

УДК 621.396

**Автоматизация проектирования полосовых фильтров для маломощных гибридных синтезаторов частот**

Якименко К.А.

Гибридные синтезаторы на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза широко используются в качестве формирователей гармонических сигналов в радиосистемах, где требуется высокая скорость и малый шаг перестройки по частоте, а также низкий уровень фазовых шумов. Важным составным блоком таких синтезаторов является один или несколько наборов полосовых фильтров, которые выделяют полезный сигнал и подавляют нежелательные спектральные составляющие. От параметров элементов фильтрации напрямую зависят шумовые и спектральные характеристики гибридных синтезаторов. В данной работе представлено описание специализированного программного средства для расчета и структурного проектирования полосовых фильтров, входящих в состав гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза. Программное средство позволяет на основе значений центральной частоты и полосы пропускания синтезировать топологию фильтра, рассчитать геометрические размеры связанных микрополосковых линий, построить амплитудно-частотную характеристику.

*Ключевые слова:* гибридный синтезатор частот, ЦВС, полосовой фильтр, фазовый шум, программное средство.

**Введение**

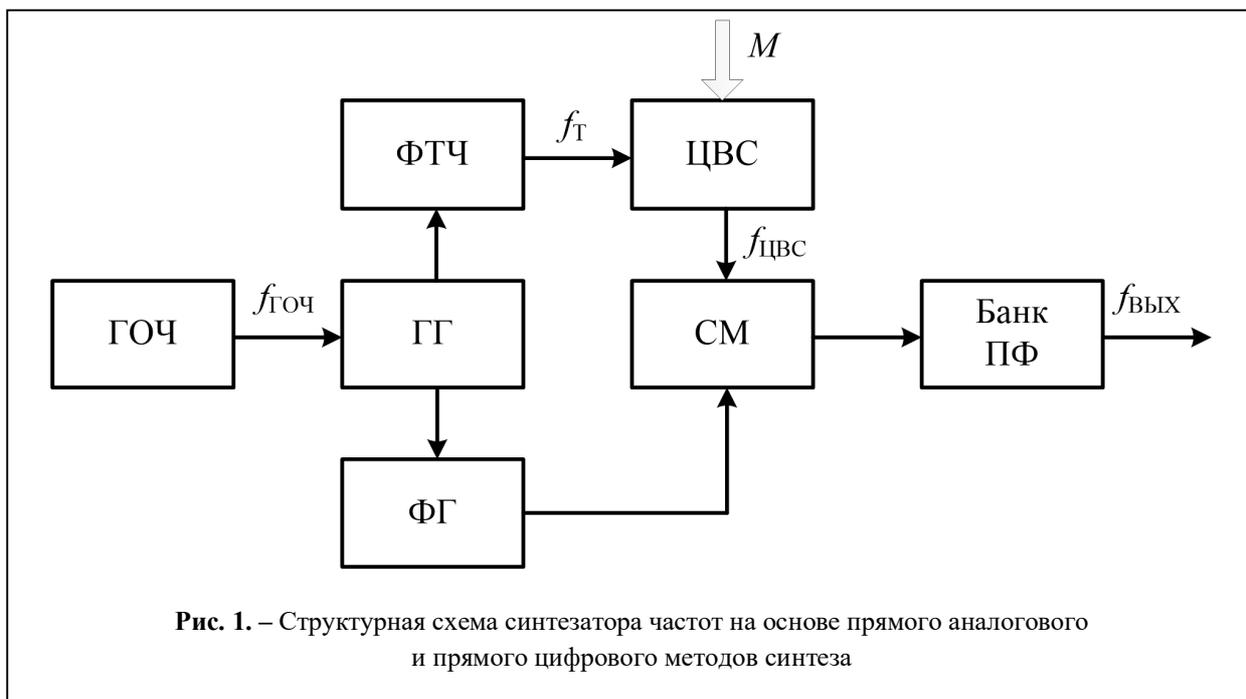
Формирователи гармонических сигналов являются важнейшими элементами практически любой радиосистемы. Основное предназначение формирователя сигналов состоит в генерации сигнала с несущей частотой и/или сигнала, который смешивается с входным сигналом в супергетеродинных системах для получения сигнала с промежуточной частотой. Как правило, в качестве таких формирователей используются синтезаторы частот, позволяющие формировать набор частот с определенным шагом.

Традиционными методами синтеза считаются прямой и косвенный методы [1–3]. В синтезаторах прямого метода синтеза частота выходного сигнала получается за счет операций сложения, умножения и деления над частотой входного (опорного) сигнала. Традиционно такие синтезаторы были построены на аналоговых элементах, но в последнее время наиболее распространены синтезаторы прямого цифрового метода синтеза — цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС). Каждый из методов синтеза имеет достоинства и недостатки. В современных радиосистемах используются гибридные синтезаторы, которые построены из комбинаций составных блоков синтезаторов различных ме-

тодов синтеза. Это позволяет устранить недостатки, присущие одним синтезаторам за счет достоинств других.

Недостатком прямых аналоговых синтезаторов является то, что малый шаг достигается лишь за счет существенного усложнения и без того довольно громоздкой архитектуры. Недостатком цифровых вычислительных синтезаторов является работа на относительно невысоких частотах. Однако совместное использование обоих типов синтезаторов в виде гибридного синтезатора позволяет взаимно устранить эти недостатки. Достоинствами гибридных синтезаторов на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза являются широкий диапазон частот (за счет прямого аналогового метода синтеза), малый шаг перестройки по частоте при относительно несложной архитектуре (за счет ЦВС), а также высокая скорость перестройки, низкий уровень фазовых шумов и побочных составляющих спектра. Описанию и исследованию шумовых характеристик таких гибридных синтезаторов посвящены работы [4–8].

Активное развитие и совершенствование вычислительных средств в настоящее время позволяет существенно экономить временные ресурсы разработчика. В связи с этим



актуальной представляется задача автоматизации процесса разработки малошумящих формирователей гармонических сигналов [9–11]. Целью данной работы является разработка программного средства для расчета и структурного проектирования полосовых фильтров гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза.

#### Фильтры в составе гибридных синтезаторов

На рис. 1 представлена структурная схема одной из возможных архитектур гибридного синтезатора на основе прямого аналогового и прямого цифрового методов синтеза частот. Принцип работы таких синтезаторов заключается в том, что сетка частот гармонических сигналов, генерируемых ЦВС, с малым шагом перестройки по частоте переносится на более высокий частотный диапазон, формируемый одним или несколькими генераторами опорной частоты (ГОЧ). С целью упрощения архитектуры выгоднее использовать один ГОЧ, но тогда диапазон выходных частот будет ограничен диапазоном частот ЦВС. Поэтому для расширения частотного диапазона необходимо использовать умножитель частоты. Умножители частоты, как

правило, реализуются на нелинейных элементах, например на диодах с накоплением заряда (ДНЗ). Применение ДНЗ позволяет получить большое количество (до полутора тысяч) гармонических составляющих частоты входного сигнала. Для выделения требуемой гармоники используются специальные фильтры (на рис. 1: фильтр тактовой частоты — ФТЧ и фильтр гармоник — ФГ). В качестве таких фильтров можно использовать полосовые фильтры с очень узкой полосой пропускания. В смесителе СМ смешиваются частоты выходного сигнала ЦВС и одной из гармоник ГОЧ, генерируемой генератором гармоник на ДНЗ. Далее банк полосовых фильтров выделяет сигнал с суммарной частотой, который является выходным сигналом синтезатора.

Частота выходного сигнала гибридного синтезатора определяется по формуле

$$f_{\text{ВЫХ}} = f_{\text{ЦВС}} + n_{\text{Г}} \cdot f_{\text{ГОЧ}} = f_{\text{ГОЧ}} (n_{\text{Г}} \cdot K_{\text{ЦВС}} + n_{\text{Г}}), \quad (1)$$

где  $n_{\text{Г}}$  — номер гармоники для получения тактовой частоты ЦВС;  $n_{\text{Г}}$  — номер опорной гармоники;  $K_{\text{ЦВС}}$  — коэффициент передачи ЦВС.

Таким образом, поскольку в состав гибридного синтезатора входят несколько полосовых фильтров, перед разработчиком формирователя сигналов ставится задача

рассчитать фильтры на необходимые диапазоны частот, причем фильтры должны обеспечивать достаточное подавление нежелательных побочных спектральных компонентов, появляющихся в результате смешивания.

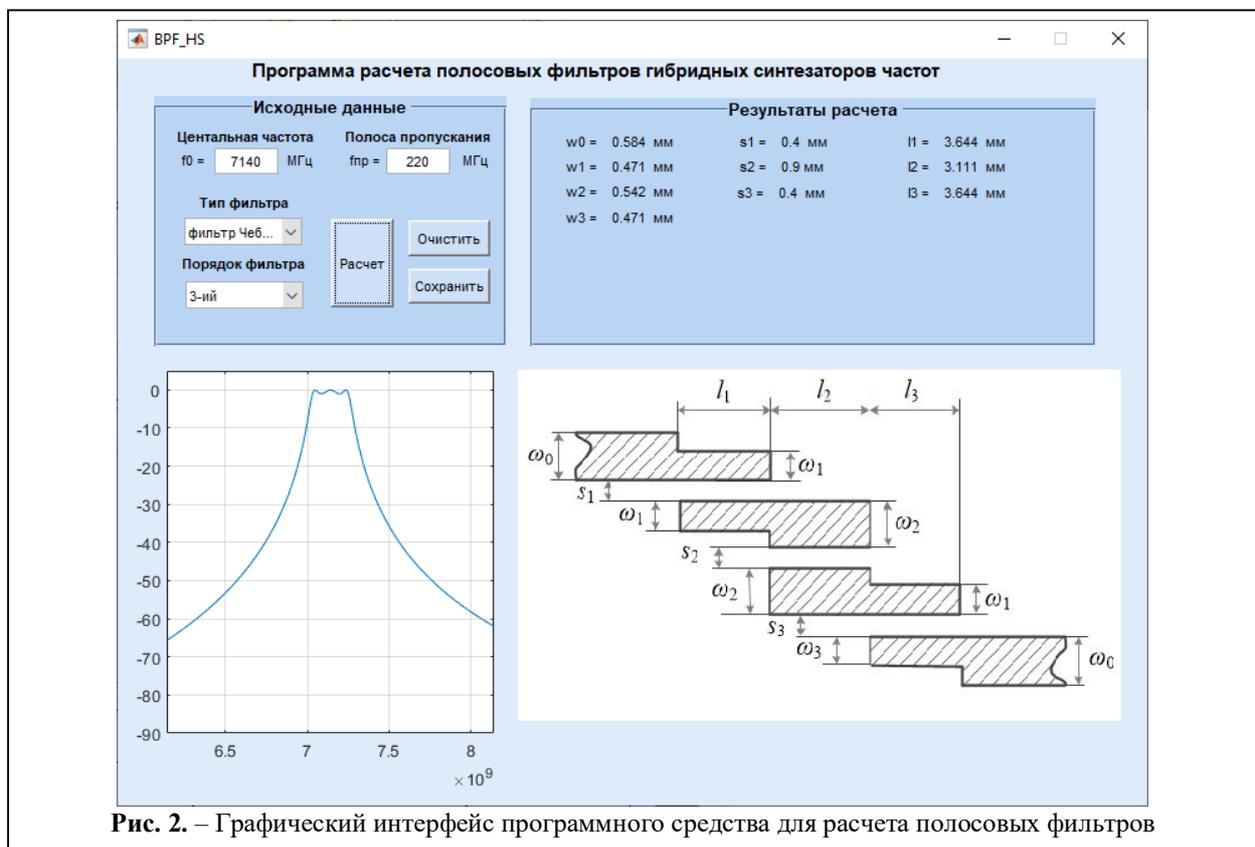
### Программное средство для проектирования фильтров

В зависимости от области применения синтезаторы частот должны обеспечивать сетку частот в различных частотных диапазонах. В связи с этим, фильтры могут реализоваться также на различных элементах. Если разрабатываемый формирователь должен работать в СВЧ- и КВЧ-диапазонах, то фильтры необходимо строить на основе распределенных элементов на отрезках линии передач. К примеру, полосовые фильтры удобно строить на микрополосковой линии. Известен ряд возможных реализаций полосовых фильтров: на параллельных связанных полуволновых резонаторах; на встречных стержнях; на одиночной микрополосковой линии с зазорами и др. Описанию и методике расчета подобных фильтров посвящено большое количество

источников, например [12–15]. При разработке программного средства использовались выражения для расчета полосовых фильтров на параллельных связанных полуволновых резонаторах из [14, 15].

Пользователь вводит значение центральной частоты и полосы пропускания в МГц, затем выбирает тип (Баттерворта, Чебышева) и порядок фильтра. Программное средство строит передаточную характеристику фильтра, а также рассчитывает геометрические размеры проводников. На рис. 2 представлен графический интерфейс программного средства.

При проектировании полосовых фильтров ФТЧ и ФГ необходимо установить как можно более узкую полосу пропускания. Это поможет достаточно подавить соседние гармоники. Достаточным считается уровень не более минус 90 дБн. Уровень нежелательных составляющих спектра характеризуется таким параметром, который в англоязычных источниках называется Spurious-Free



Dynamic Range, SFDR (перев. динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих) — безразмерная величина, равная отношению мощности полезного узкополосного сигнала (несущей) к мощности наиболее мощной паразитной частотной составляющей (гармоники).

Полоса пропускания одного из  $n$  полосовых фильтров, входящих в банк ПФ, как правило, не должна превышать диапазона изменения частоты выходного сигнала ЦВС

$$\Delta F_{\text{ПФ}n} < \Delta f_{\text{ЦВС}}.$$

При этом, диапазон изменения выходной частоты ЦВС ограничен значениями от единиц Гц до  $0,4n_{\text{TГоч}}$ .

### Заключение

В данной статье представлены результаты разработки программного средства для расчета и структурного проектирования полосовых фильтров для гибридных синтезаторов частот. Программное средство позволяет на основе значений центральной частоты и полосы пропускания синтезировать топологию фильтра, рассчитать геометрические размеры связанных линий, построить амплитудно-частотную характеристику.

Настоящая работа представляет собой результат практической реализации одного из этапов создания крупной автоматизированной системы для проектирования малошумящих гибридных синтезаторов частот. В это же время, предлагаемое программное средство может использоваться и автономно для расчетов полосовых СВЧ фильтров любого назначения.

### Литература

1. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2005. 224 с.
2. Kroupa V.F. Direct Digital Frequency Synthesizers. John Wiley & Sons, Ltd, 1998. 396 p.
3. Kroupa V.F. Phase Lock Loops and Frequency Synthesis. New York. John Wiley & Sons, Ltd, 2003. 320 p.
4. Chenakin A. Frequency Synthesizers: From Concept to Product. New York: Artech House, 2010. 235 p.
5. Romashov V.V., Khramov K.K., Yakimenko, K.A. The hybrid frequency synthesizer based on DDS and two-loop PLL // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959400.
6. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Якименко К.А. Исследование шумовых характеристик гибридного синтезатора частот на основе цифрового вычислительного синтезатора и двухкольцевой ИФАПЧ // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2014. № 16. С. 18–24.
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., 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. С. 6–17.
9. Ромашов В.В., Якименко К.А. Программный комплекс для проектирования гибридных синтезаторов частот и моделирования их шумовых характеристик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 1. С. 36–44.
10. Ромашов В.В., Докторов А.Н., Якименко К.А., Базжин А.С. Программный комплекс для анализа шумовых характеристик синтезаторов частот // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2019. № 21. С. 14–19.
11. Ромашов В.В., Якименко К.А., Докторов А.Н. Программное средство для структурного проектирования гибридных синтезаторов частот на основе прямого аналогового и прямого цифро-

вого методов синтеза // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 3. С. 47–55.

12. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: учеб. для радиотехнических спец вузов. М.: Высшая школа, 1988. 432с.

13. Малков Н.А., Пудовкин А.П. Устройства сверхвысоких частот. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 196с.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации, а также Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках проекта по конкурсу УМНИК-2018.*

**Поступила 17 октября 2020 г.**

Hybrid synthesizers based on direct analog and direct digital synthesis methods are widely used in applications where the harmonic signal generator requires a high speed and small frequency tuning step, as well as a low level of phase noise. An important component of such synthesizers is one or more sets of bandpass filters that isolate the useful signal and suppress unwanted spectral components. The noise and spectral characteristics of hybrid synthesizers directly depend on the parameters of the filtering elements. This paper describes a specialized software tool for calculating and structurally designing bandpass filters that are part of hybrid frequency synthesizers based on direct analog and direct digital synthesis methods. The software tool allows you to synthesize the filter topology based on the values of the central frequency and bandwidth, calculate the geometric dimensions of the associated microstrip lines, and construct the amplitude-frequency response.

*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, Муром, ул. Орловская, д. 23.