

УДК 621.396

**Оценка спектральных характеристик синтезаторов косвенного метода синтеза при использовании генераторов опорной частоты с нелинейными искажениями**

Беркут И.А., Якименко К.А.

В статье приведены результаты оценки спектральных характеристик синтезаторов косвенного метода синтеза при использовании генераторов опорной частоты с нелинейными искажениями. Разработана функциональная модель фазовой автоподстройки частоты в программе MATLAB Simulink. С помощью разработанной модели были проведены исследования влияния на спектральные характеристики выходного сигнала следующих нелинейностей: побочного спектрального компонента, амплитудных глитчей, джиттера.

*Ключевые слова:* синтезатор частот, фазовая автоподстройка частоты, ФАПЧ, функциональное моделирование, генератор опорной частоты, спектральные характеристики.

**Введение**

Синтезаторы частоты косвенного метода синтеза на основе систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с генератором опорной частоты (ГОЧ) активно используются в современных радиотехнических и телекоммуникационных системах. Их широкое распространение обусловлено комплексом преимуществ: высокой стабильностью выходной частоты, возможностью синтеза частот в широком диапазоне с маленьким шагом перестройки, а также относительной простотой реализацией [1–3].

Одной из наиболее существенных проблем, возникающих при проектировании и эксплуатации систем ФАПЧ, являются нелинейные искажения, порождающие нежелательные побочные спектральные составляющие (ПСС) в выходном сигнале [4–7]. Особое влияние на чистоту спектра оказывают нелинейные искажения самого ГОЧ, которые переносятся в выходной сигнал синтезатора.

В многоканальных системах связи с плотным частотным распределением наличие ПСС приводит к возрастанию уровня взаимных помех между соседними каналами, что проявляется в увеличении вероятности ошибок при передаче данных. В высокочувствительных приемных устройствах данные составляющие способствуют снижению динамического диапазона и избирательности, маскируя слабые полезные сигналы [8–12].

Целью данной работы является исследование влияния нелинейных искажений генератора опорной частоты на спектральные ха-

рактеристики выходного сигнала синтезатора частот на основе косвенного метода синтеза с помощью функциональных моделей.

**Функциональная модель синтезатора на основе фазовой автоподстройки частоты**

Для данного исследования была создана функциональная модель синтезатора в программе MATLAB Simulink, которая представлена на рисунке 1.

В данной модели ГОЧ заменяется отдельными формирователями синусоидальной волны (Sine Wave), один из которых настроен на несущую частоту  $f = 1$  МГц, а другой на частоту побочного спектрального компонента, смещенную на частоту отстройки  $\Delta f$ . Эти сигналы объединяются с помощью сумматора (Sum).

Частотно-фазовый детектор (ЧФД / PFD), принимая данный сигнал на вход reference, вырабатывает импульсные сигналы на одном из двух выходов (Up или Down) с разной скважностью. Разница в скважности пропорциональна разности фаз входных сигналов. Далее, сигнал поступает на систему накачки заряда (СНЗ / Charge Pump), которая преобразует импульсы в ток управления  $I_{упр}$ , пропорциональный фазовой ошибке.

Петлевой фильтр (ПФ / Loop Filter) преобразует управляющий ток в постоянное напряжение для генератора, управляемым напряжением (ГУН / VCO). Сигнал с ГУН подается на выход всей модели, а также на делитель частоты (ДЧ / Single Modulus

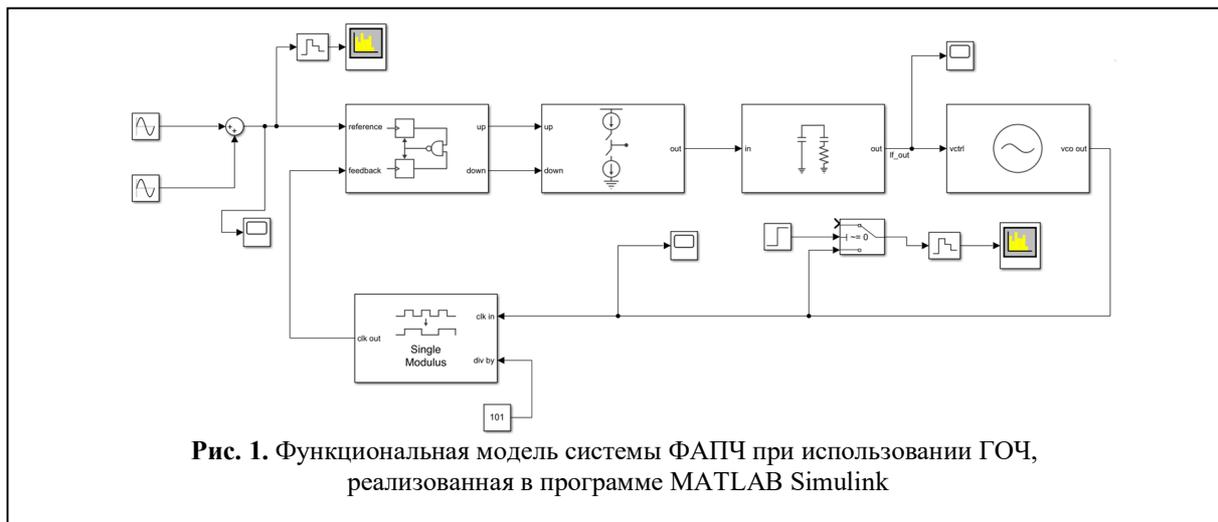


Рис. 1. Функциональная модель системы ФАПЧ при использовании ГОЧ, реализованная в программе MATLAB Simulink

Prescaler), где частота сигнала делится в  $N$  раз и поступает на вход feedback ЧФД. При расхождении входных частот ЧФД вырабатывает сигнал ошибки и подстраивает частоту под необходимую.

Рассмотрим спектр выходного сигнала при наличии одного побочного спектрального компонента при  $\Delta f = 100$  кГц, представленный на рисунке 2.

Даже один побочный спектральный компонент вносит значительные нелинейные искажения. Для качественной оценки были исследованы зависимости отношения сигнал/шум (SNR) и динамического диапазона, свободного от ПСС (SFDR) от частоты отстройки при разных порядках фильтров (рис. 3).

По полученным зависимостям наблюдаем улучшение значений обоих параметров вне зависимости от порядка фильтра. Зависимости имеют “волнистую” форму, что соответствует АЧХ данных фильтров. При увеличе-

нии частоты отстройки  $\Delta f$  с 10 кГц до 450 кГц, улучшились параметры SNR с 3,34 дБ до 16,95 дБ и SFDR с 6,85 дБ до 26,69 дБ.

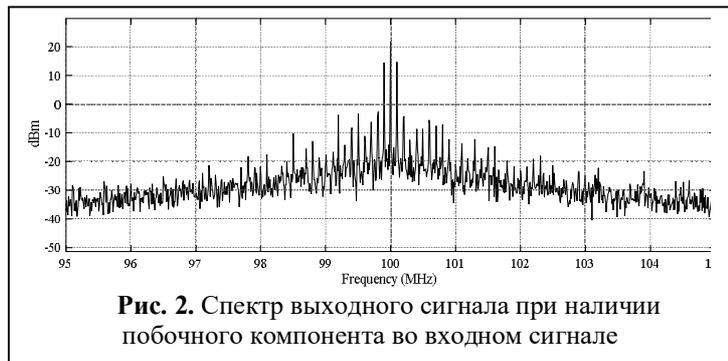


Рис. 2. Спектр выходного сигнала при наличии побочного компонента во входном сигнале

### Спектральные характеристики синтезаторов на основе ФАПЧ при использовании ГОЧ с нелинейными искажениями

Одной из основных причин возникновения нелинейных искажений являются глитчи – кратковременные скачки амплитуды, возникающие в выходном сигнале. Обычно глитчи могут возникать из-за утечки тока при переключении высокоскоростных ключей. Исследование их влияния на сигнал помогает

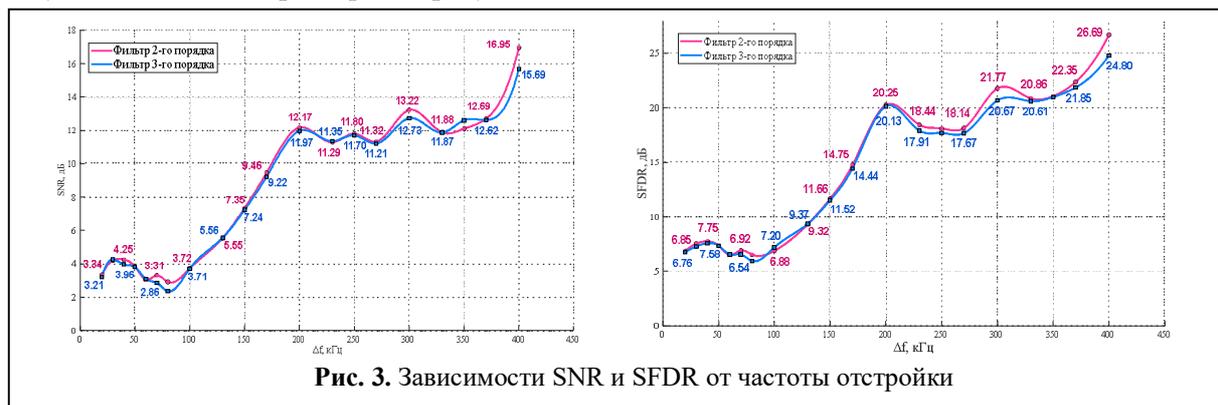
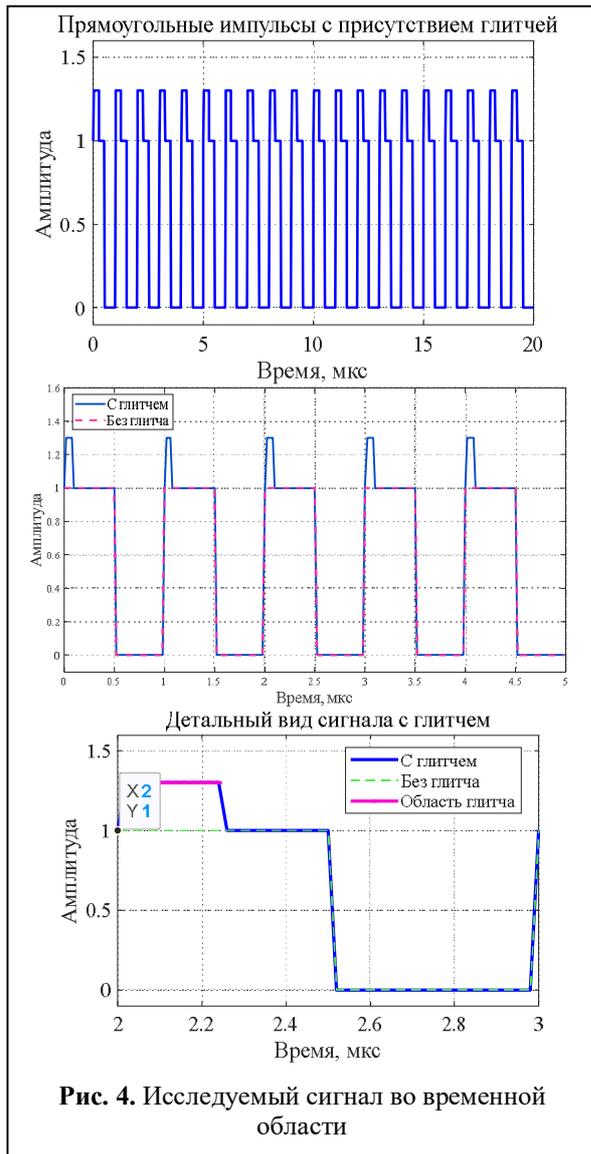


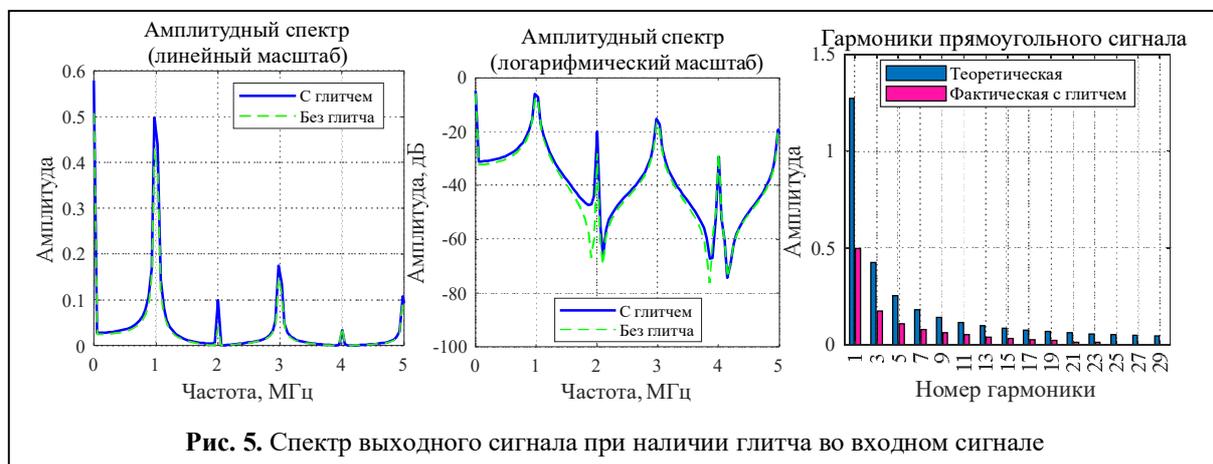
Рис. 3. Зависимости SNR и SFDR от частоты отстройки



оценить устойчивость системы к амплитудным искажениям.

В большинстве случаев глитчи вносят значительные ПСС в спектр выходного сигнала (рис. 5).

Заменим отдельные формирователи сину-



соидальной волны блоком с программой формирования сигнала с глитчами. Изменяя амплитуду, длительность и расположение глитча относительно основного импульса во всех случаях был получен чистый спектр без нелинейных искажений, что говорит о высокой степени фильтрации, и, следовательно, стабильности системы ФАПЧ.

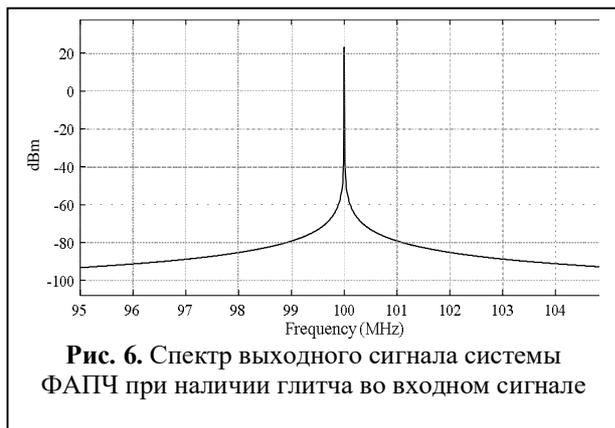
Для оценки фазовых нелинейных искажений для формирования сигнала использовался блок источника тактового сигнала выборки (SamplinfClockSource) с апертурным, т. е. случайным джиттером фазы (aperture jitter). Спектр выходного сигнала значительно расширился и появилась шумовая полка — участок спектра фазового шума, где его спектральная плотность мощности (СПМ) принимает постоянное значение.

Величина джиттера изменялась (от 10 пс до 100 пс), при этом значения параметров SNR = 10,82 дБ и SFDR = 25,41 дБ оставались неизменными, что говорит о постоянном и независимом влиянии фазовых шумов на систему ФАПЧ.

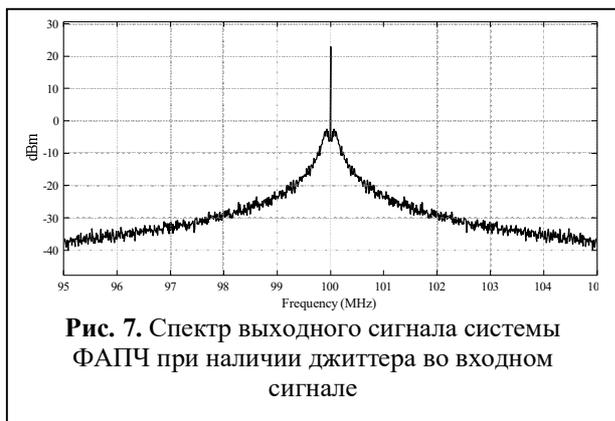
### Заключение

По результатам исследований спектральных характеристик синтезаторов косвенного метода синтеза при использовании генераторов опорной частоты с нелинейными искажениями можно сделать следующие выводы.

1. Побочные спектральные компоненты во входном сигнале имеют значительное влияние на спектр выходного сигнала. Амплитуда и количество ПСС обратно пропорциональны



**Рис. 6.** Спектр выходного сигнала системы ФАПЧ при наличии глитча во входном сигнале



**Рис. 7.** Спектр выходного сигнала системы ФАПЧ при наличии джиттера во входном сигнале

частоте отстройки ПСС  $\Delta f$  относительно полезной несущей гармоники. При увеличении частоты отстройки  $\Delta f$  с 10 кГц до 450 кГц, видно, что параметры улучшаются: SNR увеличивается с 3,34 дБ до 16,95 дБ и SFDR увеличивается с 6,85 дБ до 26,69 дБ.

2. Присутствие в выходном сигнале ГОЧ амплитудных глитчей никак не влияет на спектральные характеристики выходного сигнала ФАПЧ, что говорит о высокой устойчивости системы ФАПЧ к амплитудным искажениям, вызванным переключением высокоскоростных ключей ГОЧ.

3. Оценка спектральных характеристик ФАПЧ при использовании в качестве ГОЧ формирователя прямоугольных импульсов с джиттером показала, что джиттер опорного сигнала вызывает возникновение шумовой полки в спектре выходного сигнала в полосе эквивалентной полосе пропускания петлевого фильтра. Величина джиттера опорного сигнала не влияет на спектр. При этом, фазовые искажения непосредственно вносят ПСС в выходной спектр системы ФАПЧ и имеют постоянный и независимый характер.

## Литература

1. Jiang S., Zhang Y., Xu J. Study on spurious suppression behavior of Fractional-N and DDS based PLL synthesizers with fine frequency resolution // 2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Qingdao, China. 14-17 May 2023. DOI: 10.1109/ICMMT58241.2023.

2. Zhang A., Xu J., Wang W., Yu P. A V Band Wideband Frequency Synthesizer Based on Hybrid Scheme of DDS and PLL // 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Harbin, China. 12-15 August 2022. DOI: 10.1109/ICMMT55580.2022.10023348

3. 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.

4. Якименко К. А., Ромашов В. В., Березина Д. М., Беркут И. А. Оценка влияния амплитудных глитчей и фазового шума формирователей сигналов на основе быстродействующих ЦАП на параметры систем связи с QAM-модуляцией // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2025, №1. – С. 48–58.

5. Беркут И.А. Влияние нелинейных искажений быстродействующих ЦАП на параметры цифровых систем связи с QAM-модуляцией // Сборник тезисов докладов всероссийской молодежной научной конференции, 2024, С. 148–150.

6. Беркут И.А., Якименко К.А., Березина Д.М. Влияние спектральных компонентов в соседних зонах Найквиста на параметры систем связи на основе быстродействующих ЦАП // XXXI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», посвященная 130-летию изобретения радио. Россия, г. Воронеж, 15-17 апреля 2025 г.

7. Беркут И.А., Березина Д.М. Амплитудные глитчи быстродействующих ЦАП в составе современных систем связи // Научный потенциал молодежи – будущее России. XVII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 25.04.2025.

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. Якименко К.А., Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Сочнева Н.А. Влияние фазового шума и нелинейных искажений быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей на

параметры цифровых систем связи // Радиотехника. 2024. Т. 88. №6. С. 137–148.

10. Якименко К.А., Ромашов В.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Сочнева Н.А. Исследование шумовых характеристик синтезаторов частот на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 11. С. 180–191.

11. Березина Д.М., Беркут И.А. Численная оценка фазовых шумов формирователей сигналов на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей // Научный потенциал молодежи – будущее России. XVII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез.

**Поступила 15 сентября 2025 г.**

докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром: МИ ВлГУ, 25.04.2025.

12. 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.

The article presents the results of evaluating the spectral characteristics of indirect synthesis method synthesizers using reference frequency generators with nonlinear distortions. A functional model of phase-locked frequency control has been developed in the MATLAB Simulink program. Using the developed model, the influence of the following nonlinearities on the spectral characteristics of the output signal has been studied: sideband spectral component, amplitude glitches, and jitter.

*Key words:* frequency synthesizer, phase-locked loop, functional modeling, reference frequency generator, spectral characteristics.

*Беркут Ирина Александровна* — магистрант кафедры радиотехники ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* irinaberkut07@mail.ru

*Якименко Кирилл Александрович* — кандидат технических наук, доцент, 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, г. Муром, ул. Орловская, 23.