

ПОВЫШЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ЦИФРОВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО СИНТЕЗАТОРА ПУТЕМ ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИИ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

В. И. Долгов, А. П. Мартынов, Д. А. Хазов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

В настоящее время для современной радиоэлектроники требуются высококачественные источники сигналов, в качестве которых применяют синтезаторы частоты. Они создают сетку стабильных частот, внутри которой возможно быстрое переключение с одной частоты на другую. Такой принцип лежит в основе многоканальных систем связи, радиолокационной техники, новейших измерительных приборов. Синтезаторы частот могут быть построены с помощью систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), с помощью систем на основе прямого цифрового синтеза, путем комбинации данных методов между собой, а также прямым аналоговым синтезом частот.

В составе многих современных систем формирования радиосигналов имеется цифровой вычислительный синтезатор (ЦВС), работа которого основана на методе прямого цифрового синтеза. Он обеспечивает высокое быстродействие, широкий диапазон, малый шаг сетки частот. Наличие цифрового интерфейса позволяет управлять работой ЦВС программным методом. Данный подход позволяет исключить этапы составления уравнений схем и их решения с целью получения аналитических выражений, например, динамических характеристик. Это позволяет сократить время и упростить анализ различных радиоустройств.

Однако данные синтезаторы имеют один важный недостаток – низкую основную частоту выходного сигнала. Это вызвано, прежде всего, тем, что частота синтезируемого сигнала не может быть выше 45% тактовой частоты ЦВС. Преодолевается такое ограничение, с одной стороны, совершенствованием техпроцесса изготовления цифровых интегральных микросхем и ростом тактовой частоты, которая в настоящий момент у лучших ЦВС составляет единицы ГГц. Дальнейшее продвижение по такому пути затруднено физическими пределами, ограничивающими уровень техпроцесса, размеры наименьших элементов цифровых интегральных микросхем. С другой стороны, повысить выходную частоту ЦВС можно, комбинируя способы умножения частоты и использования различных систем ФАПЧ.

Кроме того, для повышения выходной частоты имеется возможность использования высокочастотных дискретных составляющих – образов основной частоты ЦВС [1]. Они появляются в процессе работы

цифроаналогового преобразователя, входящего в состав цифрового вычислительного синтезатора. Обычно данное явление никак не используется, и от образов избавляются с помощью фильтра низких частот (ФНЧ). Одной из причин такого подхода является низкая амплитуда образов относительно амплитуды гармоники основной частоты. Поэтому для использования требуемого образа применяют полосовой фильтр и дополнительный усилитель. Но все дополнительные элементы, так или иначе, ухудшают шумовые характеристики создаваемого формирователя частот.

Постановка задачи

Для увеличения амплитуд образов основной частоты ЦВС, и тем самым улучшения отношения сигнал/шум, возможно применить так называемую передискретизацию выходного сигнала [2]. Передискретизация выходного сигнала ЦВС позволяет перераспределить энергию от гармоники основной частоты к гармоникам образов так, что амплитуды некоторых высокочастотных гармоник будут больше, чем до передискретизации. Передискретизация осуществляется с помощью аналогового ключа, интервалы включения и отключения которого задаются сигналом, полученным с помощью преобразования скважности тактового сигнала цифрового вычислительного синтезатора.

В ходе исследования влияния передискретизации выходного сигнала ЦВС на уровни спектральных составляющих необходимо решить следующие задачи:

- разработать структурную схему и схемотехническую модель передискретизатора сигнала ЦВС;
- провести математическое моделирование спектра и огибающей;
- провести экспериментальные исследования выходного сигнала ЦВС, его спектра и огибающей;
- провести анализ влияния передискретизации на амплитуды образов основной частоты при различных скважностях и частотах выходного сигнала ЦВС.

Схема и модель ЦВС с передискретизатором

Структурная схема передискретизатора выходного сигнала ЦВС приведена на рис. 1.

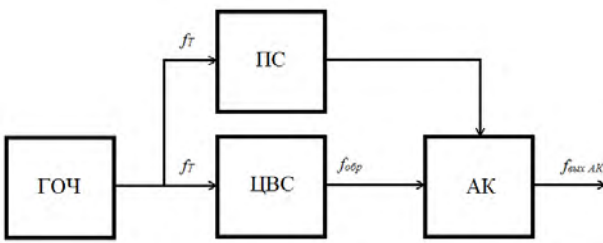


Рис. 1. Структурная схема ЦВС с передискретизацией выходного сигнала: ГОЧ – генератор опорной частоты; ПС – преобразователь скважности; ЦВС – цифровой вычислительный синтезатор; АК – аналоговый ключ

ГОЧ выполнен на высокостабильном кварцевом резонаторе. ПС осуществляет изменение скважности тактовых импульсов от 2 до требуемого значения. На управляющий вход АК подаются импульсы с преобразователя скважности.

В данной структурной схеме частота тактового сигнала ЦВС равна частоте ГОЧ, поэтому преобразователь скважности ПС подключается напрямую. В случаях, когда применяется интегральный ЦВС, в составе которого имеется встроенный умножитель тактовой частоты на основе системы ФАПЧ, тактовый сигнал для преобразователя скважности требуется брать с его выхода непосредственно перед ЦВС. В простейшем случае преобразователь скважности

ПС представляет собой логический элемент «И». На один из его входов подается исходный тактовый сигнал, а на другой – тактовый сигнал, прошедший через интегрирующую RC-цепь (для повышения скважности выходного сигнала ПС выше 2) или через дифференцирующую RC-цепь (для понижения скважности ниже 2). В результате на выходе логического элемента создается сигнал в виде последовательности прямоугольных импульсов с требуемой скважностью. Данный сигнал управляет работой аналогового коммутатора, который в определенные интервалы времени пропускает выходной сигнал ЦВС, а в остальное время находится в разомкнутом состоянии. При фильтрации образов необходимо учитывать, что коэффициент деления ЦВС должен находиться в пределах 0,15...0,35 по формуле(1).

$$K_{\text{ЦВС}} = f_{\text{ЦВС}} / f_T, \quad (1)$$

где $f_{\text{ЦВС}}$ – выходная частота ЦВС, f_T – тактовая частота.

Для оценки эффективности предлагаемого решения проведено схемотехническое моделирование исследуемого устройства, показанного на рис. 1. Данная модель, реализованная в программе Micro-CAP представлена на рис. 2.

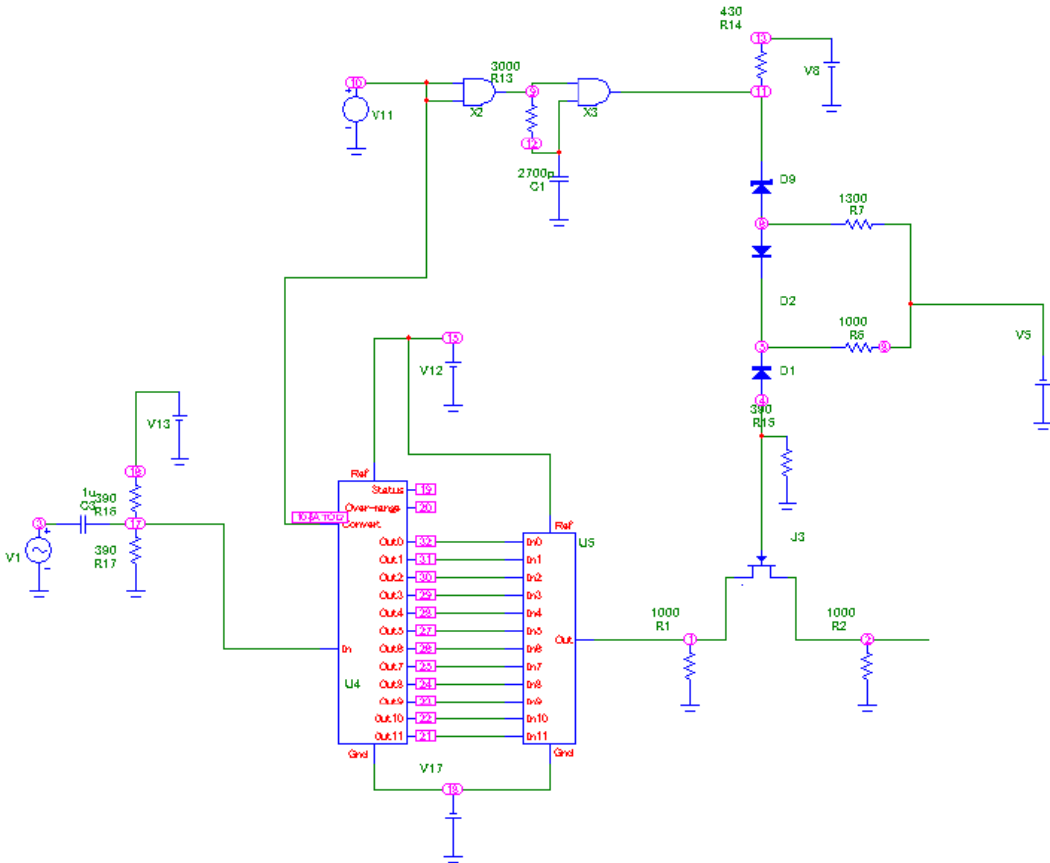


Рис. 2. Схемотехническая модель ЦВС с передискретизацией выходного сигнала

Результаты моделирования и экспериментов

Результаты моделирования работы исследуемого устройства во временной области представлены на рис. 3–4.

В данной модели в качестве ЦВС используется последовательное соединение источника идеального синусоидального сигнала, аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей, тактовым сигналом для которых служил выходной сигнал ГОЧ. В качестве ГОЧ принят идеальный источник прямоугольных импульсов с периодом повторения 1 мкс и скважностью 2. Синтезируемая частота ЦВС в такой модели ЦВС задается частотой источника идеального синусоидального сигнала. В качестве АК использован идеальный аналоговый ключ, управляе-

мым напряжением импульсной последовательности со скважностью 5 или 1,25. Основная частота выходного сигнала ЦВС, составляет 150 кГц, либо 250 кГц. Тактовая частота соответствует значению в 1 МГц.

На рис. 5 представлены результаты моделирования выходного сигнала ЦВС в частотной области до и после передискретизации для различных скважностей и частот выходного сигнала ЦВС.

Полученные спектры содержат гармоники основной частоты ЦВС ($f_{\text{ЦВС}} = 150$ кГц на рис. 6 и $f_{\text{ЦВС}} = 250$ кГц на рис. 7), их образы с частотами $f_{\text{обр}} = |nf_T + f_{\text{ЦВС}}|$, тактовую частоту f_T и ее гармоники, а также дискретные и шумовые побочные спектральные составляющие.

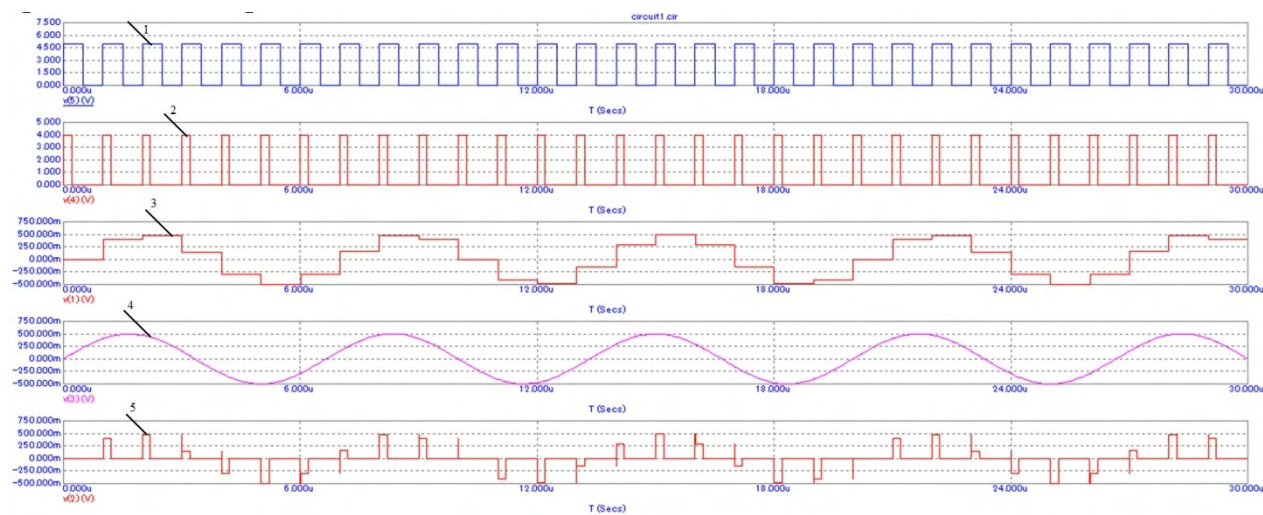


Рис. 3. Осциллограммы сигналов устройства с передискретизацией выходного сигнала ЦВС при $q = 5$ и $K_{\text{ЦВС}} = 0,15$: 1 – тактового сигнала, 2 – сигнала с преобразованной скважностью, 3 – выходного сигнала АЦП, 4 – выходного сигнала ЦАП, 5 – передискретизированного сигнала

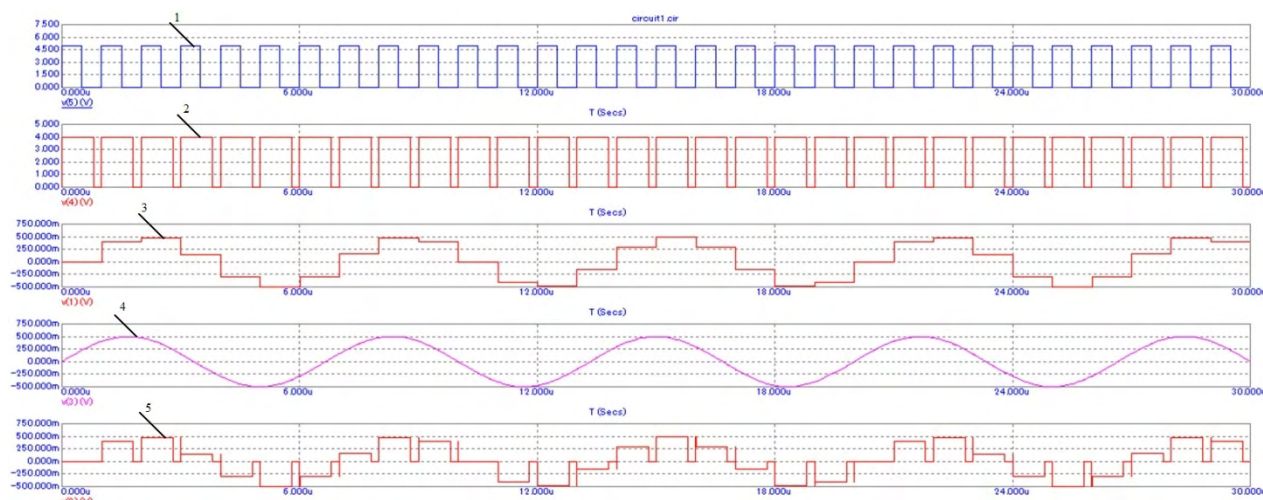


Рис. 4. Осциллограммы сигналов устройства с передискретизацией выходного сигнала ЦВС при $q = 1,25$ и $K_{\text{ЦВС}} = 0,15$: 1 – тактового сигнала, 2 – сигнала с преобразованной скважностью, 3 – выходного сигнала АЦП, 4 – выходного сигнала ЦАП, 5 – передискретизированного сигнала

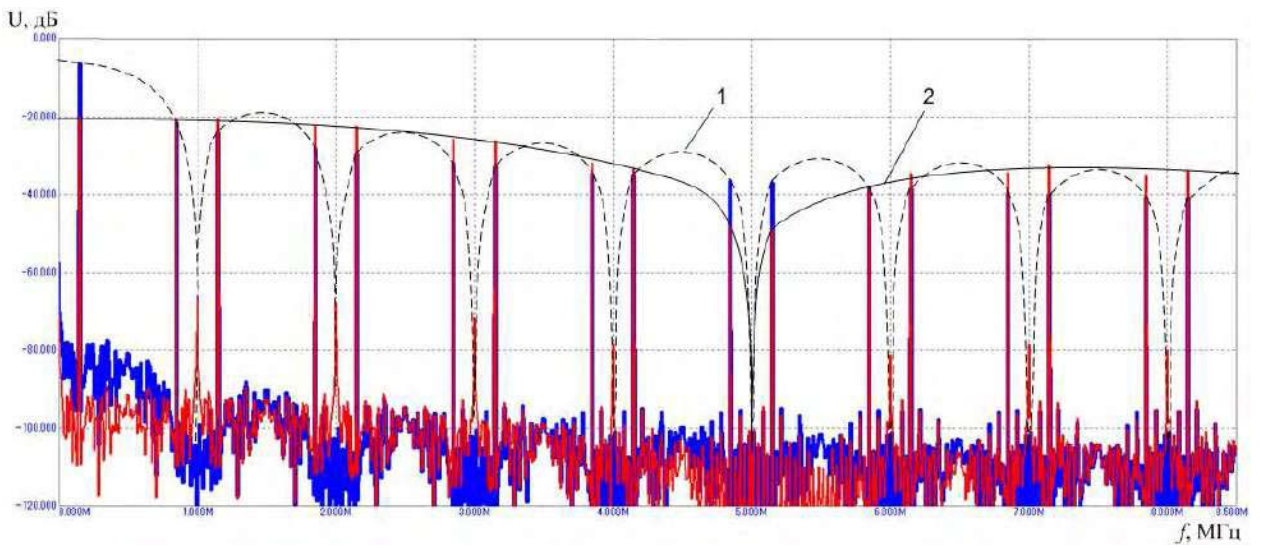


Рис. 5. Спектр выходного сигнала ЦВС при $q = 5$ и $K_{\text{ЦВС}} = 0,15$: 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

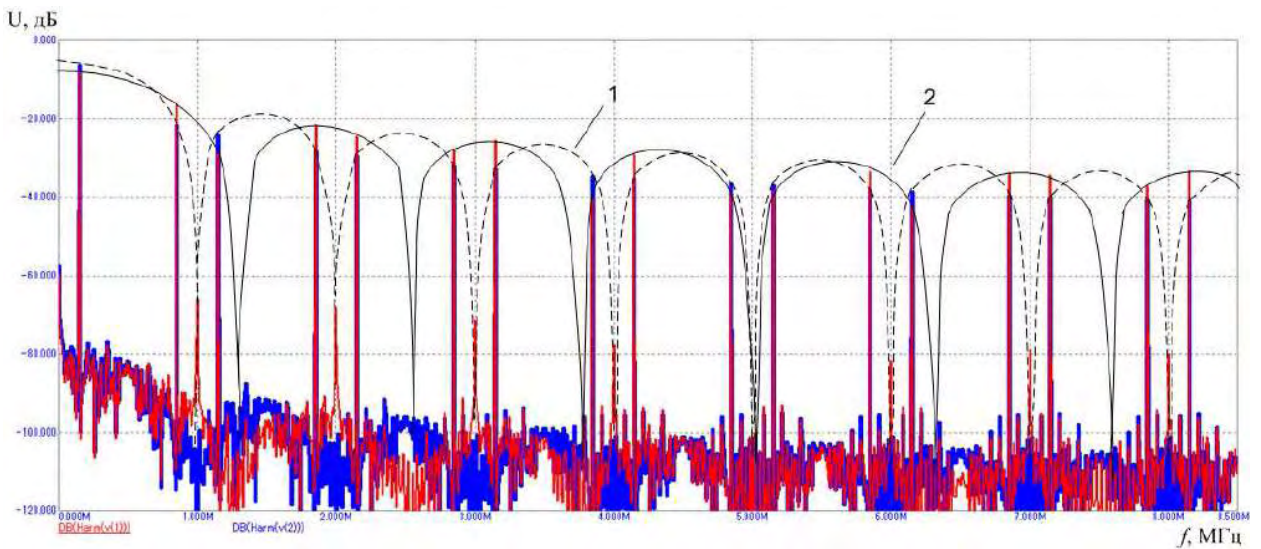


Рис. 6. Спектр выходного сигнала ЦВС при $q = 1,25$ и $K_{\text{ЦВС}} = 0,15$: 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

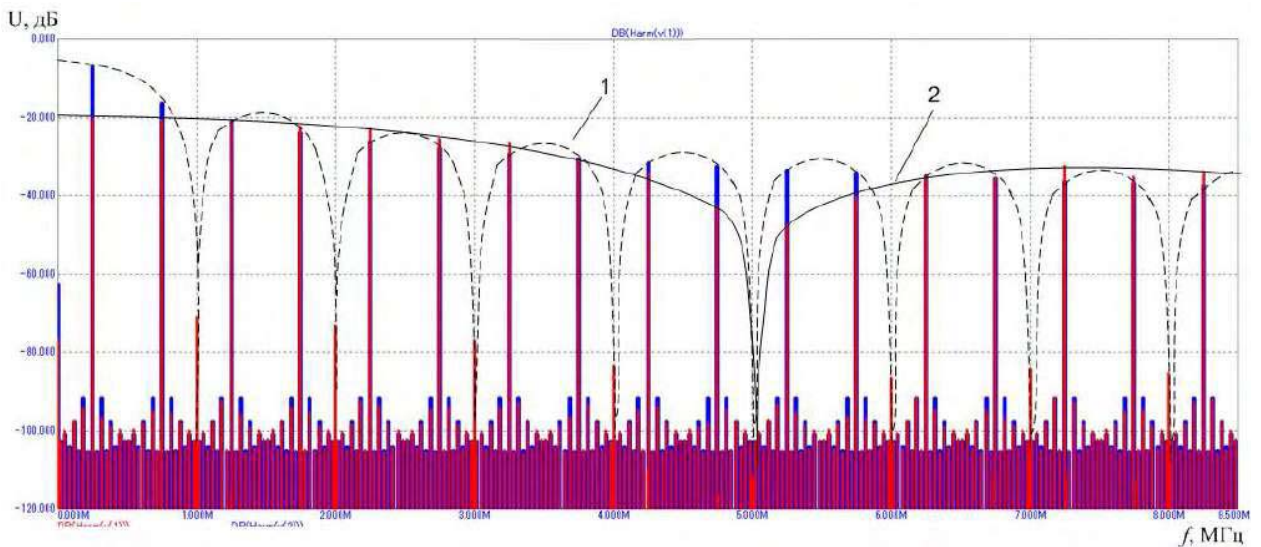


Рис. 7. Спектр выходного сигнала ЦВС при $q = 5$ и $K_{\text{ЦВС}} = 0,25$: 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

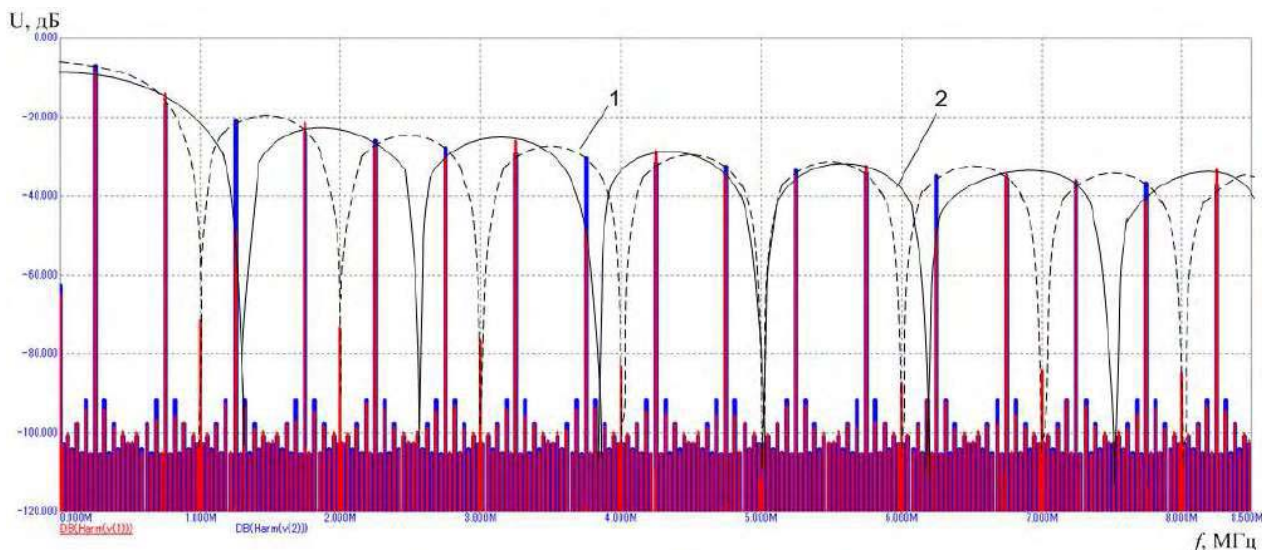


Рис. 8. Спектр выходного сигнала ЦВС при $q = 1,25$ и $K_{\text{ЦВС}} = 0,25$: 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

Анализ результатов

Из представленных спектров видно, что изменение скважности тактового сигнала и передискретизация выходного сигнала ЦВС приводят к изменению амплитуд гармоник основной частоты и их образов. В результате, если исходная огибающая спектра выходного сигнала ЦВС представляет собой вид функции синус Котельникова, принимающей нулевые значения на частотах, кратных тактовой частоте ЦВС, то при передискретизации наблюдается смещение нулевых точек огибающей спектра так, что происходит перераспределение энергии гармоник. При этом увеличение или ослабление амплитуд требуемых спектральных составляющих осуществляется подбором скважности импульсов передискретизации. Можно отметить, что коэффициент передачи ЦВС также влияет на изменение амплитуд гармоник в процессе передискретизации. При низком $K_{\text{ЦВС}}$ увеличение уровней амплитуды гармоник больше, чем при большом значении $K_{\text{ЦВС}}$.

Сравним изменение уровней различных спектральных составляющих до и после их передискретизации. Представление результатов моделирования в графическом виде позволит подробно оценить изменения амплитуд данных составляющих и, соответственно, огибающей спектра выходного сигнала ЦВС. На рис. 9 представлена зависимость амплитуд гармоник основной частоты ЦВС от номеров образов до и после передискретизации при тактовой частоте устройства 1 МГц для значений основной частоты выходного сигнала ЦВС = 150 кГц и = 250 кГц.

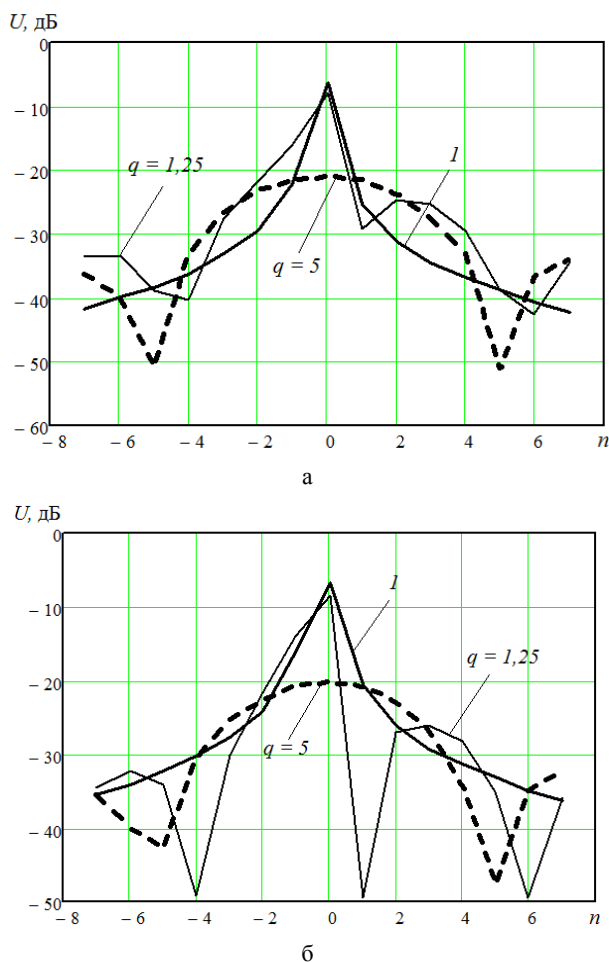


Рис. 9. Зависимость амплитуд гармоник основной частоты ЦВС ($q = 5$, $q = 1,25$) от номеров образов при: а – 150 кГц, б – 250 кГц; 1 – до передискретизации, 2 – после передискретизации

Заключение

Из представленных зависимостей видно, что передискретизация выходного сигнала ЦВС уменьшает энергию гармоник основной частоты, перераспределяя ее на более высокочастотные компоненты спектра. Так, на частоте 150 кГц, передискретизация импульсами со скважностью 5 повышает амплитуду гармоник образов $n = \pm 2, 4$ от 2 до 8 дБ. При этом наблюдается уменьшение амплитуды основной гармоники на 15 дБ. Использование импульсов с малой скважностью $1 < q < 2$ приводит к тому, что амплитуды отрицательных образов увеличиваются, а положительных – уменьшаются. Например, по рис. 9б видно, что амплитуда первого положительного образа вследствие передискретизации уменьшилась с –21 до –49 дБ, при скважности $q = 1,25$.

Для того, чтобы амплитуда требуемого образа после передискретизации имела максимальное значение, требуется, чтобы данная гармоника попадала в максимум огибающей. Поэтому для практического использования передискретизации с целью увеличения амплитуды гармоник образов требуется оперативно вычислять оптимальное для данных условий значение скважности импульсов передискретизации по исходным значениям тактовой и основной частоты, и номеру выбранного образа. Первый минимум огибающей спектра передискретизированного сигнала можно найти, если на оси частот спектра образов, нормированной к n , отложить значение скважности. Например, при $q = 5$ первый минимум огибающей спектра передискретизированного сигнала будет на-

ходиться в окрестности $|n| = 5$, амплитуды пятого отрицательного и положительного образов, также, как и амплитуда гармоники основной частоты станут ниже на 10–15 дБ. Соответственно, в таком случае больше всего увеличатся амплитуды второго и третьего, отрицательных и положительных образов. Теоретически, максимальное увеличение амплитуд образов с помощью эффекта передискретизации идеальными импульсами составляет 10–12 дБ, что подтверждает возможность использования данного явления для увеличения амплитуд высокочастотных гармоник, и соответственно, отношения сигнал/шум устройства при использовании образов основной частоты ЦВС. Это позволит снизить требуемый коэффициент усиления, и, в некоторых случаях, отказаться от дополнительного усилителя.

Литература

1. Ромашов В. В., Храмов К. К., Докторов А. Н. Модель цифрового вычислительного синтезатора, работающего на образах основной частоты // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 2 (6). С. 13–17.
2. Докторов А. Н. Исследование влияния передискретизации выходного сигнала цифрового вычислительного синтезатора на уровень дискретных составляющих / Докторов А. Н., Хазов Д. А. // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2016. № 17. С. 4–11.