

## **Анализ переходных процессов гибридных синтезаторов частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя**

К.А. Якименко<sup>1</sup>, В.В. Ромашов<sup>1</sup>, Н.А. Сочнева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.  
E-mail: [yakimenko.kirill@yandex.ru](mailto:yakimenko.kirill@yandex.ru)

*Гибридные синтезаторы частот широко используются в современных системах радиолокации и телекоммуникации. Представлены результаты исследований переходных процессов, происходящих при перестройке частоты в гибридных синтезаторах на основе быстродействующих цифро-аналоговых преобразователей. Разработана функциональная модель гибридных синтезаторов в системе Matlab Simulink. Представлены результаты оптимизации петлевых фильтров нижних частот с целью улучшения спектральных и переходных характеристик гибридных синтезаторов.*

*Ключевые слова: гибридный синтезатор частот, петлевой фильтр, быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь, ЦАП, специальный режим работы*

## **Analysis of transients in hybrid frequency synthesizers based on high-speed digital-to-analog converters**

К.А. Yakimenko<sup>1</sup>, V.V. Romashov<sup>1</sup>, N.A. Sochneva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Murom Institute (branch) of Vladimir State University.

*Hybrid frequency synthesizers are used in modern radars and telecommunications. The results of studies of transient processes occurring during frequency tuning in hybrid synthesizers based on high-speed digital-analog converters are presented. A functional model of hybrid synthesizers in the Matlab Simulink system has been developed. The results of optimization of low-pass loop filters in order to improve the spectral and transient characteristics of hybrid synthesizers are presented.*

*Keywords: hybrid frequency synthesizer, loop filter, high-speed digital-to-analog converter, DAC, special operation mode*

### **Введение**

Синтезаторы частот, предназначенные для формирования несущей частоты в современных системах радиолокации, а также в системах связи пятого поколения (5G) должны работать в сантиметровом и миллиметровом диапазонах частот с заданным шагом перестройки по частоте, а также обеспечивать хорошие шумовые и спектральные характеристики [1, 2]. Наиболее распространены в настоящее время прямой цифровой [3, 4] и гибридный [5, 6] методы синтеза частот. Авторами предложена схема гибридного синтезатора на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) [7, 8]. Работа быстродействующего ЦАП в специальных режимах позволяет использовать для увеличения рабочей частоты спектральные компоненты, присутствующие в выходном сигнале ЦАП в зонах Найквиста с номерами от 2 и выше [9]. Применение быстродействующего ЦАП позволяет уменьшить коэффициент деления в цепи обратной связи и тем самым, снизить уровень фазовых шумов. Общим недостатком синтезаторов на основе систем

ФАПЧ является значительное время перестройки, определяемое параметрами петлевого фильтра нижних частот. Целью данной работы является анализ переходных процессов при перестройке частоты гибридного синтезатора с целью оптимизации временных и спектральных характеристик.

### Переходные характеристики синтезаторов на основе ФАПЧ

Выходной сигнал предложенного гибридного синтезатора формируется на выходе генератора, управляемого напряжением (ГУН), который включен в цепь ФАПЧ. На вход ГУН через петлевой ФНЧ подается управляющее напряжение с выхода частотно-фазового детектора. В цепи обратной связи стоит смеситель, на который подается сигнал с выхода быстродействующего ЦАП. В идеальном случае для минимизации уровня фазовых шумов необходимо обеспечить единичный коэффициент деления в цепи обратной связи за счет увеличения выходной частоты ЦАП до значения, отличающегося от частоты выходного сигнала на частоту сравнения в ЧФД. Перестройка частоты осуществляется перестройкой выходной частоты ЦАП. В результате нарушается равенство фаз сигналов на входах ЧФД, и он вырабатывает сигнал ошибки, подстраивающий ГУН до восстановления равенства фаз. Переходной процесс при переключении управляющих битов быстродействующего ЦАП длится менее 100 нс, что составляет около 1% от времени перестройки ФАПЧ, в связи с этим под длительностью переходного процесса гибридного синтезатора в данной работе будем подразумевать переходной процесс петли ФАПЧ.

Общее уравнение, описывающее режим работы синтезаторов на основе ФАПЧ с единичным коэффициентом деления в цепи обратной связи [9, 10]:

$$\Phi_{\text{ГУН}}(p) = \frac{s_{\text{ЧФД}} s_{\text{ГУН}} F_{\text{ФНЧ}}(p)}{p + s_{\text{ЧФД}} s_{\text{ГУН}} F_{\text{ФНЧ}}(p)} \Phi_{\text{ГОЧ}}(p) + \frac{s_{\text{мод}} U_{\text{мод}}(p)}{p + s_{\text{ЧФД}} s_{\text{ГУН}} F_{\text{ФНЧ}}(p)}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{\text{ГУН}}(p)$  — фаза ГУН;  $s_{\text{ЧФД}}$  — крутизна характеристики ЧФД;  $s_{\text{ГУН}}$  — крутизна управления ГУН;  $F_{\text{ФНЧ}}(p)$  — передаточная характеристика петлевого ФНЧ;  $\Phi_{\text{ГОЧ}}(p)$  — фаза ГОЧ;  $s_{\text{мод}}$  — крутизна управления ГУН внешним модулирующим воздействием;  $U_{\text{мод}}(p)$  — внешнее модулирующее напряжение;  $p$  — оператор Лапласа.

Пусть при переключении синтезатора фаза на одном из входов ЧФД изменится на  $d$  (уравнение в области Лапласа умножится на  $d/p$ ). Таким образом, реакция синтезатора будет иметь вид

$$\frac{\Phi_{\text{ош}}(p)}{\Phi_{\text{ГОЧ}}(p)} = \frac{p}{p + s_{\text{ЧФД}} s_{\text{ГУН}} F_{\text{ФНЧ}}(p)} \frac{d}{p}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{\text{ош}}(p)$  — фаза ошибки при рассогласовании фаз на входах ЧФД.

При переходе к относительному изменению частоты, уравнение (2) преобразуется

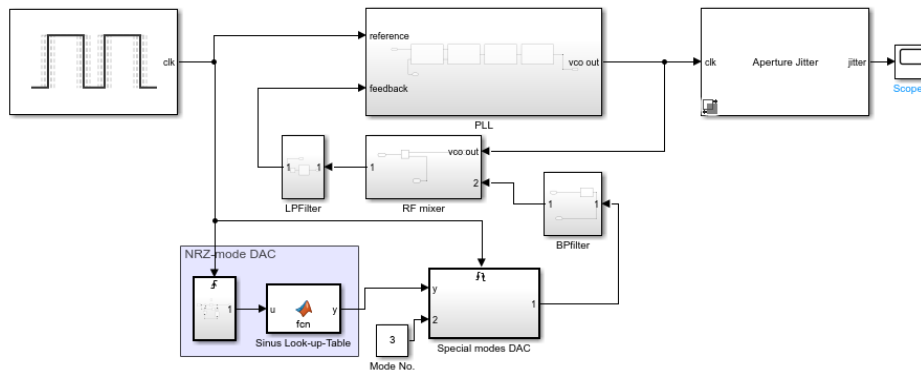
$$\Delta\omega = \frac{1}{p + s_{\text{ЧФД}} s_{\text{ГУН}} F_{\text{ФНЧ}}(p)}. \quad (3)$$

Применение преобразования Лапласа к уравнению (3) позволяет перейти к функции времени, описывающей процесс перестройки по частоте синтезатора на основе ФАПЧ. Процесс может иметь колебательный или экспоненциальный характер в зависимости от параметров системы ФАПЧ.

### Функциональная модель гибридного синтезатора частот на основе быстродействующего ЦАП

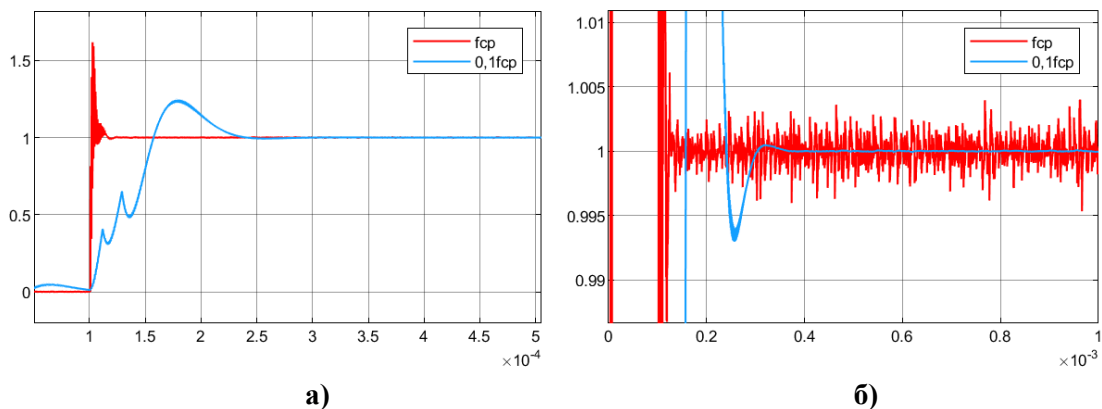
Для проведения исследований была разработана функциональная модель гибридного синтезатора в программе Matlab Simulink (рис. 1). В качестве составных

блоков используются функциональные модели частотно-фазового детектора, системы «накачки заряда», петлевого ФНЧ, генератора, управляемого напряжением, быстродействующего цифро-аналогового преобразователя, поддерживающего специальные режимы, а также модели полосовых фильтров.



**Рис. 1. Модель гибридного синтезатора на основе быстродействующего ЦАП**

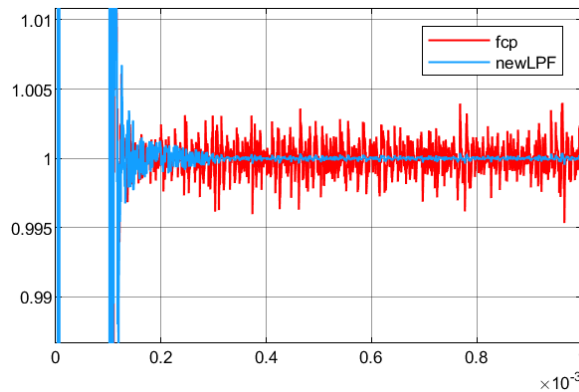
На рис. 2 представлены результаты моделирования управляющего напряжения при использовании пропорционально-интегрирующих фильтров нижних частот с двумя значениями полосы пропускания. По рис. 2 видно, что фильтр с полосой пропускания  $f_{cp}$  обеспечивает малую длительность переходного процесса, но менее эффективную фильтрацию помех, чем фильтр с полосой пропускания  $0,1f_{cp}$ .



**Рис. 2. Результаты моделирования управляющего напряжения**

В работе [10] предложена схема устройства, позволяющего увеличить скорость перестройки синтезатора на основе ФАПЧ, сохраняя при этом хорошую фильтрацию помех. Однако недостатком данного устройства является нестабильность при скачкообразном переключении номиналов резисторов, которая может привести к рассинхронизации петли ФАПЧ. В данной работе предлагается устройство, позволяющее устранить данный недостаток.

На рис. 3 предлагается сравнение выходного сигнала петлевого фильтра нижних частот предлагаемого устройства с выходным сигналом петлевого фильтра с расширенной полосой пропускания. По рис. 3 видно, что предлагаемое устройство позволяет уменьшить время перестройки, при этом обеспечивает хорошие фильтрационные показатели (аналогично петлевому ФНЧ с узкой полосой пропускания).



**Рис. 3. Результаты моделирования управляющего напряжения синтезатора с применением предлагаемого устройства**

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00149, <https://rscf.ru/project/22-79-00149/>*

### **Литература**

1. Al-Dulaimi A., Wang X., Chih-Lin I. 5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management. USA: Wiley, 2018. 784 p.
2. Launay F. NG-RAN and 5G-NR: 5G Radio Access Network and Radio Interface. USA: Wiley, 2021.
3. 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.
4. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. USA: John Wiley & Sons, Ltd, 1998. 396 p.
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., Докторов А.Н., Сочнева Н.А. Гибридный синтезатор частот на основе быстродействующего цифро-аналогового преобразователя // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №4. С. 51–59.
8. 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.
9. 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.
10. Zahir Z., Banerjee G. A 0.9–5.4 GHz wideband fast settling frequency synthesizer for 5G based consumer services // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2018. Vol. 97(2). DOI: 10.1007/s10470-018-1312-4