

Д.И. СУРЖИК,
И.А. КУРИЛОВ, Г.С. ВАСИЛЬЕВ,
С.М. ХАРЧУК

**Алгоритмы формирования
управляющих сигналов
автокомпенсаторов фазовых
искажений цифровых
вычислительных синтезаторов и
устройств на их основе**

УДК 621.396

Муромский институт
(филиал) ФГБОУ ВО
«Владимирский
государственный
университет имени
А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
г. Муром

В статье представлены алгоритмы формирования управляющих сигналов автокомпенсаторов фазовых искажений, которые могут использоваться для реализации цифровых вычислительных синтезаторов и устройств на их основе с улучшенными спектральными характеристиками. Особенностями предлагаемых алгоритмов является способ выделения информации о фазовых искажениях, учитывающий отличия частот, амплитуд и форм тактового и выходного сигналов синтезатора.

Введение

В настоящее время для формирования сигналов в устройствах и системах различного назначения (связи, телекоммуникаций, измерений, радиолокации, радионавигации, биомедицины, промышленности и других) широко используются цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС). В зависимости от назначения и специфики работы конкретного устройства или системы, в составе которой применяется ЦВС, он может использоваться в качестве перестраиваемого генератора сигналов, перестраиваемого генератора сигналов с программируемой формой (прямоугольной, треугольной, пилообразной) или формирователя модулированных

сигналов (ФМ, ЧМ, FSK, PSK и других). Широкое использование таких синтезаторов обусловлено рядом существенных достоинств перед устройствами на основе других методов синтеза [1-4], таких как:

- высокое разрешение синтезируемых сигналов по частоте и фазе, управление которыми осуществляется в цифровом виде;
- высокое быстродействие, определяемое только скоростью работы цифровых узлов и интерфейса и осуществляемое без разрывов фазы и выбросов напряжения, вызванных переходными процессами;
- параметры синтезируемого сигнала точно известны и программируются на ЭВМ либо микроконтроллером;
- технологичность изготовления.

ЦВС представляет собой устройство, управляемое ЭВМ или микроконтроллером (МК) и состоящее из тактового генератора (ТГ), фильтра нижних частот (ФНЧ) и интегральной микросхемы, содержащей в своем составе аккумулятор фазы (АФ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) – рис. 1.

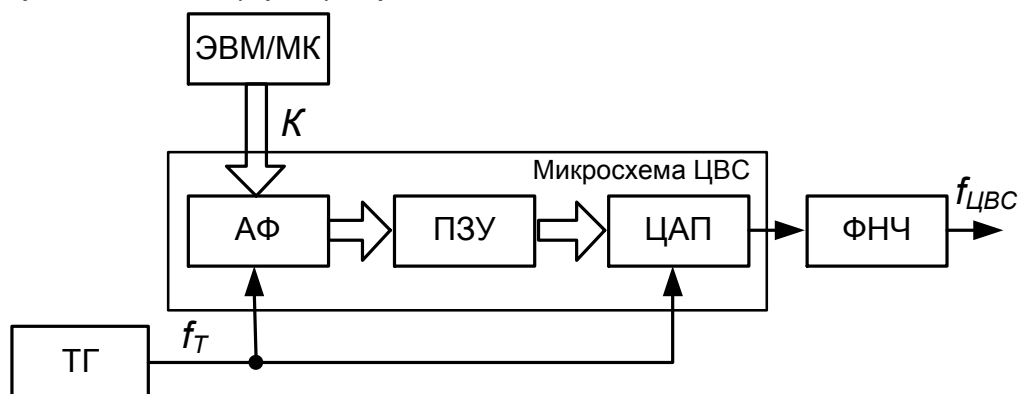


Рис. 1. Структурная схема ЦВС.

Устройство работает следующим образом. ЦВС генерирует выходной сигнал с частотой $f_{\text{ЦВС}}$, которая определяется частотой тактового сигнала f_T и кодом частоты K [1,2]. Это двоичное число подается от ЭВМ либо микроконтроллера на вход аккумулятора фазы, содержимое которого обновляется один раз в каждом тактовом цикле. Выходной код аккумулятора фазы представляет собой код мгновенной фазы выходного сигнала, который служит адресом для таблицы преобразования – ПЗУ, которое содержит

информацию о цифровой амплитуде для одного полного периода формируемого сигнала. Для преобразования выходного сигнала ПЗУ в аналоговый сигнал используется ЦАП, на выходе которого формируется ступенчатый сигнал. Аналоговый ФНЧ на выходе устройства сглаживает «ступеньки» до гармонической формы.

Постановка задачи исследования

Несмотря на множество преимуществ перед другими методами синтеза, современные ЦВС не лишены существенного недостатка, связанного с наличием в спектре синтезируемого сигнала нежелательных дискретных и шумовых компонент. Дискретная часть определяется множеством паразитных спектральных составляющих, вызванных нелинейностью ЦАП, некратностью входных и выходных частот синтезатора, усечением кода фазы и воздействием дестабилизирующих факторов, а шумовая обусловлена собственными фазовыми шумами ЦВС и шумами квантования [4,5]. На рис. 2 в качестве примера приведен спектр выходного сигнала ЦАП ЦВС (разрядность ЦАП - 12 бит) и его огибающая при $f_T = 100$ МГц, $f_{ЦВС} = 14,68$ МГц.

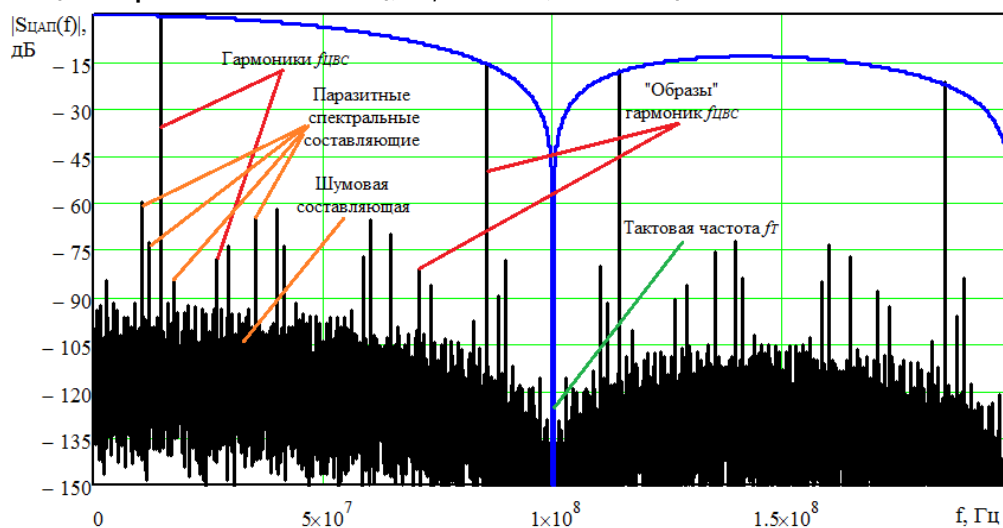


Рис. 2. Спектр выходного сигнала ЦАП ЦВС с описанием частотных составляющих.

На данный момент известно два метода улучшения спектральных характеристик ЦВС – это фильтрация и рандомизация. Однако они имеют ограниченное применение и недостаточно эффективны. Так при использовании фильтрации

существует крайне высокая вероятность попадания дискретных паразитных спектральных составляющих большой амплитуды в полосу пропускания фильтра, а рандомизация сопровождается значительным ухудшением отношения сигнал/шум выходного сигнала устройства.

Исследования авторов показали, что эффективным методом улучшения спектральных характеристик ЦВС является использование метода автоматической компенсации фазовых искажений (АКФИ) [1-4]. Идея метода базируется на том, что наиболее нежелательные дискретные и шумовые составляющие, присутствующие в спектре выходного сигнала ЦВС, соответствует паразитной фазовой модуляции полезного сигнала, что позволяет рассматривать автоматическую компенсацию в качестве метода ее снижения. Важнейшими достоинствами метода перед другими способами улучшения спектральных характеристик ЦВС являются возможность снижения фазовых искажения от нескольких источников и избирательность по отношению к полезной модуляции. Однако основная сложность в осуществлении автокомпенсации применительно к исследуемым устройствам заключается в том, что сигналы на входе и выходе ЦВС отличаются друг от друга по амплитуде, частоте и форме [1,2].

Предлагаемые алгоритмы

Для выделения фазовых искажений и формирования компенсирующего сигнала автокомпенсатора авторами предложено два оригинальных алгоритма (рис. 3,4). Основные этапы первого алгоритма проиллюстрированы временными диаграммами, поясняющими особенности обработки выходного сигнала тактового генератора.

Идея предлагаемых алгоритмов заключается в том, что при наличии паразитной фазовой модуляции выходного сигнала ЦВС, все составляющие спектра оказываются промодулированными по тому же закону, что и синтезируемая частота, но с другими индексами модуляции (рис. 2). Поскольку тактовая частота является постоянной, то выделив ее в выходном спектре ЦВС, можно осуществить автоматическую компенсацию фазовых искажений выходного сигнала синтезатора на данной частоте [5].

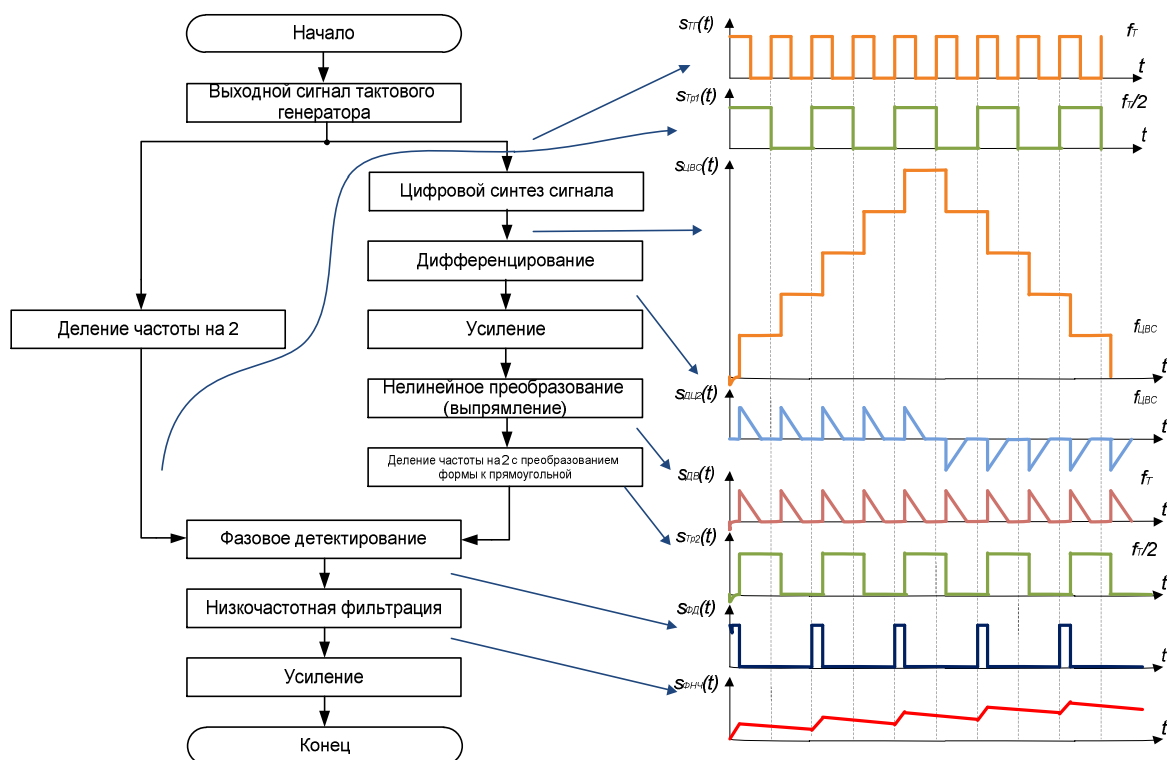


Рис. 3. Алгоритм и временные диаграммы формирования управляющего сигнала АКФИ ЦВС с детектированием на частоте, в два раза меньшей тактового сигнала.



Рис. 4. Алгоритм формирования управляющего сигнала АКФИ ЦВС с детектированием на частоте тактового сигнала.

Отличия между алгоритмами заключаются в том, что в первом случае детектирование фазовых искажений осуществляется на частоте, в два раза меньшей частоты тактового сигнала, а во втором – непосредственно на частоте тактового сигнала. Для этого в первом случае обработка выходного сигнала тактового генератора предполагает формирование опорного сигнала для фазового детектирования с помощью Т-триггера, осуществляющего деления частоты данного сигнала на два и информационного сигнала, получаемого путем синтеза сигнала в ЦВС, дифференцирования, усиления, нелинейного преобразования в двухполупериодном выпрямителе и деления частоты данного сигнала на два с преобразованием формы к прямоугольной с помощью Т-триггера. Во втором случае выходной сигнал тактового генератора изначально является опорным сигналом для фазового детектирования, а информационный сигнал получается путем синтеза сигнала в ЦВС, дифференцирования, нелинейного преобразования в двухполупериодном выпрямителе, полосовой фильтрации и усиления. Дальнейшая обработка детектированных сигналов для обоих алгоритмов является одинаковой и представляет собой фазовое детектирование и низкочастотную фильтрацию с последующим усилением.

Важнейшим достоинством первого алгоритма является осуществление фазового детектирования на пониженной в два раза частоте тактового генератора, второго – простота реализации. Однако во втором случае изменение тактовой частоты ЦВС требует перестройки и коррекции параметров полосовой фильтрации.

Заключение

Таким образом, в данной статье предложено два оригинальных алгоритма формирования управляющих сигналов автокомпенсаторов фазовых искажений цифровых вычислительных синтезаторов и устройств на их основе. Их особенностями является способ выделения информации о фазовых искажениях, поскольку частоты, амплитуды и формы тактового и выходного сигналов ЦВС существенно отличаются друг от друга. На основе предложенных алгоритмов можно реализовывать АКФИ как для случаев, когда ЦВС используется в виде самостоятельного устройства, так и когда он

применяется в составе гибридных синтезаторов частот, где он выступает в роли опорного генератора, генератора подставки, выходного делителя или делителя частоты в цепи обратной связи петли фазовой автоподстройки частоты.

Литература

1. Суржик, Д.И. Компенсация искажений ЦВС в гибридных синтезаторах частот / Д.И. Суржик, И.А. Курилов, Г.С. Васильев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2015. – № 4(20). - С. 13-19.

2. Surzhik, D.I. Design and mathematical modeling of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of DDS interferences / D.I. Surzhik, I.A. Kurilov, G.S.Vasilyev, S.M. Kharchuk // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. – 2015. – IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.

3. Surzhik, D.I. Modeling the noise properties of hybrid frequency synthesizers with automatic compensation of phase noise of DDS / D.I. Surzhik, I.A. Kurilov, O.R. Kuzichkin, G.S.Vasilyev, S.M. Kharchuk // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. – 2015. – С. 7147015.

4. Суржик, Д.И. Моделирование спектральных характеристик звеньев автокомпенсатора фазовых искажений цифровых вычислительных синтезаторов / Д.И. Суржик // Методы и устройства передачи и обработки информации. - 2016. - № 18. - С. 17-21.

5. Суржик, Д.И. Разработка алгоритма выделения фазовых искажений выходного сигнала ЦВС / Д.И. Суржик // Закономерности и тенденции развития науки в современном обществе. - 2016. – С. 85-89.