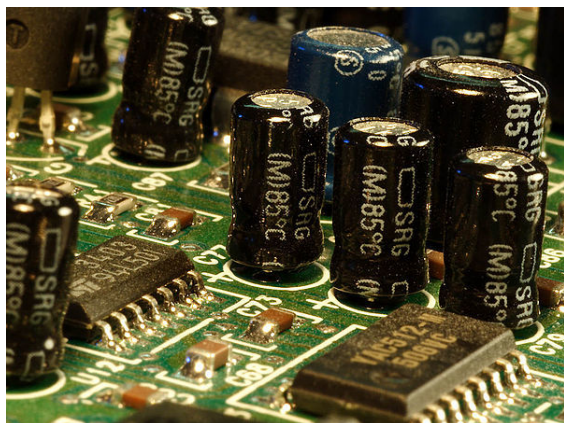
У наш час звукові карти бувають убудованими в материнську плату (*інтегровані звукові карти*), як окремі плати розширення і як зовнішні пристрої.

Інтегровані плати вбудовуються в материнську плату комп'ютера, при цьому усі входи і виходи і кодеки припаєні до материнської плати, а обробку бере на себе центральний процесор.

Плати розширення встановлюються у роз'єм шини PCI, як правило вони відтворюють звук якісніше ніж інтегровані, проте для професійної роботи їх можливості обмежені.

Зовнішні звукові плати виникли з потребою надійного екранування сигналу від сторонніх перешкод, до того ж професійні плати мають велику кількість роз'ємів, розрахованих на підключення професійних студійних пристроїв. Зовнішні плати підключають через інтерфейси USB або FireWire, причому останній більшої пропускної здатності інтерфейсу.

5.3 Будова звукової карти



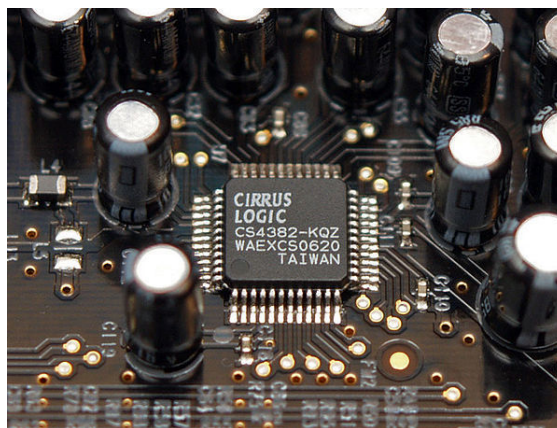
Звукова карта PCB великим планом, показано конденсатори, резистори та YAC512 двоканальний 16-бітний ЦАП

Типова звукова карта включає звукову мікросхему, що містить цифро-аналоговий перетворювач, який конвертує записаний або згенерований цифровий звук в аналоговий формат. Вихідний сигнал поступає на підсилювач, навушники або зовнішній пристрій, використовуючи стандартні роз'єми, звичайно TRS або RCA. Якщо кількість чи розміри роз'ємів завеликі для задньої панелі комп'ютера, вони можуть бути винесені окремо. Більш просунуті звукові карти містять декілька мікросхем для досягнення вищої якості або поліпшення виконання різних операцій одночасно, наприклад для запису музики в реальному часі важливо, щоб синтез звуків відбувався з мінімальною затримкою процесора.

Відтворення звуку звичайно здійснюється за допомогою багатоканальних ЦАП, що підтримують одночасне відтворення звуків різної висоти й гучності, а також звукові ефекти в реальному часі. Багатоканальне

відтворення звуку також використовується для синтезу звуку за допомогою цифрових банків інструментів (англ. *Wavetable*), що займає невелику кількість постійної або флеш-пам'яті і містить звукові семпли MIDI-інструментів. Інший шлях синтезу звуків полягає у використанні «аудіо-кодеків», цей шлях вимагає відповідного програмного забезпечення, сумісності з MIDI, та багатоканальної емуляції.

5.3.1 Звукові канали та поліфонія



8-канальний ЦАП Cirrus Logic CS4382 заснований на базі Sound Blaster X-Fi Fatal1ty

Важливою характеристикою звукової плати є **поліфонія**, що означає можливість одночасного і незалежного відтворення принаймні кількох звуків, та кількість незалежних звукових каналів. Останнє означає кількість *електричних* аудіо-виходів, відсилаючи до конфігурації динаміків (наприклад таких 2.0 (стерео), 2.1 (стерео і саб-вуфер), 5.1 тощо). Іноді (напр. в MIDI-технологіях) обидва англійські терміни — «voices» («англ. *голоси*») та «channels» («англ. *канали*») означають глибину поліфонії.

5.4 Зовнішній інтерфейс

Більшість звукових карт мають роз'єми для вхідних (*input*) та вихідних (*output*) сигналів. Нерідко звукові карти оснащуються двома вхідними роз'ємами. Один з них, *line-in*, призначений для підключення пристроїв високого рівню сигналу, таких як, наприклад магнітофон. Цифрова карта оцифровує цей сигнал і зберігає на жорсткому диску комп'ютера (пізніше збережений сигнал можна обробляти). Інший вхідний роз'єм, **microphone**, призначений для підключення мікрофону або подібного пристрою низького рівня сигналу. Професійні звукові плати оснащуються кількома вхідними роз'ємами, що дозволяє здійснювати багатоканальний запис звуку.

Крім того, звукові карти містять так званий «ігровий порт», початково призначений для підключення джойстиків, проте пізніше він знайшов своє призначення для підключення MIDI-клавіатур, цифровий вихід S/PDIF та інші роз'єми. При цьому кожне з гнізд роз'ємів маркують певним кольором згідно з такою таблицею:

5.5 Див. також

- AC97
- High Definition Audio

5.6 Література

- Лоянич А. А. Компьютер в помощь музыканту. М., 2006 ISBN 5-477-00249-2
- Белунцов В. Железо ПК, 8-е видання. «ДЕСС», 2005 ISBN 5-9605-0016-7

5.7 Посилання

- Установлення та видалення звукової плати
- Jumper settings for Sound/Multimedia Card
- A History of PC Sound Hardware
- Soundcards Museum
- How Stuff Works — Sound Cards

Розділ 6

Синтезатор



Синтеза́тор — електронний пристрій, який синтезує звук за допомогою одного чи кількох електричних генераторів коливань. Необхідне звучання досягається регулюванням властивостей електричного сигналу (в аналогових синтезаторах), або параметрів центрального процесора (у цифрових синтезаторах). Остаточно електричні коливання перетворюються у звук через гучномовці (або, при потребі, навушники).

Синтезаторами називають як окремі пристрої, що є основою електронних музичних інструментів, так і властиво електронні музичні інструменти. Синтезатор, виконаний у вигляді корпуса із клавіатурою, називається **клавішним синтезатором**. Синтезатор, виконаний у вигляді корпуса без клавіатури, називається **звуковим модулем** і управляється від зовнішніх MIDI-пристроїв (MIDI-клавіатури, секвенсера, або іншого синтезатора). Клавішний синтезатор, облаштований вбудованим секвенсером, називають **робочою станцією**.

6.1 Історичний нарис

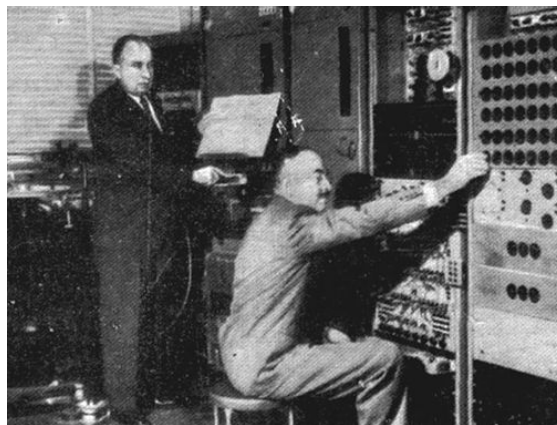
Першим пристроєм, що синтезував звук за допомогою електричних генераторів вважається винайдений 1876 року Еліша Греєм **музичний телеграф**. Греї випадково відкрив можливість контролювання звуку автоколивним електромагнітним контуром, і розробив для акустичних цілей осцилятор. Ним же був створений простий динамік, що у пізніших моделях являв собою віброуючу у магнітному полі діафрагму, що перетворювала електромагнітні коливання у звук.

Наступними відомими електронними інструментами початку 20 століття були такі інструменти, як

телармоніум, терменвокс, хвилі Мартено та орган Хаммонда, проте ці інструменти, зазвичай, не відносять до класу синтезаторів — на відміну від сконструйованих пізніше інструментів RCA Mark I, АНС, перелічені інструменти передбачають лише гру у живому часі, тоді як пізніші інструменти дозволяли записувати звук.

6.1.1 Перші програмні синтезатори

У 1949 року вийшла робота «A Mathematical Theory of Music», що приділяла увагу математичним аспектам музичної теорії та композиції. Вона надихнула інженерів електронників Лабораторії «RCA Princeton Laboratories» — Гаррі Олсена і Герберта Белара до розробки машини, яка б генерувала популярну музику, за їх задумом машина мала поєднувати в собі електронного композитора і генератора звуків. Спроба створити електронного композитора зазнала поразки — як через недостатню потужність комп'ютера та хиби́ність самої теорії композиції.



Синтезатор RCA Mark II, 1956

Проте робота над електронним звуковим генератором була плідною і привела до створення синтезаторів RCA Mark I (1955) та RCA Mark II (1959). Ці моделі вважаються першими програмованими інструментами, RCA Mark II мав 24 лампових осциляторів, програми синтезу звуку записувалися

на перфострічках, що зчитувалися спеціальним пристроєм синтезатора. З цими синтезаторами працювали композитори, зосереджені у центрі «*Columbia Princeton Electronic Music Centre*», було випущено кілька платівок із перекладеннями класичних творів на цих синтезаторах. Проте інструмент не міг претендувати на комерційне використання через надзвичайно великі габарити і високу вартість (175 000 \$).

1959 року інструмент, подібний до RCA Mark II був сконструйований в Німеччині фірмою Siemens інженерами Г.Клайном та В.Шаффом. Цей інструмент мав 20 лампових осциляторів і був призначений для озвучування рекламних роликів продукції Siemens. Як і RCA Mark II, синтезатор зчитував програми звукового синтезу з перфострічок, серед інших композиторів з цим інструментом працював Мауріціо Кагель.

Паралельно, 1958 року в СРСР Євгенієм Мурзіним був сконструйований синтезатор АНС, що використовував фотооптичний метод синтезу звуку, а «партитури» для цього інструменту являли собою прозорі лінії на покритій невисихаючою фарбою дошці. Е 1960-х роках для цього інструменту творили А. Шнітке та С.Губайдуліна, Е.Артем'єв використав інструмент у ряді фільмів А. Тарковського.

6.1.2 Початок комерціалізації

Комерційне використання синтезатора бере свій початок 1963 року, коли американський винахідник Роберт Муг представив на з'їзді Товариства звукоінженерів свій перший синтезатор, який за яким пізніше закріпилося ім'я свого винахідника. Сам Муг так визначив термін синтезатор:

Цей інструмент коштував значно дешевше (мінімальний комплект — \$1500), керувався клавіатурою, що дозволяло використовувати його на естраді, а не лише для студійної роботи (як попередні синтезатори). Інструмент був монофонічним і використовував адитивний метод синтезу. Серед перших музикантів, що використали цей інструмент були гурти The Monkees (альбом *Pieces, Aquarius, Capricorn & Jones Ltd.*, 1967^{[2][3]}), The Doors (альбом *Strange Days*^[4], 1967), Grateful Dead, The Rolling Stones і The Beatles. З часом Роберт Муг розробив кілька моделей синтезаторів, зокрема поліфонічну модель Полімуг (*Polymoog*) та мініатюризовану — Мінімуг (*Minimoog*).

Фірма Роберта Муга не протрималася на ринку й десяти років. Її продукти були витіснені дешевшими й досконалішими інструментами великих електронних фірм, таких як Roland, ARP, Yamaha та інші. Проте назва Муг (*Moog*) назавжди залишилась в електронній музиці. Навіть у сучасній практиці, що характе-

ризується домінуванням цифрових технологій, багато музикантів використовують інструменти випущені Робертом Мугом. Зокрема Клаус Шульц і Піт Намлок з 1994 працюють над циклом платівок *The Dark Side Of The Moog*, 11-й альбом якого вийшов 2008 року.



Minimoog свого часу був найпопулярнішим синтезатором



синтезатор Fairlight CMI, 1979 року випуску

В першій половині 1970-х років синтезатор став провідним інструментом рок-музики на рівні з електрогітарою. У ці роки випуском синтезаторів займалися вже кілька фірм:

- ARP Instruments — використовували: Тоні Бенкс, Гербі Генкок, Джо Завінул, Dereche Mode, Alphaville
- Akai
- Electronic Music Studios — використовували: «Pink Floyd», Hawkwind, Roxy Music
- E-mu
- Fairlight — використовували: Пітер Гебріел, Жан-Мішель Жарр
- Korg
- Moog — використовували: «Yes», Emerson, Lake and Palmer, Тоні Бенкс
- New England Digital

- Oberheim — використовували: Rammstein
- Roland corporation — використовували: Rammstein
- Sequential Circuits — використовували: Eurythmics, Depeche Mode, Duran Duran
- Synclavier — використовували: Стіві Вандер
- Yamaha — використовували: Стів Райх, Kraftwerk, Браян Іно, Енія, Deep Purple, U2, Vangelis.

6.1.3 Поліфонічні синтезатори

Ранні синтезатори були виключно монофонічними (одноголосними), проте швидкий поступ мініатюризації електронних пристроїв і розвиток мікросхем сприяли мініатюризації синтезаторів та опануванню поліфонії. Синтезатор Polymoog, що випускався у 1975—1980 роках уже мав 4-голосну поліфонію, проте були недостатньо гнучкими в управлінні. Більш просунуті поліфонічні синтезатори ведуть свій відлік з моделей Yamaha GX1, CS-50, CS-60 та Yamaha CS-80 а також Oberheim Four-Voice. Щоправда і ці інструменти ще були досить складними і дорогими.

Іншим важливим нововведенням стала цифрова пам'ять, що дозволяла швидко переключати звуки на синтезаторах. Це стало можливим із появою мікропроцесорів на початку 1970-х, щоправда початково мікропроцесори були дуже дорогими і складні для використання і лише у 1977 році з'явилися перші синтезатори, що використовували мікропроцесор як контролер — це були синтезатори Prophet-5 виробництва Sequential Circuits.^[5] З цією моделлю музиканти вперше отримали можливість зберігати налаштування параметрів синтезу у пам'яті інструменту і завантажувати їх з пам'яті простим натисканням кнопки. Prophet-5 також відрізнявся від попередників компактністю. Іншою відомою моделлю поліфонічного синтезатора стала Coupland Digital Music Synthesizer, щоправда не мала комерційного успіху.

6.1.4 Радянські синтезатори

В СРСР використання закордонних технологій обмежувалося, що позначилося і на синтезаторах. Тому радянські синтезатори хоча й орієнтувалися на західні моделі, проте їх розвиток мав свою специфіку, розвиваючись за умов майже монопольної економіки, вони використовуючи деталі і плати, що вироблялися виключно на вітчизняних заводах. В результаті радянські синтезатори утворили унікальний спектр продукції.

Серед моделей 1970-х — 1980-х років — інструмент з 8-голосною поліфонією «Полівокс», монофонічні

інструменти, «Ритм-2», «Естрадін — 230», «Аліса — 1377», драм-машини «Лель», «Марш УДС», «Полігон», вокодер «Крок» та інші. Серед виробників синтезаторів — Житомирський завод «Електроизмеритель» (нині — ВАТ «Електровимірювач»), де випускались синтезатори «Естрадін-230»^[6].

Звуки деяких синтезаторів пізніше були емульовані VST-інструментами з однойменними назвами, розробленими російською компанією SyncerSoft. За спогадами музикантів, більшість радянських синтезаторів мали досить великий рівень шумів, іноді нестабільно тримали тон, потенціометри й інші регульовані резистори досить часто виходили з ладу.

З розпадом СРСР, радянські заводи припинили випуск подібних інструментів, що було пов'язано з причинами економічного характеру.

6.1.5 Поява цифрових синтезаторів

Появу першого цифрового синтезатора датують 1971 роком — це був синтезатор Con Brio ADS (Advanced Digital Synthesizer). Він був винятково дорогим і був використаний для звукових ефектів у телепрограмі Sci-Fi Star Trek. 1973 року з'явився гібридний аналогово-цифровий Maplin Synthesiser.

Першим цілком доступним, повністю цифровим синтезатором, що спирався на мікропроцесори був Synclavier, що був устаткований двома клавіатурами (комп'ютерного та фортепіанного типів) та жорстким диском. Цей синтезатор використали такі музиканти, як Гербі Генкок, Пітер Гебріел, музиканти гурту Duran Duran та інші.^[7]

Іншими інструментами, що продавалися відносно успішно, були також австралійський Fairlight СМІ (1979), американський E-mu Emulator (1981) і німецький PPG Wave (1981). Слід відзначити також цифрове піаніно Kurzweil K250, випущене 1983 року, що спиралося на технологію цифрового семплювання.

Спочатку цифрові синтезатори були сприйняті музикантами недовіркою, згодом однак почали домінувати на ринку. Вони не поступалися можливостями у генеруванні звуку аналоговим. Крім того цифрові синтезатори устатковувалися банками різноманітних звуків. Цифрові синтезатори були меншими, а згодом стали й дешевшими, у 1980-х роках вже доступними досить широкому загалу. Провідними виробниками цифрових синтезаторів стали японські фірми Yamaha і Casio, Yamaha вперше впровадили і операторний синтез (FM-синтез) звуку у моделях GS-1 та GS-2. Особливої популярністю користувалася модель Yamaha DX7, випущена 1983 року, лише упродовж трьох років було продано 200 000 екземплярів.^[8]

Цифрові синтезатори однак не витіснили аналогові і

до сьогодення використовуються обидва різновиди. Широко розповсюджені також і можливі комбінації аналогових і цифрових технологій, зокрема ряд цифрових синтезаторів модулюють процеси аналогового синтезу.

6.2 Типи синтезу звуку

Синтезатори використовують різні типи синтезу звуку, серед яких слід зазначити такі:

- **Підсумовувальний (адитивний) синтез**, в якому використовується принцип суперпозиції (накладення) декількох хвиль простої (звичайно синусоїдної) форми з різними частотами й амплітудами. За аналогією з електроорганами ці хвилі називаються регістрами й позначаються, як 16' (тон октавою нижче взятого), 8' (вихідний тон), 4' (тон октавою вище взятого) і т.д. (цифра являє собою довжину труби відповідного регістра органа у футах). У чистому вигляді зустрічається у електроорганах (Hammond, Farfisa) та їх цифрових емуляторів (Korg CX-3, Roland VK-8 і т.д.). Звучання інструмента тим багатше, чим більша кількість регістрів використана в конструкції.
- **Віднімальний (субтрактивний) синтез**, у якому вихідна хвиля довільної форми змінює тембральне забарвлення при проходженні через різноманітні фільтри, обвідні генератори, процесори ефектів і т.д. Як підмножина даний тип синтезу широко застосовується практично у всіх сучасних моделях синтезаторів.
- **Операторний (FM, від англ. Frequency Modulation) синтез**, у якому відбувається взаємодія (частотна модуляція й підсумовування) декількох хвиль простої форми. Кожна хвиля разом зі своїми характеристиками називається оператором, певна конфігурація операторів становить алгоритм. Чим більша кількість операторів використана в конструкції синтезатора, тим багатше стає звучання інструмента. Наприклад, популярний донині синтезатор Yamaha DX-7 (1984 року випуску) має 6 операторів, для конфігурування яких служить 36 різних алгоритмів.
- **Фізичний синтез (метод фізичного модулювання)**, у якому за рахунок використання потужних процесорів виробляється моделювання реальних фізичних процесів, що протікають у музичних інструментах того або іншого типу. Наприклад, для дерев'яних духових, таких як флейта, параметрами будуть довжина, профіль і діаметр труби, швидкість повітряного потоку,

матеріал корпусу; для струнних інструментів — розмір корпусу, матеріал, довжина й натяжіння струн і т. д. Фізичний синтез використовують такі інструменти, як *Yamaha VL-1*, *Korg OASYS*, *Alesis Fusion* і т. д.

- **Табличний** (англ. *Wavetable*, PCM) синтез, у якому звук створюється за рахунок відтворення записаних раніше у пам'ять інструмента фрагментів звучання реальних музичних інструментів (семплів і мультисемплів). Найвідоміший синтезатор у цій групі — *Waldorf Wave*, цей синтезатор вважається також найдорожчим синтезатором у світі.

Крім того синтезатори можуть використовувати **комбіновані види синтезу**, в яких використовується та чи інша комбінація з перелічених вище видів. Більшість сучасних інструментів створюється саме на основі гібридного синтезу, завдяки його потужним засобам варіювання тембру в самих широких межах.

6.2.1 Напрямки синтезу звуку

Існують два основні напрямки синтезу звуків.

- Імітація акустичних музичних інструментів. Відносно легшою вважається задача синтезування звуку духових інструментів, складнішою — струнних інструментів.
- Винайдення невідомих раніше звуків.

6.3 Різновиди синтезаторів

Залежно від використовуваної технології синтезатори можна розділити на дві основні категорії — аналогові та цифрові, хоча можливе також і поєднання цих технологій, реалізоване у віртуально-аналогових синтезаторах. В свою чергу цифрові синтезатори можуть реалізовуватися як апаратно (у вигляді інструментів) так і віртуально (програмним забезпеченням комп'ютера). За призначенням можна виділити професійні синтезатори, та інтерактивні, призначені для освітніх та розважальних цілей.

Аналогові синтезатори

Аналогові синтезатори реалізують адитивний і субтрактивний типи синтезу. Головна особливість даної категорії полягає в тому, що звук генерується й обробляється за допомогою реальних електричних ланцюгів. Часто з'єднання різних модулів синтезу виробляється за допомогою спеціальних кабелів — patch-проводів, звідси «патч» — загальноприйнята

назва певного тембру синтезатора серед музикантів. Основні переваги аналогових синтезаторів полягають у тому, що всі зміни характеру звучання в часі, наприклад рух частоти зрізання фільтра, відбуваються винятково плавно (безупинно). Недоліком вважається високий рівень шуму. До найвідоміших, використовуваних у наш час аналогових синтезаторів відносяться: *Mimimoog Voyager*, *LittlePhatty*, *Prophet '08*, *Andromeda A6*.

Віртуально-аналогові синтезатори

Віртуально-аналогові синтезатори являють собою гібрид між аналоговим синтезатором і цифровим, несучи у своєму корпусі програмну складову. Найвідоміші серед них: *Access Virus TI*, *Nord Lead 2x*, *Nord Modular*, *DSI Poly Evolver*

Цифрові синтезатори

Цифрові синтезатори реалізуються як апаратно, так і віртуально.

Апаратні цифрові синтезатори по суті являють собою вузькоспеціалізовані комп'ютери, що реалізують різноманітні типи синтезу. Для створення й відтворення вихідних хвильових форм, модифікації звучання обвідними фільтру, використовуються цифрові пристрої на базі одного центрального процесора й декількох співпроцесорів. Найпередовіші моделі сучасних цифрових синтезаторів (*Korg OASYS*, *Roland Fantom*, *Yamaha Tyros*), подібно персональним комп'ютерам, дозволяють оновлювати операційну систему, містять сторінкові меню, вбудовані довідкові файли, скрінсейвери й т.д.

Віртуальні синтезатори є різновидом цифрових синтезаторів, однак вони являють собою особливий вид програмного забезпечення. Для створення звуку використовуються центральний процесор й оперативна пам'ять персонального комп'ютера, а для виводу звуку на відтворюючій пристрій використовується звукова карта ПК. Віртуальні синтезатори можуть являти собою як самостійні (*stand-alone*) програмні продукти, так і плагіни (*plug-ins*) певного формату (*VST*, *DXi*, *RTAS*, *TDM*, *LADSPA* і т. д.), призначені для запуску усередині програми-хоста, звичайно багатоканального зведення (*Cubase VST*, *Sakewalk Sonar*, *Logic Pro*, *Pro Tools*, *Ardour* і т. д.). Завдяки високій доступності популярність віртуальних синтезаторів зростає, чільне місце серед віртуальних синтезаторів займають численні моделі апаратних інструментів (наприклад, *Native Pro53* — емулятор синтезатора *Prophet*, *Novation V-Station* — емулятор синтезатора *Novation K-Station*, *Korg Legacy* — емулятори синтезаторів *Korg M1*, *Wavestation*, *PolySix*, *MS20* і т. д.).

Інтерактивні, або домашні синтезатори також явля-

ють собою різновид цифрових синтезаторів, призначену спеціально для домашнього й салонного аматорського музикування, а також для інтерактивного навчання музиці. Звичайно в таких синтезаторах відсутні засоби для розвиненого редагування звуку, включаючи регулятори реального часу. Акцент робиться на реалістичній імітації різноманітних оркестрових інструментів і використанні функції автоматичного акомпанементу. У цьому випадку для того, щоб зіграти який-небудь музичний твір, виконавцеві не потрібно програмувати тембри або записувати партії в секвенсер — досить вибрати готовий тембр для мелодії й стиль для автоаккомпанементу. Безумовно, керування подібними синтезаторами істотно простіше, ніж у професійних виконавських моделей і найчастіше доступно навіть дитині. Багато синтезаторів подібного типу містять у собі навчальні ігри типу «вгадай ноту» або «вгадай акорд», збірники готових музичних творів для прослуховування й розучування, функцію караоке з виводом на екран тексту пісні і т. д. До даної категорії синтезаторів відносяться сімейства *Yamaha PSR*, *Casio CTK/WK*, *Roland E/VA/EXR* і т. д.

6.4 Керування роботою синтезатора

Керування сучасного професійного синтезатора являє собою складний процес, пов'язаний з контролем декількох сотень, або й тисяч, різноманітних параметрів, що визначають ті чи інші аспекти звучання. Деякі параметри можуть управлятися в реальному часі за допомогою обертових регуляторів, коліс, педалей, кнопок; інші налаштовуються лише попередньо. Набір регульованих параметрів та їх інтерфейс можуть відрізнятися у різних моделях, проте серед загальних можна виділити такі:

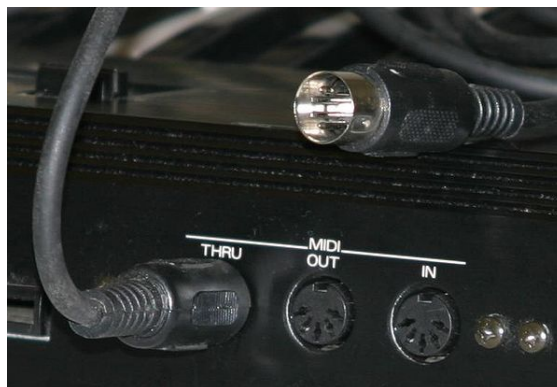
- **Клавіатурний і динамічний трекінг** використовується для відстеження позиції й швидкості натискання на клавішу. Наприклад, при русі від нижніх клавіш до верхніх, тембр може плавно змінитися від віолончелі до флейти, причому при більше енергійному натисканні на клавіші до загального звучання можна додати, наприклад, тембр литавр.
- **ADSR-обвідна** (англ. *ADSR-envelope*) застосовується для неперіодичної зміни певного параметра звучання (найчастіше — гучності та частоти зрізу фільтра). Обвідна являє собою ламану лінію, що складається із секцій атаки (*Attack*), спаду (*Decay*), затримки (*Sustain*) і затухання (*Release*), хоча в окремих моделях можуть зустрічатися спрощені (*ADR*) або ускладнені, багатостадійні обвідні.

- **Фільтр** (англ. *filter*) служить для вирізання із загального спектра сигналу певної смуги частот. Найчастіше фільтр також обладнується резонансом, що дозволяє різко підсилити смугу частот на границі зрізання. Зміна характеристик фільтра за допомогою регуляторів реального часу, клавіатурного трекінгу й/або обвідних дозволяє одержувати винятково різноманітні варіанти звучання.
- **Рінг-модулятор** (англ. *ring-modulator*) дозволяє модулювати вихідний сигнал іншим сигналом з певної (фіксованої або плаваючої) частотою, за рахунок чого відбувається істотне збагачення гармоніками. Назва «Ring» (англ. «дзвонити») пов'язана з тим, що даний вузол часто служить для одержання «дзвоноподібного» звучання інструмента.
- **Генератор низьких частот** (англ. “*Low Frequency Oscillator*”, *LFO*) застосовується для періодичної зміни певних параметрів звучання, наприклад висоти, гучності, частоти зрізання фільтра й т.д. У випадку циклічної зміни гучності створюється ефект тремоло, зміна висоти створює ефект вібрато, періодична зміна частоти зрізання фільтра називається ефектом «вау-вау» (англ. «wah-wah»).
- **Обробка ефектами** використовується для остаточного доведення звучання. Сучасні синтезатори звичайно оснащуються досить великою кількістю ефектів-процесорів (наприклад, *Korg Karma* — 8 процесорів, *Roland Fantom* — 6 процесорів і т. д.). Процесори працюють незалежно один від одного, хоча при бажанні їх можна поєднувати в послідовні ланцюги. Сучасні ефекти-процесори реалізують велику кількість просторових (реверберація, затримка, луна), модуляційних (фленжер, хорус, фейзер) і інших (дисторшн, звуковисотний зсув) алгоритмів ефектів. Найбільш просунуті моделі мають засоби для керування параметрами ефектів від регуляторів реального часу, обвідних, *LFO* і т. д.

6.5 MIDI-контроль

Переважає більшість сучасних синтезаторів є MIDI-сумісними інструментами. Історично поява технології і стандарту MIDI була пов'язана з тим, що по мірі того, як синтезатори ставали все більш доступними і все більш різноманітними, музиканти вважали за потрібне мати велику колекцію синтезаторів, і почер-

гово використовувати їх у студії та концертних виступах. В результаті інструменталісти-«клавішники» вибудовували на концертних естрадах цілі «стіни» з кількох або навіть кільканадцяти клавішних синтезаторів, розміщуючись посередині між ними. Звичайно, така ситуація виглядала все менш практичною і врешті окреслила необхідність стандартизації інструментів з тим, щоб клавішник міг керувати кількома пристроями з однієї клавіатури.



Роз'єми MIDI на задній панелі синтезатора та MIDI-кабель

Технологія MIDI дозволяє передачу інформації з одного пристрою або інструменту іншому у режимі реального часу. Ця інформація включає власне повідомлення про взяття нот з клавіатури, команди вибору інструменту (тобто приготованих у пам'яті інструменту програм синтезу звуку), контролю різних нюансів виконання, таких як гучність чи панорамування та інші повідомлення. Для забезпечення роботи з MIDI, на синтезаторах встановлюються роз'єми MIDI-IN (через який поступає MIDI-інформація з інших пристроїв), MIDI-OUT (через який пристрій передає MIDI-інформацію про дії, які на ньому виконуються до інших пристроїв), та MIDI-THRU (для передачі інформації, отриманої через MIDI-IN в незмінному вигляді).

Цифровий стандарт MIDI для апаратних синтезаторів було введено 1983 року, а з 1991 року MIDI став стандартом і для програмного забезпечення. Можливість управляти з MIDI-клавіатури одночасно кількома синтезаторами (при відповідній комутації цих пристроїв за допомогою MIDI-кабелів) привела до появи синтезаторів без MIDI-клавіатури, або т.зв. «звукових модулів». Як правило, такі звукові модулі виготовляються з урахуванням можливості закріплювати їх на спеціальних стійки — реках (звідси ще одна назва — «рекові» синтезатори). Сучасні синтезатори можна підключити і до звукової карти комп'ютера за допомогою MIDI-кабелю, який підключається до відповідних роз'ємів синтезатора та звукової карти.

6.6 Синтезатори у музичній практиці

Початком популярності синтезаторів у музичній культурі можна вважати альбом Венді Карлоса *Switched-On Bach* 1968 року, в якому на синтезаторі Моуга були виконані відомі інструментальні твори Баха. Цей альбом став першим із електронних альбомів, що попав до категорії «платинових».^[9] Упродовж кінця 1960-х синтезатор Моуга був використаний у сотнях записів. В ті часи цей інструмент породив своєрідну субкультуру пошуків нових звуків і привертання уваги до них. Ця тенденція певним чином торкнулася і радянської культури — неповторний тембр синтезатору АНС можна почути у ряді фільмів А.Тарковського, звуки синтезаторів неодмінно присутні у радянських кінострічках фантастичної тематики.

У 1980-х роках синтезатори викликали до життя цілу низку музичних напрямків, існування яких без цього інструменту було б неможливе. Одним із перших став синті-поп, який на початку 1980-х років вивів гурти *Depeche Mode*, *Visage* та *OMD* на вершини британських чартів. Згодом звучання синтезаторів визначило усе багатоманіття електронної музики, від клубної танцювальної музики до експериментальних напрямків. У 1980-х роках більшість рок- і поп-гуртів використовували синтезатори. У висліді електронний звук втратив риси прогресивності й став тривіальним.

У сучасності синтезатор має практично будь-який гурт поп- чи рок-музики. Музиканта, що грає на синтезаторі у таких колективах зазвичай називають **клавішником**. Роль клавішного синтезатору в поп- чи рок- ансамблі може бути різноманітною — синтезатор може використовуватись для підтримки гармонічної педалі (в цьому разі властиве використання м'якого, приглушеного тембру), для окремих звукових ефектів, та як сольний інструмент. У концертній практиці також можливе використання синтезатора як заміни того чи іншого акустичного інструменту чи кількох інструментів, як правило така заміна пов'язана з труднощами організаційного чи бюджетного характеру.

6.7 Література

- *Стецюк І.* Історія електронних синтезаторів // «Музыка» 2006, № 4

Російською мовою

- *Термен Л.С.* Физика и музыкальное искусство. – М., 1966
- *Волошин В.И., Федорчук Л.И.* Электромзыкальные инструменты – «Энергия», М., 1971

- *Гаранян Г.* Аранжировка для эстрадных инструментальных и вокально-инструментальных ансамблей. М., «Музыка», 1986

Англійською мовою

- Forrester, Peter: *The A-Z of analogue synthesizers*. Susurreal Publishing, Crediton 1998, ISBN 0-952-43772-4 (Detaillierte Darstellung aller bis 1998 jemals hergestellter analoger Synthesizer und Orgeln in zwei Bänden; englisch).
- Steinbrink, Holger: *Synthesizer Programming – Sounddesign Tipps & Tricks*. audio-workshop Fachskript, Waldorf 2005 (http://www.audio-fabrik.de/shop/product_info.php?info=p28_Synthesizer-Programming-Fachskript.html).
- Gorges, Peter: *Synthesizer Programming*. 3. unveränderte Auflage. Wizoobooks, Bremen 2004, 2007, 2008, ISBN 978-3-934903-64-7.
- Schmitz, Reinhard (2005). *Analog Synthesis*, ISBN 978-3-934903-01-2.
- Shapiro, Peter (2000). *Modulations: A History of Electronic Music: Throbbing Words on Sound*, ISBN 1-891024-06-X.
- Strange, Allen: *electronic music : systems, techniques and controls*. 2. Auflage. Wm.C.Brown, 1972, ISBN 0-697-03602-2.

Німецькою мовою

- *Moogulator: Hands On Synthsound, Vol.1: Videolernkurs zur Synthesizerprogrammierung*. 1. Auflage. DVD Lernkurs, Fürth 2008, ISBN 978-3-9811987-8-2 (<http://www.dvd-lernkurs.de/audiobearbeitung/synthsound.html>).
- Uwe G. Hoenig: *Workshop Synthesizer: KLANGERZEUGUNG FÜR MUSIKER*. 3. Auflage. PPV Medien, Bergkirchen 2006, ISBN 3-932-27527-6.
- Bernd Enders: *Die Klangwelt des Musiksynthesizers: Die Einführung in die Funktions- und Wirkungsweise eines Modulsynthesizers*. Franzis-Verlag, München 1985, ISBN 3-772-37761-0.
- André Ruschkowski: *Soundscape: Elektronische KLANGERZEUGUNG und Musik*. 1. Auflage. Lied der Zeit, Berlin 1990, ISBN 3-7332-0058-6.
- Bernardo Egli, Wolfgang Röllin: *Das große Synthi-Buch*. Voggenreiter, Bonn 1984, ISBN 978-3802401343.

6.8 Див. також

Синтезатор частот

6.9 Примітки

- [1] цитовано за
- [2] Moog Out With The Monkees
- [3] allmusic.com
- [4] CLASSIC TRACKS: 'Strange Days'
- [5] Wells, Peter (2004). *A Beginner's Guide to Digital Video*. AVA Books (UK). с. 10. ISBN 2884790373.
- [6] “Эстрадаин” – первый житомирский синтезатор
- [7] 1979 *Fairlight CMI*. Mix Magazine. September 1, 2006.
- [8] Colbeck, Julian (June 1997). *Keyfax The Omnibus Edition*. Hal Leonard Corporation. с. 208. ISBN 0918371082.
- [9] Catchlove, Lucinda (April 1, 2002). *Wendy Carlos (electronic musician)*. Remix Magazine.

6.10 Посилання

- [Хронологія розвитку електронної музики](#)

англійською мовою

- [Vintagesynth](#) — Огляд синтезаторів
- [Progsounds](#) — Огляд синтезаторів
- [Synth Museum](#) — Огляд синтезаторів
- [New sound developers](#) — сайт розробників нових звучань
- [120 years of Electronic Music](#) — синтезатори 1870—1990 років
- [Principles of Sound Synthesis](#) — принципи синтезу, сайт університету Salford University
- [Innovative Synthesis](#) — статті про синтезатори

російською мовою

- [Музей советских синтезаторов](#) — Огляд синтезаторів радянської доби
- [Денис Дубровский. Звуки музыки](#)
- [Электромзыкальные инструменты. Синтезатор](#)
- [Лев Орлов. Синтезаторы и семплы](#)
- [Музыкальный синтезатор](#)

Розділ 7

Частота дискретизації

Частота дискретизації (англ. *sample rate*) — визначає кількість сигналів за секунду (або за іншу одиницю) при перетворенні безперервного сигналу в дискретний сигнал (тобто його дискретизації). Як правило, частота дискретизації вимірюється в герцах (Гц). Поняття частоти дискретизації може бути застосованим лише в тому випадку, коли квантування здійснюється зі сталою періодичністю.

Вибір частоти дискретизації в загальному випадку визначається відомою теоремою Котельникова (теоремою відліків, згідно з якою якщо **безперервний** сигнал $x(t)$ має спектр, обмежений частотою F_{max} , то він може бути однозначно і без втрат відновлений за своїми **дискретними** відліками, узятими з частотою $f_{дискр} = 2 * F_{max}$, або, по-іншому, за відліками, узятими з періодом $T_{дискр} = \frac{1}{2 * F_{max}}$.

7.1 Аудіо

При оцифруванні звукового сигналу під функцією $S(t)$ слід розуміти безперервний аналоговий звуковий сигнал, а під частотою f_{max} — найвищу частоту необхідного звукового діапазону. Якщо необхідно точно відобразити аналоговий сигнал в діапазоні до f_{max} , то відліки повинні слідувати з періодом, принаймні, в два рази меншим, ніж період частоти f_{max} . Іншими словами, частоту дискретизації слід вибирати так, щоб вона була, щонайменше, в два рази вище за максимальну частоту звукового діапазону.

При цьому мінімально можлива частота дискретизації $F_d = 2f_{max}$ називається частотою Найквіста $F_N = 2f_{max}$. На практиці частота дискретизації $F_d = (2, 1 \dots 2, 4)f_{max}$.

Найчастіше необхідна смуга звукових частот обмежується 20...22 кГц, а частота дискретизації при цьому вибирається рівною 44,1 або 48 кГц.

Це обумовлено тим, що між найвищою частотою звукового діапазону F_{max} , і половиною частоти дискретизації $F_d/2$ повинен бути деякий інтервал, в який потрібно помістити зріз амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтру низьких частот (ФНЧ), розташованого на вході блоку аналого-цифрового пере-

творення. Це ФНЧ, який називається антиалайсинг (*antialiasing*) фільтром, потрібний для того, щоб жодна складова спектру вище $F_d/2$ не потрапила на перетворювач.

Застосовувана частота дискретизації звукового сигналу

- 8000 Гц — телефон, достатній для людської мови
- 11025 Гц
- 22050 Гц — радіо
- 32000 Гц — miniDV цифрове відео camcorder, DAT (LP mode)
- 44100 Гц — audio CD, часто застосовується в MPEG-1 аудіо (VCD, SVCD, MP3)
- 47250 Гц — перший світовий комерційний PCM записувач звуку Nippon Columbia (Denon)
- 48000 Гц — цифровий звук, використовуваний в miniDV, digital TV, DVD, DAT, фільмах та професійному аудіо
- 50000 Гц — перші комерційні цифрові записувачи звуку з кінця 70-х з 3M та Soundstream
- 50400 Гц — частота дискретизації, використовувана Mitsubishi X-80 цифровим записувачем звуку
- 96000 or 192,000 Hz — DVD-Audio, деякі LPCM DVD треки, BD-ROM (Blu-ray Disc) аудіо треки, та HD-DVD (High-Definition DVD)
- 2.8224 МГц — SACD, 1-bit sigma-delta modulation знаний як Direct Stream Digital, розробляється Sony та Philips

7.2 Джерела

- Цифровая запись

Розділ 8

Герц

Герц (позначається **Гц**, *Hz*) — одиниця виміру в СІ частоти періодичних процесів (н-д, коливань), назва якої походить від імені німецького фізика Генріха Герца, першовідкривача електромагнітного випромінювання.

Герц — похідна одиниця, що має спеціальну назву й позначення та дорівнює одному коливанню (періоду) на секунду:

$$1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

В герцах вимірюють і тактову частоту процесорів. Зазвичай вона вимірюється в мегагерцах та гігагерцах.

8.1 Кратні і частинні одиниці

8.2 Див. також

- Міжнародна система одиниць (СІ)

Розділ 9

Фільтрація звуку

Фільтрація звуку — процес обробки електричного звукового сигналу частотновибірними пристроями з метою зміни спектрального складу звукового сигналу.

Задачею фільтрації може бути:

- Амплітудно-частотна корекція сигналу (підсилення або послаблення складових спектру звуку).
- Заглушення спектру сигналу або шумів у певній смузі частот.

При фізичній реалізації фільтрів їх виготовляють на основі коливальних ланок, що складаються з котушок індуктивності та конденсаторів, або на основі їхніх аналогів.

Основою фільтрів, реалізованих програмним шляхом є спектральний аналіз. Спектральний аналіз здійснюється, як правило, за допомогою спеціального алгоритму — швидких перетворень Фур'є. Фільтрація зводиться до перемноження спектральних коефіцієнтів на відповідні значення передавальної функції фільтра.

9.1 Види фільтрів

Фільтри характеризуються за допомогою амплітудно-частотної характеристики (АХЧ). Ця характеристика являє собою графік залежності коефіцієнта передачі (амплітуди) $K(f)$ від частоти f . В залежності від розташування смуги пропускання та смуги загорождення на осі частот, відрізняють фільтри:

- нижніх частот, ФНЧ (low pass)
- верхніх частот, ФВЧ (high pass)
- смугові (band pass)
- режекторні (band stop)

Основними характеристиками фільтру є:

- частота зрізу (cut off)
- крутизна зрізу (slope)
- ширина смуги пропускання/загорождення (bandwidth)

Низькочастотний фільтр пропускає через себе низькі частоти та редукує всі частоти, що розташовані вище частоти зрізу фільтру. Високочастотний фільтр пропускає через себе верхні частоти та редукує частоти, що розташовані нижче частоти зрізу фільтру. Смуговий фільтр пропускає певну смугу частот, та заглушає частоти, що розташовані поза смугою. Режекторний фільтр — навпаки, заглушає частотну смугу, пропускаючи частоти, що розташовані поза нею. Частотою зріза фільтра в цих випадках називається центральна частота смуги.

Оскільки реалізація «ідеального» фільтру, з різким переходом від смуги пропускання до смуги загорождення є неможливою, реальний графік залежності вихідної напруги від частоти являє собою криву ліній (див. зображення).

У сучасній аудіотехніці, в тому числі програмних аудіоредакторах використовують системи фільтрів, зокрема еквалайзери, кросовери та ін.

9.2 Література

- Петелин Р., Петелин Ю. — Музыкальный компьютер. Секреты мастерства.
- Белунцов В. — Новейший самоучитель работы на компьютере для музыкантов.
- Дослідження активних фільтрів.
- websound - музичний комп'ютерний журнал (рос.)
- авторський сайт Р. та Ю. Петеліних. (рос.)
- Преобразование звука и спецэффекты. (рос.)

Розділ 10

Цифрова обробка сигналів

Цифрова обробка сигналів (ЦОС — англ. *digital signal processing, DSP*) — перетворення сигналів, представлених у цифровій формі.

10.1 Принципи цифрової обробки сигналів

Будь який безперервний (аналоговий) сигнал $s(t)$ може бути підданий дискретизації по часу і квантуванню по рівню (оцифруванню), тобто представлений в цифровій формі. Якщо частота дискретизації сигналу F_d не менше, ніж подвоєна найвища частота в спектрі сигналу F_{max} (тобто $F_d \geq 2 \cdot F_{max}$), то отриманий дискретний сигнал $s(k)$ буде еквівалентним сигналу $s(t)$ за методом найменших квадратів (МНК) (див.: Теорема Котельникова).

За допомогою математичних алгоритмів $s(k)$ перетвориться в деякий інший сигнал $s_1(k)$, який має необхідні властивості. Процес перетворення сигналів називається фільтрацією, а пристрій, що виконує фільтрацію, називається фільтр. Оскільки значення сигналів надходять з постійною швидкістю F_d , фільтр повинен встигати обробляти поточний сигнал серії до надходження наступного (частіше — до надходження наступних n відліків, де n — затримка фільтра), тобто обробляти сигнал в реальному часі. Для обробки сигналів (фільтрації) в реальному часі застосовують спеціальні обчислювальні пристрої — цифрові сигнальні процесори. Це повністю стосується не тільки безперервних сигналів, але і переривчастих, а також до сигналів, записаних на пристрої зберігання інформації. В останньому випадку швидкість обробки непринципова, так як при повільній обробці дані не будуть втрачені.

Розрізняють методи обробки сигналів у часовій (англ. *time domain*) і в частотній (англ. *frequency domain*) області. Еквівалентність частотно-часових перетворень однозначно визначається через перетворення Фур'є.

Обробка сигналів у часовій області широко використовується в сучасній електронній осцилографії і в

цифрових осцилографах. Для подання сигналів в частотній області використовуються цифрові аналізатори спектра. Для вивчення математичних аспектів обробки сигналів використовуються пакети розширення (найчастіше під ім'ям Signal Processing) систем комп'ютерної математики MATLAB, Mathcad, Mathematica, Maple тощо.

В останні роки при обробці сигналів та зображень широко використовується новий математичний базис подання сигналів з допомогою «коротких сплесків» — вейвлетів. З його допомогою можуть оброблятися нестационарні сигнали, сигнали з розривами та іншими особливостями і сигнали у вигляді пачок.

10.2 Основні застосування

- Лінійна фільтрація — селекція сигналу в частотній області; синтез фільтрів, узгоджених з сигналами; частотне розділення каналів; цифрові перетворювачі Гільберта ($L^n(a, b)$) і диференціатор; коректори характеристик каналів.
- Спектральний аналіз — обробка мовних, звукових, сейсмічних, гідроакустичних сигналів; розпізнавання образів.
- Частотно-часовий аналіз — компресія зображень, гідро — і радіолокація, різноманітні завдання виявлення сигналу.
- Адаптивна фільтрація — обробка мови, зображень, розпізнавання образів, придушення шумів, адаптивні антенні решітки.
- Нелінійна обробка — обчислення кореляцій, медіанна фільтрація; синтез амплітудних, фазових, частотних детекторів, обробка мови, векторне кодування.
- Багатошвидкісна обробка — інтерполяція (збільшення) і децимація (зменшення) частоти дискретизації в багатошвидкісних системах телекомунікації, аудіосистемах.
- Отримання згорток.

10.3 Основні перетворення

Цифрова обробка сигналу в передавачі^[1]

- * Форматування
- * Кодування джерела
- * Шифрування
- * Канальне шифрування
- * Ущільнення
- * Імпульсна модуляція
- * Смугова модуляція
- * Розширення спектра
- * Множинний доступ
- * Передача сигналів

Цифрова обробка сигналу в приймачі^[1]

- * Прийом сигналів
- * Множинний доступ
- * Звуження спектра
- * Демодуляція і дискретизація
- * Детектування
- * Розущільнення
- * Канальне декодування
- * Дешифрування
- * Декодування джерела
- * Форматування

10.4 Див. також

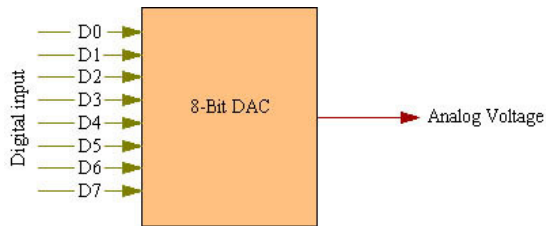
- Сигнал
- Теорема Котельникова
- Перетворення Фур'є
- Обробка зображень
- Цифровий фільтр
- Аудіо-кодек
- Вейвлет

10.5 Посилання

[1] Скляр Б. Цифровий зв'язок. Теоретичні основи і практичне застосування. Пер. з англ. — М.: Видавничий дім «Вільямс», 2003, 1104 с., Стр.33, ISBN 5-8459-0497

Розділ 11

ЦАП

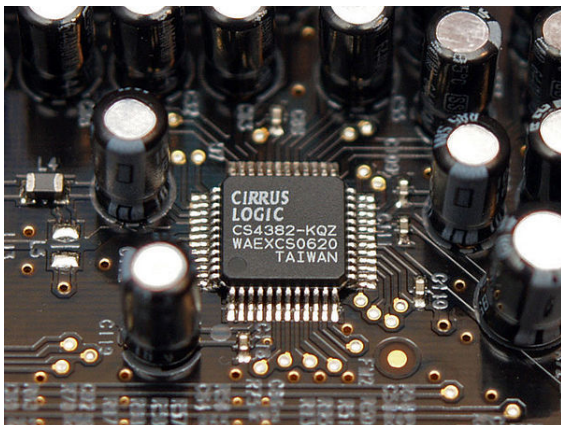


Схематичне зображення 8-бітного ЦАП

технологічними процесами, програвачах CD/DVD, звукових картах ПК.

11.2 Див. також

- АЦП



8-канальний ЦАП Cirrus Logic CS4382 у звуковій карті.

Цифро-аналоговий перетворювач (англ. *DAC*) — пристрій для перетворення цифрового (як правило двійкового) сигналу на аналоговий. Пристрій, що виконує зворотну дію називається аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП)

Як правило ЦАП отримує на вхід цифровий сигнал в імпульсно-кодовій модуляції (англ. PCM — pulse-code modulation). Перетворення різних стиснутих форматів в PCM виконується відповідними кодеками.

11.1 Використання

ЦАП використовується завжди, коли необхідно перетворити сигнал з цифрового формату в аналоговий. ЦАП використовується в системах керування

Розділ 12

Звуковий ефект

Звукові ефекти (англ. *Sound effects* або англ. *audio effects*) — штучно створені або підсилені звуки, або обробка звуку, що застосовуються для підкреслення художнього або іншого змісту в кіно, відео іграх, музиці або інших медіа.

12.1 Технічні ефекти

Типовими звуковими ефектами, які застосовуються при підготовці аудіоматеріалу є такі:

- *луна* (англ. *echo delay*) — один або декілька затриманих сигналів додаються до оригінального. Для того, щоб ефекти сприймалися як відлуння, затримка мусить бути порядку 50 мілісекунд або більше. Ефект може бути досягнутим за допомогою як аналогової, так і цифрової обробки. Якщо значна кількість затриманих сигналів відтворюється упродовж кількох секунд, результуючий сигнал створює ефект присутності у великому приміщенні і сприймається як ефект реверберації.
- *фленжер* (англ. *flanger*) — затриманий сигнал додається до оригінального із змінною затримкою до 10 мілісекунд. Цей ефект досягається цифровою обробкою, хоча раніше досягався відторенням запису на двох синхронізованих програвачах та наступним міксуванням. Для досягнення ефекту оператор поміщав свій палець на кромку (англ. *flange*) одного з дисків, що трохи заповільнювало його рух, а відтак і його звучання. Коли оператор прибирав свій палець, механізм прискорював рух диску до синхронізації з іншим.
- *фейзер* (англ. *phaser*) — сигнал роздвоюють, частина його фільтрується фазовим фільтром для створення фазового зсуву, після чого фільтрований та нефільтрований сигнали змішуються. Ефект фейзера подібний до ефекту фланжеру, однак важко відтворюваний на аналоговій апаратурі. Фейзери використовують для досягнення «синтезації» або «електронізації» натураль-

них звуків, таких як людська мова. Голос персонажу С-ЗРО з фільму Зоряні війни був створений шляхом редагування голосу актора фейзером.

- *хорус* (англ. *chorus*) — затриманий сигнал додається до оригінального з постійною затримкою. Затримка має бути малою для уникнення ефекту ехо, але більшою за 5 мс, в інакшому разі інтерференція хвилі призведе до ефекту фленжеру. Часто затримані сигнали трохи зсувають по висоті для досягнення реалістичнішого ефекту ансамблевого музикування.
- *еквалайзер* (англ. *equalization*) — різні частотні смуги підсилюються або послаблюються для корегування тембральних характеристик. Є різновидом фільтрації звуку. Скорочено — EQ.
- *фільтрація звуку* — процес, що використовує різні види звукових фільтрів. Смугова фільтрація голосу може симулювати ефект телефонної розмови.
- *овердрайв* (англ. *overdrive*) ефект, подібний до ефектів fuzz box продукує спотворені звуки, може імітувати голос роботів або радіотелефонні сигнали. Класичний овердрайв спричиняє до обрізки (*clipping*) сигналу, коли його абсолютна величина перевищує певний поріг (*threshold*).
- *Звуковисотний зсув* (англ. *pitch shift*) підвищує або знижує висоту звукових сигналів. Цей ефект часто використовується для корекції співу попспіваків, що співають фальшиво. Швидкість відтворення (темп) при цьому залишається сталим.
- *Розтягнення часу* (англ. *time stretching*) — на відміну від звуковисотного зсуву, цей ефект змінює швидкість відтворення аудіосигналу (темп), не змінюючи його висоти.
- *ефект резонансу* — підсилює обертони на заданих частотах.
- *Компресія звуку* (англ. *compression*) — зменшення амплітудного діапазону звуку з метою запобігання мимовільних коливань динаміки. Компрес-

сію звуку не слід плутати зі стисканням звукових даних.

- *3D аудіо ефекти* — поміщає звуки за межами стереобазис
- *обернене відлуння* (англ. *reverse echo*) — ефект наростання, коли відлуння звуку випереджає сам звук. Винахідниками цього ефекту вважаються Jimmy Page та Led Zeppelin (напр пісня Whole Lotta Love).

12.2 Див. також

- Звукові технології

12.3 Посилання

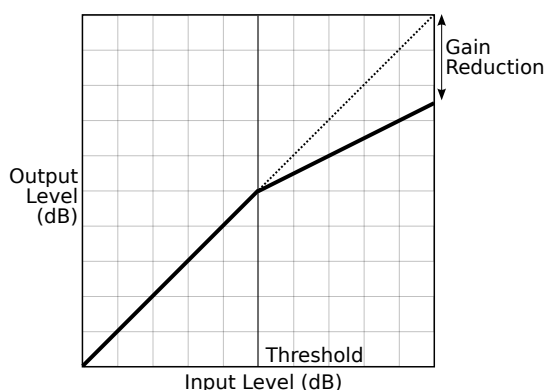
- Ефектний звук(рос.)
- Способи перетворення звуку, звукові ефекти(рос.)

Розділ 13

Компресія звуку

Компресія звуку (англ. *Dynamic range compression*) — це процес зменшення (стиснення) динамічного діапазону звукового сигналу. Компресія застосовується у звукозапису, підготовці фонограм, концертному відтворенні музики тощо. Пристрій, що здійснює компресію називається **компресором** (англ. *compressor*).

13.1 Призначення



Відношення між рівнем вхідного сигналу (Input level), вихідного сигналу (Output level), та величиною компресії (gain reduction)

Різниця динамічного рівня між найтихішими та найгучнішими звуками зменшують для комфортності прослуховування у звичайних умовах. Звичайно наше вухо сприймає тихі звуки в тихому середовищі, однак не сприймає у шумному. Наприклад, в автомобілі оточуючий шум може заглушити тихі звуки. Загальне ж підсилення динаміки зробить гучні звуки занадто голосними. Компресія звуку вирішує цю проблему, роблячи гучні та тихі звуки комфортними для слухання.

13.2 Основні параметри

- **Поріг** (англ. *Threshold*). Визначає рівень, при досягненні якого компресор почне обробляти

сигнал. Цей параметр задається в децибелах нижче пікового значення. Тобто значення порога -4 дб позначає, що компресор буде обробляти сигнал, якщо рівень цього сигналу на 4 дб менше відкаліброваного значення, що становить 0 дб. У цифрових системах 0 дб — це найвищий рівень сигналу.

- **Відношення** (англ. *Ratio*). Цей параметр визначає, як компресор впливає на сигнал. Наприклад, відношення 2:1 означає, що якщо сигнал перевищить поріг, то рівень цього сигналу повинен бути зменшений удвічі. Якщо рівень сигналу перевершує заданий на 1 дб, то після компресії, він буде перевищувати поріг тільки на 0,5 дб.
- **Атака** (англ. *Attack*). Значення цього параметра визначає, як швидко компресор почне обробляти сигнал. Значення задається в мілісекундах, і чим різкіше атака інструмента, тим воно повинне бути менше.
- **Затухання** (англ. *Release*). Цей параметр задає тривалість обробки сигналу після його початку. Як і атака, загасання задається в мілісекундах. При боротьбі зі сплесками звичайно встановлюється мале значення, тому що сплески відбуваються переважно на початку ноти.
- **Підсилення** (англ. *Gain*). За допомогою цього параметра задають рівень сигналу на виході компресора. Значення задається в децибелах. Оскільки компресор, як правило, зменшує загальний рівень сигналу, то за допомогою цього параметра можна відновити його до початкового.
- **Жорстка або м'яка компресія** (англ. *Hard knee, soft knee*). Більшість компресорів дозволяє вибирати режим обробки звуків, що перевищують установлений рівень порога. При **твердому режимі** перевищуючий рівень звуку стискується в постійному відношенні, що задано відповідним параметром (*Ratio*). Наприклад, якщо

для параметра Ratio встановлене значення 4:1, то інтенсивність будь-якого звуку, що перевищив поріг, буде зменшена в 4 рази. Твердий режим застосовується при записі таких інструментів, як барабан, коли потрібно негайно обробити будь-який сплеск. Навпроти, **м'який режим** здійснює стискання зі змінним коефіцієнтом, значення якого залежить від того, наскільки звук перевищив встановлений поріг. Компресор поступово збільшує значення коефіцієнта стиску в міру того, як гучність звуку зростає. Такий режим використовується при запису інструментів з повільною атакою, особливо при записі вокалу.

13.5 Джерела

- Ликбез по компрессии(рос.)
- Работа с компрессором(рос.)
- Компрессия, что это такое и для чего....(рос.)

13.3 Багатосмуговий компресор

Багатосмуговий компресор (англ. *Multiband compressors*) — це компресор, що може обробляти різні частотні смуги, на кожен з яких можна довільно задавати параметри відношення, атаки і затухання. Такий компресор застосовуються, перш за все, при **майстергингу**, однак доцільне їх включення і в музичні центри. Апаратні багатосмугові компресори використовуються також у радіотрансляціях. Це робиться для підвищення гучності з уникненням перемодуляції. Гучніший звук має комерційну перевагу, однак, застосування багатосмугового компресору на радіо вимагає доброго слуху і почуття стилю. Це пов'язано з тим, що застосування багатосмугового компресору змінює баланс різних частотних смуг аудіосигналу.

13.4 Різновиди пристроїв динамічної обробки звукового сигналу

Різновидами компресорів є лімітер, експандер та гейт.

Лімітер (англ. *limiter*) - компресор з параметром відношення $\infty:1$. При перевищенні вхідним сигналом номінального рівня — на виході рівень сигналу має постійне значення, близьке до номінального. Якщо вхідний рівень сигналу не перевищує номінального значення, то пристрій працює як звичайний лінійний підсилювач, згідно з установками (іншими словами лімітер не дозволяє сигналу перевищувати задане в установках значення).

Експандер (англ. *expander*) протилежний компресору пристрій, розширює динамічний діапазон аудіосигналу.

Гейт (англ. *gate*) відкидає, відрізає сигнал на виході, якщо його рівень на вході нижчий вказаного значення.

13.6 Джерела, дописувачі та ліцензії тексту і зображень

13.6.1 Текст

- **Цифровий звук** *Джерело:* https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA?oldid=13503281 *Дописувачі:* Albedo, DDima, A1, JAnDbot, Aibot, VolkovBot, Movses-bot, EDUCA33E, SieBot, Loveless, AlleborgoBot, PipepBot, Lionetto, Technik, Юрій Булка, PixelBot, Ickis, BOTarate, ArthurBot, Melancholic-ukwiki, Іванко1, IvanBot, MerlIwBot, AvicBot, Addbot і Аноніми: 3
- **Цифровий сигнал** *Джерело:* https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D1%81%D0%B8%D0%B3%D0%BD%D0%B0%D0%BB?oldid=18045818 *Дописувачі:* Albedo, A1, Escarbot, Holigor, VolkovBot, A-tomic, SieBot, Loveless, AlleborgoBot, Дядько Ігор, BOTarate, Володимир Груша, Idemchuk, Lexusuns, Іванко1, IvanBot, MerlIwBot, Addbot і Аноніми: 6
- **Семпл** *Джерело:* <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%BB?oldid=18715110> *Дописувачі:* Albedo, A1, JAnDbot, Vml, Xqbot, EmausBot, ZéroBot, Lexusuns, IvanBot, Addbot, Piramidion і MobyVan
- **Аналого-цифровий перетворювач** *Джерело:* https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%BE-%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D1%87?oldid=19308978 *Дописувачі:* Albedo, Sz-iwbot, Amakuha, A1, Thijs!bot, JAnDbot, VolkovBot, Movses-bot, SieBot, PipepBot, Lionetto, Alexbot, SpBot, Amirobot, SilvononBot, Володимир Груша, ArthurBot, Xqbot, Khodakov Pavel, FoxBot, DixonDbot, Dinamik-bot, Aeou, Gerbeda, EmausBot, Lexusuns, Іванко1, IvanBot, CocuBot, RLutsBot, PavloChemBot, Shynkar, Sanya7901 і Аноніми: 15
- **Звукова плата** *Джерело:* https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%82%D0%B0?oldid=18274600 *Дописувачі:* Ilya, Albedo, YurikBot, A1, Thijs!bot, JAnDbot, Aibot, Movses-bot, ТХіКіВот, MaryankoD, SieBot, Loveless, Andriyko UA, Deineka, BOTarate, Alex Khimich, SpBot, NickK, Luckas-bot, Indaclu6, Володимир Груша, ZaMooZoo GREAT, Xqbot, RedBot, FoxBot, EmausBot, ZéroBot, Іванко1, IvanBot, WikitanvirBot, MerlIwBot, МАХХХ-309, Shynkar, Green Zero, Addbot, Vlasenko D, RotlinkBot, Fessor і Аноніми: 6
- **Синтезатор** *Джерело:* <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80?oldid=18669476> *Дописувачі:* Ilya, Albedo, Yakudza, Sz-iwbot, A1, JAnDbot, CommonsDelinker, Aibot, VolkovBot, Movses-bot, Friend, ТХіКіВот, АНbot, Raider, SieBot, Andrijko Z., Deineka, Yakiv Gluck, Technik, DragonBot, Дядько Ігор, Летюча голландка, Ickis, MelancholieBot, Demetriol, CarsracBot, Luckas-bot, SilvononBot, Ptbotgourou, ArthurBot, Nallimbot, Xqbot, MerlLinkBot, Kirsim, Goo3, TobeBot, KamikazeBot, Jafeluv, EmausBot, Lexusuns, Іванко1, IvanBot, ChuispastonBot, MerlIwBot, Shynkar, Addbot і Аноніми: 4
- **Частота дискретизації** *Джерело:* https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B0_%D0%B4%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97?oldid=16904027 *Дописувачі:* Albedo, A1, VolkovBot, ТХіКіВот, SieBot, Rei-bot, Юрій Булка, MelancholieBot, Xqbot, ZéroBot, Lexusuns, Іванко1, WikitanvirBot, AvocadoBot, Dexbot і Addbot
- **Герц** *Джерело:* <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D1%80%D1%86?oldid=17417936> *Дописувачі:* Albedo, Fedotto, ReAl, Yurko, A1, Escarbot, Leon II, ТХіКіВот, SieBot, Alex Blokha, Yakiv Gluck, ButkoBot, Lockalbot, MelancholieBot, Luckas-bot, ArthurBot, Nallimbot, Xqbot, SassoBot, FoxBot, EmausBot, ZéroBot, Mung Daal, IvanBot, WikitanvirBot, Manubot, MerlIwBot, Addbot, Alex Kushnir і Аноніми: 5
- **Фільтрація звуку** *Джерело:* https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D1%83?oldid=15277877 *Дописувачі:* Albedo, Yakudza, A1, Holigor, АНbot, Іванко1, Teodret, Addbot, PidlisnukBot і Аноніми: 1
- **Цифрова обробка сигналів** *Джерело:* https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D1%81%D0%B8%D0%B3%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2?oldid=19360647 *Дописувачі:* Khodakov Pavel, Berep, ZéroBot, KLBot2, YFdyh-bot, Shynkar і Addbot
- **ЦАП** *Джерело:* <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%90%D0%9F?oldid=16871620> *Дописувачі:* Albedo, Farfurkis, ReAl, A1, VictorAnyakin, JAnDbot, VolkovBot, Yakiv Gluck, Володимир Груша, EmausBot, Lexusuns, ChuispastonBot, WikitanvirBot, Addbot, Jarozwj і Аноніми: 2
- **Звуковий ефект** *Джерело:* https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B5%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82?oldid=14302868 *Дописувачі:* Albedo, A1, JAnDbot, Dim Grits, Aibot, VolkovBot, Movses-bot, ТХіКіВот, SieBot, BOTarate, Luckas-bot, Іванко1, IvanBot, WikitanvirBot, MerlIwBot, Shynkar, Addbot і Аноніми: 1
- **Компресія звуку** *Джерело:* https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%96%D1%8F_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D1%83?oldid=16535785 *Дописувачі:* Albedo, A1, JAnDbot, Aibot, Movses-bot, Хорхе, SieBot, ButkoBot, SpBot, MystBot, ArthurBot, Xqbot, Ветер, EmausBot, Іванко1, ChuispastonBot, WikitanvirBot, Vagobot, AvocadoBot, Addbot і Аноніми: 1

13.6.2 Зображення

- **Файл:8_bit_DAC.jpg** *Джерело:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/8_bit_DAC.jpg *Ліцензія:* Attribution *Дописувачі:* Text Book: Operational Amplifiers *Художник:* Rober F Coughlin
- **Файл:Access_Virus_TI.jpg** *Джерело:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c1/Access_Virus_TI.jpg *Ліцензія:* Public domain *Дописувачі:* ru:Участник:Matroskin *Художник:* Matroskin
- **Файл:Alesis_Fusion_HD8.jpg** *Джерело:* https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ee/Alesis_Fusion_HD8.jpg *Ліцензія:* Public domain *Дописувачі:* Власна робота *Художник:* Matroskin

- **Файл:Audio-level-compression-diagram-01.svg** Джерело: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e6/Audio-level-compression-diagram-01.svg> Ліцензія: CC BY 2.5 Дописувачі: Власна робота Художник: Iainf 05:10, 8 July 2006 (UTC)
- **Файл:C-media_manli_soundcard.jpg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/75/C-media_manli_soundcard.jpg Ліцензія: Public domain Дописувачі: Computer parts - Soundcard PCI 7.1 OEM (M-CMI8768-8CH) Художник: Alex Khimich
- **Файл:Carlos_brandenburg_3.ogg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/uk/2/26/Carlos_brandenburg_3.ogg Ліцензія: Добропорядне використання Дописувачі: Джерело Художник: Автор
- **Файл:CirrusLogicCS4282-AB.jpg** Джерело: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/CirrusLogicCS4282-AB.jpg> Ліцензія: CC BY-SA 3.0 Дописувачі: Власна робота Художник: Andrzej Barabasz (Chepy)
- **Файл:Commons-logo.svg** Джерело: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Commons-logo.svg> Ліцензія: Public domain Дописувачі: This version created by Pumbaa, using a proper partial circle and SVG geometry features. (Former versions used to be slightly warped.) Художник: SVG version was created by User:Grunt and cleaned up by 3247, based on the earlier PNG version, created by Reidab.
- **Файл:Computer_sound_card01.JPEG** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c9/Computer_sound_card01.JPEG Ліцензія: Public domain Дописувачі: Downloaded from : <http://pdphoto.org/PictureDetail.php?mat=pdef&pg=8357> Художник: Credits : PD Photo.org
- **Файл:Crystal_Clear_app_korganizer.png** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e9/Crystal_Clear_app_korganizer.png Ліцензія: LGPL Дописувачі: All Crystal Clear icons were posted by the author as LGPL on kde-look; Художник: Everaldo Coelho and YellowIcon;
- **Файл:Digital.signal.svg** Джерело: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/Digital.signal.svg> Ліцензія: Public domain Дописувачі: No machine-readable source provided. Own work assumed (based on copyright claims). Художник: No machine-readable author provided. Rbj assumed (based on copyright claims).
- **Файл:Dobra5.png** Джерело: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Dobra5.png> Ліцензія: CC BY 3.0 Дописувачі: Власна робота Художник: Alex Tora
- **Файл:Emoji_u1f4bb.svg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Emoji_u1f4bb.svg Ліцензія: Apache License 2.0 Дописувачі: <https://code.google.com/p/noto/> Художник: Google
- **Файл:Fairlight_CMI.jpg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/Fairlight_CMI.jpg Ліцензія: CC BY 2.0 Дописувачі: \$100,000 Fairlight vintage keyboard Художник: Thomas Kriese
- **Файл:Gear_template.svg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Gear_template.svg Ліцензія: GPL Дописувачі:
- File:Gnome-applications-system.svg Художник:
- GNOME icon artists
- **Файл:Gnome-speakernotes.svg** Джерело: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Gnome-speakernotes.svg> Ліцензія: GPL Дописувачі: Self-made in Illustrator; Based off of image from the GNOME package, a free software (GPL) desktop environment. Художник: Gnome?
- **Файл:Midi_ports_and_cable.jpg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Midi_ports_and_cable.jpg Ліцензія: CC-BY-SA-3.0 Дописувачі: en:Image:Midi_ports_and_cable.jpg Художник: :en:Pretzelpaws with a Canon EOS-10D camera. Cropped 2/9/05 using the GIMP.
- **Файл:Minimoog.JPG** Джерело: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Minimoog.JPG> Ліцензія: Public domain Дописувачі: photo taken by Krash Художник: Krash
- **Файл:Quantization_noise.ogg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/uk/a/a5/Quantization_noise.ogg Ліцензія: Добропорядне використання Дописувачі: англ вікі Художник: ?
- **Файл:Question_book-new.svg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/99/Question_book-new.svg Ліцензія: CC-BY-SA-3.0 Дописувачі: Перенесено з en.wikipedia на Вікісховище. Created from scratch in Adobe Illustrator. Based on Image: Question book.png created by User:Equazcion Художник: Tkgd2007
- **Файл:Rca_press.jpg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/uk/e/e4/Rca_press.jpg Ліцензія: ? Дописувачі: http://120years.net/machines/rca/rca_image4.html Художник: ?
- **Файл:Roland_Juno_D.jpg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Roland_Juno_D.jpg Ліцензія: Public domain Дописувачі: Власна робота Художник: Matroskin
- **Файл:Roland_TR-808_drum_machine.jpg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/be/Roland_TR-808_drum_machine.jpg Ліцензія: CC-BY-SA-3.0 Дописувачі: Перенесено з pl.wikipedia на Вікісховище. Художник: Eriq з голландська Wikipedia
- **Файл:SI_base_unit.svg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/SI_base_unit.svg Ліцензія: CC BY-SA 3.0 Дописувачі: Власна робота. Based on [1] Художник: Dono
- **Файл:Sblive!.jpg** Джерело: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0a/Sblive%21.jpg> Ліцензія: Public domain Дописувачі: No machine-readable source provided. Own work assumed (based on copyright claims). Художник: No machine-readable author provided. FinnBjo~commonswiki assumed (based on copyright claims).
- **Файл:Sequential_Circuits_Six-Trak_front.png** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1d/Sequential_Circuits_Six-Trak_front.png Ліцензія: CC-BY-SA-3.0 Дописувачі: Власна робота Художник: Matt Perry
- **Файл:WM_WM8775SEDS-AB.jpg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/WM_WM8775SEDS-AB.jpg Ліцензія: CC BY-SA 3.0 Дописувачі: Власна робота Художник: Andrzej Barabasz (Chepy)
- **Файл:Yamaha_Tyros.jpg** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/26/Yamaha_Tyros.jpg Ліцензія: Public domain Дописувачі: Matroskin Художник: Matroskin
- **Файл:Аналогово-цифрове_перетворення.png** Джерело: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/uk/6/63/%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B2%D0%BE-%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F.png Ліцензія: GNU FDL Дописувачі: перекладено з [1] Художник: Користувач А1

13.6.3 Ліцензія вмісту

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0