

Формирование и усиление сигналов

DOI 10.24412/2221-2574-2022-4-51-59

УДК 621.396

ГИБРИДНЫЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Ромашов Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: romashovmurom@mail.ru

Якименко Кирилл Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru

Докторов Андрей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: doctorov_a_n@mail.ru

Сочнева Наталья Александровна

аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»².

E-mail: sochnewa.natalya@yandex.ru

¹Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

²Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

Аннотация: Вопросы расширения диапазона частот формирователей сигналов радиосистем с сохранением низкого уровня фазовых шумов являются актуальными в настоящее время. В статье предлагается структурная схема маломощного гибридного синтезатора частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза частот, в котором для расширения диапазона формируемых частот используется быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) в специальных режимах работы. Применение быстродействующего ЦАП в структуре системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) позволяет использовать в качестве подставки в цепь обратной связи образы (копии спектра) основной частоты с увеличенной амплитудой, находящиеся во второй, третьей и более высоких зонах Найквиста. За счет этого расширяется диапазон частот, формируемых гибридным синтезатором, и обеспечивается небольшое значение коэффициента деления в цепи обратной связи ФАПЧ, что приводит к уменьшению результирующего уровня фазовых шумов. Функциональное моделирование предлагаемого синтезатора в среде Matlab Simulink показало, что за счет использования образов с увеличенной амплитудой в высоких зонах Найквиста удается на 5–7 дБ снизить уровень фазовых шумов.

Ключевые слова: гибридный синтезатор частот, быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь, ЦАП, фазовый шум, прямой цифровой синтез.

Введение

Гибридные синтезаторы частот на основе прямого цифрового [1, 2] и косвенного [3, 4] методов синтеза в настоящее время широко ис-

пользуются в качестве формирователей сигналов в современных радиосистемах [5–7]. Такие синтезаторы обладают рядом достоинств: широкий диапазон частот, малый шаг перестрой-

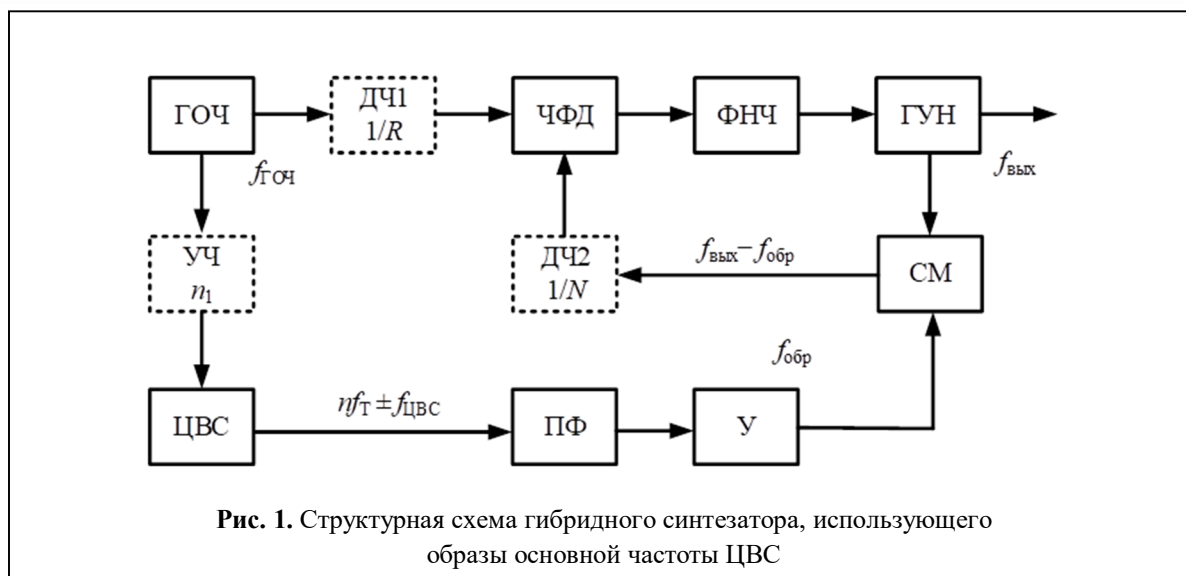


Рис. 1. Структурная схема гибридного синтезатора, использующего образы основной частоты ЦВС

ки по частоте, относительно невысокий уровень побочных составляющих спектра, поддержка различных типов модуляции. Однако недостатком подобных устройств является то, что уровень фазовых шумов прямо пропорционален квадрату коэффициента деления в цепи обратной связи системы фазовой автоподстройки частоты. Для уменьшения коэффициента деления используются смесители в цепи обратной связи [4], на которые подаются сигналы либо с дополнительных генераторов, либо с цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС), работающих на образах основной частоты [8]. Последний вариант позволяет помимо снижения уровня фазовых шумов увеличить диапазон формируемых частот, однако недостатком является отсутствие возможности использования образов основной частоты ЦВС высоких порядков из-за значительного уменьшения их амплитуды по закону $\sin(x)/x$ с увеличением частоты. Для увеличения амплитуды образов основной частоты ЦВС высоких порядков могут использоваться усилители, однако это приведет к дополнительному росту уровня фазовых шумов.

Целью данной работы является разработка структуры гибридного синтезатора на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза, в котором для уменьшения уровня фазовых шумов и увеличения диапазона пере-

стройки по частоте используются образы основной частоты ЦВС высоких порядков.

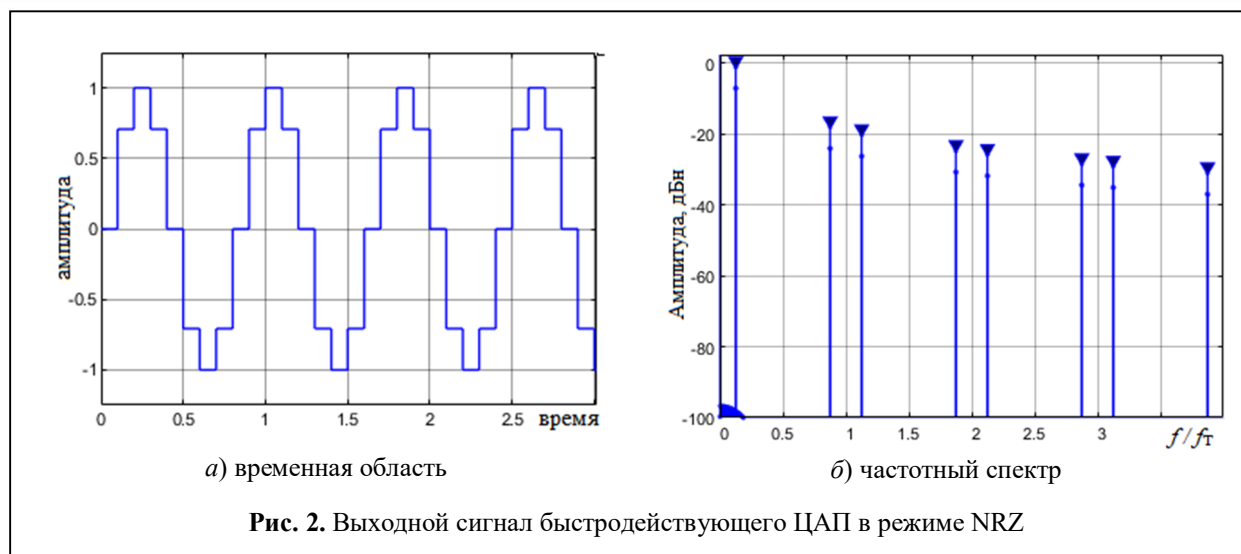
Использование образов основной частоты в гибридном методе синтеза

Гибридный синтезатор частот, использующий образы основной частоты ЦВС, выполнен на основе традиционной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) со смесителем в цепи обратной связи [9–11]. Структурная схема такого синтезатора представлена на рис. 1. Генератор опорной частоты (ГОЧ) формирует опорный сигнал с высокостабильной частотой $f_{ГОЧ}$. Данный сигнал подается на частотно-фазовый дискриминатор (ЧФД), который вырабатывает сигнал ошибки, подстраиваемый генератор, управляемый напряжением (ГУН). Выходной сигнал ГУН по цепи обратной связи поступает на один из входов смесителя (СМ).

Опорный сигнал ГОЧ также подается на ЦВС. Частота $f_{ГОЧ}$ умножается в умножителе частот (УЧ) в n_1 -раз. Выходной сигнал ЦВС во временной области имеет вид ступенчатой синусоиды (рис. 2, а), за счёт чего содержит в спектре основную частоту $f_{ЦВС}$ и образы (копии спектра) основной частоты (рис. 2, б):

$$f_{обр} = n f_T \pm f_{ЦВС}, \quad (1)$$

где f_T — тактовая частота ЦВС; $f_{ЦВС}$ — основная частота ЦВС; $n = 1; 2; 3 \dots$ — номер образа основной частоты ЦВС. Для выделения необ-



ходимого образа основной частоты ЦВС используется полосовой фильтр (ПФ).

Выходной сигнал ЦВС усиливается в усилителе U и поступает на второй вход смесителя. Сигнал с разностной частотой поступает на второй вход ЧФД. При необходимости частоты могут быть поделены в делителях частоты ДЧ1 и ДЧ2. Следует отметить, что основной целью использования смесителя и образов является уменьшение коэффициента деления в цепи обратной связи, т.е. в идеальном случае для обеспечения наилучших шумовых характеристик коэффициент деления ДЧ2 должен быть равен единице.

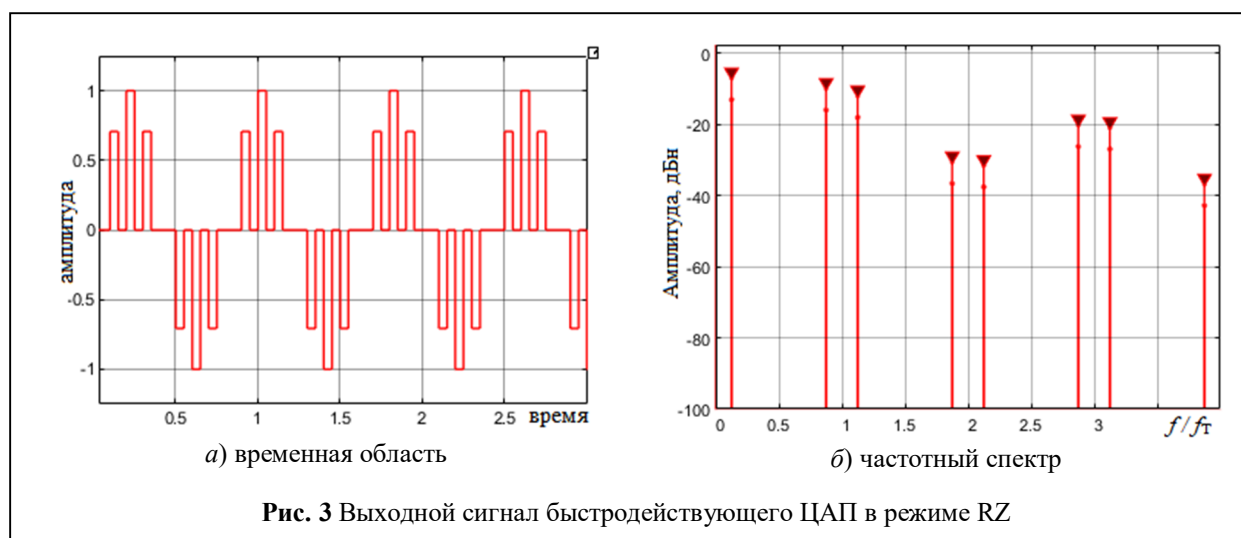
Перестройка гибридного синтезатора по частоте осуществляется перестройкой ЦВС. Однако амплитуда образов уменьшается с уве-

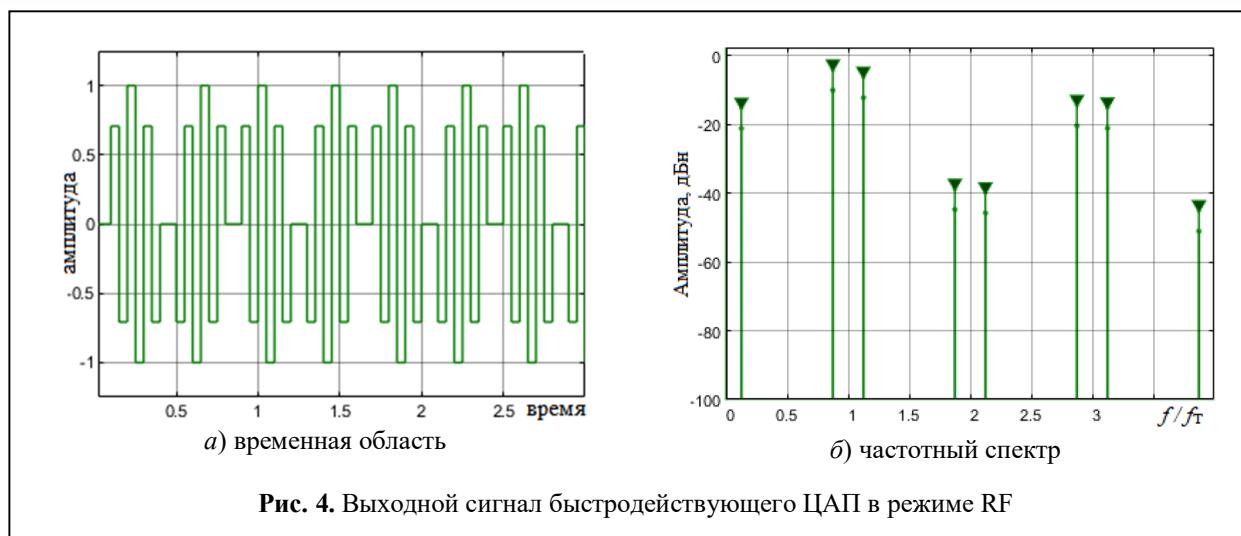
личением номера образа по закону $\sin(x)/x$, из-за чего не представляется возможным использовать образы высоких порядков.

Быстродействующие цифро-аналоговые преобразователи

В настоящее время известны несколько специальных режимов работы быстродействующих преобразователей [12–14]:

- режим *no-return-to-zero* (NRZ) — стандартный режим работы ЦАП, как в обычных цифровых вычислительных синтезаторах;
- режим *return-to-zero* (RZ) характеризуется тем, что отсчет каждой «ступеньки» синусоиды выходного сигнала возвращается в ноль, за счёт чего в спектре увеличивается амплитуда гармоники образа во второй зоне





Найквиста (рис. 3);

- режим *radio frequency* (RF) характеризуется тем, что отсчёт каждой «ступеньки» синусоиды выходного сигнала представляется двумя разнополярными импульсами, за счёт этого в спектре увеличивается амплитуда гармоник образа во второй и третьей зонах Найквиста (рис. 4).

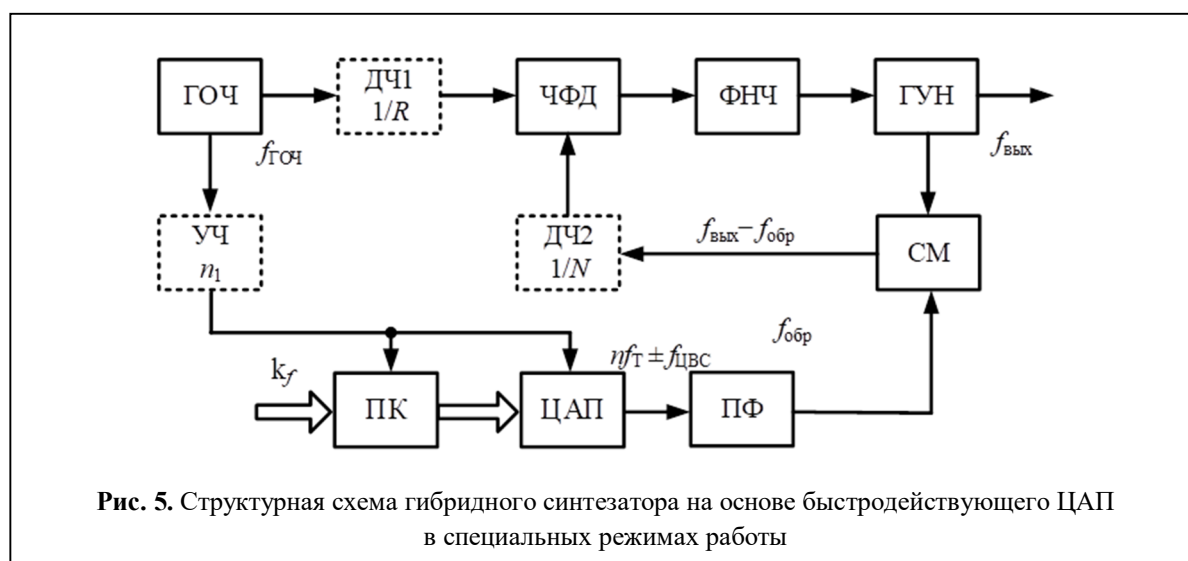
Данные режимы реализуются в быстродействующих ЦАП с помощью высокочастотных ключей. На основе быстродействующих ЦАП можно построить формирователи сигналов, близкие к цифровым вычислительным синтезаторам, работающим на образцах основной частоты. Отличие состоит в том, что в спектре выходного сигнала происходит перераспределение амплитуды образов основной частоты. В

зависимости от выбранного режима работы ЦАП можно использовать образ в определенной зоне Найквиста с увеличенной амплитудой.

Гибридный синтезатор на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя

Для расширения диапазона формируемых частот гибридных синтезаторов на основе ФАПЧ авторами предлагается использовать быстродействующие цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), способные работать в специальных режимах.

На рис. 5 представлена схема гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП в специальных режимах работы [15].



Данный синтезатор отличается от синтезатора, представленного на рис. 1, тем, что вместо ЦВС здесь используется устройство, состоящее из преобразователя кода (ПК) и быстродействующего ЦАП, поддерживающего специальные режимы работы. 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.

Принцип работы гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП аналогичен принципу работы гибридного синтезатора на образцах основной частоты. ГУН формирует выходной сигнал, частотой которого управляет система ФАПЧ. В цепи обратной связи находится частотный смеситель. Отличие заключается в том, что в зависимости от требуемой частоты выходного сигнала ЦАП автоматически переключается в специальный режим работы, в результате используются образцы с увеличенной за счет перераспределения спектра амплитудой.

Оценка шумовых характеристик

предлагаемого гибридного синтезатора

На рис. 6 представлена функциональная модель предлагаемого гибридного синтезатора, созданная в системе Matlab Simulink, для оценки спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов выходного сигнала.

Модель состоит из источника опорного колебания, модели частотно-фазового дискриминатора с системой «накачки заряда», петлевого пропорционально-интегрирующего фильтра, модели генератора, управляемого напряжением, модели частотного смесителя и модели быстродействующего ЦАП, поддерживающего три специальных режима работы (NRZ, RZ, RF).

Моделирование проводилось при параметрах: частота выходного сигнала $f_{\text{ВЫХ}} = 1$ ГГц; частота сравнения в частотно-фазовом детекторе $f_{\text{ЧФД}} = 10$ МГц; ширина полосы пропускания пропорционально-интегрирующего фильтра 4-го порядка $f_{\text{ПИФ4}} = 1$ МГц.

На рис. 7, а) представлены результаты моделирования СПМ фазовых шумов обычной ФАПЧ (без применения частотного смесителя в цепи обратной связи) при следующих параметрах: коэффициент деления в цепи обратной связи $N = 100$.

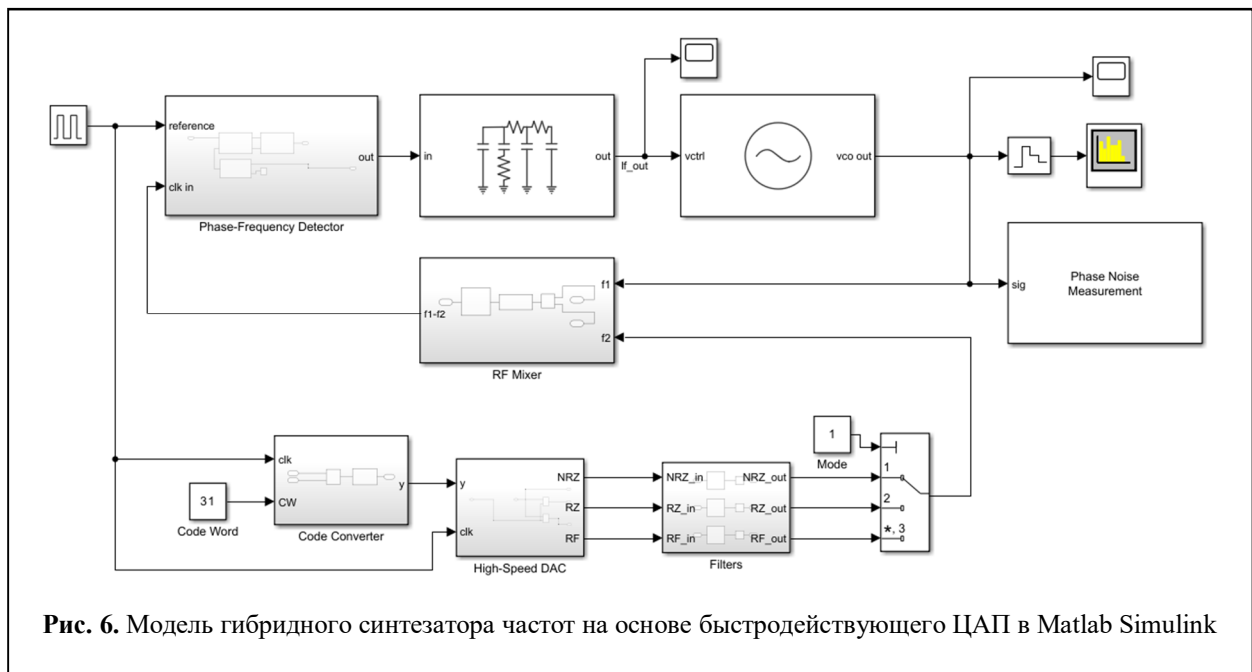
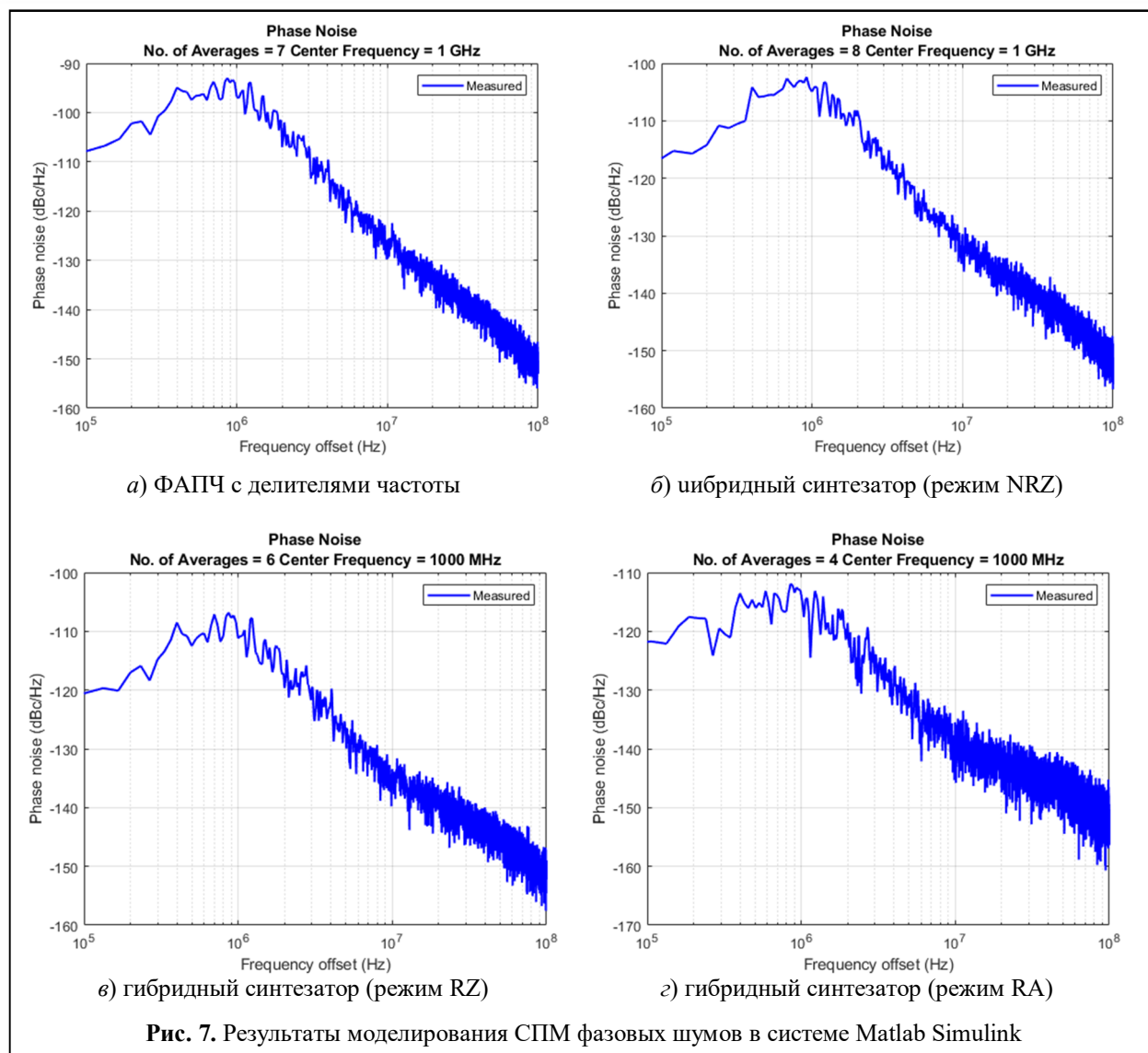


Рис. 6. Модель гибридного синтезатора частот на основе быстродействующего ЦАП в Matlab Simulink



На рис. 7, б) представлены результаты моделирования СПМ фазовых шумов гибридного синтезатора частот на образцах основной частоты (режим NRZ) при следующих параметрах: коэффициент деления в цепи обратной связи $N=92$; номер образа $n=-1$; основная частота ЦВС $f_{\text{ЦВС}}=20$ МГц; частота образа $f_{\text{обр}}=80$ МГц.

На рис. 7, в) представлены результаты моделирования СПМ фазовых шумов предлагаемого гибридного синтезатора частот (режим RZ) при следующих параметрах: коэффициент деления в цепи обратной связи $N=62$; номер образа $n=-4$; основная частота ЦВС $f_{\text{ЦВС}}=20$ МГц; частота образа $f_{\text{обр}}=380$ МГц.

На рис. 7, г) представлены результаты мо-

делирования СПМ фазовых шумов предлагаемого гибридного синтезатора частот (режим RF) при следующих параметрах: коэффициент деления в цепи обратной связи $N=42$; номер образа $n=-6$; основная частота ЦВС $f_{\text{ЦВС}}=20$ МГц; частота образа $f_{\text{обр}}=580$ МГц.

Применение быстродействующего ЦАП в структуре гибридного синтезатора позволяет использовать образы в зонах Найквиста высоких порядков, т.е. увеличить частоту подставки на смеситель.

По результатам моделирования (рис. 7) можно сделать вывод, что применение образов основной частоты низких порядков (в режиме NRZ) даёт выигрыш по уровню фазовых шумов перед традиционной системой ФАПЧ без

смесителей в цепи обратной связи до 8–10 дБ на отстройках 1 кГц до 100 кГц от несущей. Применение образов основной частоты высоких порядков (в режимах RZ и RF) даёт 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.

Полоса пропускания петлевого ФНЧ систем ФАПЧ должна составлять около 10% от частоты сравнения в ЧФД. В системах ФАПЧ с целочисленными делителями частоты шаг перестройки равен частоте сравнения в ЧФД, поэтому для уменьшения шага перестройки необходимо уменьшать частоту сравнения, что в свою очередь приводит как к росту фазовых шумов (из-за увеличения коэффициента деления в цепи обратной связи), так и к увеличению времени перестройки системы ФАПЧ (из-за уменьшения полосы пропускания ФНЧ). Поскольку в гибридных синтезаторах шаг перестройки не зависит от частоты сравнения в ЧФД, можно увеличить частоту сравнения до максимально возможного значения. На рис. 8 представлена осциллограмма управляющего сигнала на выходе петлевого фильтра при переключении частоты выходного сигнала с 1000 МГц на 1010 МГц путём загрузки в преобразователь кода соответствующего кодового слова. Видно, что длительность переходного процесса составляет около 20 мкс из-за достаточно широкой полосы пропускания петлевого ФНЧ.

Заключение

Гибридные синтезаторы частот обеспечивают широкий диапазон выходных частот. Применение быстродействующего ЦАП в структуре системы фазовой автоподстройки частоты позволяет использовать в качестве подставки в цепь обратной связи образы (копии спектра) основной частоты с увеличенной амплитудой, находящиеся в достаточно высоких зонах Найквиста. За счет этого расширяется диапазон частот, формируемых гибридным синтезато-

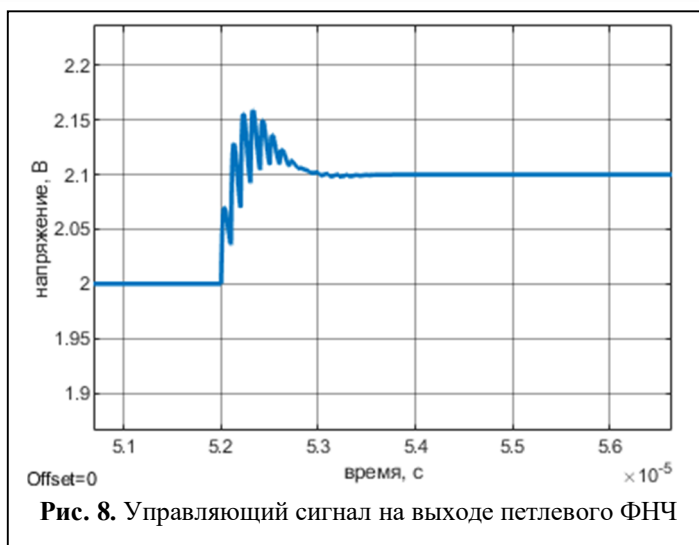


Рис. 8. Управляющий сигнал на выходе петлевого ФНЧ

ром, и обеспечивается малое значение коэффициента деления в цепи обратной связи ФАПЧ, что приводит к уменьшению результирующего уровня фазовых шумов. Функциональное моделирование предлагаемого синтезатора в Matlab Simulink показало, что применение образов основной частоты высоких порядков (в режимах RZ и RF) даёт 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. Кроме того, предлагаемый гибридный синтезатор обеспечивает малый шаг перестройки по частоте (менее герца), а также относительно высокую скорость перестройки (по сравнению с системами ФАПЧ).

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

Литература

1. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. New York: John Wiley&Sons, Ltd, 1998. 396 p.
2. 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.
3. Kroupa V. F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. New York: John Wiley&Sons, Ltd, 2003, 320 p.

4. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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).

13. Overhoff S. Direct-Sampling DACs in Theory and Application [Электронный ресурс] // Maxim Integrated company [сайт]. [2013]. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5446> (дата обращения 5.09.2022).

14. 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.

15. Пат. РФ № RU 214526. Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифроаналогового 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.

Поступила 6 сентября 2022 г.

English

HYBRID FREQUENCY SYNTHESIZER BASED ON HIGH-SPEED DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER

Vladimir Viktorovich Romashov — Grand Dr. in Engineering, Professor, Head of Radio Engineering Department, Murom Institute¹ (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: romashovmurom@mail.ru

Kirill Aleksandrovich Yakimenko — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute¹ (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru

Andrey Nikolayevich Doktorov — PhD, Associate Professor, Radio Engineering Department, Murom Institute¹ (Branch) Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: doctorov_a_n@mail.ru

Natalya Aleksandrovna Sochneva — Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”².

E-mail: sochnewa.natalya@yandex.ru

¹Address: 602264, Russian Federation, Vladimir Region, Murom, Orlovskaya street. 23.

²Address: 602264, Russian Federation, Vladimir, Gorky street. 87.

Abstract: Hybrid frequency synthesizers based on direct digital and indirect synthesis methods are currently widely used as signal conditioners in today's radio systems. Such synthesizers have a number of advantages: a broad band, small frequency tuning step, rather low level of spectrum alias components, and support for modulation of various types. However, the drawback of such devices is phase noise level, which is directly proportional to squared dividing ratio in reactive circuit of phase-locked loop. The article proposes a block diagram of low-noise hybrid frequency synthesizer based on direct digital and indirect methods of frequency synthesis where a high-speed digital-to-analog converter (DAC) is applied in special operating modes (NRZ, RZ, RF) to broaden the band of generated frequencies. The use of high-speed DAC within phase-locked loop (PLL) enables utilizing images (spectrum copies) of fundamental frequency as reactive circuit injection with expanded amplitude and those copies are located in sufficiently high Nyquist zones. And due to this, frequency band generated by hybrid synthesizer broadens, and a small value of dividing ratio in PLL reactive circuit is ensured, which brings to reduction of resultant phase noise level. Functional simulation of the proposed synthesizer in Matlab Simulink revealed that using high-order fundamental frequency images (in RZ and RF modes) gives a gain in phase noise over conventional PLL system without mixers in reactive circuit up to 15–20 dB at 1 kHz tuning-out up to 100 kHz that of carrier. Besides, the proposed hybrid synthesizer ensures a small frequency tuning step (less than a hertz), as well as rather high tuning speed (compared to PLL systems).

Keywords: hybrid frequency synthesizer, high-speed digital-to-analog converter, DAC, phase noise, direct digital synthesis.

References

1. *Kroupa V.F.* Direct Digital Frequency Synthesizers. New York: John Wiley&Sons, Ltd, 1998. 396 p.
2. *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.
3. *Kroupa V. F.* Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. New York: John Wiley&Sons, Ltd, 2003, 320 p.
4. *Ryzhkov A.V., Popov V.N.* Frequency synthesizers in radio communication technology. Moscow: Radio i Svyaz', 1991. 264 p.
5. *Belchikov S.* Phase noise: how to go down below -120 dBn/Hz at 10 kHz tuning in the frequency range up to 14 GHz, or the struggle for decibels. Komponenty i tehnologii. 2009. No. 5, No. 6.
6. *Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doktorov A.N., Romashova L.V.* Experimental study of noise characteristics of hybrid frequency synthesizers based on direct digital and indirect synthesis methods. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Radio engineering and infocommunication systems. 2017. No. 1 (33). Pp. 6–17.
7. *Romashov V.V., Yakimenko K.A.* Development of a mathematical apparatus for frequency planning of hybrid frequency synthesizers. Design and technology of electronic means. 2016. No. 3. Pp. 3–9.
8. *Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A.* Application of images of the main frequency of the DDS in hybrid frequency synthesizers. Radioengineering and telecommunication systems. 2013. No. 3 (11). Pp. 19–24.
9. *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.
10. *Romashov V.V., Yakimenko K.A.* A software package for designing hybrid frequency synthesizers and modeling their noise characteristics. Radio engineering and telecommunication systems. 2018. No. 1 (29). Pp. 36–44.
11. Pat. RU No. RU 172814 U1. Hybrid frequency synthesizer with improved spectral characteristics. *Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A.* Appl. 24.04.2017; publ. 25.07.2017.
12. High Speed DACs [Electronic source]. Analog Devices, Inc. [website]. URL: <http://www.analog.com/en/products/digital-to-analog-converters/high-speed-da-converters.html> (access date 05.09.2022).
13. *Overhoff S.* Direct-Sampling DACs in Theory and Application [Electronic source]. Maxim Integrated company [website]. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5446> (access date 05.09.2022).
14. *Romashov V.V., Khramov K.K., Doktorov A.N., Yakimenko K.A., Sochneva N.A.* Increasing the efficiency of using higher Nyquist zones in direct digital synthesis of high-frequency signals. Radioengineering. 2022. Vol. 86. No. 5. Pp. 135–144.
15. Pat. No. RU 214526. Hybrid frequency synthesizer based on a high-speed digital-to-analog converter in special operating modes. *Romashov V.V., Yakimenko K.A., Doktorov A.N., Sochneva N.A.* Appl. 05.25.2022; publ. 02.11.2022.