ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЯ

Передискретизация (изменение частоты) в звуке называется процесс изменения опорной частоты выборок в цифровом потоке данных, например, в формате CD частота выборок составляет 44,1 кГц в секунду, а в системе Windows и Android используется опорная частота 48 кГц. От этой частоты зависит максимальная частота записи, которая должна быть не более, чем в два раза ниже частоты выборок, чтобы сигнал мог быть восстановлен. Поэтому для CD ВЧ ограничена около 20 кГц. Аналогом дискретизации в фото является ресайз, изменения разрешения картинки или видео.

От алгоритма пересчета сильно зависит качество, могут появляться как артефакты, так и замыливание (сглаживание) картинки или звука. Уверен, многие это замечали на компьютере, на экране при отображении фото, когда резкость ухудшается или при просмотре видео на YouTube при изменении разрешения картинки резкость заметно меняется. В хороших аудиоплеерах встраиваются качественные алгоритмы передискретизации, где даже можно выбрать тип фильтрации (сглаживания).

Сегодня в современных бюджетных ЦАП передискретизацию делают качественно за счет внутренних качественных алгоритмов, когда делается внутренняя (кратная) передискретизация, чтобы сгладить ступенчатый сигнал на выходе, где частота повышается в несколько раз в 4, 8 и пр. В дорогих ЦАП ставят обычно для кварцевых генератора на частоту 44,1 кГц и 48 кГц, на самом деле образующих сетку частот, так как принято на практике использовать кратные частоты, например 44.1, 88.2,176.4 кГц и 48, 96, 192 кГц…

При передискретизации **всегда** в сигнал вносятся характерные, так называемые ошибки квантования (цифровые), поэтому все это измеряется в виде искажений, что хотел показать на примере. Буду проигрывать тестовый сигнал 44,1 кГц и 48 кГц и буду исследовать на пример наличия артефактов и искажений, вызванных пересчетом данных.

Как ЦАП использовал бюджетный ЦАП **SIMGOT DEW4X** и **Shanling UA3**. Подключены они были к телефону **POCO M3**, плеер был использован для проигрывания **Eddict**, где есть настройка точного побитового вывода аудиопотока, чтобы система Андроида не влияла на данные, не изменяла.

Записывался сигнал для анализа с помощью программы **RMAA,** с использованием АЦП **ESI UGM192** на максимальной для него частоте записи 192 кГц и битности сигнала 24 бита, чтобы иметь минимальное влияние АЦП на искажения. Внутренняя регулировка громкости в обоих ЦАП была выставлена на максимум, уровень при записи регулировался громкостью в плеере (в телефоне), т.е. на уровне цифровых данных, чтобы на АЦП получить максимальный уровень, это примерно 0,5 В в пике на синусе 1 кГц с уровнем записи 0 дБ (максимальный уровень записи).

В плеере громкость понижается за счет пересчета уровней цифрового сигнала, где разрядность была выставлена в плеере избыточная 32 бита, что позволяет без потери качества и деградации 16 битного сигнала регулировать сигнал по уровню. Нагрузка на выходе ЦАП отсутствовала, чтобы иметь минимальные искажения на выходе.

Громкость в плеере для обоих ЦАП составила 65 единиц из 100 максимальных. Это тот уровень, на котором обычно слушаю музыку через данный ЦАП на наушниках **Shure SRH840**. Ниже в таблицу сведены измеренные параметры.

Таблица 1.

Test results

Device:	DEW4X 44.1 кГц	DEW4X 48 кГц	Shanling UA3 44.1 кГц	Shanling UA3 48 кГц
Sampling mode:	16-bit, 44 kHz	16-bit, 48 kHz	16-bit, 44 kHz	16-bit, 48 kHz
Frequency response, dB	+0.01, -0.03	+0.01, -0.03	+0.03, -1.22	+0.02, -0.79
Noise level, dBA	-94.2	-94.6	-94.2	-94.5
Dynamic range, dBA	94.1	94.5	94.2	94.4
THD, %	0.0009	0.0009	0.0010	0.0010
IMD + Noise, %	0.0058	0.0058	0.0056	0.0056
Stereo crosstalk, dB	-93.8	-93.2	-92.9	-93.9
IMD+N (swept freq.), %	0.0060	0.0062	0.0062	0.0062
	☑ Select	☐ Select	☑ Select	☐ Select

HINT: Right-click on result boxes to view the detailed reports...

По таблице мы видим, что изменение опорной частоты не меняет параметры совершенно, они остаются в пределах погрешности измерения. Но лучше искать разницу на графике нелинейных искажений (THD), ниже показаны графики, слева для частоты 44,1 кГц, справа для 48 кГц.

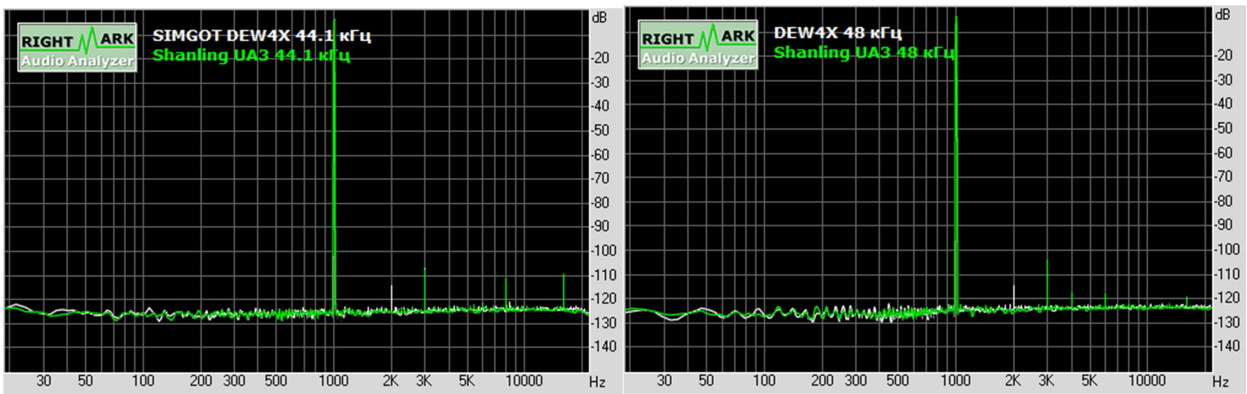

Рис.1. Графики нелинейных искажений THD.

На графиках вижу типичные искажения для данных ЦАП, где есть вторая и третья гармоника. А это значит точный побитовый вывод в плеере работает и ЦАП делает качественную внутреннюю передискретизацию, сомневаюсь, что в них два кварца используется, на сайте об этом не пишут.

А теперь проведу те же измерения, только включу системный вывод данных, по умолчанию, когда система (Андроид) выводит данные на ЦАП всегда с частотой 48 кГц, т.е. проводит внутреннюю передискретизацию в системе, если запись отличается от 48 кГц.

Отключение/включение побитового вывода в плеере **Eddict** делается через: **Настройки- вывод USB- специальный режим USB- вкл/откл**.

Ниже показаны результаты измерения при использования системного выхода в плеере.

Таблица 2

Test results

Device:	DEW4X 44.1 кГц	DEW4X 48 кГц	UA3 44.1 кГц	UA3 48 кГц
Sampling mode:	16-bit, 44 kHz	16-bit, 48 kHz	16-bit, 44 kHz	16-bit, 48 kHz
Frequency response, dB	+0.01, -0.03	+0.01, -0.03	+0.02, -0.79	+0.02, -0.79
Noise level, dBA	-97.2	-97.6	-94.3	-94.5
Dynamic range, dBA	85.5	86.0	83.5	84.1
THD, %	0.0090	0.0087	0.013	0.011
IMD + Noise, %	0.015	0.016	0.019	0.020
Stereo crosstalk, dB	-95.1	-94.6	-93.3	-94.8
IMD+N (swept freq.), %	0.016	0.017	0.021	0.022
	Select	Select	Select	Select

HINT: Right-click on result boxes to view the detailed reports...

Как видим, по параметрам **искажения резко выросли**, <u>даже там, где передискретизации нет на частоте 48 кГц</u>! Ниже полученные графики, слева для частоты 44.1 кГц, справа для 48 кГц отдельно для ЦАП **SIMGOT DEW4X**, чтобы искажения не накладывались.

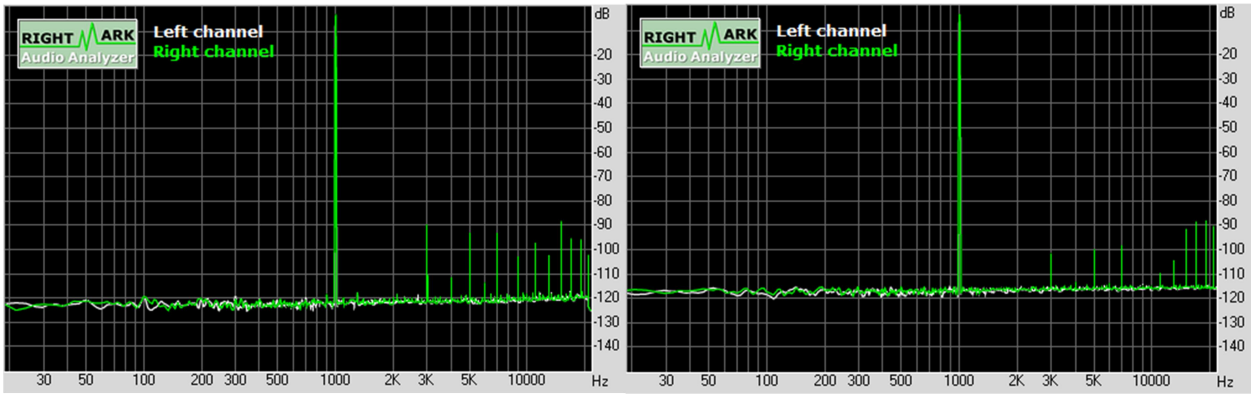

Рис.2. Графики нелинейных искажений THD для SIMGOT DEW4X.

На правом графике мы видим искажения, которые добавляет телефон, фирма **POCO** (Xiaomi), это их фирменный трюк для подкрашивания звука, видимо, задается не стандартный цифровой фильтр, который добавляет гармоники для подкрашивания звука.

И поэтому громкость на выходе своих телефонов Xiaomi ограничивают, так как на высокой громкости искажения резко начинают расти, становятся заметными на слух. Это видно при включении увеличения громкости, которое есть в настройках, но там еще и АЧХ меняется, в зависимости от выбора варианта. В общем фирма сделала всё, чтобы пользователь не услышал точного звука в их телефоне)))

На левом графике на частоте 44.1 кГц мы видим, что к искажениям ещё добавляются 3, 5 и 7 гармоники, которых вообще нет на частоте 48 кГц. **Это есть артефакты от передискретизации**, так как запись с частотой 44,1 кГц, поэтому система пересчитывает поток в 48 кГц.

Ниже показаны те же графики для **Shanling UA3**, слева для частоты 44,1 кГц, справа для 48 кГц.

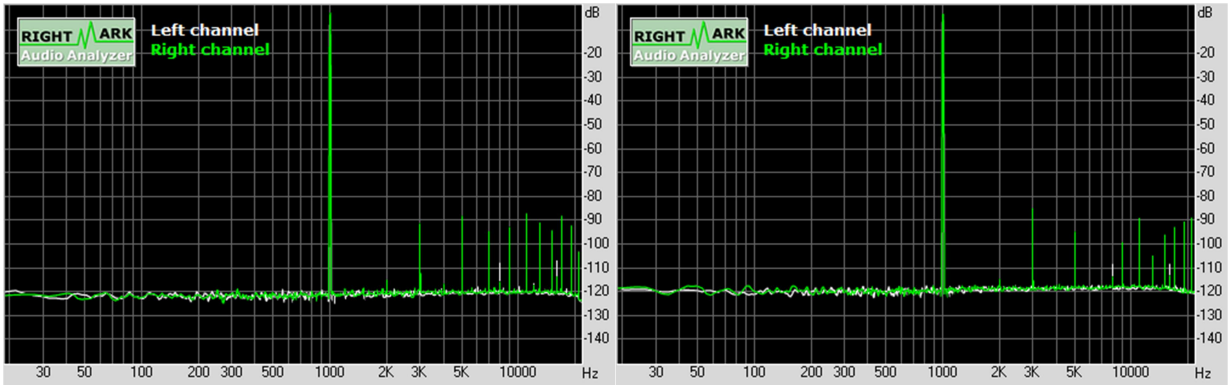

Рис.3. Графики нелинейных искажений THD для Shanling UA3.

Картина примерно та же самая. Как видим, **ни о каком Hi-Fi при этом говорить не приходится**, сигнал меняется на цифровом уровне, без возможности это изменить в настройках телефона. Но можно использовать побитовый выход в плеере, в том же **Eddict** можно выставить частоту **192 кГц**, что будет аналогично внутренней 4-х кратной передискретизации. При этом я вижу, что частота реально меняется, у ЦАП Shanling UA3 на частоте 176,4 и 192 кГц загорается белый светодиод, в то время как на частоте 44,1 кГц и 48 кГц горит синий светодиод.

И поэтому сделал измерения для этого варианта, с передискретизацией в плеере, ниже в таблице 3 показаны результаты.

Таблица 3

Test results

Device:	UA3 44.1 кГц	UA3 48 кГц	DEW4X 44,1 кГц	DEW4X 48 кГц
Sampling mode:	16-bit, 44 kHz	16-bit, 48 kHz	16-bit, 44 kHz	16-bit, 48 kHz
Frequency response, dB	+0.01, -0.10	+0.01, -0.09	+0.00, -0.03	+0.00, -0.02
Noise level, dBA	-93.9	-94.1	-94.3	-94.6
Dynamic range, dBA	93.8	94.0	94.0	94.4
THD, %	0.0010	0.0010	0.0008	0.0009
IMD + Noise, %	0.0060	0.0059	0.0057	0.0058
Stereo crosstalk, dB	-94.1	-94.4	-93.2	-94.3
IMD+N (swept freq.), %	0.0062	0.0063	0.0061	0.0061
	Select	Select	Select	Select

HINT: Right-click on result boxes to view the detailed reports...

Если мы сравним с таблицей 1, то разницы не увидим. И ниже отдельно графики, чтобы сравнить с рис.1.

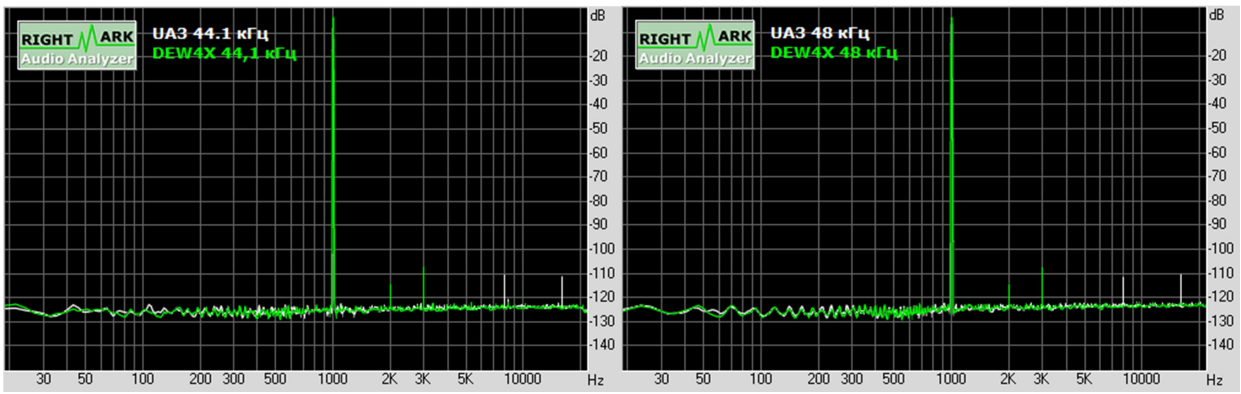

Рис.4. Графики нелинейных искажений THD.

Как видим, графики полная копия, с учетом погрешности измерения. Таким образом, мы провели передискретизацию в плеере, а на ЦАП подали поток на частоте 192 кГц, кратный 48 кГц и не увидели роста искажений на частоте записи 44,1 кГц, потому, что передискретизация используется 4-х кратная, поэтому результат получается качественный.

Провел дополнительное исследование, использовал только ЦАП **SIMGOT DEW4X** и в плеере **Eddict** принудительно выставил передискретизацию, проиграл запись с частотой 44,1 кГц и сделал передискретизацию на 48 кГц в плеере (**1 столбец**), потом проиграл запись 48 кГц, при выводе 48 кГц, т.е. без пересчета (**2 столбец**). И сделал обратное преобразование, запись 44,1 кГц вывел в плеере как запись 44,1 кГц (**3 столбец**) и запись 48 кГц вывел с частотой 44,1 кГц (**4 столбец**). И получил следующие данные.

Таблица 4

Test results

Device:	44.1-->48	48-->48	44.1-->44.1	48-->44.1
Sampling mode:	16-bit, 44 kHz	16-bit, 48 kHz	16-bit, 44 kHz	16-bit, 48 kHz
Frequency response, dB	+0.01, -0.03	+0.01, -0.03	+0.01, -0.03	+0.01, -0.03
Noise level, dBA	-94.2	-94.5	-94.3	-94.5
Dynamic range, dBA	94.2	94.4	94.2	94.4
THD, %	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008
IMD + Noise, %	0.0057	0.0058	0.0058	0.0057
Stereo crosstalk, dB	-93.0	-93.5	-93.6	-92.9
IMD+N (swept freq.), %	0.0060	0.0061	0.0060	0.0060
	☑ Select	☐ Select	☑ Select	☐ Select

HINT: Right-click on result boxes to view the detailed reports...

При этом на графиках тоже не вижу никакой деградации от передискретизации!!! **Плеер делает это очень качественно**, никаких дополнительных гармоник не появляется, как в системе, все чисто!

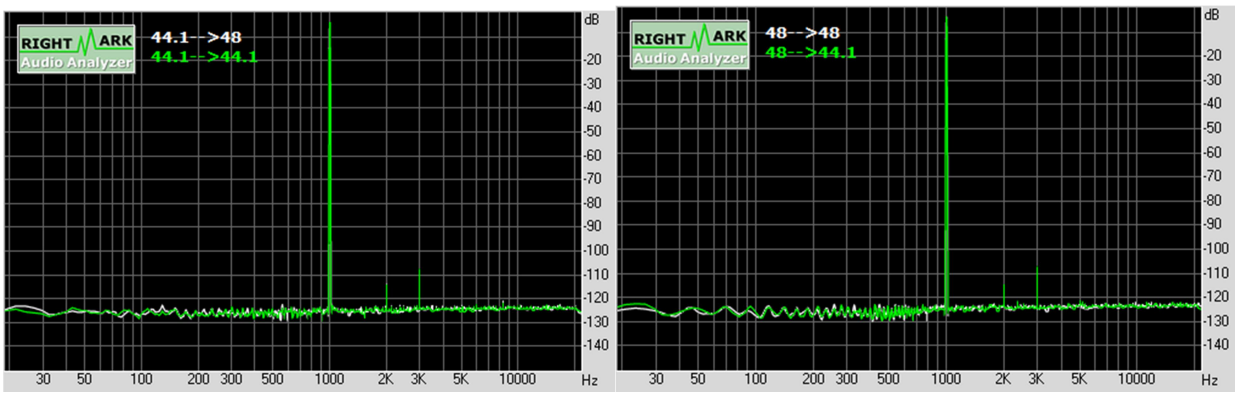

Рис.5. Графики нелинейных искажений THD.

Но на АЧХ работу передискретизации всё же видно, т.е. она работает.

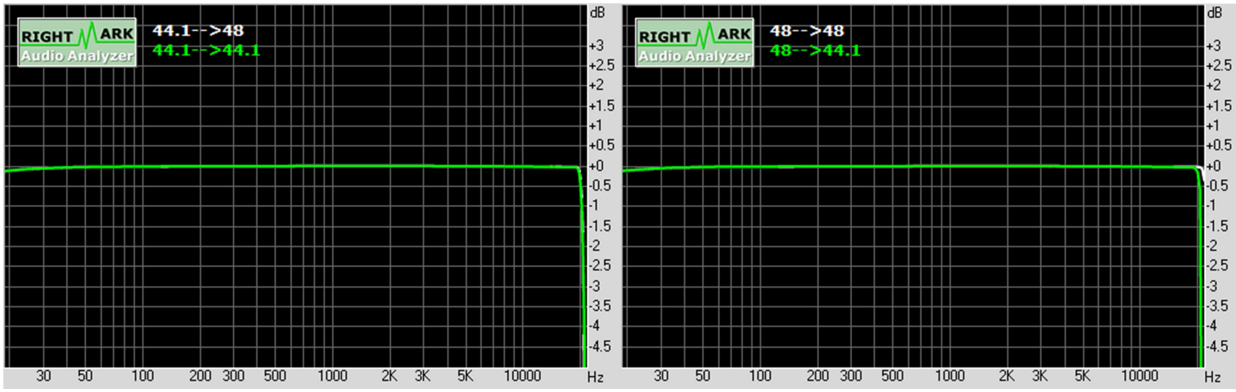

Рис.6. АЧХ в разных режимах при передискретизации в плеере.

На правом графике мы видим на зеленом графике, что запись с частотой 48 кГц ограничилась по ВЧ на уровне выходной частоты 44,1 кГц, что логично. И поэтому решил посмотреть импульс на осциллографе. Ниже полученные графики, идут в порядке соответствия столбцам таблицы 4.

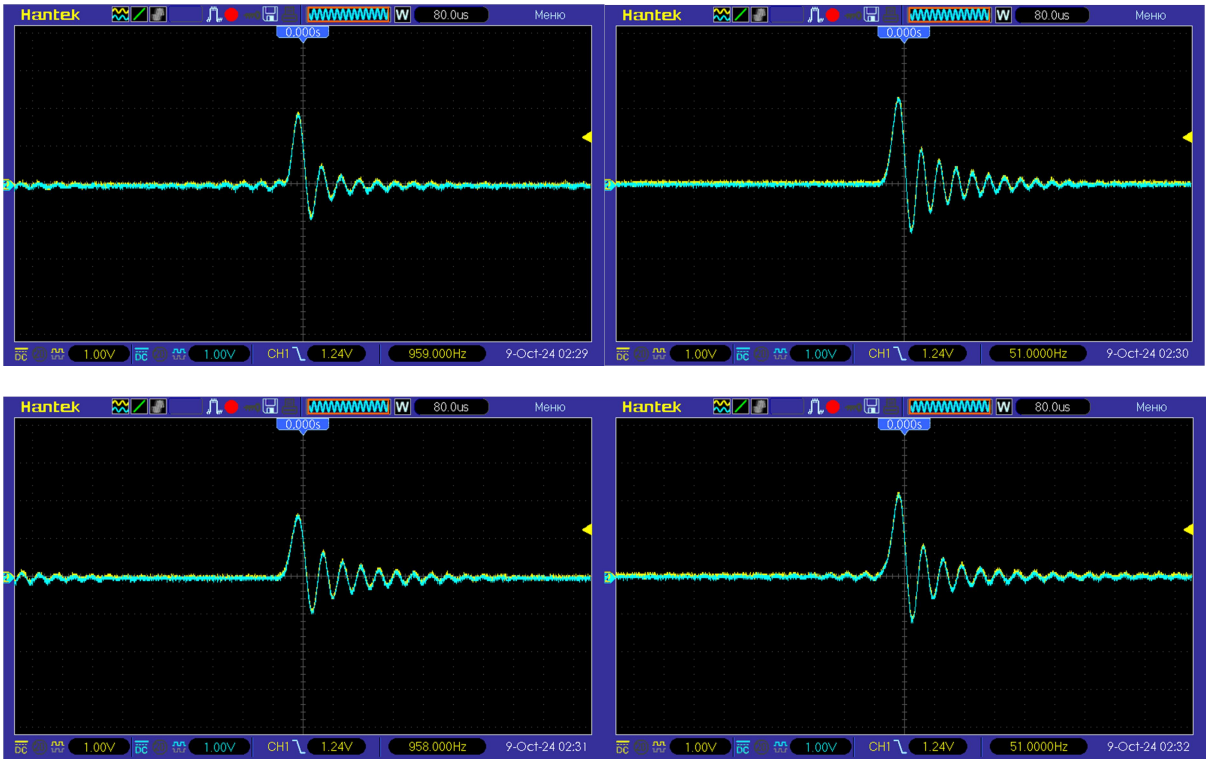

Рис.7. Полученные импульсы при передискретизации в плеере Eddict.

При этом импульс стоит на месте, не дергается, как это обычно происходит при подобной передискретизации в Windows, я такое первый раз вижу, жму руку разработчикам плеера Eddict от Shanling!

При этом по графикам видно, когда происходит пересчет, то импульс меняет форму от своего стандартного вида, это график 1 (слева вверху) и график 4 (справа внизу). График 2 (справа вверху) и график 3 (слева внизу) идут без передискретизации, поэтому импульсная характеристика для этого ЦАП стандартная. При этом запись с частотой 44,1 кГц имеет выше уровень, записана по максимуму 0 дБ, в то время как запись с частотой 44,1 кГц имеет пониженный уровень (около -6 дБ), поэтому высота импульса различается.

А ниже приведены графики, как делает передискретизацию система телефона, первый (левый) график это запись с частотой 44,1 кГц, которая в системе пересчитывается в 48 кГц. Второй график (справа), это запись 48 кГц, которая системой не пересчитывается, так как частота совпадает.

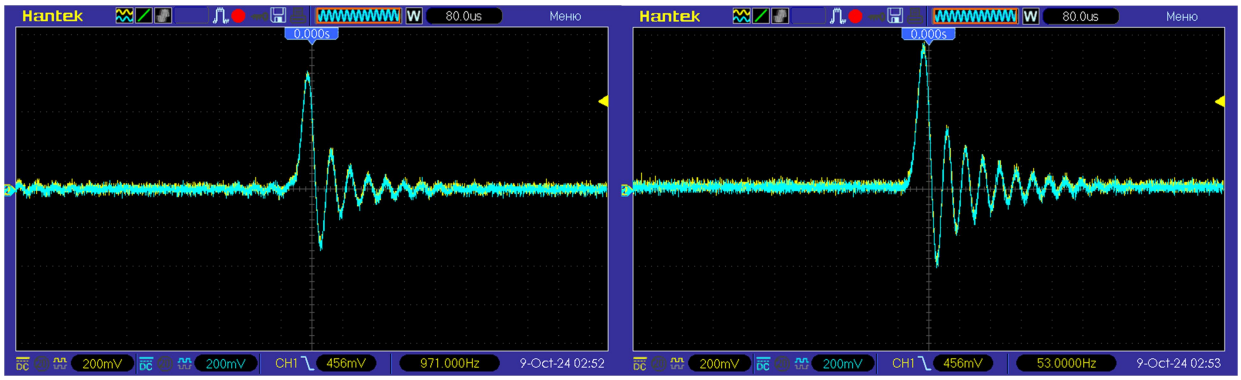

Рис.8. Полученные импульсы при передискретизации в системе до частоты 48 кГц.

На левом графике мы видим изменение формы импульса, так как система пересчитывает в частоту 48 кГц, при этом сигнал на осциллографе в реальном времени как бы немного дышит, отсюда и берутся искажения дополнительные или гармоники 3, 5 и 7, как я думаю. На правом графике воспроизводилась запись 48 кГц, поэтому импульс без изменений. При этом по уровню напряжения импульсы получились много ниже, чем при побитовом выводе плеера, так как система телефона, как уже сказал, снижает уровень, плюс обогащает сигнал ВЧ гармониками. Масштаб на напряжению на рис.8 меньше в 5 раз, чем на рис.7, при этом громкость в телефоне стояла на 100%, без дополнительного усиления, где АЧХ ещё меняется. Xiaomi знает, как звук разукрашивать)

И как видим, плеер Eddict делает очень качественную свою внутреннюю передискретизацию, чем не может похвастаться система Windows, там биения импульса при передискретизации видны явно больше, на осциллографе в реальном времени, если смотреть на экране.

Вывод. Как видим по измерениям, в бюджетных ЦАП нет никакой необходимости ставить два кварца отдельных на разные частоты 44,1 кГц и 48 кГц, процессор с этой ролью справляется отлично, качественно пересчитывает внутри ЦАП сигнал. Или это можно сделать в программе (в плеере), если она позволяет. Причем, качественный пересчет даже возможен при близких частотах 44,1 и 48 кГц, но это возможно только при повышении битности сигнала по амплитуде (24, а лучше 32 бита использовать), чтобы не возникали биения, вызванные ошибками квантования по уровню сигнала при пересчете.

И как видим, определить, измерить точно, какой используется в ЦАП кварц, на какую частоту не возможно через измерения, по крайней мере, на таком оборудовании, где искажения передискретизации уже меньше, чем погрешность измерения АЦП.

Как уже сказал, система Windows делает передискретизацию явно хуже, там больше биение сигнала и значит гармоник добавляется больше, хотя это можно использовать для обогащения сигнала, чтобы оживить музыку. Что позволяет, на мой взгляд, немного лучше разделить ВЧ от СЧ, добавить небольшой эффект реверберацией.

И, конечно, качество передискретизации сильно зависит от используемых алгоритмов, от битности сигнала, поэтому искажения тоже меняются и на слух это может быть заметно, по крайней мере, в наушниках приличных и на хорошем ЦАП-е и при желании. Большинство слушателей эти искажения не заметят, особенно на колонках, поэтому производители не тратят много ресурсов процессорных для данного процесса, что логично и понятно. А для любителей чистого звука нужно использовать аудиоплееры, побитовый выход, где искажения от передискретизации минимальны и на слух я их не слышу, даже при быстром переключении, если только на уровне кажется…