

УДК 621.396

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ПОМЕХАМИ ДРОБНОСТИ В СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТ КОСВЕННОГО СИНТЕЗА**П. А. Толкачев****МИРЭА – Российский технологический университет, 119454, Москва, просп. Вернадского, д.78**

Статья поступила в редакцию 14 марта 2019 г.

Аннотация. В работе рассматривается актуальная проблема работа синтезатора частот с делителем с переменным и дробно-переменным коэффициентом деления. Раскрывается проблематика появления побочных составляющих в спектре выходного сигнала синтезаторов частот с дробно-переменным коэффициентом деления. Приводятся два метода увеличения качества спектра выходного сигнала синтезаторов частот косвенного синтеза. Основа первого метода заключается в изменении по случайному закону моментов переключения коэффициента деления (рандомизации), второй метод заключается в коррекции фазовой ошибки. Корректность работы методов проверяется с помощью имитационного моделирования в программном пакете Simulink.

Ключевые слова: синтезатор частот косвенного синтеза, дробно-переменный коэффициент деления, метод рандомизации, коэффициент переключения, метод коррекции фазовой ошибки, моделирование дробного синтезатора частот.

Abstract. Research questions of the frequency synthesizer with a divider with a variable and a fractional variable division factor are considered. The term fractional-N describes a family of synthesizers that allow the minimum frequency step to be a fraction of the reference frequency. A number of methods have been proposed to realize fractional-N frequency synthesis, they are based on the basic concepts of traditional integer-N synthesis. The problems of adverse components in the spectrum of the output signal of fractional-N synthesizers are revealed. There are two methods of increasing the quality of the output signal of the PLL frequency synthesizers of

synthesis methods to improve the spectrum of output signal for PLL frequency synthesizers synthesis. The first method is random jittering, the second is phase cancellation method. The correctness of the methods is checked using simulation in the software package Simulink.

Keywords: frequency synthesizer of the indirect synthesis; fractional variable division ratio; method of randomization of switching coefficients; method of phase error correction, fractional frequency synthesizer simulation.

1. Введение

Как известно, идеи использования дробного деления появились более 35 лет назад, но долгие годы синтезаторы частот (СЧ) на их основе не удавалось довести до массового производства. Замечательным свойством схем с делителями с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД) стала возможность повышения (до нескольких порядков) частоты сравнения в системе импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ) по отношению к заданному шагу сетки частот [1].

На рис.1. изображен СЧ на ИФАПЧ с делителем с переменным коэффициентом деления (ДПКД), генерирующий синусоидальный сигнал с частотой $f_{out} = 2$ ГГц, при частоте опорного генератора (ОГ) 19,68 МГц. Если требуется реализовать систему с частотным разрешением 200 кГц (как для систем WCDMA), то для этого необходимо установить предварительный коэффициент деления $M=492$, тогда частота сравнения фазового детектора $f_{pd} = 40$ кГц, в этом случае для достижения разрешения по частоте в 200 кГц коэффициент деления ДПКД должен быть не меньше $N=50000$, так как:

$$f_{\text{вых}} = \frac{N}{M} f_{\text{ОГ}} = N f_{\text{ФД}} \rightarrow \Delta f = f_{\text{ФД}}.$$

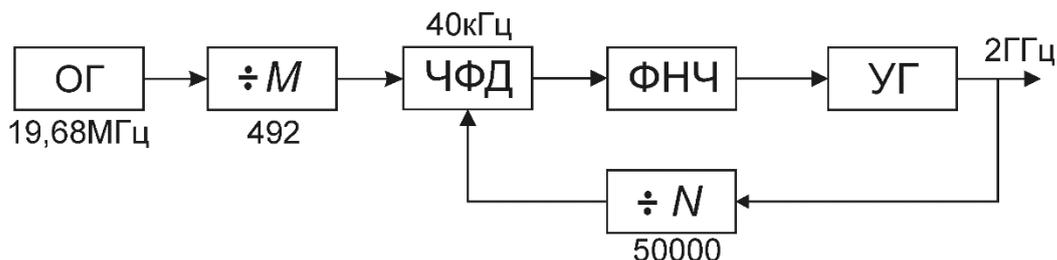


Рис.1. СЧ на ФАПЧ с ДДПКД

В результате такой реализации шаг сетки частот (разрешение по частоте) не может превышать частоту сравнения фазового детектора, при этом уровень шумов на выходе УГ возрастет на 114 дВ относительно ОГ, кроме того, фазовый детектор, работающий на частоте $f_{\text{ФД}} = 40$ кГц, обеспечит стабилизацию частоты в пределах нескольких килогерц, что приведет не только к увеличению шумов на выходе УГ, но и к увеличению времени перестройки [2].

Для того чтобы сделать частоту фазового детектора выше частоты перестройки, необходимо использовать ДДПКД. СЧ с ДДПКД позволяет обеспечить разрешение по частоте выше частоты сравнения фазового детектора.

Усложнение схемы при этом касается сравнительно низкочастотной части цифрового устройства управления ДДПКД. Это очень перспективно с точки зрения технологии производства, так как сокращает не только энергопотребление, но и массогабаритные показатели. В то же время, методу присущи недостатки. В соответствии с принципом работы ДДПКД импульсная последовательность на его выходе не равномерна по времени, что приводит к появлению в спектре выходного сигнала побочных спектральных составляющих помех дробности на частотах, отстоящих от несущей на величины, кратные шагу сетки частот. Простое сужение полосы пропускания фильтра нижних частот (ФНЧ) в цепи управления для обеспечения заданного качества спектра чаще всего сводит на «нет» весь выигрыш от увеличения частоты сравнения и не позволяет существенно повысить быстродействие системы ИФАПЧ.

Метод реализации ДДПКД основан на применении фазового аккумулятора [3]. На рис. 2 изображена традиционная схема реализации СЧ с ДДПКД, который производит деление на дробную часть $\frac{1}{4}$. Дробный коэффициент деления получается при подаче управляющего сигнала на одно из двух положений ДДПКД: на блок деления с коэффициентом N или на $N+1$.

$$f_{\text{вых}} = \left(N + \frac{P}{2^k}\right) f_{0Г} = N f_{0Г} + \frac{P}{2^k} f_{0Г} \rightarrow \Delta f = \frac{P}{2^k} f_{0Г}, \text{ где } k - \text{ разрядность}$$

аккумулятора, а p – разрядность делителя.

В результате такого способа деления и возникает основная проблема ДДПКД – появление нежелательных боковых составляющих в спектре выходного сигнала.

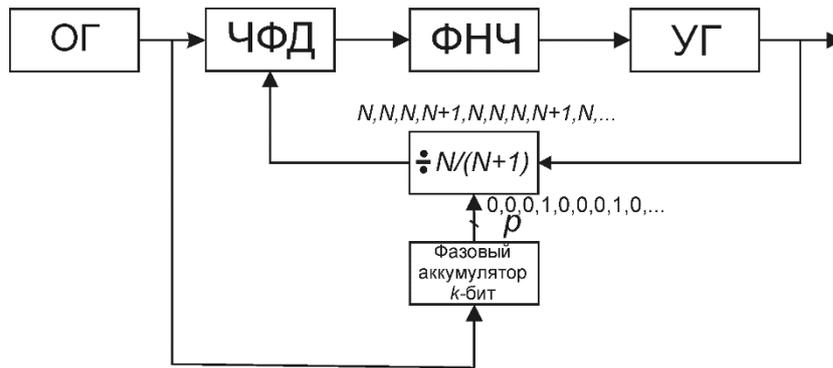


Рис. 2. Схема СЧ с ДДПКД и принцип ее работы.

Способ реализации СЧ с ДДПКД представляет собой классическую схему реализации СЧ с ИФАПЧ, где в качестве делителя используется ДДПКД (рис. 3).

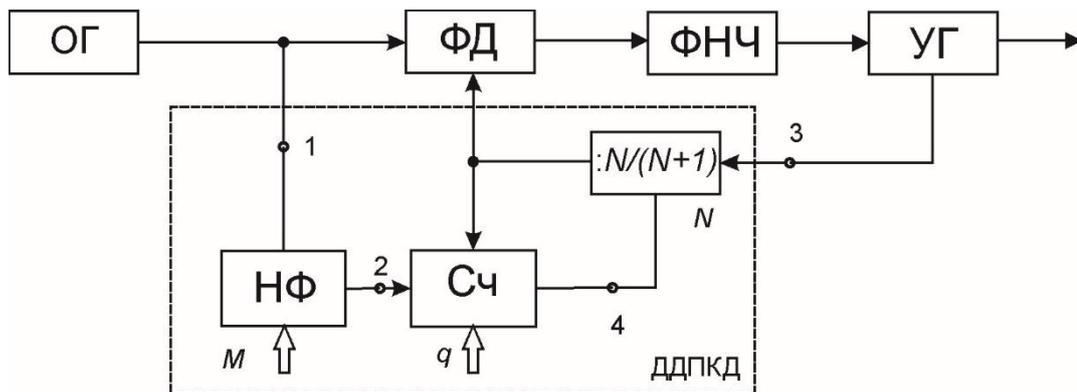


Рис. 3. Структурная схема реализации СЧ с ДДПКД.

В состав ДДПКД входят: цифровой накопитель фазы (НФ) с объемом M , счетчик (Сч) с ограничением q и цифровой делитель частоты на N или на $N + 1$ в зависимости от значения управляющего сигнала в точке 4.

Узел ДДПКД работает следующим образом. Допустим, что в некоторый момент времени в накопителе фазы и в счетчике записаны нули. Каждый

импульс с выхода управляемого генератора поступает на делитель частоты $N/(N + 1)$. Сигнал с выхода делителя поступает на счетчик. Пока число в счетчике не превосходит значение q , выходной сигнал этого счетчика (точка 4) принимает значение логической 1, так что коэффициент деления частоты составляет $N + 1$. Для последующих $M - q$ импульсов выходной сигнал счетчика изменяется на логический 0, поэтому коэффициент деления принимает значение N . Когда на вход поступит M импульсов опорного генератора, выходной импульс переполнения (точка 2) сбрасывает счетчик в исходное состояние и процесс счета начинается вновь.

Таким образом, за M периодов импульсов ОГ проходит q периодов сигнала с частотой $f/(N + 1)$ и $(M - q)$ периодов сигнала с частотой f/N .

Выходная частота при этом выражается следующим образом:

$$f_{\text{вых}} = \left(N + \frac{q}{M} \right) f_{\text{ОГ}}.$$

Синтезатор стабильных частот формирует колебание с заданной средней частотой f в виде последовательности отрезков времени с немного отличающимся интервалом следования: на одном из них выходная частота составляет $Nf_{\text{ОГ}}$, на другом $(N + 1)f_{\text{ОГ}}$.

Моменты перехода выходного напряжения УГ через нуль следуют неравномерно: в группе из q периодов они следуют реже, а в последующей группе из $(M - q)$ периодов чаще, чем для равномерного закона. Соответственно ошибка по фазе то увеличивается, то уменьшается, это приводит к тому, что нарушается работа системы ИФАПЧ, так как на выходе фазового детектора образуется пилообразное напряжение, поступающее на УГ. В итоге на УГ в выходном спектре сигнала формируются дополнительные боковые составляющие.

За последние десятилетия было предложено большое количество технических решений, направленных на снижение уровня ПД. Все они могут быть условно отнесены к следующим видам: методы рационального изменения во времени коэффициентов деления ДДПКД, методы компенсации помех

дробности (как аналоговые, так и цифровые или аналого-цифровые, комбинированные методы) В основе методов первой группы лежит идея отыскания алгоритмов управления ДДПКД, обеспечивающих не только требуемый дробный коэффициент (при усреднении на определённом интервале времени), но и позволяющих перераспределять энергию отдельных составляющих в спектре ПД. В ряде случаев удается полностью исключить некоторые гармоники, но кардинального снижения уровня ПД в достаточно широкой полосе частотных отстроек от частоты несущего колебания детерминированные алгоритмы не обеспечивают. Методы аналоговой компенсации помех дробности также не получили широкого распространения из-за очевидных ограничений, обусловленных низкой технологичностью, и связанных с необходимостью настройки схем и нестабильностью степени компенсации в реальных условиях эксплуатации [4].

В статье рассмотрены методы, позволяющие бороться с проблемой появления ПД.

2. Метод компенсации фазовой ошибки

Данный метод использует цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) как традиционный метод борьбы с побочными составляющими.

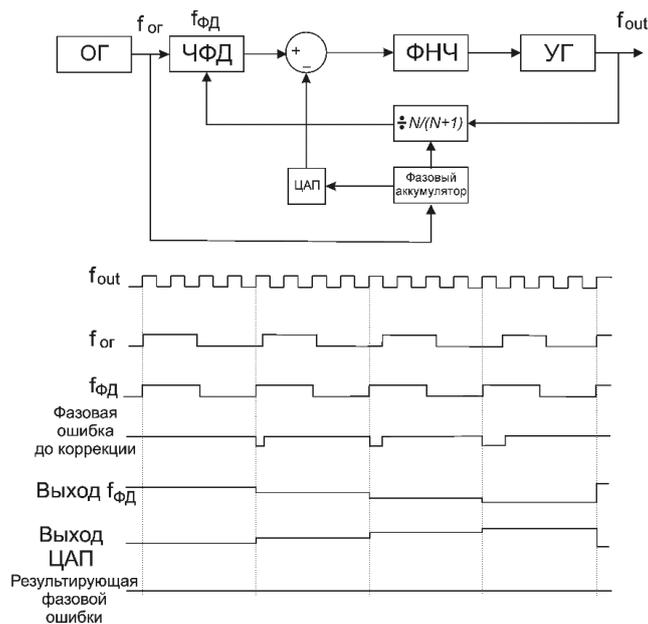


Рис. 4. Структура и работа СЧ по методу компенсации фазовой ошибки.

На рис. 3 показана базовая архитектура и принцип работы системы. Поскольку фазовая ошибка компенсируется в аналоговой области, этот метод зависит от несовершенства аналоговых элементов, в результате компенсация ограничивается, в основном, разрешением ЦАП и его точностью. Этот подход наиболее эффективен, когда используется фазовый детектор, реализованный на триггерах, нежели в виде обычного перемножителя, в этом случае необходимо только совпадение напряжения постоянного тока в течение одного такта.

3. Метод случайного переключения коэффициента деления.

Путем случайного переключения коэффициента деления ДДПКД возможно решение проблемы появления боковых составляющих. В качестве простейшего генератора псевдослучайной последовательности переключения коэффициентов деления можно взять сигма-дельта модулятор, на вход которого подается постоянная величина (дробная часть коэффициента деления). В результате на каждый тактовый сигнал случайным или псевдослучайным образом создается новый управляющий сигнал, который регулирует переключение ДДПКД с N на $N+1$. У данного метода есть недостаток – это дрожание выходной частоты, так как белый шум, проникающий в частотную область, увеличивает фазовые шумы.

Попробуем применить рассмотренные выше методы, для наглядности будем использовать моделирование.

4. Моделирование СЧ

В программной среде Simulink была спроектирована модель СЧ с ДДПКД (рис.5) [5,6], далее к данной модели были последовательно применены два метода борьбы с паразитными боковыми составляющими (рис.6).

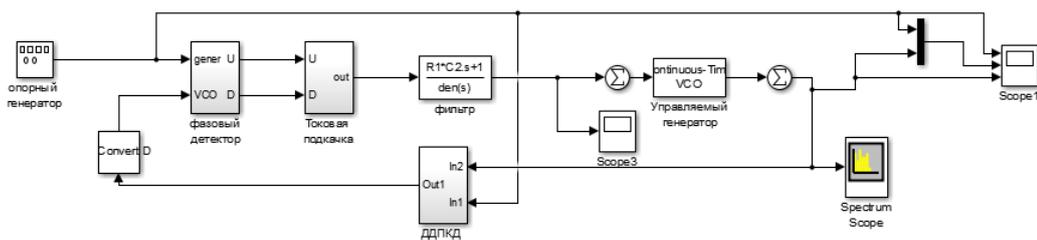


Рис. 5. Simulink модель СЧ с ДДПКД.

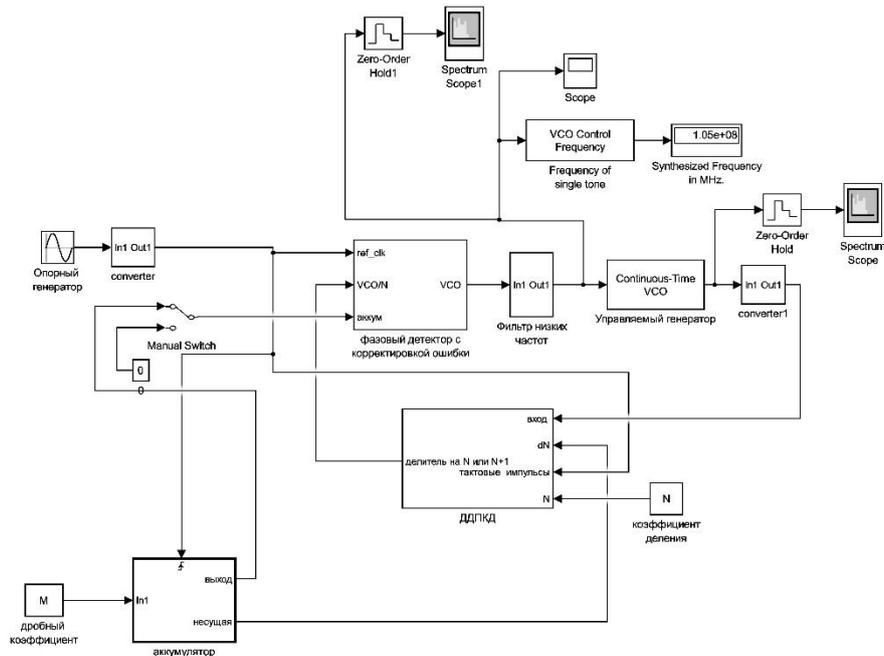


Рис. 6. Simulink модель СЧ с ДДПКД и применением метода рандомизации моментов переключения коэффициентов деления, а также метода компенсации фазовой ошибки.

Сравним результаты, полученные при моделировании. На рисунках 7 изображены эпюры напряжения сигнала на выходе фильтра нижних частот (ФНЧ).

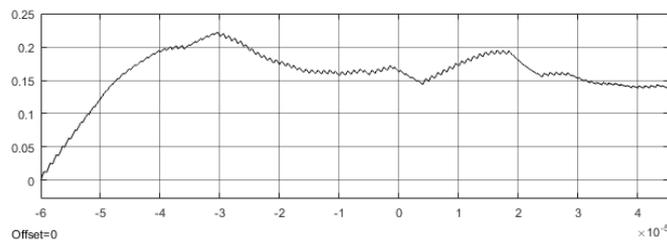


Рис. 7.1. Эпюра напряжения сигнала на выходе ФНЧ в СЧ с ДПКД.

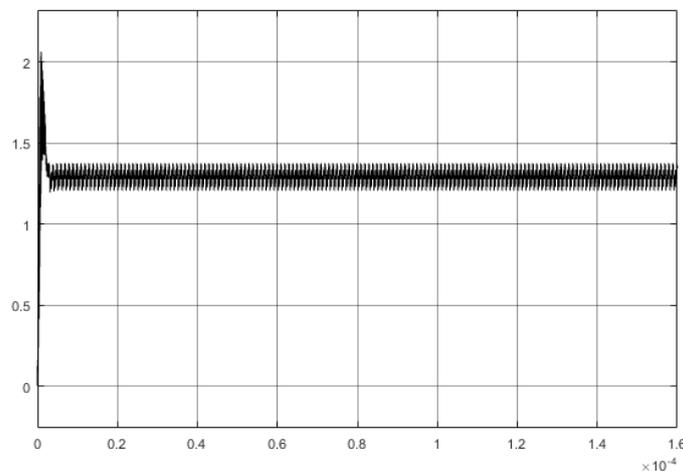


Рис. 7.2. Эпюра напряжения сигнала на выходе ФНЧ в СЧ с ДПКД с применением метода рандомизации моментов переключения.

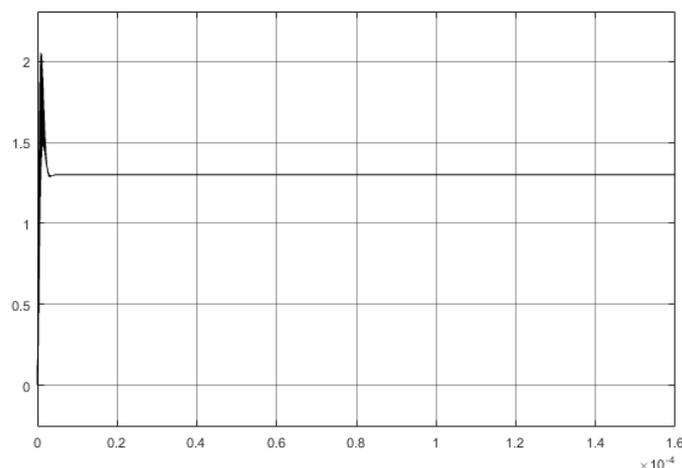


Рис. 7.3. Эпюра напряжения сигнала на выходе ФНЧ в СЧ с ДПКД с применением метода рандомизации моментов переключения и метода компенсации фазовой ошибки.

Как видно из рисунка 7.1, добиться полностью устойчивой работы СЧ с ДДПКД при такой реализации, к сожалению, не удалось, однако, применив метод рандомизации моментов переключения (рис. 7.2), нам удалось добиться снижения уровня биений и стабилизации их в пределах 0.2 В. Совместное же применение метода рандомизации моментов переключения и метода компенсации фазовой ошибки позволяет значительно улучшить стабильность напряжения на выходе ФНЧ (рис 7.3). Чтобы оценить работу методов борьбы с боковыми составляющими, рассмотрим спектры выходного сигнала (рис. 8).

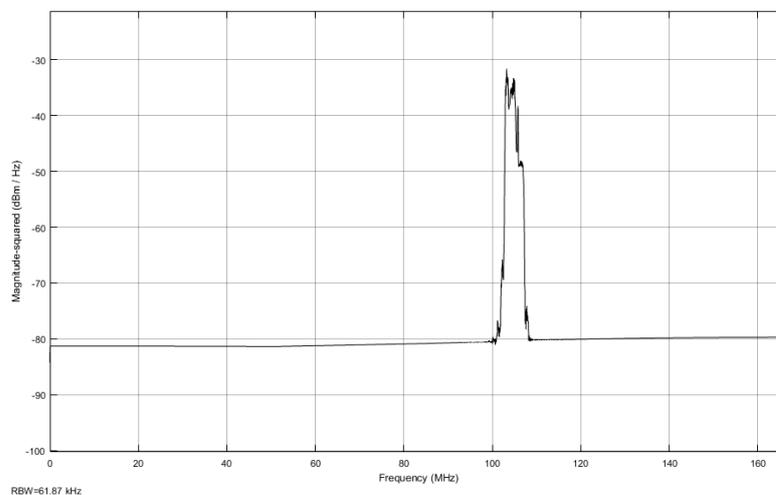


Рис. 8.1. Выходной спектр сигнала СЧ с ДДПКД.

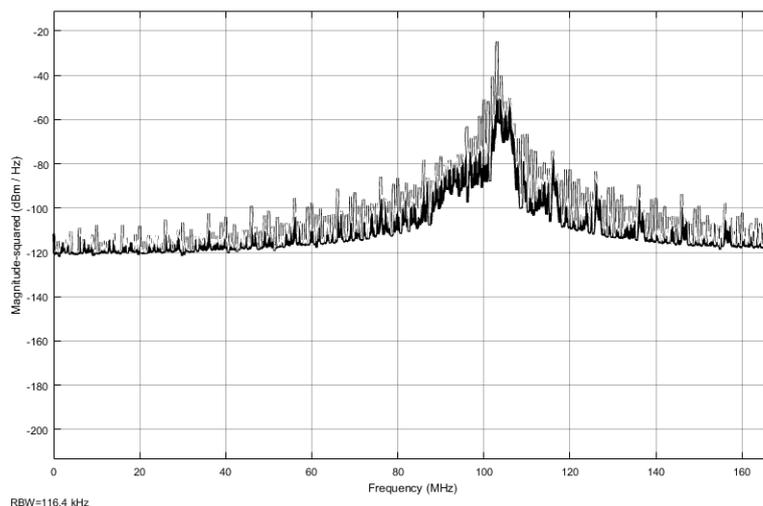


Рис. 8.2. Выходной спектр сигнала СЧ с ДДПКД с применением метода рандомизации моментов переключения.

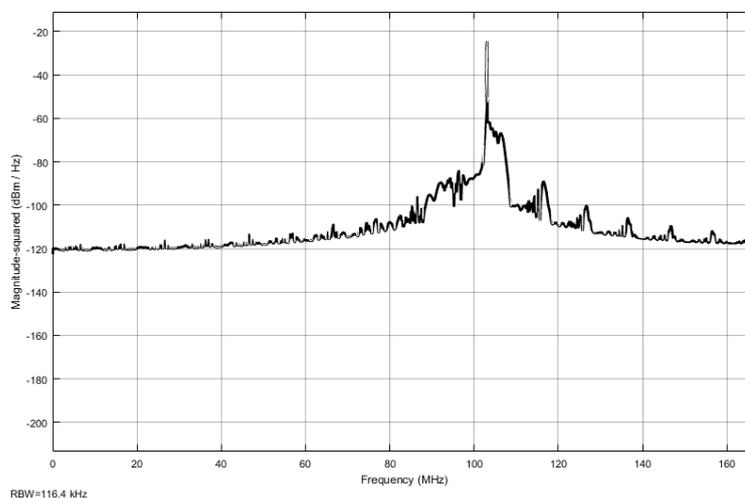


Рис. 8.3. Выходной спектр сигнала СЧ с ДДПКД с применением метода рандомизации моментов переключения и метода компенсации фазовой ошибки.

На рис. 8.1 изображен спектр выходного сигнала СЧ с ДДПКД, отметим, что уровень шумов порядка -80 dBm/Hz и ширина спектра на уровне в -40 dBm/Hz составляет порядка 5 МГц, после применения метода рандомизации моментов переключения рис. 8.2 средний уровень шумов снизился до величины порядка -100 dBm/Hz, при этом спектр стал более ярко выражен, что свидетельствует об улучшении качества выходного сигнала. После применения также метода компенсации фазовой ошибки, рис. 8.3, уровень шумов в выходном спектре снизился до -110 dBm/Hz, а ширина спектра выходного сигнала на уровне в -40 dBm/Hz стала составлять величину порядка 1 МГц.

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что применение методов рандомизации моментов переключения и компенсации фазовой ошибки позволяют значительно улучшить качество спектра выходного сигнала синтезатора частот, также значительно снизить средний уровень шумов на выходе. К сожалению, использование в качестве рандомизатора моментов переключения ДДПКД сигма-дельта модулятора (СДМ) первого порядка затрудняет создание полностью случайной последовательности, представляется перспективным использование СДМ более высоких порядков.

Литература

1. Шахтарин Б.И., Иванов А.А. Сравнительный анализ цифровых систем синхронизации. Вестник МГТУ им Н. Э. Баумана, серия приборостроение, 2007, №1, С. 24-38.
2. Шахтарин Б.И., Сизых В.В. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации. Москва, Горячая линия – Телеком, 2011, С. 118-122.
3. Прохладин Г.Н. Моделирование шумовых характеристик синтезаторов частот на основе систем ИФАПЧ. // Радиотехника, 2006, №2, С. 36 – 47.
4. Романов С.К., Тихомиров Н.М., Леньшин А.В. Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот. Москва, Радио и связь, 2010, С. 29-52.
5. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование. Москва, Связь, 1979, С. 112 – 180.
6. Шахтарин Б.И. Синтезаторы частот. Москва, Горячая линия-Телеком, 2007, С. 112–136.

Для цитирования:

П. А. Толкачев. Причины возникновения и методы борьбы с помехами дробности в синтезаторах частот косвенного типа. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/13/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.13