

SYNTHESIS BASICS

translated by *SuperDroid*

SUBTRACTIVE SYNTHESIS

Субтрактивный метод синтеза звуков является одним из самых ранних и широко распространенных методов. Этот метод применялся в таких классических синтезаторах, как Moog, Arp, Prophet-5 и 10, в большинстве синтезаторов Oberheim, Roland Jupiter моделях, TB-303 и других - их перечень практически бесконечен. Теперь и современные цифровые рабочие станции и сэмплеры применяют основные принципы субтрактивного синтеза.

MODULES - THE BUILDING BLOCKS

Субтрактивный метод синтеза впервые был использован в модульных синтезаторах, где соединение основных элементов (электрических модулей) осуществлялось с помощью коммутационных проводов (*patch cords*), а каждый из этих модулей для размещения требовал огромных корпусов. С ростом технологий большинство из этих модулей выглядят теперь в виде небольшой печатной платы, но архитектура и название модулей современных синтезаторов, использующих субтрактивный метод синтеза, остались такими же, как и десятилетия назад. Познакомимся с этими **модулями** поближе. Для начала рассмотрим три основных, которые создают и обрабатывают звук:

OSCILLATOR – осциллятор один из тех модулей, который действительно производит звук (большинство других модулей только придают определенную форму звуку из осциллятора). Это как струна струнного инструмента, колебания которой создают звук.

FILTER – сигнал из осциллятора может пройти через фильтр, который придаст звуку тембр определенной окраски.

AMPLIFIER – усилитель формирует громкость звука, делая его “легким” или “тяжелым”, “медленным” или “быстрым”.

В дополнение к этим трем основным модулям, все синтезаторы также имеют **модуляторы** – устройства, которые могут придавать определенную громкость звуку, менять тембр и изменять другие свойства звука непрерывно во время игры на клавиатуре. Модуляторы прибавляют звуку воодушевление, превращая, к примеру, унылый и гудящий тембр органа в динамичный и интересный тембр. Среди всех модуляторов самые распространенные Envelope Generators (*генераторы огибающих*) и LFOs (*генераторы низких частот*).

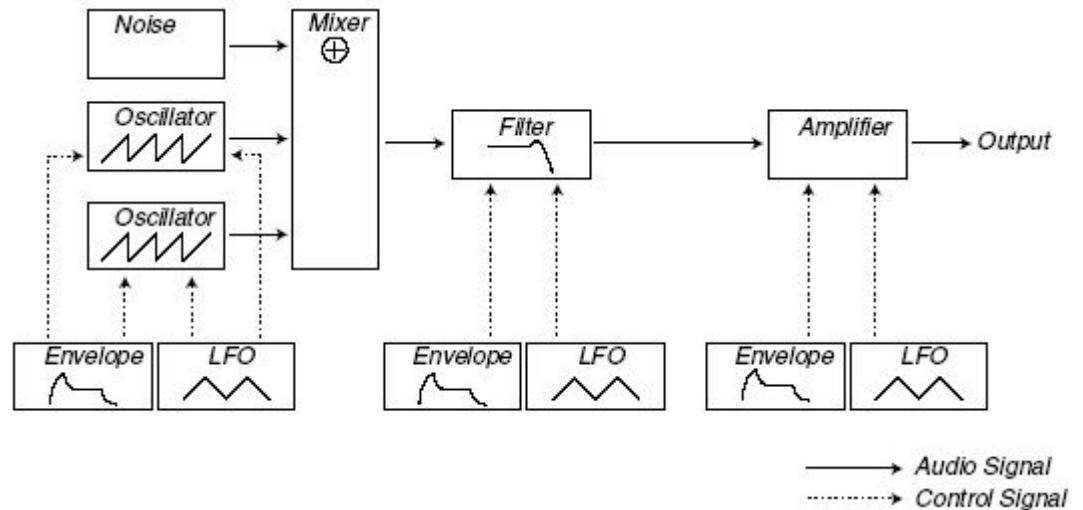
ENVELOPE GENERATOR – генератор огибающей применяется для придания звуку определенной “формы”. Если применить огибающую к усилителю (который контролирует громкость), то станет возможным делать звук медленно наплывающим и, затем, медленно затухающим в момент нажатия и удержания клавиши.

LFO – это аббревиатура от **low frequency oscillator** (генератор низких частот). Низкочастотные колебания требуются для реализации эффектов:

1. частотной модуляции (*частотное вибрато*)
2. амплитудной модуляции (*амплитудное вибрато, тремоло*)
3. а также тембрового вибрато (*эффекта “Bay-Bay”*).

CONNECTIONS

Существует много способов, с помощью которых модули могут быть соединены в синтезаторе, но один из самых распространенных особенно среди синтезаторов прошлого поколения приведен на рисунке.

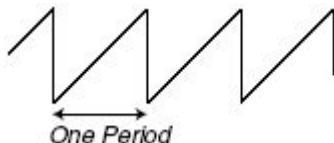


Обратите внимание на то, что горизонтальные линии показывают маршрут аудио сигнала, а вертикальные – управляющего сигнала. В этом примере огибающими модулируются только осциллятор, фильтр и усилитель, не затрагивая звукового сигнала непосредственно.

THE OSCILLATORS AND WAVEFORMS

Существуют две основные характеристики осциллятора – это форма волны (**waveform**) и высота тона (**pitch**).

PITCH – длина периода волны определенной формы определяет высоту тона (*частоту*) звука. Чем короче период, тем выше тон звука. Если осциллятор генерирует звук с частотой 440Гц, то это означает появление 440 периодов одной и той же формы волны в секунду.



Обычно используются три способа изменения частоты осциллятора:

- **Путем изменения настроек частоты на осцилляторе.**

- **Путем игры на клавиатуре.** Клавиатура соединяется с осциллятором через КВТ (*Keyboard Tracking*) таким образом, что нажатие различных клавиш на клавиатуре приводит к появлению звуков различной высоты. В некоторых случаях это соединение через КВТ может быть отключено, клавиатура в этом случае будет соединяться с осциллятором напрямую, что заставит осциллятор воспроизводить звук одной и той же высоты тона, независимо от того, какая клавиша нажата.

- **Модуляцией.** Модуляция позволяет создавать изменение высоты тона автоматически. Самый общий случай использования модуляции – это использование LFO для того, чтобы увеличивать и уменьшать высоту тона звука, создавая эффект *частотного вибрато*. Можно также управлять высотой звука с помощью огибающей или поставить этот процесс в зависимость от силы удара по клавише (*velocity*).

WAVEFORM – от формы волны осциллятора зависит ее гармоническое содержание и, следовательно, ее основная характеристика – тембр. Среди всех форм волны самые общепринятые: пилообразная (**sawtooth**) форма, треугольная (**triangle**) и импульсная (**pulse**).

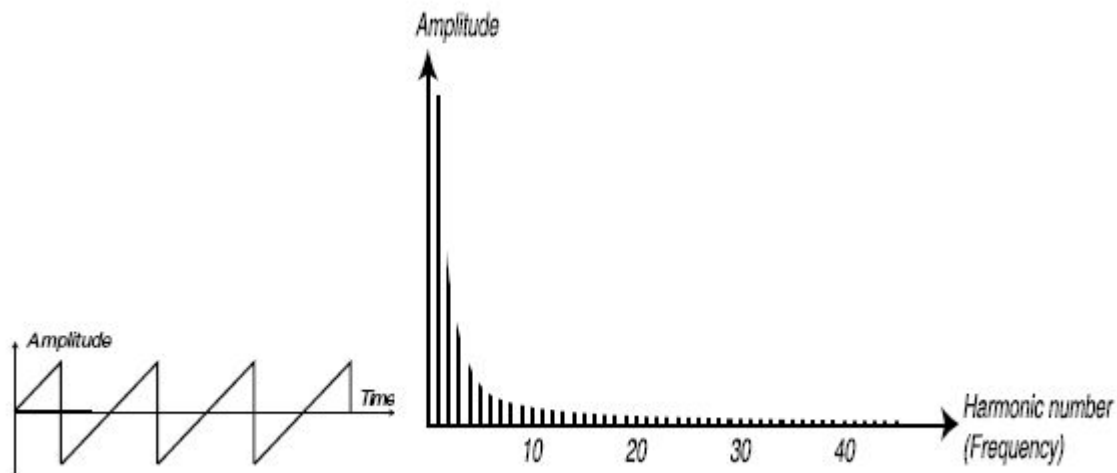
Очень трудно понять, как звучит волна, по ее графическому изображению (*сигналограмме*). Гораздо демонстративнее спектральный анализ (*спектрограмма*). Давайте совершим небольшой экскурс в теорию. Математически все формы волны состоят из определенного числа гармоник, сложенных вместе. Каждая гармоника состоит из синусоидальной формы волны, которая не имеет гармоник вообще. Другими словами, если сложить вместе определенное число волн синусоидальной формы со своей собственной частотой и громкостью (*амплитудой*), то можно получить волну любой формы в качестве результирующей. Вообще говоря, под понятием спектра звуковой волны следует понимать совокупность составляющих синусоидальных звуковых волн, в результате наложения которых получается исходная результирующая звуковая волна. Совокупность (*набор*) значений амплитуд и частот составляющих синусоидальных волн называется соответственно спектром амплитуд и спектром частот.

Гармоника с самой низкой высотой тона называется первой гармоникой (*fundamental harmonic*). Первая гармоника определяет основной тон звука. Если первая гармоника звука равна, скажем, 440Гц, то этот звук воспринимается с высотой тона 440Гц. Следующие гармоники, которые добавляются к первой, называются обертонами. Обычно частота первого обертона (*второй гармоники*) в два раза больше частоты первой гармоники (*в нашем примере она равна 880Гц*). Следующий обертон появляется с частотой в три раза большей частоты первой гармоники (*1320Гц*) и так далее. На спектральном дисплее формы волны легко можно определить частоту каждой гармоники и ее амплитуду. Это достигается путем откладывания вертикальных линий от горизонтальной шкалы (*число линий равно числу гармоник*). Позиция каждой такой линии на горизонтальной шкале отображает частоту гармоники, а высота такой линии – ее громкость (*амплитуду*). Линия крайняя слева обозначает первую гармонику, следующая справа – вторую гармонику и так далее. Часто для удобства на горизонтальной шкале указывается номер гармоники, а не ее частота. Легко понять, что если старшие гармоники имеют большую амплитуду чем

младшие, то звук воспринимается как “яркий”. На иллюстрациях, приведенных ниже, показаны только несколько самых первых гармоник, но теоретически, их количество может быть бесконечным.

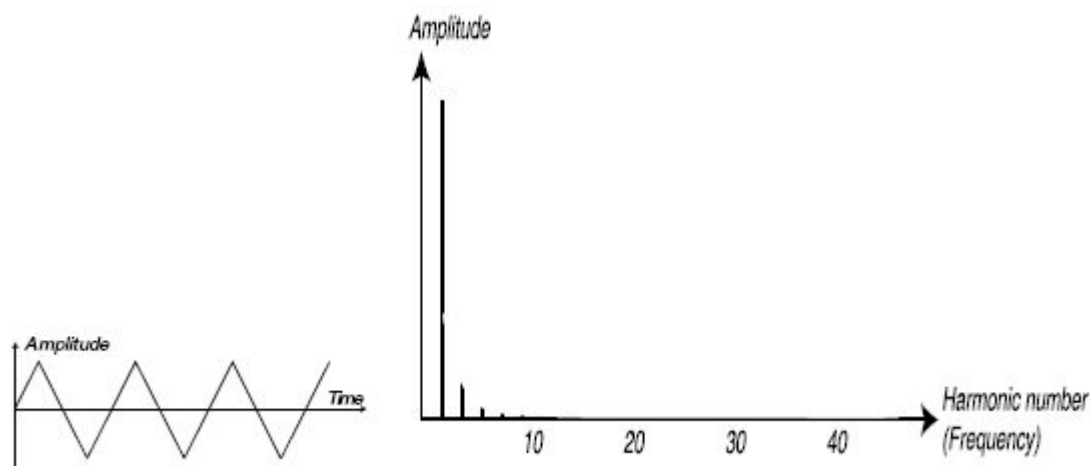
SAWTOOTH

Пилообразная волна (**sawtooth**) имеет простой спектр. Значения всех гармоник спектра пропорциональны: старшая гармоника имеет отлчительно большую амплитуду по сравнению с младшей, что делает ярким звучание волны этой формы.



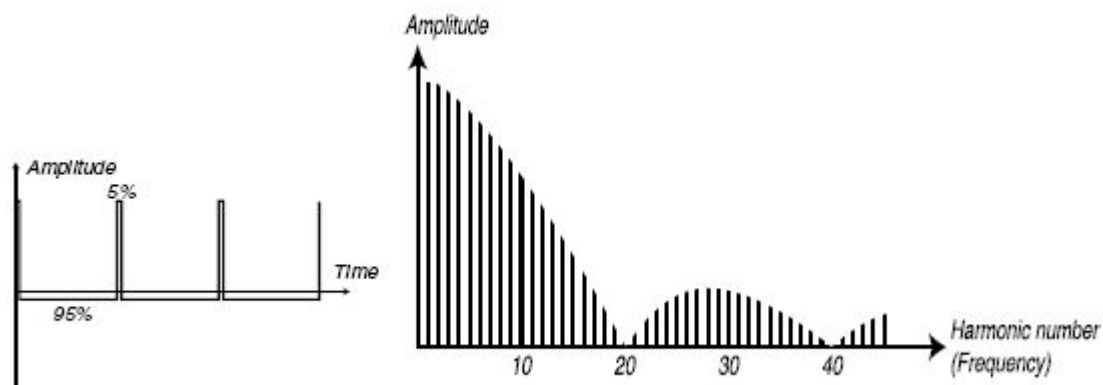
TRIANGLE

У треугольной волны (**triangle**) величина амплитуды гармоник невелика, и к тому же они имеют нечетные номера, что делает звучание чистым, как у флейты, но немного “пустотелым” (“hollow”).



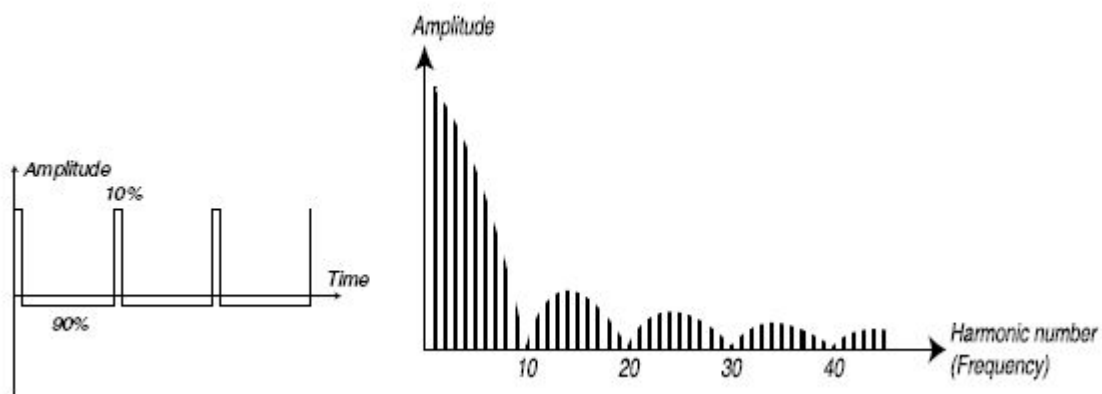
PULSE WAVE

Импульсная волна (**pulse**) немного сложнее, так как это не одна форма волны, а несколько различных форм. Для импульсной волны характерна форма, в которой в течение одного периода имеется резкий переход от максимального значения амплитуды к минимальному значению и обратно. Причем расположение этого перехода внутри периода может варьироваться. Рассмотрим три примера такой волны.



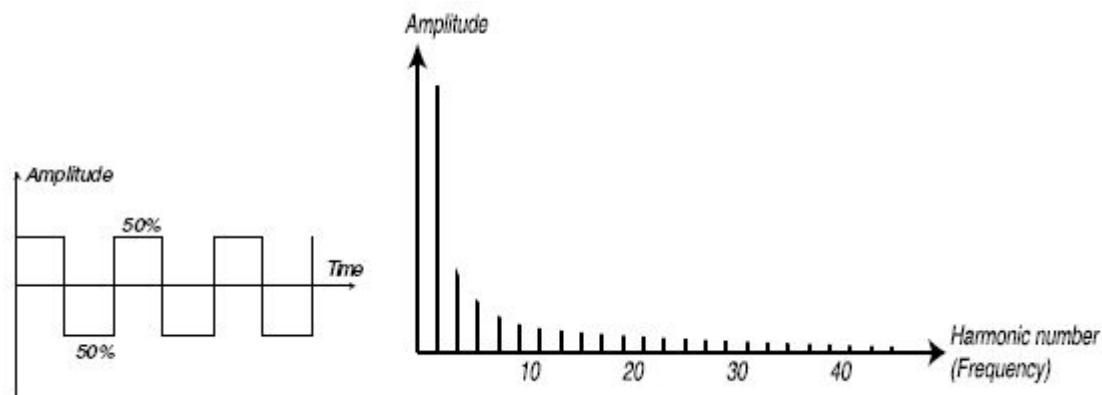
Пример №1

В первом примере резкий переход произошел от начала периода на участке, равным 5-ти процентам периода. Принято говорить, что импульсная волна в таком случае имеет *ширину импульса 5% (duty cycle)*.



Пример №2

Во втором примере волна имеет *ширину импульса 10%*.



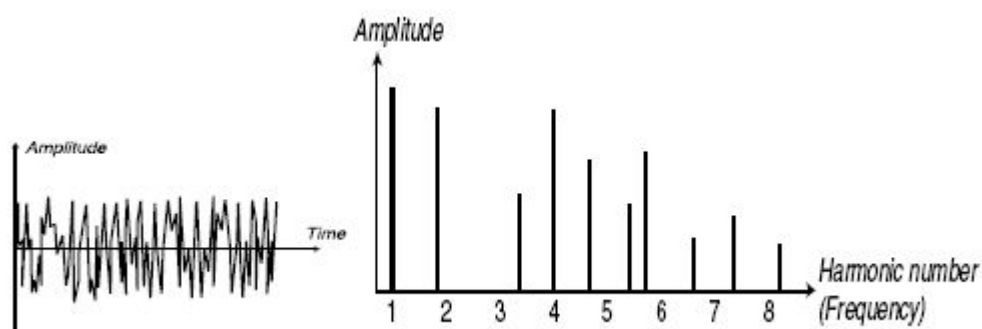
Пример №3

В третьем примере *ширина импульса* равна 50%. Это особый вид импульсной волны. Такая волна называется квадратной (**square wave**). Ее особенность заключается в том, что она содержит только нечетные гармоники, поэтому характер ее звучания несколько “пустотелый” (“hollow”).

Во многих синтезаторах (в том числе и в Nord Lead) ширину импульса можно изменять для изменения тембра - чем уже ширина импульса, тем “тоньше” тембр звука. Также возможно изменять ширину импульса с помощью модуляции низкими частотами (*LFO*) или огибающими. Такой процесс называется *модуляцией ширины импульса*. Модуляцией ширины импульса низкими частотами можно добиться “жирного”, богатого гармониками эффекта (*очень похожего на хорус - эффект*), который часто используется при создании звуков струнных.

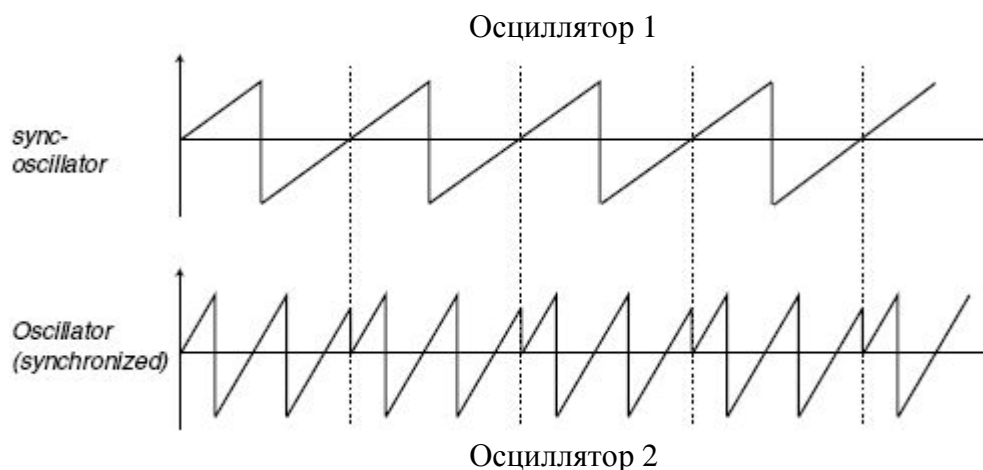
ABOUT INHARMONIC SPECTRA (о негармоничном спектре)

Для всех форм волны, рассмотренных выше, характерен спектр, у которого обертона появляются на месте “совершенных” гармоник. Однако это не характерно для многих других звуков. Если, к примеру, использовать частотную модуляцию (*FM*) или кольцевую модуляцию (*Ring Modulation*) в синтезаторе Nord Modular G2, с использованием двух осцилляторов, настроенных с разницей в высотности не на октаву и не на квинту, например, то получится спектр, у которого обертона появятся где-то посередине между “совершенными” гармониками. В результате получится негармоничный звук, который часто имеет “металлический” оттенок:



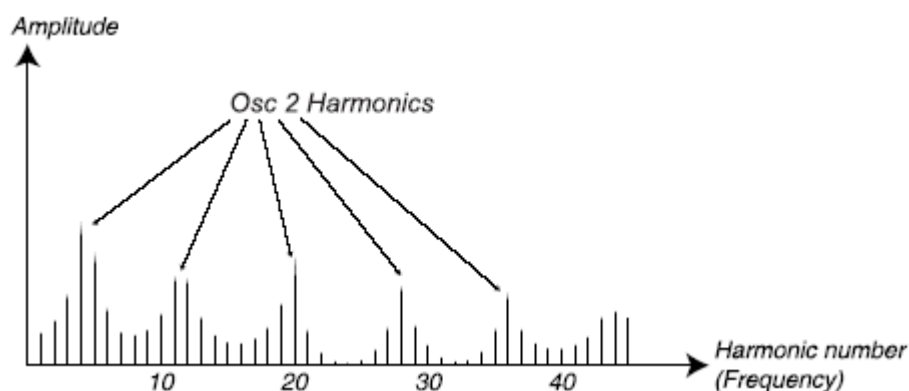
SYNC (синхронизация)

Если, к примеру, Осциллятор 2 синхронизировать по Осциллятору 1, то Осциллятор 2 будет запускаться с начала нового периода каждый раз, когда это делает Осциллятор 1. И если высота тона Осциллятора 2 выше высоты тона Осциллятора 1 (*меньше период колебания*), то в результате синхронизации у Осциллятора 2 (синхронизируемого осциллятора) получится сложная форма волны, зависящая как от собственной высоты тона, так и от высоты тона Осциллятора 1, по которому осуществляется синхронизация:



Когда синхронизация применяется, высота тона Осциллятора 2 входит в синхронизм с высотой тона Осциллятора 1. И если изменить высоту тона Осциллятора 1, то у Осциллятора 2 высота тона также изменится. Вдобавок к этому, если изменять высоту тона Осциллятора 2, то результат будет восприниматься, как изменение тембра, а не высотности звучания.

Таким образом, синхронизация приводит к появлению в спектрограмме Осциллятора 2 (синхронизируемого осциллятора) глубокого резонанса гармоник:



А если высоту тона синхронизируемого осциллятора изменять непрерывно с помощью модуляции (LFO или модуляции огибающими), то это может привести к очень интересным результатам звучания.

THE Filter

Фильтр в синтезаторе применяется с целью удалить или наоборот акцентировать частоты спектра. Фильтр немного похож на усилитель тем, что он применяется по-разному к различным частям спектра. Например, фильтр может делать низкие частоты громче, в тоже время высокие частоты слабее. Таким образом, с помощью фильтра можно звуку прибавить басов и убавить дискантов.

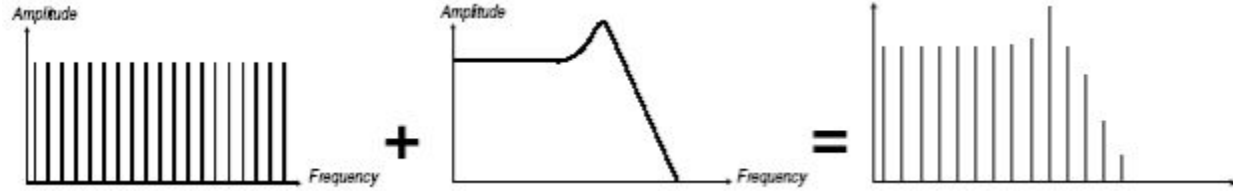
Представим теоретический звук, у которого в спектре все обертона имеют максимальное значение амплитуды:



И “пропустим” его через фильтр низких частот (*lowpass filter*), который имеет следующую кривую характеристики:



Как видно на рисунке, кривая характеристики имеет горизонтальный участок в нижнем регистре (на этом участке частоты не подвергаются фильтрации) и затем, в определенной точке, начинается постепенный спад (фильтрация). И если теперь посмотреть на теоретический спектр, к которому применяется подобная характеристика, то можно увидеть, что высокочастотная часть спектра срезана:

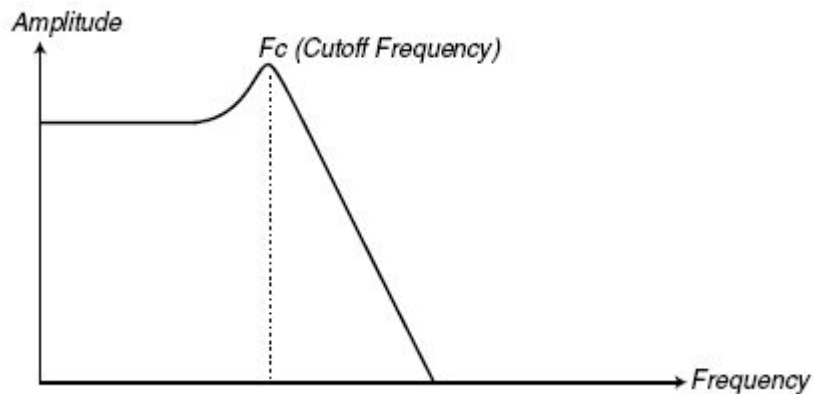


FILTER TYPES

Существуют много фильтров различного предназначения. Рассмотрим три самые часто используемые.

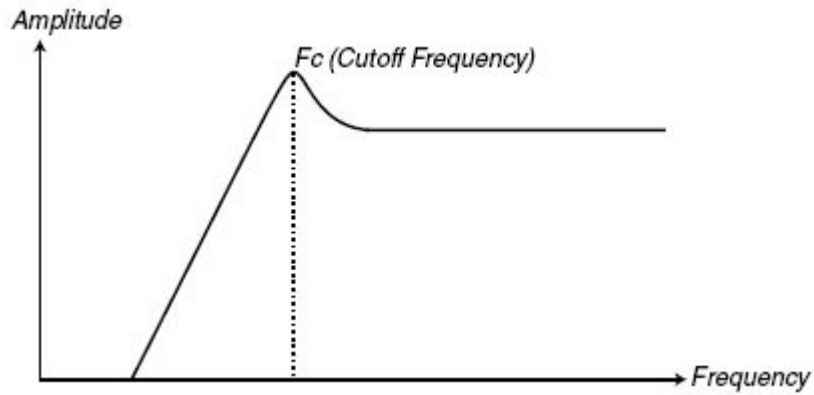
Lowpass Filter

Фильтр низких частот демпфирует (заглушает) высокие частоты, находящиеся выше частоты среза и “пропускает” низкие, как показано в примере выше. Этот тип фильтра стал часто использоваться в конструкции синтезаторов с тех пор, как он впервые был применен для того, чтобы “смягчить” резкий звук пилообразной и импульсной формы волны.



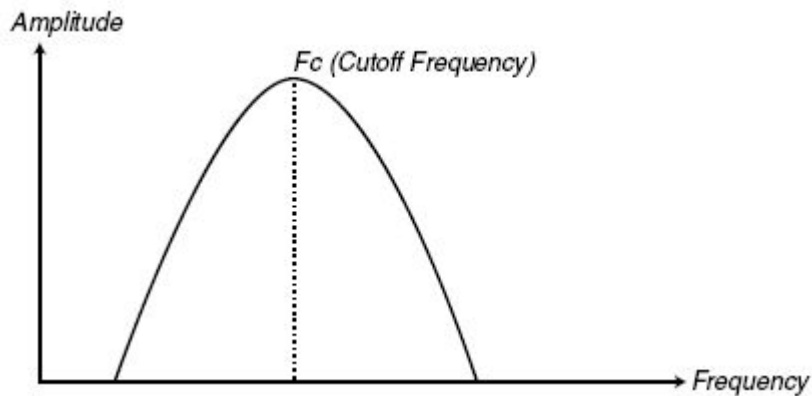
Highpass Filter

Фильтр высоких частот демпфирует (заглушает) низкие частоты и “пропускает” высокие, находящиеся выше частоты среза, как показано на рисунке:



Bandpass Filter

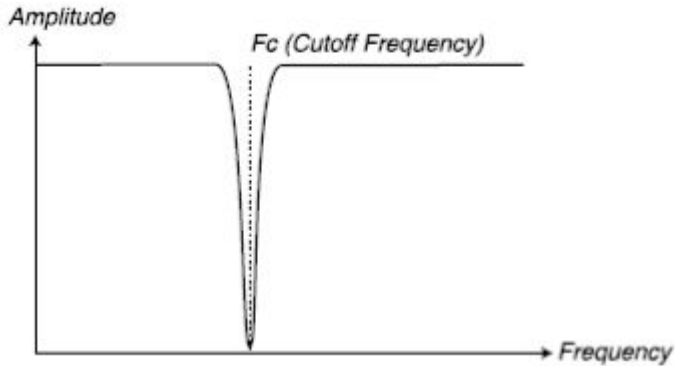
Полосно-пропускающий фильтр “пропускает” частоты на определенном диапазоне спектра (полосе), заглушая все остальные, ниже и выше этого диапазона (полосы), как показано на рисунке:



Это подчеркивает определенный диапазон средних частот.

Notch Filter

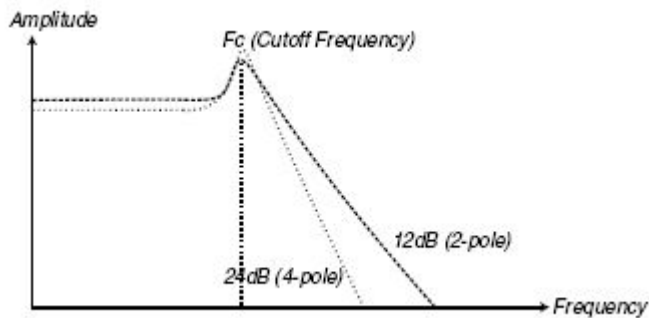
Этот тип фильтра (известный также под названием *Band Reject Filter* - узкополосный режескторный фильтр) можно рассматривать, как противоположный полосно-пропускающему фильтру: он подавляет частоты в определенном диапазоне (*узкой полосе частот*), пропуская частоты, лежащие ниже и выше этого диапазона.



ROLL-OFF (SLOPE) (спад амплитудно-частотной характеристики (угол наклона))

Фильтры одного и того же типа могут иметь разные характеристики. Одним из факторов, определяющих спад кривой фильтра, является *roll-off фактор*, который измеряется в **db/Octave** (децибел на октаву) или в *poles*. Самый простой из возможных фильтров имеет *roll-off фактор* равный **6 db/Octave** или “*1pole*”. Следующее значение этого фактора равняется **12 db** или “*2 poles*”, затем **18 db** “*3 poles*” и так далее.

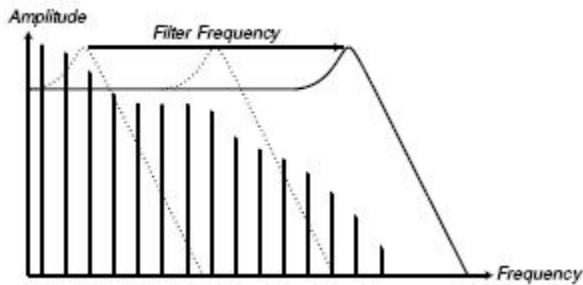
Фильтры, которые часто используются в синтезаторах – это **12 db** и **24 db** lowpass фильтры. Различие их характеристик можно увидеть на графике АЧХ: фильтр **12 db** пропускает больше высоких частот чем **24 db** фильтр, что делает саунд более ярким и звучным, чем у **24 db** фильтра.



В синтезаторе Nord Modular G2 фильтр Nord Filter можно переключать между **12 db** и **24 db** режимами. Для звуков с высоким значением резонанса (*о резонансе будет сказано ниже*), подобных звукам синтезатора TB-303, мы рекомендуем **12 db** режим фильтра, для большинства других звуков - режим **24 db**.

CUTOFF FREQUENCY

Самым важным параметром фильтра является его *cutoff frequency* (*частота среза*) – это регулируемый параметр, значение его определяет, где в частотном полотно будет происходить срез. Если частота среза в пропускающем фильтре нижних частот имеет низкое значение, то только низшие значения гармоник (*басы*) будут проходить через фильтр. Если частота среза имеет очень высокое значение (*“полностью поднята вверх”*), то все частоты пройдут через фильтр, как показано на рисунке:

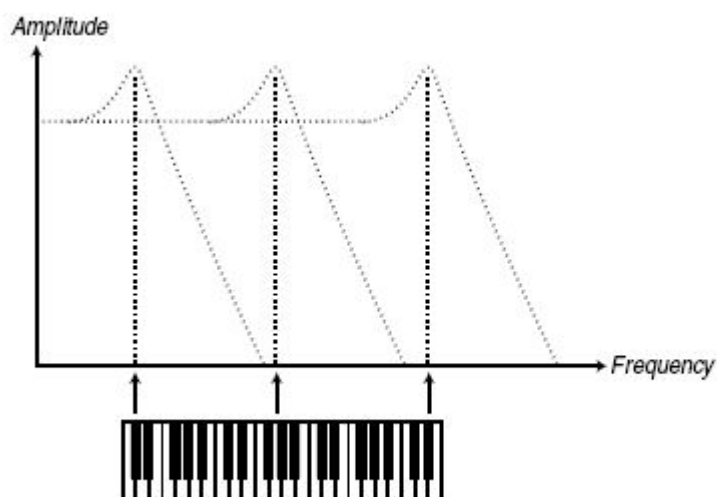


Изменение частоты среза носит название *“sweeping the filter”* (*качание фильтра*). Это, вероятно, один из самых существенных способов формирования тембра звука синтезатора. Используя огибающую можно, к примеру, установить зависимость значения частоты среза от этой огибающей, а именно: в момент появления звука частота среза будет иметь высокое значение, а затем, в момент его затухания, будет постепенно понижаться (*фильтр “закрывается”*). Таким способом можно эмулировать поведение щипковых и молоточковых струнных инструментов (*гитара, фортепьяно и т.д.*), у которых амплитуда гармоник уменьшается в момент затухания звука.

Keyboard tracking

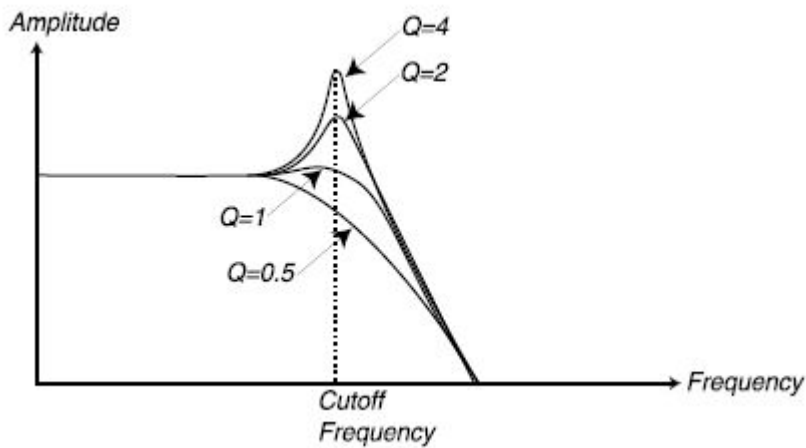
Во время звукоизвлечения звуков разной высоты при игре на клавиатуре, частота осциллятора меняется. Тем не менее, частота среза фильтра остается постоянной. Это означает, что у звуков различной высоты будут срезаны разные обертона. Игра на клавиатуре в верхнем регистре будет давать более “грязный” звук.

Чтобы это избежать многие синтезаторы имеют параметр *Filter Keyboard Tracking*. Если он активирован, то частота среза изменяется в зависимости от нажатой клавиши клавиатуры, также как и частота осциллятора. Это гарантирует постоянство гармонического спектра для всех клавиш.

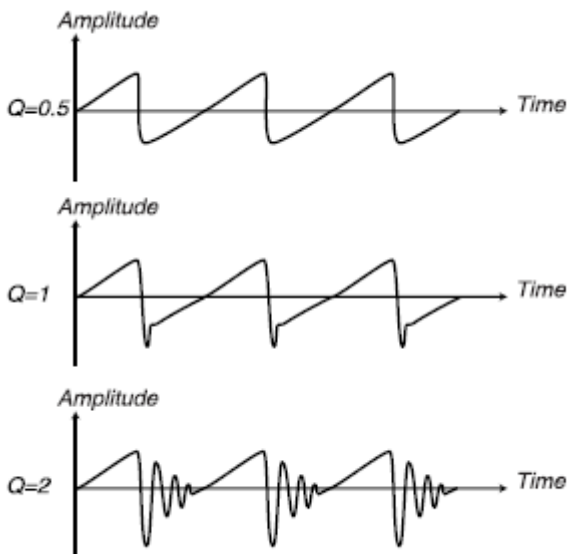


RESONANCE

Резонанс фильтра обеспечивается путем соединения его выхода с входом, то есть созданием “feedback loop” – контура обратной связи. Количество фидбэка регулируется параметром резонанса на передней панели инструмента. Когда применяется резонанс, частоты около точки среза фильтра акцентируются (*делаются громче*). По мере увеличения резонанса, фильтр все более ведет себя как полосно-пропускающий фильтр, который пропускает только те частоты, которые расположены около точки среза. Фильтр запускается в “кольцо”, начинает почти звучать, словно добавляя частоты к звуку. При дальнейшем увеличении глубины резонанса (*на некоторых синтезаторах*) фильтр становится подобием осциллятора, самостоятельно генерирующим звук.



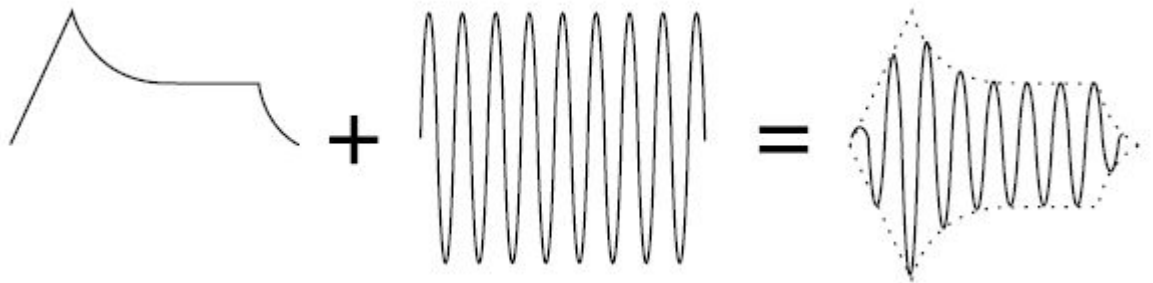
Высокие значения резонансов отражаются в форме волны. Они отображаются как “наложенная” волна с частотой, равной частоте среза фильтра. Следующие три примера демонстрируют одну и ту же волну, но с разными значениями резонанса:



Применяя резонанс и изменяя частоту среза фильтра с помощью огибающей, можно получить типичный синтезаторный звук.

The Amplifier

Усилитель чаще всего используется последним в цепочке синтеза сигналов для управления громкостью. Как было сказано выше, модуляцией усилителя огибающей можно придать звуку требуемую “форму”. По сути дела, “форма звука” – это один из главных факторов, по которому мы опознаем звук. Настраивая огибающую усилителя можно сделать звук “мягким” или “твердым”, “щипкового инструмента” или “статичным”.

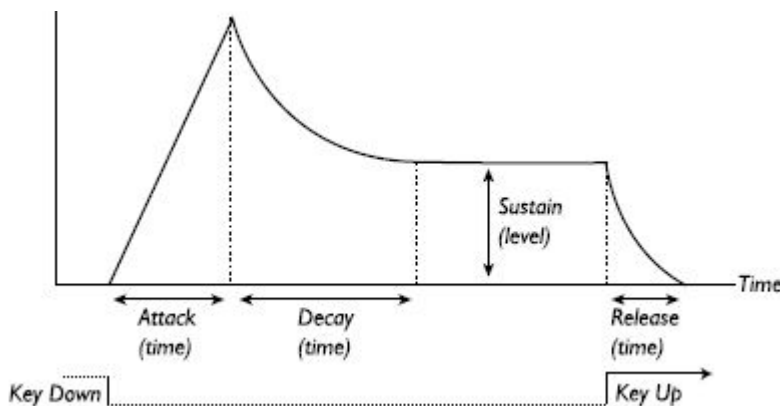


Кривая огибающей громкости (слева) определяет, как амплитуда формы волны изменяется со временем.

Envelopes

ADSR-envelope

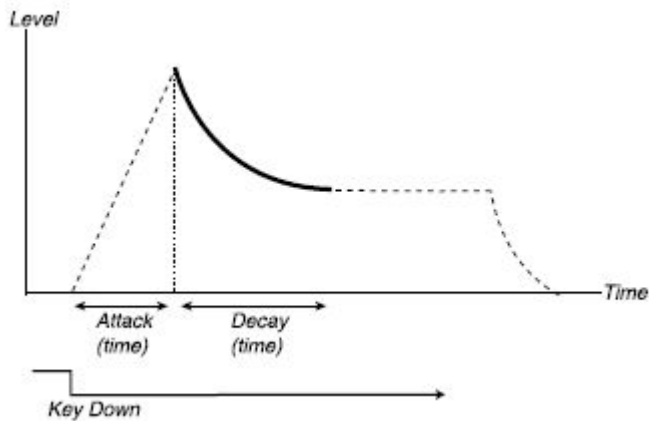
Огибающие используются для модуляции высоты тона, амплитуды, частоты среза фильтра и других параметров звука с целью изменения этих параметров от момента нажатия до момента отпускания клавиши. Классическая огибающая синтезатора имеет четыре параметра: Attack, Decay, Sustain, Release (*атака, первичный спад, продление (уровень стабильного звучания), конечный спад*) поэтому ее еще называют “ADSR-огибающей”.



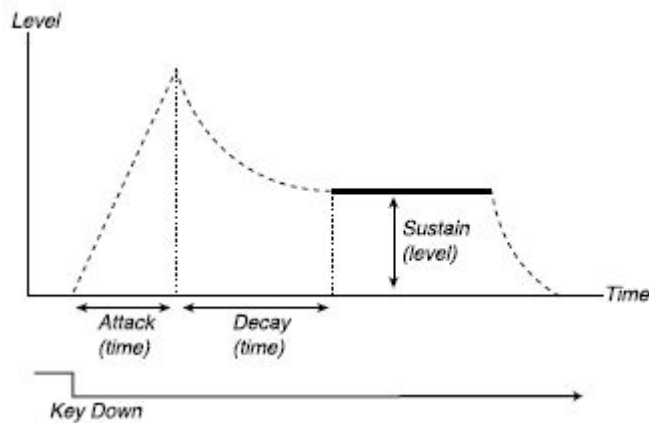
Attack (атака). В момент нажатия клавиши огибающая запускается с нуля и достигает максимального значения (*см. рисунок*). Время достижения максимального значения зависит от регулируемого параметра Attack: если этот параметр равен нулю, то достижение максимального значения происходит мгновенно (*время равно нулю*), при увеличении значения параметра время атаки также увеличивается. К примеру, при модуляции

оггибающей громкости (*амплитуды*) увеличение значения параметра Attack сделает звук “мягче”, а если использовать оггибающую применительно к фильтру, то можно в момент нажатия клавиши придать звуку “вау” звучание.

Decay (первичный спад). После достижения оггибающей максимального значения уровня, начинается первичный спад вплоть до нуля, насколько длителен он будет – зависит от значения регулируемого параметра Decay.

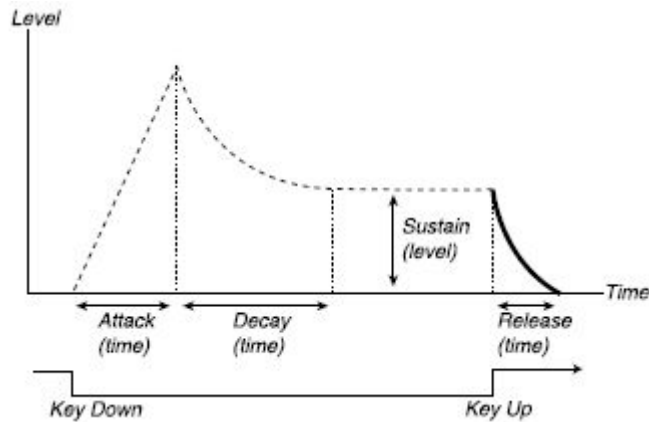


Sustain (продление). Уровень оггибающей не обязательно должен снижаться до нуля после первичного спада (*Decay*). Для этих целей ADSR-оггибающая имеет регулируемый параметр Sustain, значение которого определяет уровень стабильного звучания, на котором оггибающая не должна изменяться после Decay.



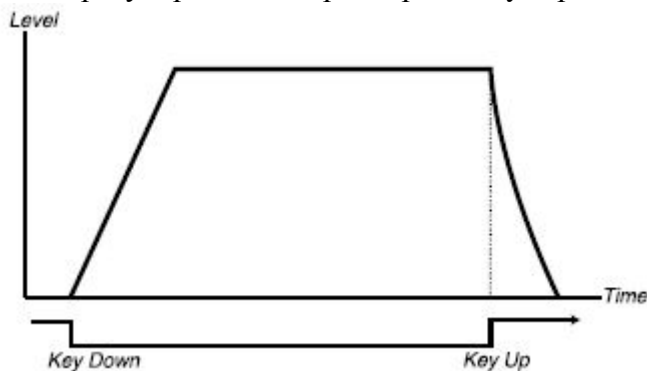
К примеру, при создании звука флейты необходимо установить достаточно высокое значение параметра Sustain оггибающей, модулирующей громкость (*амплитуду*), так как для флейты характерно сохранять неизменной громкость звука пока на ней играют. С другой стороны, для синтеза звука фортепиано необходимо установить значение регулируемого параметра Sustain равным нулю, так как для этого инструмента характерно понижение до тишины громкости после первичного спада (*Decay*) при удержании клавиши.

Release (конечный спад). Как сказано выше, значение уровня огибающей, при котором она не изменяется после первичного спада, пока клавиша не отпущена, задается регулируемым параметром Sustain. Затем, после отпущения клавиши, огибающая падает до нуля. Начинается фаза конечного спада, время которого задается значением регулируемого параметра Release.

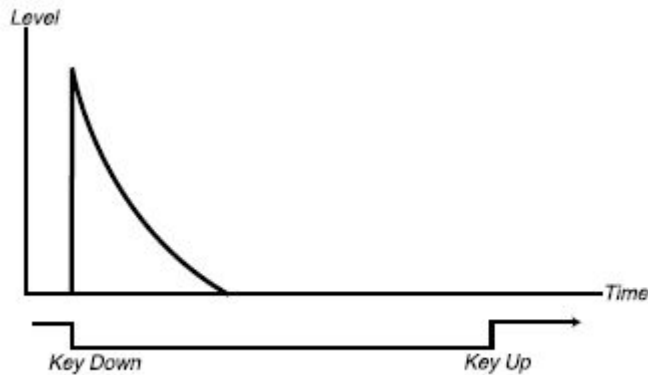


Обратите внимание на то, что только регулируемый параметр Sustain представляет уровень, остальные параметры - время.

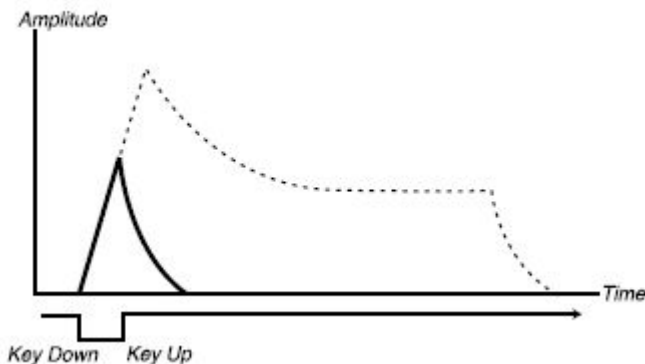
- Если сделать значение регулируемого параметра Sustain максимальным, то регулирование параметра Decay теряет смысл:



- Если сделать значение регулируемого параметра *Sustain* равным нулю, то звук полностью затихнет после того, как закончится фаза *Decay*. С помощью коротких атак (*Attack*) и умеренных значений первичных спадов (*Decay*) можно симулировать поведение струнных щипковых инструментов:



- Если отпустить клавишу еще до того, как огибающая достигнет фазы стабильного звучания (*Sustain*), то произойдет “прыжок” к фазе *Release* (см. рисунок):



Часто уровни огибающей (*вертикальная ось*) приходится изменять, поставив изменение их значений в зависимость от характера исполнения при игре на клавишах, чтобы изменяя стиль игры (*усиливая энергичность нажатия*), делать звук более ярким (*в случае модуляции фильтра*) или более громким (*в случае модуляции усилителя*).

AD-envelope

Простейшая форма огибающей имеет только параметры *Attack* и *Decay*, поэтому она называется “AD-огибающая”. На самом же деле AD-огибающая – это та же ADSR-огибающая, значение регулируемого параметра *Sustain* которой равно нулю. Этот тип огибающей (*часто с возможностью регулирования количества и инверсии*) применяется для модуляции только начала звука. Обычно предусматривается в схеме синтезатора, чтобы модулировать FM амплитуду или высоту тона генерируемого осциллятором звука для создания изменений его тембра на стадии *Attack*.

LFO

LFO – подобен осциллятору, который производит звук в синтезаторе, но с двумя отличиями:

1. LFO осциллирует очень низкие частоты: ниже частоты предела слышимости (до 20 Hz);
2. LFO используется не для производства звука непосредственно, а, напротив, LFO соединяется с другими модулями для модуляции их параметров. Например, если направить его сигнал на высоту тона, то получится вибрато, если на частоту среза фильтра, то получится эффект вау-вау, а если на усилитель, то тремоло.

LFO имеет три параметра: Waveform (*форма волны*), Rate (*частота*) и Amount

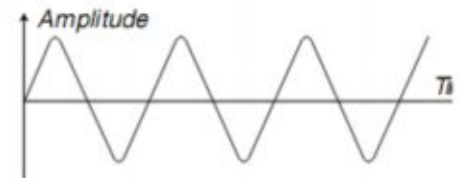
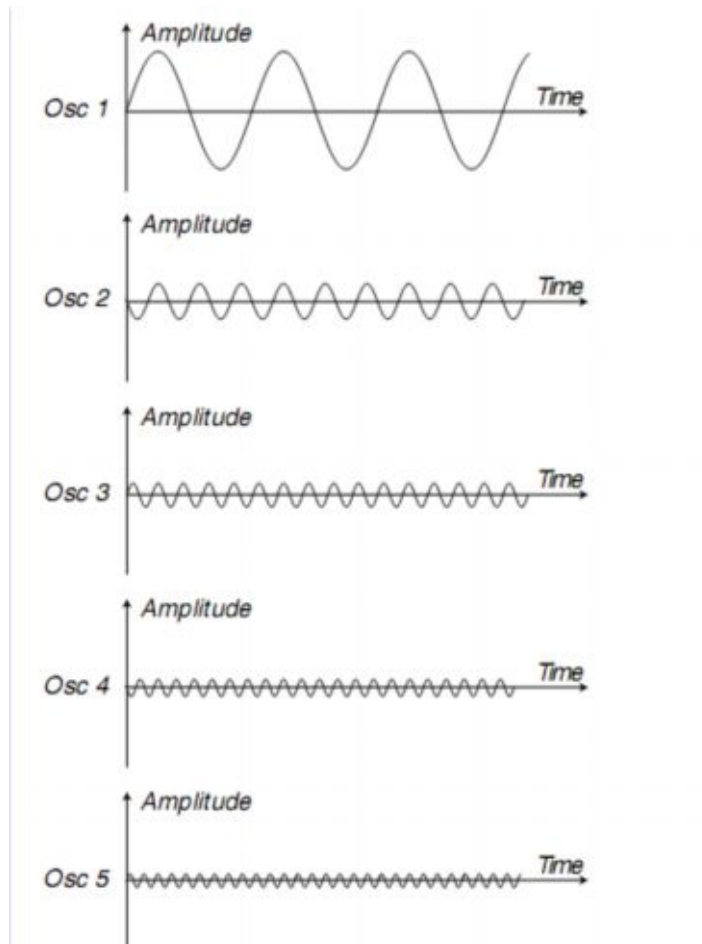
- Waveform определяет тип вибрато: неизменяемое (*треугольная или синус*), изменяемое по линейному закону (*пила*).
- Rate определяет скорость вибрато
- Amount – количество LFO.

Additive synthesis

Аддитивный метод синтеза противоположен субтрактивному методу: вместо использования волн заданных форм с богатым гармоническим содержанием (*пила, импульсные волны*), ослабления или усиления различных частей гармонического спектра этих волн фильтрами, вы создаете свои формы сложением определенного количества волн синусоидальной формы. По такому же принципу действует тональное колесо органа.

Creating a waveform

Для демонстрации основного принципа аддитивного синтеза давайте создадим волну треугольной формы из нескольких синусоидальных волн. Как было сказано выше у волны треугольной формы амплитуды гармоник невелика (*поэтому звук чистый как у флейты*), и к тому же они имеют нечетные номера (*поэтому звучание немного “пустотелое”*). Так как “совершенная” волна треугольной формы состоит из бесконечного числа волн синусоидальной формы, практически невозможно получить ее точно, а лишь приближенно. В примере ниже мы используем шесть различных синусоидальных волн, чтобы получить треугольную. Обратите внимание на то, что амплитуды разных гармоник показаны схематично.



Так почему же мы должны использовать именно аддитивный метод синтеза, а не субтрактивный синтез, чтобы создавать волны сложной формы? Есть существенное отличие: с помощью аддитивного синтеза возможен полный контроль над каждой гармоникой, что делает возможным создание волн любой требуемой (*“tailor-make”*) формы. В субтрактивном синтезе вы управляете только областями гармонического спектра.

Other synthesis and modulation methods

FM synthesis

FM означает Frequency Modulation (*частотная модуляция*) – это метод добавления гармонических и негармонических частот к звуку, модулируя его частоту другим сигналом. Сигнал, направленный на вход FM модуля, изменяет линейно высоту тона в частотной шкале, в противоположность питч-модуляции (*pitch modulation*), где модуляция частоты происходит в шкале нотной. Разница в частоте несущей и модулирующей волны определяет плотность гармоник в звуке. Уровень (*амплитуда*) модулирующей волны определяет полную ширину спектра звука.

На практике звук, полученный FM синтезом, имеет “металлическое” звучание (*“как у колокола”*). Характерная форма волны при использовании FM синтеза – чистый синус, однако любая другая форма может быть использована как в качестве модулирующей, так и в качестве несущей (*модулируемой*) волны, при этом более сложные типы волн сгенерируют больше частот в результирующем спектре, чем более простые.

AM synthesis

АМ означает Amplitude Modulation (*амплитудная модуляция*) – это метод добавления полос частот путем модуляции амплитуды несущей волны. Для иллюстрации того, что происходит при амплитудной модуляции, мы приводим простейший пример, где в качестве несущей и модулирующей волны использованы синусоидальные волны. На графиках слева (*см. рисунки*) показана амплитуда как функция времени, на графиках справа – амплитуда как функция частоты:

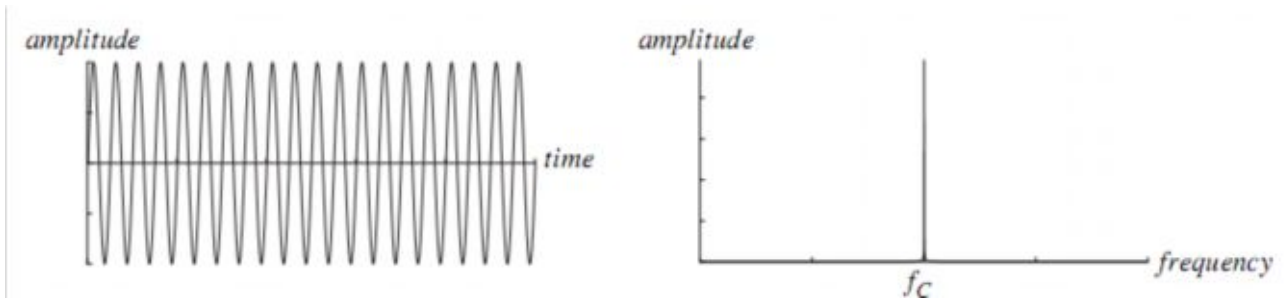


Рис 1. Несущая (модулируемая) волна

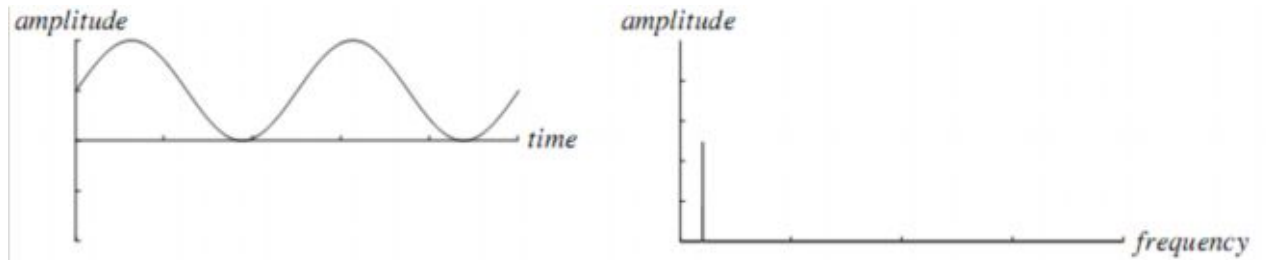


Рис 2. Модулирующая волна

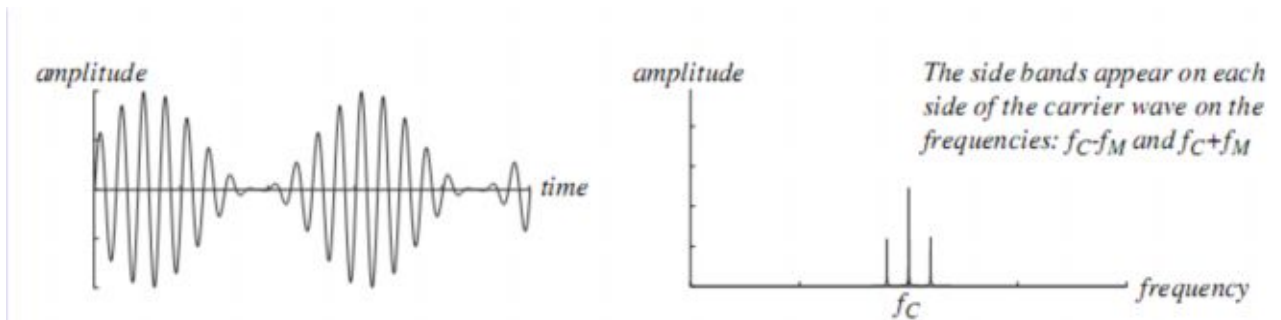


Рис 3. Амплитудная модуляция

(боковые полосы частот появляются на каждой стороне от несущей волны на частотах $f_c - f_m$ и $f_c + f_m$)

Ring modulation

Кольцевая модуляция подобна АМ-модуляции, но вместо однополярной модулирующей волны (*расположена выше нуля в зоне положительных значений*), используется биполярная волна. В примере ниже мы использовали ту же несущую волну, что и в АМ-синтезе. И ту же частоту модулирующей волны, но только волна - биполярная:

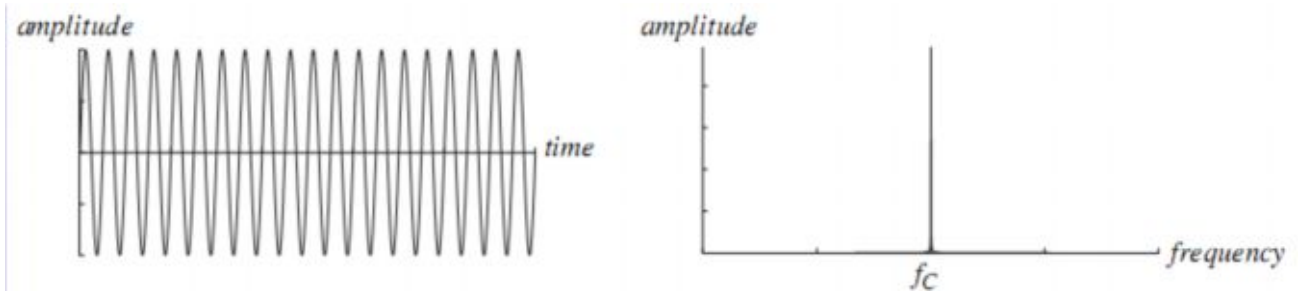


Рис 1. Несущая (модулируемая) волна

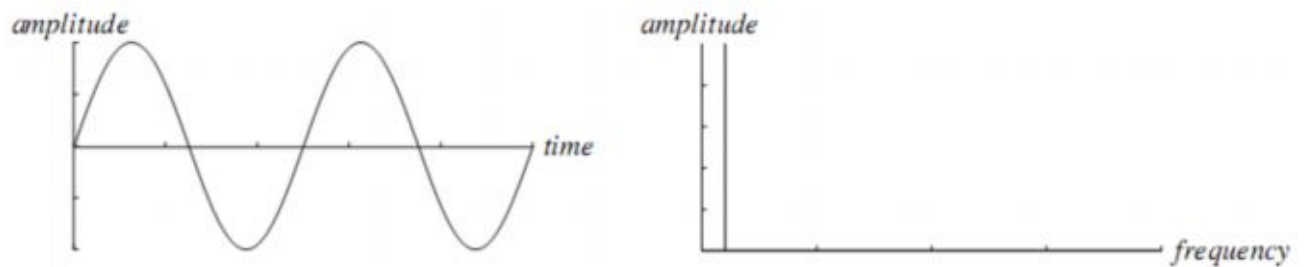


Рис 2. Модулирующая волна

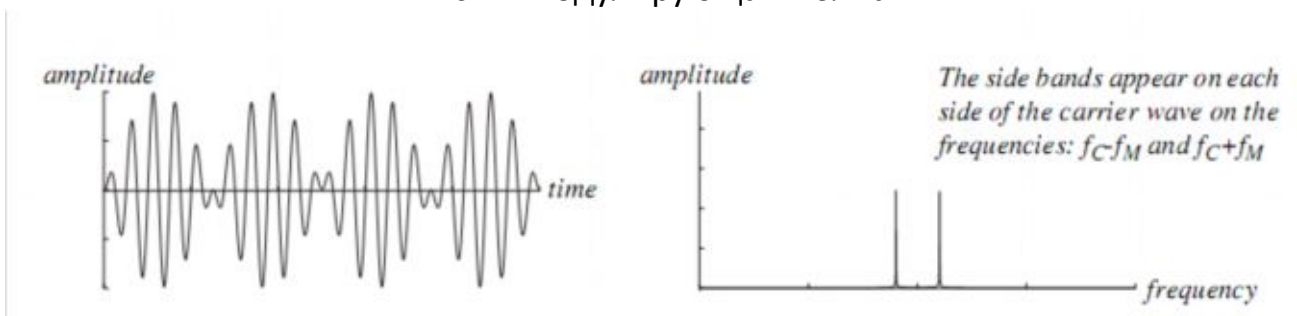


Рис 3. RM модуляция

(боковые полосы частот появляются на каждой стороне от несущей волны на частотах $f_c - f_m$ и $f_c + f_m$)

Как можно видеть из рисунков главное отличие между амплитудной (АМ) и кольцевой (RM) модуляцией заключается в значении уровней амплитуд боковых полос частот и виде несущей волны после модуляции (*при кольцевой модуляции возможно подавление несущей волны*). Еще одно отличие заключается в том, что результирующая волна, полученная после кольцевой модуляции, имеет фазовый сдвиг на 180 градусов от каждого полупериода модулирующей волны.

Если более сложные формы волн (*сложнее чем синус*) будут использованы для амплитудной или кольцевой модуляции, то боковые полосы частот будут сгенерированы для каждой составляющей сигнала.