

УДК 621.396

Функциональное моделирование и исследование характеристик гибридного синтезатора частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя

Якименко К.А.

В данной статье представлены результаты разработки функциональной модели гибридного синтезатора частот на основе системы фазовой автоподстройки частоты и быстродействующего цифро-аналогового преобразователя. Разработанная в программе Matlab Simulink модель позволяет провести исследование шумовых, спектральных и переходных характеристик гибридного синтезатора. Моделирование переходных процессов демонстрирует, что при формировании частот, равных единицам гигагерц, время перестройки составляет примерно единицы мкс; повышение порядка петлевого фильтра уменьшает пульсации при перестройке частоты. Исследование шумовых характеристик показало, что применение образов основной частоты высоких порядков (в режимах RZ и RF) дает выигрыш по уровню фазовых шумов перед традиционной системой ФАПЧ без смесителей в цепи обратной связи до 15–20 дБ на отстройках 1 кГц до 100 кГц от несущей.

Ключевые слова: гибридный синтезатор частот, фазовая автоподстройка частоты, ФАПЧ, цифро-аналоговый преобразователь, ЦАП, фазовый шум, модель.

Введение

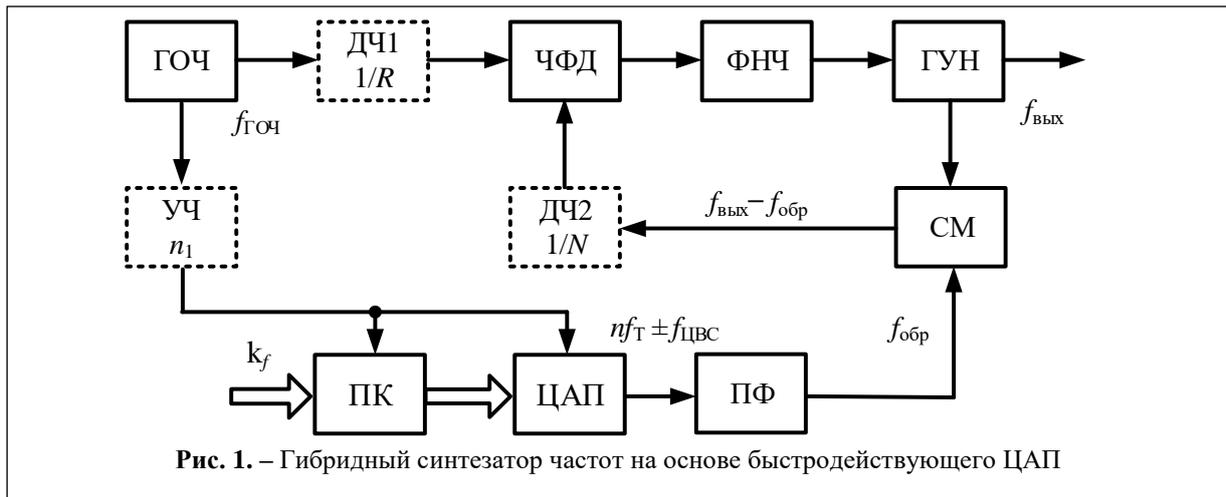
Функциональное моделирование формирователей сигналов с целью исследования их основных характеристик и параметров позволяет существенно сберечь временные и экономические ресурсы разработчиков. Например, анализ переходных процессов, исследование шумовых и спектральных характеристик выгоднее предварительно провести с помощью функциональной модели, и только потом начинать экспериментальные исследования.

В качестве формирователей сигналов современных радиосистем в настоящее время широко используются гибридные синтезаторы частот на основе косвенного метода синтеза [1–3] и прямого цифрового метода синтеза [4–6]. Такие синтезаторы обеспечивают широкий диапазон выходных частот с низким уровнем фазовых шумов и дискретных составляющих спектра (за счет применения системы фазовой автоподстройки частоты — ФАПЧ), а также малый шаг перестройки по частоте, поддержку различных видов модуляции (за счет цифровых вычислительных синтезаторов — ЦВС) [7–9]. Улучшить шумовые характеристики гибридных синтезаторов позволяет применение копий спектра (образов) основной частоты ЦВС [10–13].

Целью данной работы является разработка функциональной модели гибридного синтезатора частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и исследование его переходных, шумовых и спектральных характеристик.

Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя

Применение быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей в структуре гибридных синтезаторов позволяет существенно улучшить шумовые характеристики синтезаторов. Это достигается за счет увеличения выходной частоты ЦАП при переключении в специальный режим работы. В зависимости от выбора специального режима работы меняется форма выходного сигнала таким образом, что в спектре происходит перераспределение амплитуды образов. Известно несколько специальных режимов работы (NRZ, RZ, RF и др.) [14–16]. На рис. 1 представлена структурная схема предлагаемого авторами гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП [17].



Принцип работы гибридного синтезатора, представленного на рис. 1, заключается в следующем. Генератор опорной частоты (ГОЧ) формирует опорный сигнал с высокостабильной частотой $f_{\text{ГОЧ}}$, который через делитель частоты ДЧ1 подается на частотно-фазовый дискриминатор (ЧФД). Выходной сигнал генератора, управляемого напряжением, (ГУН) является выходным для всего синтезатора, а также по цепи обратной связи поступает на один из входов смесителя (СМ). Частота выходного сигнала ГУН $f_{\text{ВЫХ}}$ подстраивается управляющим сигналом ЧФД, фильтрующимся в петлевом фильтре нижних частот (ФНЧ).

Частота опорного сигнала ГОЧ умножается в умножителе частоты УЧ в n_1 -раз, и получившийся сигнал тактирует формирователь на основе преобразователя кода ПК и быстродействующего ЦАП. Преобразователь кода состоит из накапливающего сумматора и запоминающего устройства, в котором хранится таблица отсчетов синуса. Накапливающий сумматор в зависимости от устанавливаемого пользователем кода частоты k_f формирует двоичное число, соответствующее адресу ячейки в запоминающем устройстве, в которой в двоичном виде хранится амплитудное значение требуемого отсчета синусоиды (или другого сигнала). В спектре выходного сигнала ЦАП присутствует основная частота и ее образы с частотами:

$$f_{\text{обр}} = nf_T \pm f_{\text{осн}}, \quad (1)$$

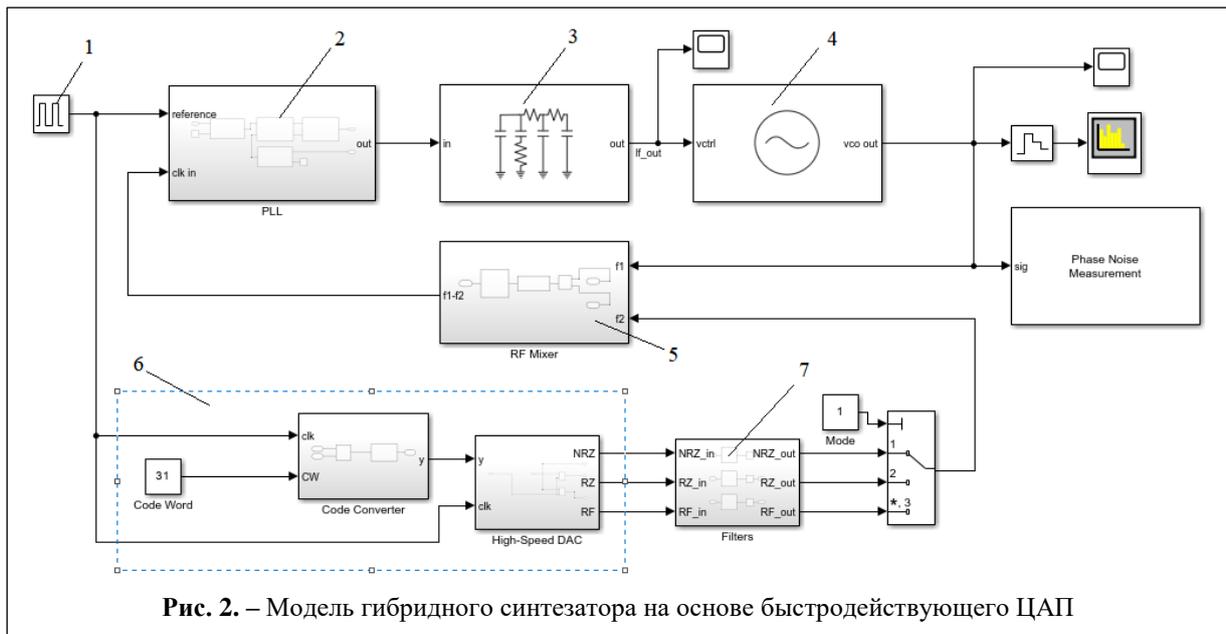
где f_T — тактовая частота, $f_{\text{осн}}$ — основная частота, $n = 1; 2; 3 \dots$ — номер образа основной частоты. Для выделения необходимого образа основной частоты используется полосовой фильтр (ПФ).

Переключение специальных режимов позволяет перераспределить амплитуду со спектрального компонента основной частоты на образы основной частоты, находящиеся в более высоких зонах Найквиста. Полосовой фильтр выделяет требуемый образ с увеличенной амплитудой, который затем подается на смеситель. Сигнал с разностной частотой делится в делителе ДЧ2 и поступает на второй вход ЧФД.

Перестройка гибридного синтезатора по частоте осуществляется загрузкой кодовых слов k_f . Шаг перестройки гибридного синтезатора может составлять доли Гц.

Описание разработанной модели гибридного синтезатора

Система Matlab Simulink позволяет проводить моделирование различных систем на основе функциональных блоков. В данной системе была разработана модель гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП (рис. 2). Модель состоит из источника сигнала опорной частоты 1, модели микросхемы ФАПЧ 2, модели петлевого ФНЧ 3, модели



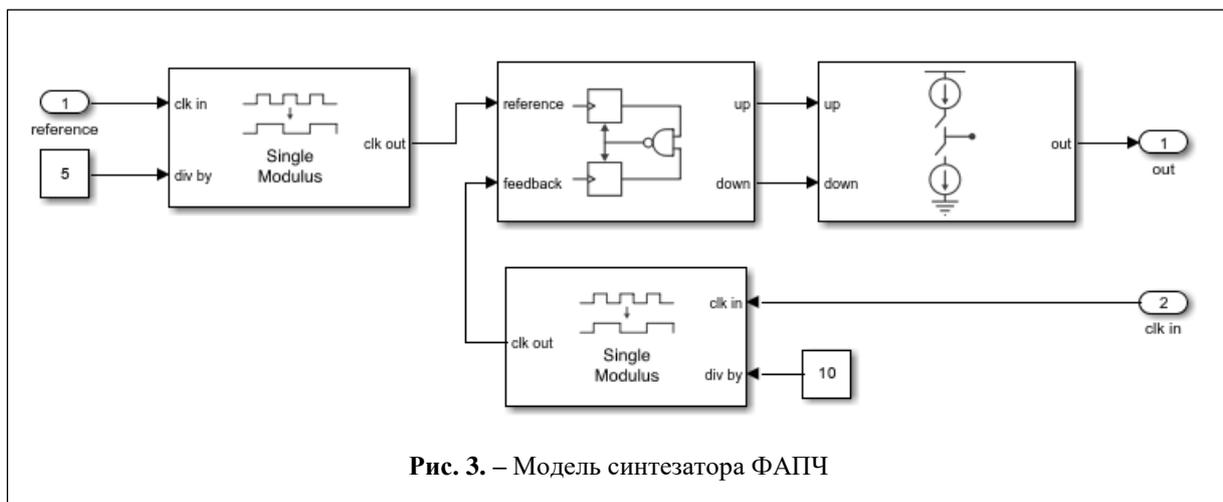
ГУН 4, модели частотного смесителя 5, формирователя на основе быстродействующего ЦАП 6, набора частотных фильтров 7.

Модель микросхемы ФАПЧ (рис. 3) повторяет примерную архитектуру интегральных микросхем фазовой автоподстройки частоты без интегрированного ГУН и состоит из функциональных блоков делителей частот, частотно-фазового дискриминатора (ЧФД) и системы «накачки» заряда.

Блоки делителей частот позволяют проводить деление частоты входных сигналов, имеющих форму прямоугольных импульсов, на настраиваемое целое значение N, передаваемое на порт div-by.

Блок ЧФД выдает два выходных импульса, которые отличаются по длительности. Разница в длительности пропорциональна разности фаз между входными сигналами. Система позволяет добавить в блок ЧФД компенсацию «мертвой зоны» — добавляемую задержку для активного выходного сигнала, близкого к нулевому смещению фазы, заданную в секундах. «Мертвая зона» — это полоса смещения фазы, близкая к нулевому смещению фазы, для которой выходной сигнал ЧФД незначителен. Также можно установить время нарастания/убывания и общее время задержки работы ЧФД.

Блок «накачки заряда» вырабатывает выходной ток, который пропорционален разнице в рабочих циклах между сигналами на



его входном порте up и down. Задача данного блока — преобразовать фазовую ошибку, представленную двумя выходами блока ЧФД, в единый ток на входе петлевого ФНЧ. Программно в этом блоке можно установить следующие параметры: выходной ток (в амперах), порог входного напряжения (в вольтах), а также токовые и временные нестабильности.

Блок петлевого фильтра нижних частот позволяет установить номиналы элементов для расчета передаточных характеристик пропорционально-интегрирующих фильтров второго, третьего и четвертого порядков.

Модель генератора, управляемого напряжением, генерирует выходную частоту в соответствии с выражением

$$f_{\text{вых}} = (K_{\text{ГУН}} \cdot U_{\text{упр}}) + f_{\text{вых0}},$$

где $K_{\text{ГУН}}$ — чувствительность ГУН, Гц/В; $U_{\text{упр}}$ — входное управляющее напряжение, В; $f_{\text{вых0}}$ — частота ГУН при нулевом управляющем напряжении, Гц. Данные параметры в блоке можно назначить вручную. Кроме того, есть возможность добавить в выходной сигнал фазовый шум. Для этого предусмотрена возможность установить значения отстройки от несущей частоты и соответствующие им значения спектральной плотности мощности в дБн/Гц.

Модель частотного смесителя позволяет генерировать последовательность импульсов с частотой, представляющей собой разность

частот сигналов, приходящих на входы смесителя. Работа модели основана на логическом элементе XOR.

Модель формирователя на основе быстродействующего ЦАП состоит из модели преобразователя кода и непосредственно модели ЦАП. Модель преобразователя кода (рис. 4) состоит из накопителя кода фазы НКФ и ПЗУ. К значению в регистре НКФ с каждым импульсом тактовой частоты прибавляется кодовое слово, и так происходит до переполнения регистра (в представленной модели разрядность регистра составляет 12). На выходе регистра с каждым тактовым импульсом выдает адрес ячейки памяти ПЗУ, в которой хранится значение амплитуды требуемого сигнала (синусоиды, треугольника и др.).

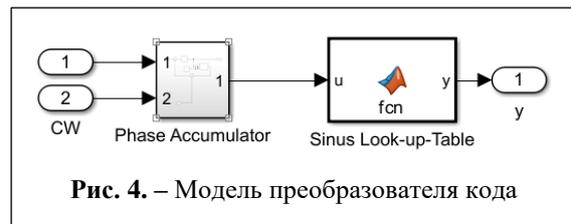


Рис. 4. – Модель преобразователя кода

Модель быстродействующего ЦАП формирует выходные сигналы в зависимости от требуемого режима работы. В режиме RZ после каждого отсчета синусоиды представляется двумя отсчетами: непосредственно значением синусоиды и возвращением в «ноль». В режиме RF каждый отсчет синусоиды представляется двумя разнополярными импульсами.

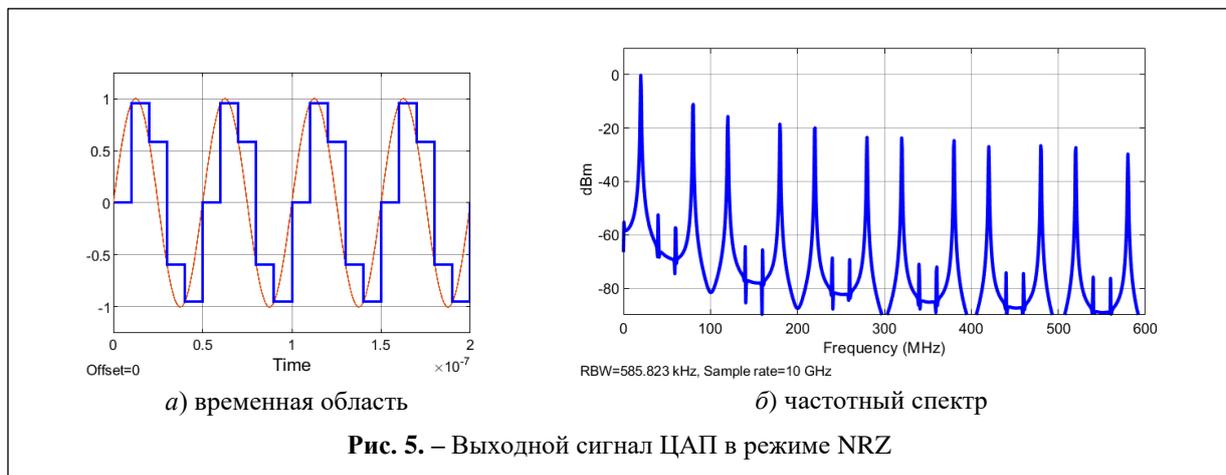
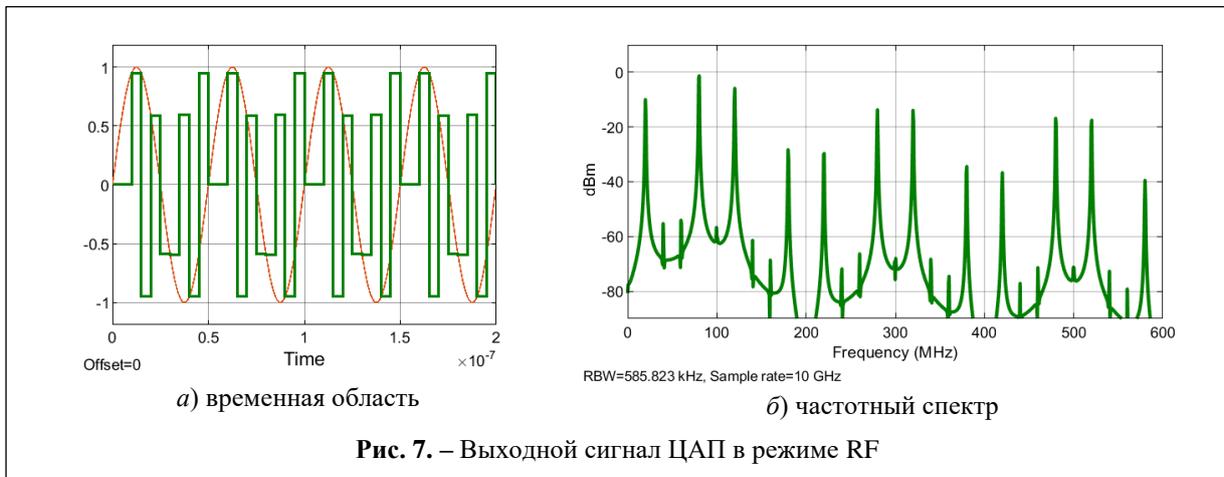
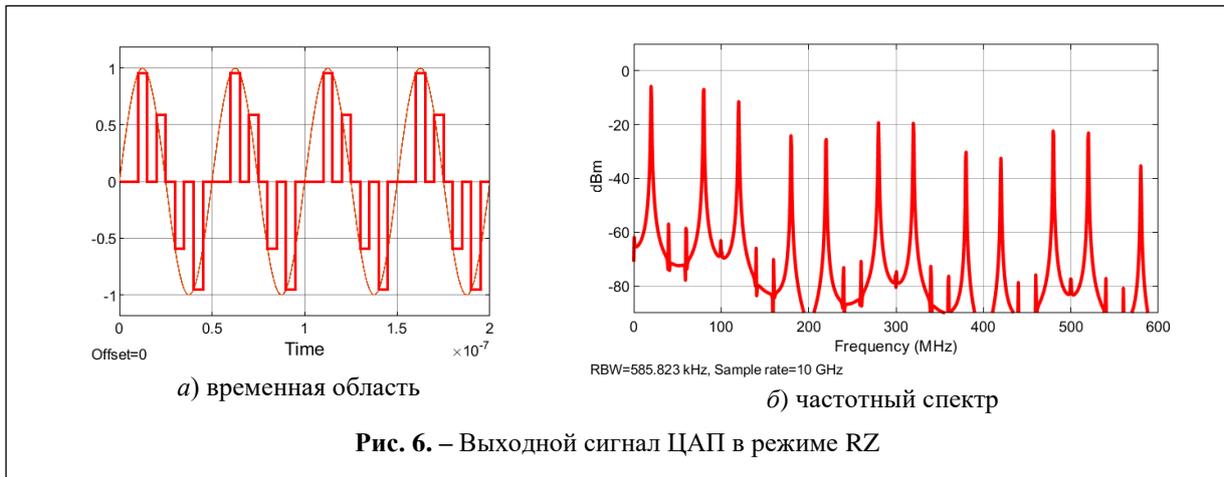


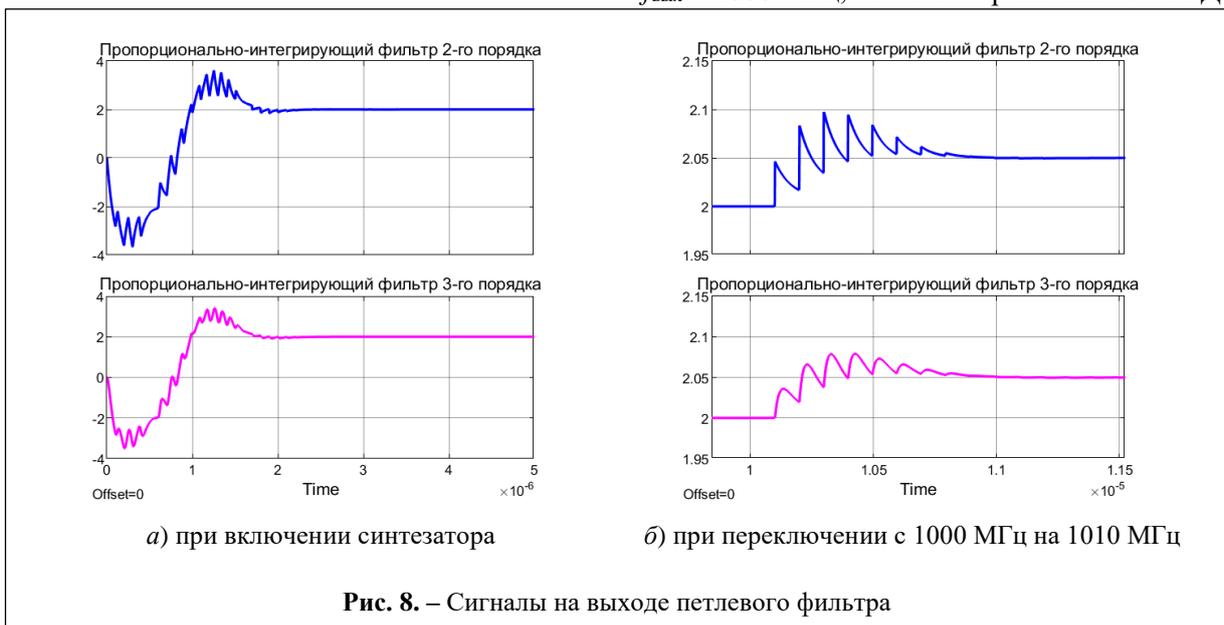
Рис. 5. – Выходной сигнал ЦАП в режиме NRZ



Блок фильтров представляет собой набор передаточных функций полосовых частотных фильтров Баттерворта, Чебышева, Бесселя и Эллиптического с возможностью установки порядка фильтра.

Анализ характеристик гибридного синтезатора частот

Пусть исходные данные для моделирования следующие: частота опорного генератора $f_{Гоч} = 100$ МГц, выходная частота $f_{вых} = 1000$ МГц, частота сравнения в ЧФД



$f_{cp} = 10$ МГц. Проведем моделирование работы синтезатора в трех специальных режимах NRZ, RZ, RF. Быстродействующий ЦАП при тактовой частоте 100 МГц формирует основную частоту 20 МГц. На рис. 5–7, а) представлены осциллограммы выходного сигнала быстродействующего ЦАП, а на рис. 5–7 б) — соответствующие им спектры.

По результатам моделирования видно, что в спектре выходного сигнала происходит перераспределение амплитуды образов основной частоты. При этом по сравнению с режимом NRZ уменьшаются амплитуды образов в первой, четвертой пятой зонах Найквиста и увеличиваются во второй, третьей, шестой и седьмой зонах Найквиста. Применение специальных режимов позволило увеличить амплитуду образов по сравнению с режимом NRZ:

- режим RZ: вторая зона Найквиста — на 8,11 дБ, третья зона Найквиста — на 8,21 дБ, шестая зона Найквиста — на 8,22 дБ, седьмая зона — на 8,17 дБм;
- режим RF: вторая зона Найквиста — на 13,96 дБ, третья зона Найквиста — на 14,06 дБ, шестая зона Найквиста — на 14,07 дБ, седьмая зона — на 14,03 дБ.

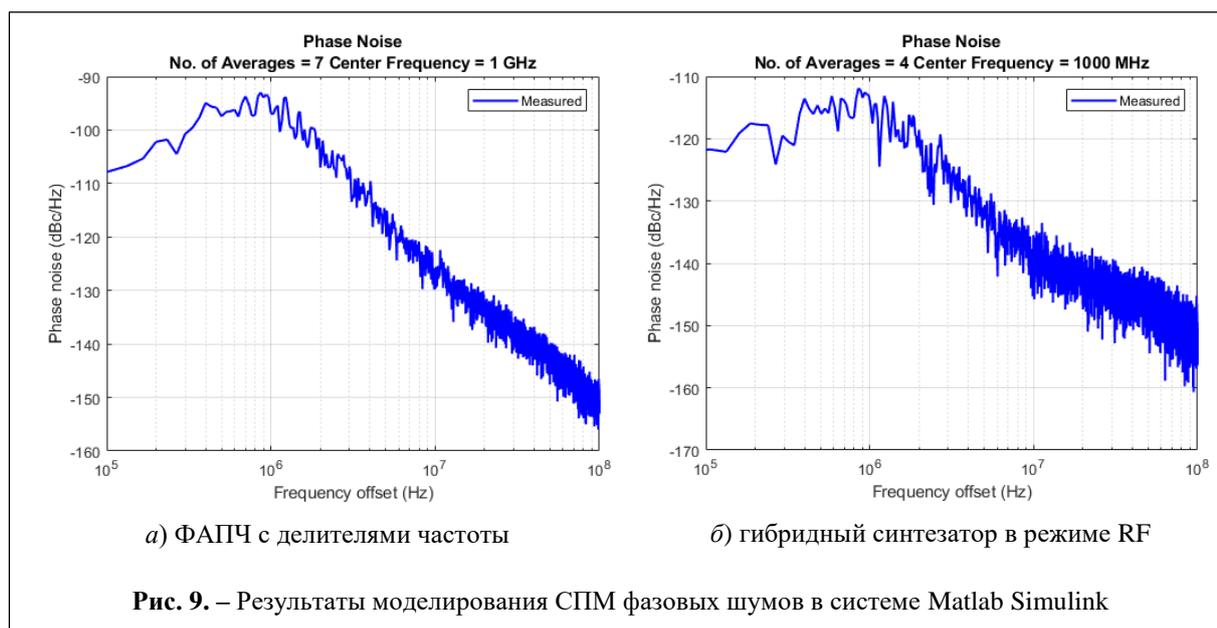
Проведем исследование характеристик гибридного синтезатора при работе ЦАП в ре-

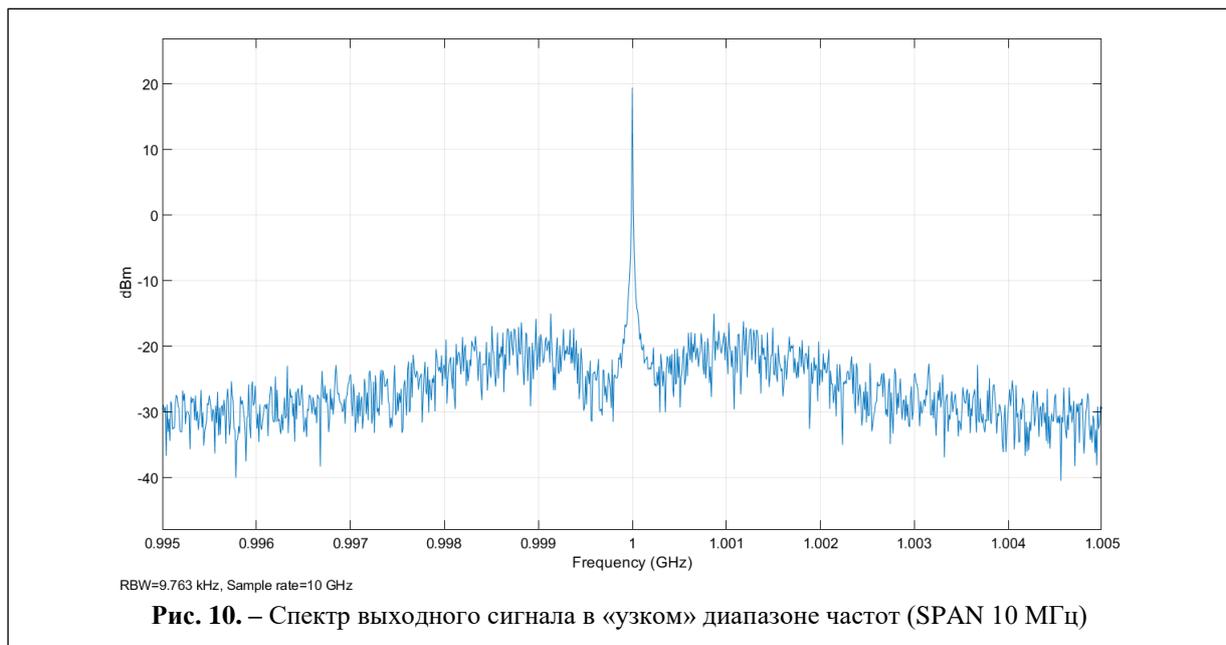
жиме RF при следующих параметрах: коэффициент деления в цепи обратной связи $N = 42$; номер образа $n = -6$; основная частота ЦВС $f_{цвс} = 20$ МГц; частота образа $f_{обр} = 580$ МГц.

На рис. 8 представлены управляющие сигналы ГУН гибридного синтезатора при использовании в качестве петлевого фильтра пропорционально-интегрирующих фильтров 2-го и 3-го порядков с полосой пропускания 1 МГц. На рис. 8 а) показана форма сигнала в начальный момент времени после включения синтезатора, на рис. 8 б) — форма сигнала при переключении гибридного синтезатора с 1000 МГц на 1010 МГц. Видно, что переходной процесс занимает не более 3 мкс.

Система Matlab Simulink позволяет проводить исследование спектральной плотности мощности фазовых шумов выходного сигнала ГУН. Для этого в модель ГУН были добавлены значения СПМ фазовых шумов для четырех значений отстроек от несущей. Кроме того, в блоках были установлены следующие значения нестабильностей, соответствующие реальным микросхемам:

- ЧФД: компенсация «мертвой зоны»: — 30 пс, время нарастания/убывания — 30 пс, общая задержка работы — 50 пс;





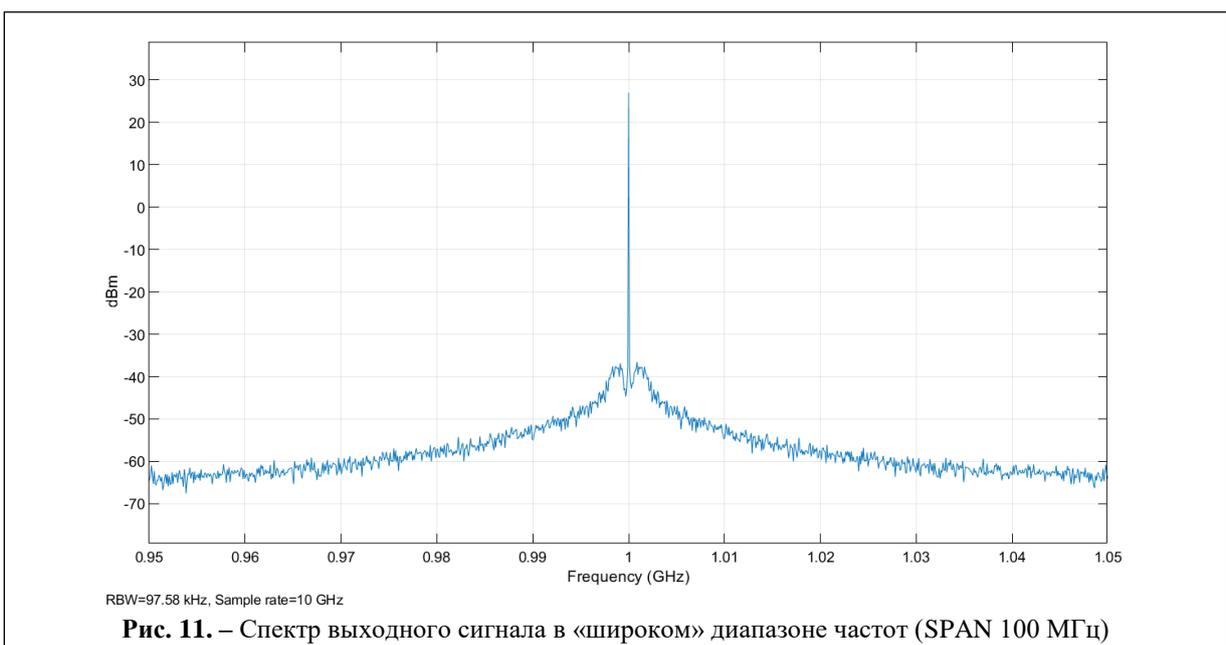
- Блок «накачки заряда»: выходной ток — 1 мА, входной порог — 0,5 В, токовый дисбаланс — 0,1 мкА, ток утечки — 0,01 мкА, время нарастания/убывания импульса «вверх» — 5 нс, время задержки импульса «вверх» — 6 нс, время нарастания/убывания импульса «вниз» — 2 нс, время задержки импульса «вниз» — 4 нс;

- ГУН: чувствительность — 200 МГц, частота при управляющем напряжении 1 В — 800 МГц, фазовый шум: минус 113 дБн/Гц (при отстройке 10 кГц), минус 135 дБн/Гц (при отстройке 100 кГц), минус 145 дБн/Гц

(при отстройке 1 МГц), минус 161 дБн/Гц (при отстройке 10 МГц).

На рис. 9 представлены результаты моделирования СПМ фазовых шумов системы ФАПЧ и гибридного синтезатора в режиме RF.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что применение ЦАП в специальных режимах работы в структуре гибридного синтезатора позволяет снизить уровень фазовых шумов по сравнению с обычной системой ФАПЧ на 15–20 дБ за счет меньшего



значения коэффициента деления в цепи обратной связи.

На рис. 10 представлен спектр выходного сигнала гибридного синтезатора в «узком» диапазоне отстроек от несущей. Ширина частотного диапазона (SPAN) равна 10 МГц. На рисунке видна несущая и шумовой пьедестал, ограниченный характеристикой петлевого ФНЧ.

На рис. 11 представлен спектр выходного сигнала гибридного синтезатора в «широком» диапазоне отстроек от несущей. Ширина частотного диапазона (SPAN) равна 100 МГц.

Заключение

В данной статье представлены результаты разработки функциональной модели гибридного синтезатора частот на основе системы фазовой автоподстройки частоты и быстродействующего цифро-аналогового преобразователя. Разработанная модель позволяет провести исследование шумовых, спектральных и переходных характеристик гибридного синтезатора.

Моделирование переходных процессов позволяет наглядно продемонстрировать, что при формировании частот, равных единицам гигагерц, время перестройки составляет примерно единицы мкс; повышение порядка петлевого фильтра уменьшает пульсации при перестройке частоты ГУН.

Исследование шумовых характеристик показало, что применение образов основной частоты высоких порядков (в режимах RZ и RF) дает выигрыш по уровню фазовых шумов перед традиционной системой ФАПЧ без смесителей в цепи обратной связи до 15–20 дБ на отстройках 1 кГц до 100 кГц от несущей.

Литература

1. Banerjee D. PLL Performance, Simulation and Design Handbook (4th ed.). National Semiconductor, 2006. 338 p.
2. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. New York: John Wiley&Sons, Ltd, 2003, 320 p.

3. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972. 447 с.

4. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. New York: John Wiley&Sons, Ltd, 1998. 396 p.

5. Vankka J. Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications: Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology, 2000. 208 p.

6. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 224 с.

7. Бельчиков С. Фазовый шум: как спуститься ниже –120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или борьба за децибелы // Компоненты и технологии. 2009. №5, №6.

8. Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Ромашова Л.В. Экспериментальное исследование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017. № 1 (33). С. 6–17.

9. Ромашов В.В., Якименко К.А. Разработка математического аппарата для частотного планирования гибридных синтезаторов частот // Проектирование и технология электронных средств. 2016. № 3. С. 3–9.

10. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Якименко К.А. Применение образов основной частоты ЦВС в гибридных синтезаторах частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 3 (11). С. 19–24.

11. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A., Doktorov A.N. Wide-band hybrid frequency synthesizer with improved noise performance // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 - Proceedings. 1. 2018. Pp. 1–4.

12. Ромашов В.В., Якименко К.А. Программный комплекс для проектирования гибридных синтезаторов частот и моделирования их шумовых характеристик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 1 (29). С. 36–44.

13. Пат. РФ № RU 172814 U1. Гибридный синтезатор частот с улучшенными спектральными характеристиками / Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Якименко К.А. Заявл. 24.04.2017; опубл. 25.07.2017.

14. High Speed DACs [Электронный ресурс] // Analog Devices. Inc. [сайт]. [2022]. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html> (дата обращения 5.09.2022).

15. Overhoff S. Direct-Sampling DACs in Theory and Application [Электронный ресурс] // Maxim Integrated company [сайт]. [2022]. URL:

<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5446> (дата обращения 5.09.2022).

16. Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А., Сочнева Н.А. Повышение эффективности использования высших зон Найквиста при прямом цифровом синтезе высокочастотных сигналов // Радиотехника. 2022. Т. 86. №5. С. 135–144.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-358.2022.4.

Поступила 10 сентября 2022 г.

17. Пат. РФ № RU 214526. Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя в специальных режимах работы / Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н., Сочнева Н.А. Заявл. 25.05.2022; опубл. 02.11.2022.

This article presents the results of the development of a functional model of a hybrid frequency synthesizer based on a phase-locked frequency system and a high-speed digital-to-analog converter. The Matlab Simulink model can be used for studying the noise, spectral and transient characteristics of a hybrid synthesizer. Modeling of transients allows us to demonstrate that when frequencies equal to units of gigahertz are formed, the tuning time is approximately units of microseconds; increasing the order of the loop filter reduces ripples during frequency tuning. The study of noise characteristics showed that the use of high-order fundamental frequency images (in RZ and RF modes) gives a gain in the level of phase noise over the traditional PLL system without mixers in the feedback circuit up to 15–20 dB at 1 kHz to 100 kHz detuning from the carrier.

Key words: hybrid frequency synthesizer, DDS, bandpass filter, phase noise, software.

Якименко Кирилл Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru

Адрес: 602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.