

УДК 621.396

Программный комплекс для проектирования гибридных синтезаторов частот и моделирования их шумовых характеристик

Ромашов Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
E-mail: romashovmugom@mail.ru.

Якименко Кирилл Александрович

аспирант 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, Владимирская обл., ул. Орловская, д.23.

Аннотация: В статье разработан алгоритм частотного планирования гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза. Представлены результаты разработки программного комплекса, позволяющего по введенным значениям опорных и выходных частот провести частотное планирование гибридных синтезаторов, реализованных на современных интегральных микросхемах, рассчитать петлевые фильтры нижних частот, построить структурные схемы, провести математическое моделирование и сравнение спектральной плотности (СПМ) фазовых шумов выходного сигнала, провести исследование вкладов звеньев синтезаторов в результирующий уровень СПМ фазовых шумов.

Ключевые слова: гибридные синтезаторы частот, цифровой вычислительный синтезатор, ЦВС, фазовая автоподстройка частоты, ФАПЧ, частотное планирование, фазовый шум, программный комплекс.

Введение

Гибридные синтезаторы частот (ГСЧ) на основе прямого цифрового метода синтеза (цифровые вычислительные синтезаторы – ЦВС) и косвенного метода синтеза (фазовая автоподстройка частоты – ФАПЧ) обеспечивают широкий диапазон выходных частот с малым шагом перестройки, а также хорошие спектральные характеристики [1-3]. Применение дискретных копий выходной частоты ЦВС – образцов основной частоты – в гибридных синтезаторах позволяет существенно снизить уровень фазовых шумов выходного сигнала [4, 5]. В работах [6-9] были разработаны и экспериментально подтверждены математические модели спектральной плотности мощности (СПМ) фазовых шумов, позволяющие провести моделирование шумовых характеристик ГСЧ для любых опорных и выходных частот.

В связи с тем, что для проведения частотного планирования и математического моделирования шумовых характеристик ГСЧ необходи-

мо провести определённое количество вычислений, актуальной является задача автоматизации расчётов с помощью специализированного программного обеспечения.

Целью данной работы является разработка алгоритмов частотного планирования гибридных синтезаторов частот и реализация на их основе программного средства для структурного проектирования гибридных синтезаторов частот, а также анализа их шумовых характеристик.

Алгоритм частотного планирования гибридных синтезаторов частот

Математический аппарат для расчёта частотного плана четырёх типов гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза (ГСЧ с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ; ГСЧ с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ; ГСЧ с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ; ГСЧ, использующего образцы основной частоты

ты ЦВС) разработан в [10]. Исходными данными для проведения частотного планирования являются:

- частота выходного сигнала ГСЧ $f_{ВЫХ}$ (либо диапазон выходных частот ГСЧ $f_{ВЫХmin} \dots f_{ВЫХmax}$);
- частота сравнения в фазовом дискриминаторе (ФД), f_{CP} ;
- частота входного (опорного) сигнала, формируемого генератором опорной частоты (ГОЧ), $f_{ГОЧ}$;

Кроме этого дополнительно необходимо учесть параметры микросхем, на основе которых предполагается реализация гибридного синтезатора:

- минимально и максимально допустимые частоты сравнения в фазовом дискриминаторе (ФД) микросхемы ФАПЧ f_{CPmin} и f_{CPmax} ;
- максимально допустимая тактовая частота ЦВС f_{Tmax} ;
- значение разрядности накопителя кода фазы $N_{НКФ}$ ЦВС.

Коэффициент передачи современных интегральных микросхем ЦВС ограничен значениями

$$K_{ЦВС} \in [K_{ЦВСmin}; K_{ЦВСmax}], \quad (1)$$

где $K_{ЦВСmin} = \frac{1}{2^{N_{НКФ}}}$; $K_{ЦВСmax} = 0,35 \dots 0,4$.

Для обеспечения хорошей фильтрации в ГСЧ, использующем образы основной частоты ЦВС, необходимо ограничить коэффициент передачи ЦВС

$$K_{ЦВСобр} \in [0,15; 0,35]. \quad (2)$$

Шаги изменения коэффициентов передачи ЦВС

$$\Delta K_{ЦВС} = \Delta K_{ЦВСобр} = \frac{1}{2^{N_{НКФ}}}. \quad (3)$$

Алгоритм частотного планирования гибридных синтезаторов частот имеет вид:

Шаг 1. Начало алгоритма. Ввод исходных данных.

Шаг 2. Подпрограмма расчёта коэффициентов деления ДЧ1.

Для ГСЧ с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ $K_{ЦВС} = f_{CP} / f_{ГОЧ}$.

Для ГСЧ с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ $N_{1OC} = f_{ГОЧ} / f_{CP}$ (коэффициенты деления ДЧ1 для ГСЧ с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ и ГСЧ, использующего образы основной частоты ЦВС, рассчитываются аналогично).

На следующем этапе необходимо рассчитать оставшиеся параметры гибридных синте-

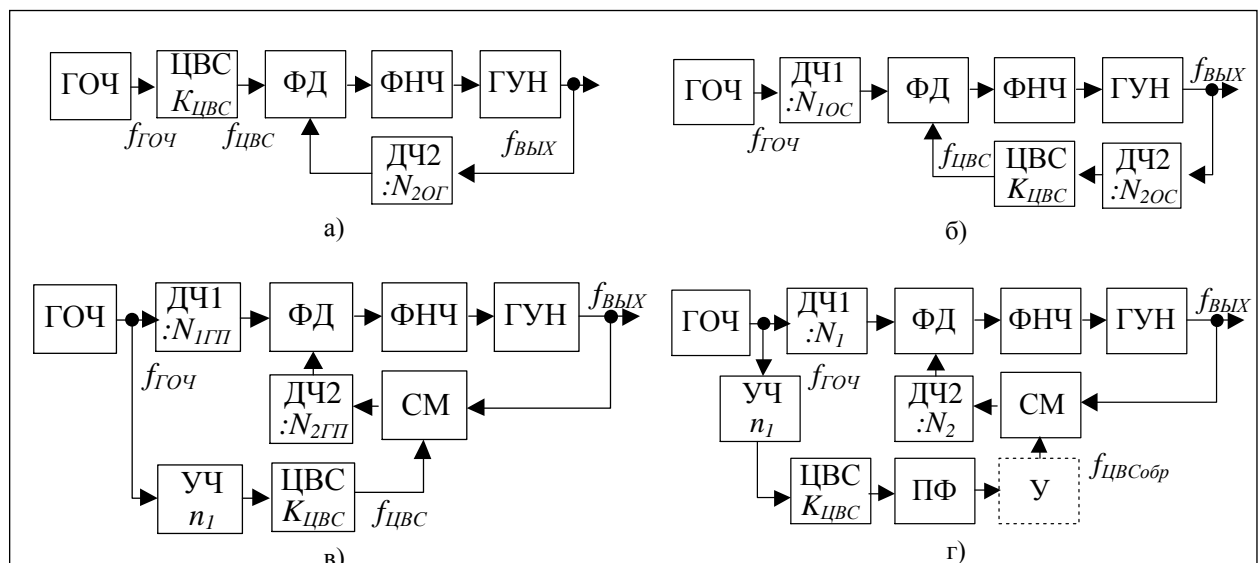


Рис. 1. Структурные схемы гибридных синтезаторов частот на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза (ГОЧ – генератор опорной частоты; ЦВС – цифровой вычислительный синтезатор с коэффициентом передачи $K_{ЦВС} = f_{ЦВС} / f_T$; ФД – фазовый дискриминатор; ГУН – генератор, управляемый напряжением; ДЧ1, ДЧ2, ДЧ3 – делители частоты; УЧ – умножитель частоты; СМ – смеситель; ПФ – полосовой фильтр; У – усилитель)

затворов (коэффициенты деления, умножения, коэффициенты передачи ЦВС и др.). Если нужно рассчитать параметры для формирования сигнала с одной частотой, выполняется шаг 3. Если нужно рассчитать параметры для формирования диапазона выходных частот, необходимо перейти к шагу 4.

Шаг 3. Подпрограмма расчёта параметров гибридных синтезаторов для формирования сигнала с одной частотой.

Для ГСЧ с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ коэффициент деления определяется как

$$N_{2OG} = \frac{f_{ВЫХ}}{f_{СР}}$$

Для ГСЧ с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ делитель ДЧ2 необходимо использовать в случае, когда $f_{Тmax} < f_{ВЫХ}$. Коэффициент передачи ЦВС определяется как

$$K_{ЦВС} = \frac{N_{2OC} f_{СР}}{f_{ВЫХ}}$$

Выходная частота ГСЧ с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ рассчитывается

$$f_{ГСЧП} = (N_{2ГП} f_{СР} + f_{ГОЧ} n_{1ГП} K_{ЦВС}). \quad (2)$$

Поскольку выходная частота зависит от нескольких параметров ($N_{2ГП}$, $n_{1ГП}$, $K_{ЦВС}$), необходимо подобрать те, при установке которых ГСЧ сформирует заданную частоту $f_{ВЫХ}$. Этого можно добиться используя циклы с последовательной подстановкой параметров $N_{2ГП}$, $n_{1ГП}$, $K_{ЦВС}$ в (2) и проверяя на каждой итерации $f_{ГСЧП} = f_{ВЫХ}$ (если «истинно», то набор параметров записывается в выходной массив значений параметров ГСЧ с ЦВС в качестве генератора подставки). Параметры изменяются

$$\begin{aligned} N_{2ГП} &= 1 \dots N_{2ГПmax}; \\ n_{1ГП} &= 1 \dots n_{1ГПmax}; \\ K_{ЦВС} &\in [K_{ЦВСmin}; K_{ЦВСmax}]. \end{aligned}$$

Максимально допустимые значения параметров:

$$N_{2ГПmax} = trunc\left(\frac{f_{ВЫХ} - f_{ГОЧ} K_{ЦВСmin}}{f_{СР}}\right);$$

$$n_{1ГПmax} = trunc\left(\frac{f_{Тmax}}{f_{ГОЧ}}\right);$$

где $trunc()$ – оператор, отбрасывающий дробную часть.

Выходная частота ГСЧ, использующего образы основной частоты ЦВС, рассчитывается

$$f_{ГСЧобр} = (N_2 f_{СР} + f_{ГОЧ} n_1 |n + K_{ЦВСобр}|), \quad (3)$$

где n – номер образа основной частоты ЦВС.

В данном случае выходная частота зависит от N_2 , n_1 , $K_{ЦВСобр}$, n . Таким образом, с помощью циклов должна быть организована последовательная подстановка параметров N_2 , n_1 , $K_{ЦВСобр}$ в (3), и на каждой итерации проведена проверка $f_{ГСЧП} = f_{ВЫХ}$ (если «истинно», то набор параметров записывается в выходной массив данных). Параметры изменяются

$$\begin{aligned} N_2 &= 1 \dots N_{2max}; \\ n_1 &= 1 \dots n_{1max}; \\ K_{ЦВСобр} &\in [K_{ЦВСобрmin}; K_{ЦВСобрmax}]; \\ n &= -n_{max}, \dots, -2, -1, 1, 2, \dots, n_{max}. \end{aligned}$$

Максимально допустимые значения параметров:

$$\begin{aligned} N_{2max} &= trunc\left(\frac{f_{ВЫХ} - f_{ГОЧ} K_{ЦВСобрmin}}{f_{СР}}\right); \\ n_{1max} &= trunc\left(\frac{f_{Тmax}}{f_{ГОЧ}}\right); \\ n_{max} &= 3. \end{aligned}$$

Шаг 4. Подпрограмма расчёта параметров гибридных синтезаторов для формирования диапазона выходных частот.

Для ГСЧ с ЦВС в качестве опорного генератора ФАПЧ перестройка частоты осуществляется за счёт изменения N_{2OG} и $K_{ЦВС}$. Диапазон перестройки современных ЦВС превышает диапазон частот сравнения ФД. Поэтому граничные частоты определяются:

$$\begin{cases} f_{ГСЧOGmin} = N_{2OGmin} f_{СРmin}; \\ f_{ГСЧOGmax} = N_{2OGmax} f_{СРmax}. \end{cases}$$

Таким образом, для определения N_{2OGmin} и N_{2OGmax} нужно последовательно изменять значения коэффициента деления ДЧ2 ($N_{2OG} = 1, 2, \dots$) до тех пор, пока не будет выполне-

ны условия:

$$\begin{cases} f_{ГСЧОГ\min} \leq f_{ВЫХ\min}; \\ f_{ГСЧОГ\max} \geq f_{ВЫХ\max}. \end{cases}$$

Для ГСЧ с ЦВС в цепи обратной связи ФАПЧ делитель ДЧ2 необходим только в тех случаях, когда $f_{ВЫХ\max} > f_T$. Граничные частоты диапазона перестройки определяются

$$\begin{cases} f_{ГСЧОС\min} = \frac{N_{2ОС}}{K_{ЦВС\max}} f_{СР\min}; \\ f_{ГСЧОС\max} = \frac{N_{2ОС}}{K_{ЦВС\min}} f_{СР\max}. \end{cases}$$

Таким образом, для определения требуемых коэффициентов передачи ЦВС необходимо последовательно изменять $K_{ЦВС}$ в диапазоне (1) с шагом (3) до тех пор, пока не выполнится условие

$$\begin{cases} f_{ГСЧОС\min} \leq f_{ВЫХ\min}; \\ f_{ГСЧОС\max} \geq f_{ВЫХ\max}. \end{cases}$$

Для ГСЧ с ЦВС в качестве генератора подставки ФАПЧ граничные частоты диапазона перестройки определяются

$$\begin{cases} f_{ГСЧПП\min} = f_{ГОЧ} \left(\frac{N_{2ГП}}{N_{1ГП}} + \frac{n_{1ГП}}{2^{N_{НКФ}}} \right); \\ f_{ГСЧПП\max} = f_{ГОЧ} \left(\frac{N_{2ГП}}{N_{1ГП}} + n_{1ГП} K_{ЦВС\max} \right). \end{cases}$$

Для ГСЧ, использующего образы основной частоты ЦВС, выходная частота будет изменяться за счёт изменения $K_{ЦВС}$:

– при положительных номерах образов ($n > 0$)

$$\begin{cases} f_{ГСЧобр\min} = f_{ГОЧ} \left[\frac{N_2}{N_1} + n_1 \cdot (n + K_{ЦВСобр\min}) \right]; \\ f_{ГСЧобр\max} = f_{ГОЧ} \left[\frac{N_2}{N_1} + n_1 \cdot (n + K_{ЦВСобр\max}) \right]. \end{cases}$$

– при отрицательных номерах образов ($n < 0$)

$$\begin{cases} f_{ГСЧ\min} = f_{ГОЧ} \left[\frac{N_2}{N_1} + n_1 \cdot (n + K_{ЦВСобр\max}) \right]; \\ f_{ГСЧ\max} = f_{ГОЧ} \left[\frac{N_2}{N_1} + n_1 \cdot (n + K_{ЦВСобр\min}) \right]. \end{cases}$$

То есть, для выполнения условия

$$\begin{cases} f_{ГСЧПП\min} \leq f_{ВЫХ\min}; \\ f_{ГСЧПП\max} \geq f_{ВЫХ\max}. \end{cases}$$

необходимо изменять не только $N_{2ГП} = 1, 2, \dots$... $N_{2ГП\max}$, но и $n_{1ГП} = 1, 2, 3, \dots$ $n_{1ГП\max}$, а для выполнения условия

$$\begin{cases} f_{ГСЧобр\min} \leq f_{ВЫХ\min}; \\ f_{ГСЧобр\max} \geq f_{ВЫХ\max}. \end{cases}$$

необходимо изменять коэффициент деления $N_2 = 1, 2, \dots$ $N_{2\max}$; коэффициент умножения $n_1 = 1, 2, \dots$ $n_{1\max}$; номер образа $n = \dots -3, -2, -1, 1, 2, 3, \dots$

Конец алгоритма.

В результате выполнения алгоритма получаются наборы значений коэффициентов деления и умножения, коэффициентов передачи ЦВС (а также номеров образов для ГСЧ, использующего образы основной частоты ЦВС), при установке которых гибридные синтезаторы сформируют сигнал с заданной выходной частотой, либо с диапазоном выходных частот.

Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот

Математические модели шумовых характеристик ГСЧ [6-9] позволяют рассчитать уровень СПМ фазовых шумов для любых значений опорной и выходной частоты.

К особенностям частотного планирования ГСЧ на основе прямого цифрового и косвенного методов синтеза относится то, что уровень СПМ фазовых шумов ГСЧ зависит от комбинаций параметров гибридных синтезаторов (значений коэффициентов деления и умножения входящих в структуру ГСЧ делителей и умножителей частот, коэффициентов передачи ЦВС). Поэтому для обеспечения наименьшего уровня СПМ фазовых шумов выходного сигнала необходимо выбрать определённые значения коэффициентов деления и умножения.

Алгоритм подбора параметров ГСЧ, обеспечивающих наименьший уровень фазовых шумов выходного сигнала, заключается в том, что при подстановке исходных значений опорных и выходных частот, а также значений частоты отстройки, математические модели шумовых характеристик сводятся к функциям, зависящим только от параметров гибридных

синтезаторов. Таким образом, необходимо организовать последовательную подстановку всех получившихся по алгоритму частотного планирования значений параметров ГСЧ, сравнить полученные значения и выбрать те параметры, которые обеспечивают наименьший уровень СПМ фазовых шумов.

Алгоритм имеет следующий вид:

Шаг 1. Ввод наборов параметров каждого ГСЧ, обеспечивающих формирование заданной выходной частоты.

Шаг 2. Подпрограмма расчёта значений СПМ фазовых шумов для каждого ГСЧ на заданных отстройках ($F_1, F_2, F_3 \dots F_j$) от несущей. На данном этапе наборы параметров поочередно подставляются в соответствующие математические модели шумовых характеристик, и рассчитываются значения СПМ фазовых шумов для заданных значений отстроек от несущей ($F_1, F_2, \dots F_j$).

Шаг 3. Подпрограмма выбора наименьших значений уровня фазовых шумов для каждого значения частоты отстройки.

Шаг 4. Подпрограмма выбора комбинаций параметров. На данном этапе необходимо ре-

шить, какой набор параметров обеспечивает наименьший уровень фазовых шумов, то есть из оставшихся столбцов выбрать один по определённому критерию. Данный критерий зависит от области применения гибридного синтезатора. Для одних применений критичным является уровень фазовых шумов на ближних отстройках, для других – на дальних. Поэтому выбор критерия на данном этапе определяется пользователем.

Реализация программного комплекса

Структурная схема программного комплекса представлена на рис. 2. Программный комплекс состоит из следующих программ:

- программа частотного планирования ГСЧ;
- программа расчёта петлевых ФНЧ;
- программа моделирования СПМ фазовых шумов ГСЧ;
- программа подбора параметров ГСЧ, обеспечивающих наименьший уровень фазовых шумов.

Кроме указанных программ в состав комплекса входит база данных параметров современных интегральных микросхем ФАПЧ и ЦВС

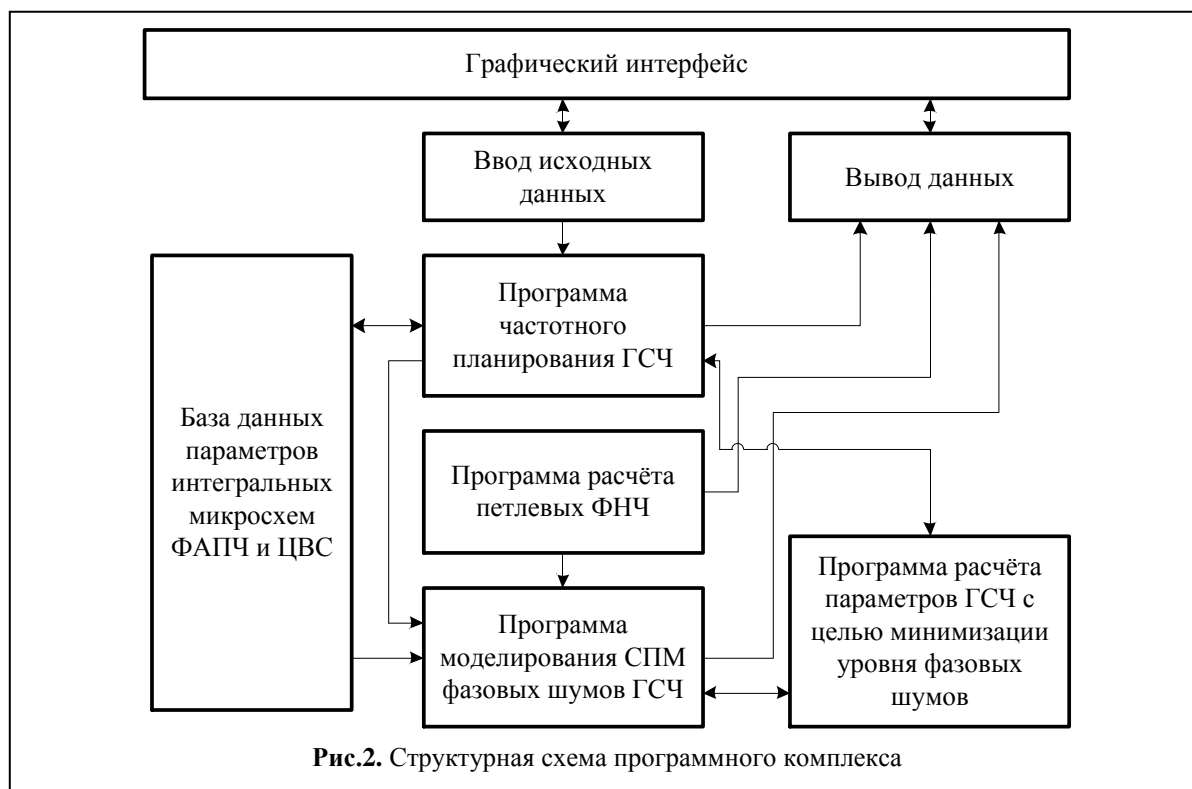


Рис.2. Структурная схема программного комплекса

и математических моделей их шумовых характеристик, в которую можно вносить новые данные. Графический интерфейс, представленный на рис. 3, обеспечивает связь между пользователем и программным комплексом. Окно графического интерфейса содержит:

- 1 – область ввода исходных данных;
- 2 – инструменты выбора интегральных микросхем ЦВС, ФАПЧ и типа петлевого ФНЧ;
- 3 – окно ввода значения выходной частоты для моделирования шумовых характеристик;
- 4 – инструменты выбора ГСЧ для просмотра схемы или вкладов звеньев в результирующий уровень СПМ фазовых шумов;
- 5 – окно вывода структурной схемы выбранного ГСЧ;
- 6 – поле вывода параметров выбранного ГСЧ;
- 7 – окно вывода результатов математического моделирования шумовых характеристик ГСЧ для сравнения или исследования вкладов звеньев в результирующий уровень СПМ фазовых шумов выбранного ГСЧ.

Программный комплекс поддерживает расчёт шумовых характеристик для нескольких типов

петлевых ФНЧ: пропорционально-интегрирующие фильтры первого, второго и третьего порядков и другие. При выборе типа фильтра в рабочую память программы расчёта петлевых ФНЧ загружается значение частоты сравнения, а также формулы расчёта номиналов элементов и передаточной функции.

На рис.4 представлены полученные с помощью программного комплекса результаты сравнения СПМ фазовых шумов гибридных синтезаторов частот, построенных на интегральных микросхемах ADF4113 (ФАПЧ с целочисленными делителями частоты) и AD9914 (ЦВС), при использовании в качестве петлевого ФНЧ пропорционально-интегрирующего фильтра 2 порядка (а) и пропорционально-интегрирующего фильтра 3 порядка (б). Значения частот для моделирования: $f_{ГОЧ} = 100$ МГц, $f_{СР} = 10$ МГц, $f_{ВЫХ} = 1000$ МГц.

На рис. 5 представлены полученные с помощью программного комплекса результаты сравнения СПМ фазовых шумов гибридных синтезаторов частот, построенных на интегральных микросхемах ADF4118 (ФАПЧ с целочисленными

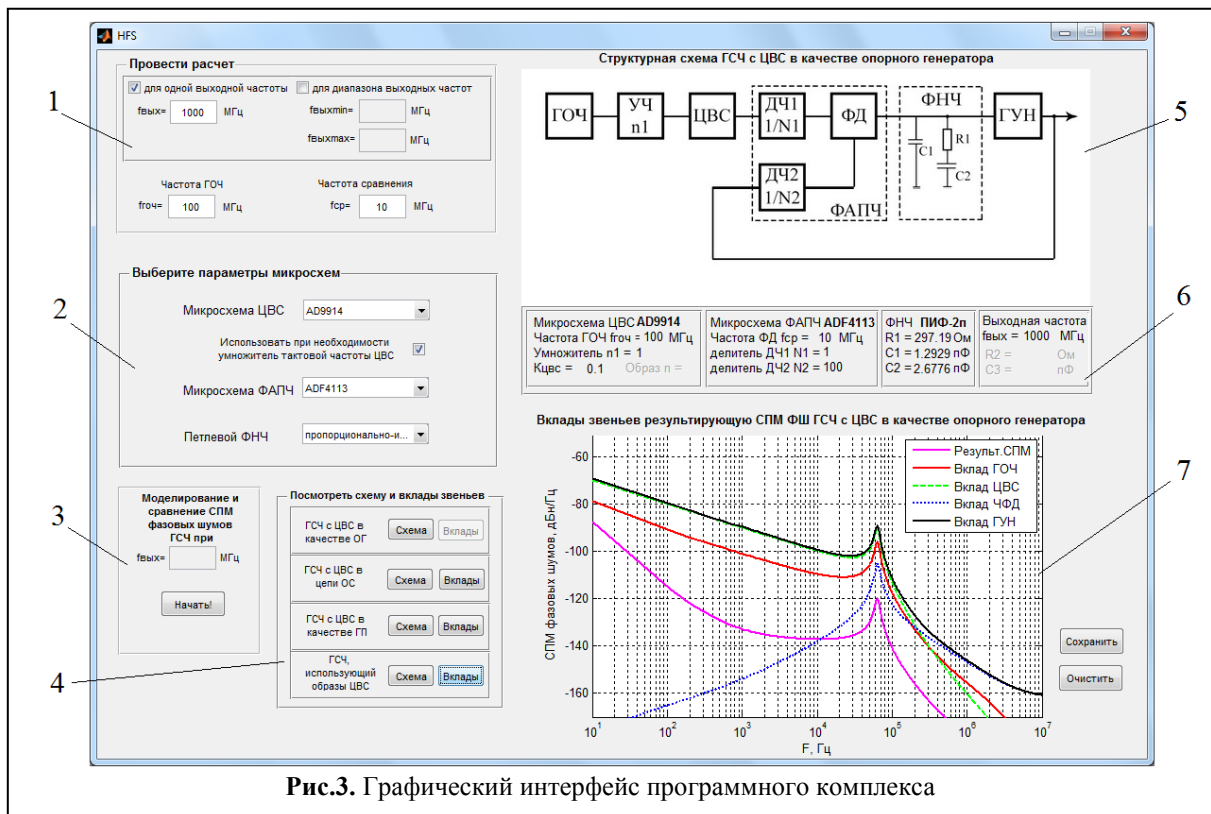
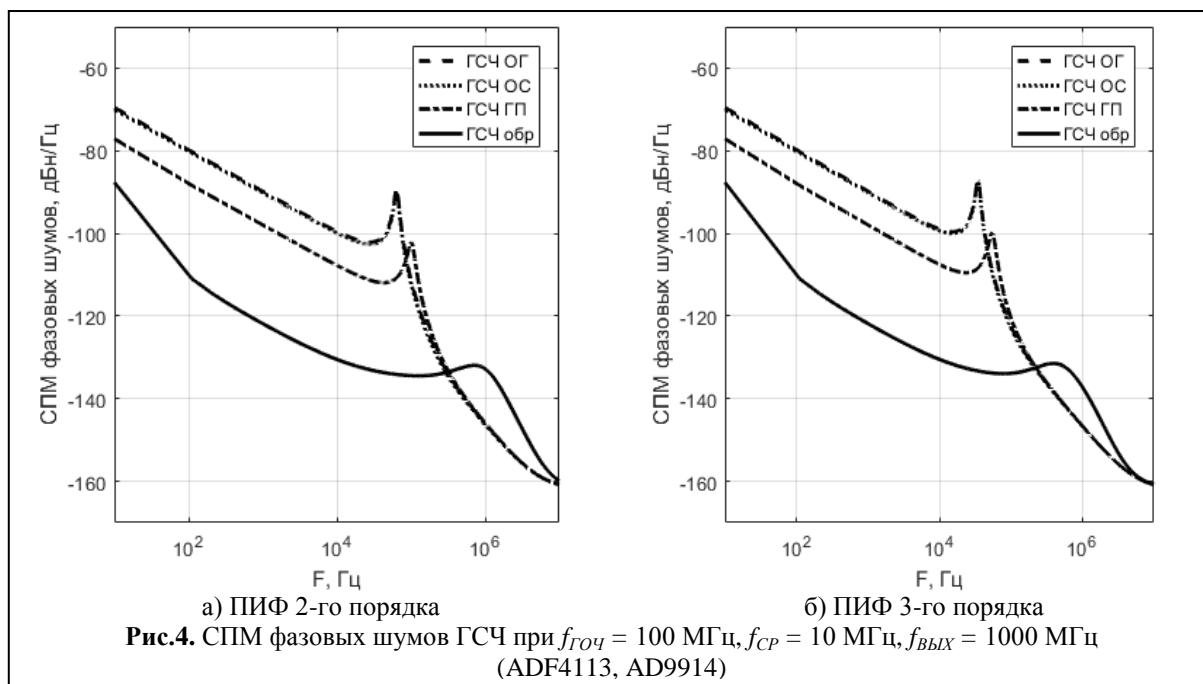


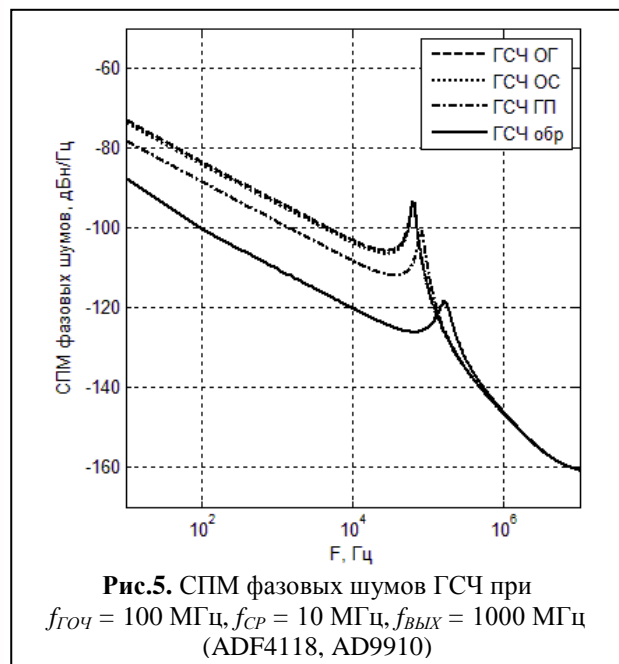
Рис.3. Графический интерфейс программного комплекса



ми делителями частоты) и AD9910 (ЦВС), при использовании в качестве петлевого ФНЧ пропорционально-интегрирующего фильтра 2-го порядка.

Заключение

1. Разработанные алгоритмы позволяют провести частотное планирование гибридных синтезаторов частот для формирования сигнала с одной частотой и диапазона выходных частот.



2. На основе математических моделей шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот разработан алгоритм подбора параметров гибридных синтезаторов частот, обеспечивающих наименьший уровень шумовых характеристик выходного сигнала.

3. Алгоритмы использованы при реализации программного комплекса, позволяющего провести структурное проектирование гибридных синтезаторов частот на современных интегральных микросхемах, а также моделирование и исследование их шумовых характеристик.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00299 мол_а.

Литература

1. Ридико Л.И. DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. 2001. №8. – С. 50-56.
2. Synthesizer products data book data subject to change without notice for customer service or technical assistance / QUALCOMM Incorporated. San Diego, 1997. – 174 p.
3. Ченакин А. Частотный синтез: текущие решения и новые тенденции // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2008. №1. – С. 92-97.
4. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Якименко К.А. Применение образов основной частоты ЦВС в гибридных синтезаторах частот // Радиотехнические и телекоммуникационные сис-

темы. 2013. №3. – С. 19-24.

5. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The use of images of DDS in the hybrid frequency synthesizers // CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. Russia, Crimea, Sevastopol : September 7-13, 2014. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959404. – С. 302-303.

6. Romashov V.V., Yakimenko K.A. Modelling and comparing of phase noise curves of hybrid synthesizers // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015. Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21-23, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147198. – С. 714 -719.

7. 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. №1. – С. 18-24.

8. Ромашов В.В., Ромашова Л.В., Храмов К.К., Докторов А.Н., Якименко К.А. Моделирование шумовых характеристик гибридных синтезаторов частот // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. №1. – С. 5-20.

9. 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.

10. 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.

Поступила 15 декабря 2017 г.

English

The software package for designing hybrid frequency synthesizers and their noise properties simulation

Vladimir Viktorovich Romashov – Doctor of Engineering, Professor, Department Head of Radio Engineering, Murom Institute (branch) Federal state budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs”.

E-mail: romashovmurom@mail.ru.

Kirill Aleksandrovich Yakimenko – Post-graduate student, Murom Institute (branch) Federal state budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs”.

E-mail: yakimenko.kirill@yandex.ru.

Address: 602264, Murom, Vladimir Region, Orlovskaya St., 23.

Abstract: Hybrid frequency synthesizers based on direct digital and indirect synthesis methods are widely used as harmonic signal generators in today’s radio systems due to its advantages (broad band output frequencies, a low pitch for frequency tuning, good spectral and noise properties). In this regard, the automation task of frequency planning and structural designing hybrid frequency synthesizers, as well as simulation and analysis of their noise properties is essential nowadays. This article presents the developed frequency planning algorithm of the hybrid synthesizers that enables the reference and output frequencies-based calculation of the division and multiplication factors of the frequency dividers and multipliers that are within the structure of the hybrid synthesizers. This algorithm-based software package was elaborated comprising the following programs: the frequency planning program; the loop low frequency filter calculation program; the noise properties simulation program; the parameters optimization program for hybrid synthesizers to minimize the phase noise level. Besides, the software package includes the parameters and mathematical models’ database of modern integrated circuit noise properties (on the basis of which the hybrid synthesizers construction is planned). Any new data can be added to the database. The software package will perform the frequency planning of hybrid frequency synthesizers; will build schematic diagrams; will calculate loop low frequency filter parameters; will carry out the mathematical modeling and comparison of noise properties based on the entered values of reference and output frequencies. The synthesizer parameters optimization program will select the optimal values of the division and multiplication factors, in which hybrid synthesizers ensure the lowest level of the output signal phase noise. The user can conduct the research of the hybrid synthesizers contributing to the resulting phase noise levels when using this software package.

Key words: hybrid frequency synthesizers, digital computational synthesizer, DCS, phase-locked loop, PLL, frequency planning, phase noise, software package.

The reported study was funded by RFBR according to the research project №16-37-00299

References

1. Ridiko L. I. DDS: direct digital frequency synthesis / *Komponenty i tekhnologii*. 2001. No. 8. Pp. 50-56.
2. Synthesizer products data book data subject to change without notice for customer service or technical assistance / QUALCOMM Incorporated. San Diego: 1997. 174 p.
3. Chenakin A. Frequency synthesis: current solutions and new trends / *ELEKTRONIKA: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*. 2008. -No. 1. P. 92-97.
4. Romashov V. V., Romashova L. V., Khramov K. K., Yakimenko K. A. Application of DDS fundamental frequency images in the hybrid frequency synthesizers // *Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy*. 2013. No. 3. P. 19-24.
5. Romashov V.V., Romashova L.V., Khramov K.K., Yakimenko K.A. The use of images of DDS in the hybrid frequency synthesizers // *CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings*. Russia, Crimea, Sevastopol : September 7-13, 2014. DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959404. C. 302-303.
6. Romashov V.V., Yakimenko K.A. Modelling and comparing of phase noise curves of hybrid synthesizers // *2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015*. Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21-23, 2015. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147198. Pp. 714–719.
7. Romashov V.V., Romashova L.V., Yakimenko K.A. Research of noise performances of hybrid frequency synthesizer based on direct digital synthesizer and dual loop PLL // *Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii*. 2014. No. 1. P. 18-24.
8. Romashov V. V., Romashova L. V., Khramov K. K., Doktorov A. N., Yakimenko K. A. Noise properties simulation in hybrid frequency synthesizers // *Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy*. 2014. No. 1. Pp. 5-20.
9. Romashov V. V., Yakimenko K. A., Doktorov A. N., Romashova L. V. The noise properties experimental research of hybrid frequency synthesizers based on direct digital and indirect synthesis methods / *Bulletin of the Volgograd State University of Technology*. Iss: "Radiotekhnicheskiye i infokommunikatsionnye sistemy". 2017. No. 1. Pp. 6-17.
10. Romashov V. V., Yakimenko K. A. Mathematical tools development for hybrid frequency synthesizers frequency planning / *Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv*. 2016. No. 3. P.3-9.