

М.П. Кандирін

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПРОЕКТУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ СИНТЕЗАТОРІВ НВЧ СИГНАЛІВ НА ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМАХ

Розглянуті варіанти практичного проектування комбінованих синтезаторів на інтегральних мікросхемах. Отримані вирази для моделі СЦП фазових шумів комбінованих синтезаторів на основі системи ФАПЧ з ЦСС в ланцюзі зворотного зв'язку. Приведені результати моделювання шумових характеристик таких синтезаторів для ряду вихідних сигналів.

Ключові слова: комбінований синтезатор, ФАПЧ, шумові характеристики.

Вступ

Постановка проблеми і аналіз публікацій.

Для формування прецизійних сигналів в сучасних радіоелектронних системах застосовуються високостабільні синтезатори частот. Останнім часом, зважаючи на свої достоїнства, велике поширення отримали цифрові обчислювальні синтезатори, що використовують метод прямого цифрового синтезу.

Саме метод прямого цифрового синтезу сигналів отримав широке поширення, і саме за ним закріпилася назва "Прямого цифрового синтезу", тобто DDS.

На практиці дуже часто використовується і інший тип синтезаторів – синтезатори непрямого синтезу. Такі синтезатори містять у своєму складі підлаштовуваний по частоті автогенератор, охопленний петлею фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ або PLL).

Синтезатори з DDS і ФАПЧ є на сьогодні основними типами синтезаторів сигналів, що випускаються для застосування в телекомунікаційній і приймально-передавальній апаратурі.

Синтезатори з непрямим синтезом (на основі петлі ФАПЧ) незамінні в НВЧ-генераторах, гетеродинах високочутливих приймачів і передавачів, до яких пред'являються жорсткі вимоги по чистоті спектрів сигналу, а також в апаратурі з батарейним живленням. У інших сферах застосування прямі цифрові синтезатори складають серйозну конкуренцію ФАПЧ-синтезаторам.

Поліпшити якість формованих сигналів дозволяють комбіновані синтезатори, ґрунтовані на комбінації декількох основних методів синтезу сигналів (наприклад, прямого аналогового, непрямого і прямого цифрового методів).

Окрім рівнів бічних і паразитних спектральних складових в спектрі формувальних сигналів, важливим параметром синтезаторів є шумові характе-

ристики, оцінювані спектральною щільністю потужності (СЦП) фазових шумів (ФШ) [1–3].

Як правило, на синтезатори і інші його компоненти в інтегральному виконанні фірма виготівник в документації на них приводить шумові характеристики для ряду окремо взятих вихідних частот.

При оцінці рівня СЦП фазових шумів на інших частотах доводиться користуватися усередненими математичними моделями, які при розрахунках дають велику погрішність.

У ряді робіт [1–7] були розроблені і досліджені математичні моделі СЦП фазових шумів для різних варіантів комбінованих синтезаторів, проте вони найчастіше мають теоретичну спрямованість, чим практичну.

Тому в цій роботі постараємося виправити цей пропуск, показавши усі етапи практичного проектування від складання структурної схеми комбінованих синтезаторів, вибору елементної бази, розробки математичної моделі СЦП фазових шумів і аналіз з її допомогою шумових характеристик проєктованих синтезаторів для довільних вихідних частот.

На практиці існує велика кількість варіантів схем комбінованих синтезаторів що реалізуються з використанням інтегральних схем (кількість їх варіюється від цілей, завдань і діапазону формованих частот), ми ж зупинимось на одній з них, що реалізується на основі системи ФАПЧ з ЦСС в зворотному зв'язку.

Мета статті. Показати на конкретному прикладі практичне проектування комбінованих синтезаторів НВЧ сигналів на інтегральних мікросхемах з розробкою математичної моделі СЦП фазових шумів для аналізу їх шумових характеристик.

Виклад основного матеріалу

Оскільки варіант схеми комбінованого синтезатора нами заздалегідь визначений, то залишається визначити діапазон вихідних частот.

Для наочності процесу проектування виберемо два діапазони формованих частот, а саме:

- перший діапазон 1,7–1,8 ГГц;
- другий діапазон 7,2–8,2 ГГц.

Це зроблено нами навмисно, оскільки для формування цих діапазонів частот первинна схема трохи видозмінюватиметься.

Структурна схема комбінованого синтезатора, для формування вихідних частот першого діапазону приведена на рис. 1.

Як бачимо, в цій схемі ЦСС знаходиться в ланцюзі зворотного зв'язку петлі ФАПЧ і є дільником зі змінним коефіцієнтом ділення частоти ГУН. Така схема дозволяє забезпечити широку смугу вихідних частот при їх малому дозволі, низький рівень фазового шуму і малий рівень паразитних спектральних складових.

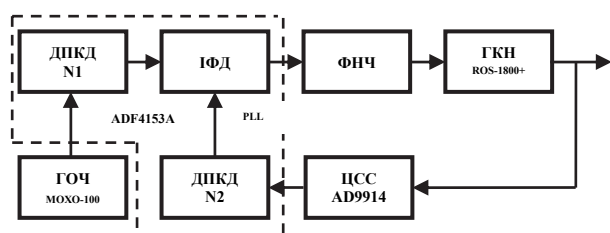


Рис. 1. Структурна схема комбінованого синтезатора для діапазону вихідних частот 1,7–1,8 ГГц

Наступним важливим етапом при проектуванні є процес вибору елементної бази з доступної на сьогодні номенклатури. Передусім, в цій схемі вихідна частота ГКН є тактовою частотою для ЦСС. Звідси витікатиме, що ЦСС необхідно вибирати з робочою тактовою частотою не менше 1,8–2,0 ГГц. Серед тих, що серійно випускаються фірмою Analog Devices, такими ЦСС являються AD9915 і AD9914 з тактовими частотами 2,5 ГГц і 3,5 ГГц відповідно, при 12 розрядних ЦАП.

Оскільки ТТХ цих синтезаторів, за винятком тактової частоти, ідентичні, то для подальшого проектування зупинимо свій вибір на останній розробці фірми, синтезаторі AD9914 з тактовою частотою 3,5 ГГц.

В якості генератора опорної частоти для схеми рис. 1 використовуватимемо один з двох малощумливих кварцових генератора типу "МОХО-100" або модель FE-102A виробництва Frequency Electronics, працюючих на частоті 100 МГц і що мають малі рівні фазових шумів. Експериментальна шумова характеристика генератора МОХО-100 зображена на рис. 2, а.

Для розробки математичної моделі СЦП фазових шумів схеми рис. 1 необхідно апроксимувати експериментальні залежності елементів схеми усередненими моделями СЦП фазових шумів з невеликою корекцією коефіцієнтів.

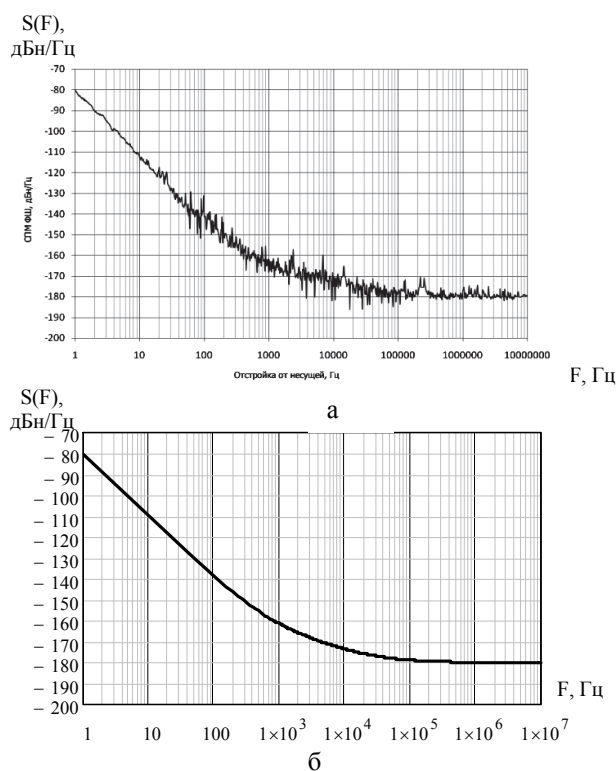


Рис. 2. Експериментальна (а) і апроксимована (б) залежності СЦП фазових шумів ГОЧ МОХО-100

Шумові характеристики скоректованої моделі ГОЧ з [3] приведена на рис. 2, б, а вираз для СЦП фазових шумів виглядатиме таким чином

$$S_{\text{ГОЧ}}(F) = \frac{10^{-8.0}}{F^3} + \frac{10^{-10.5}}{F^2} + \frac{10^{-13.5}}{F} + 10^{-18.0} \quad (1)$$

В якості ГКН використовуємо мікросхему (ROS-1800+) [8] з вихідною частотою 1,7–1,82 ГГц, експериментальні шумові характеристики якого приведені на рис. 3, а. Апроксимація цієї характеристики з усередненої моделі ГКН з [1] приведена на рис. 3, б.

Скоректоване вираження моделі СЦП ФШ ГКН прийме наступний вид

$$S_{\text{ГКН}}(F) = \frac{10^{-12.7}}{F^3} \cdot \frac{f_{\text{ГКН}}^2}{Q^2} + \frac{10^{-16.4}}{F^2} \cdot \frac{f_{\text{ГКН}}^2}{Q^2} + \frac{10^{-13.0}}{F} + 10^{-16.2} \quad (2)$$

де Q – добротність котушки коливального контуру, при апроксимації приймалася рівною 200; $f_{\text{ГКН}}$ – частота ГКН.

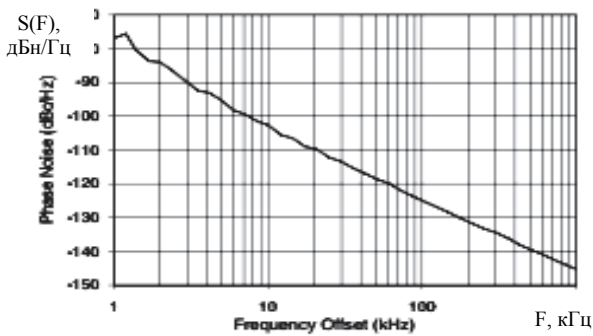
Порівняння розрахункових і експериментальних СЦП фазових шумів показує їх хороший збіг.

Подібні процедури апроксимації зробимо і з моделями фазового детектора і дільниками частоти.

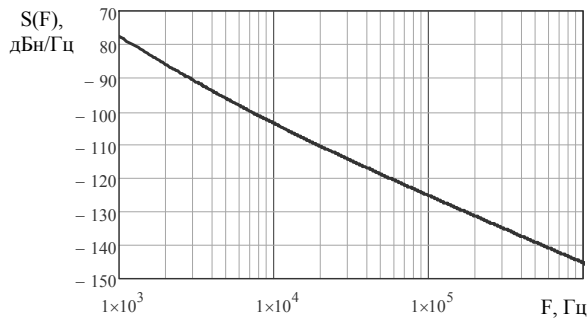
Експериментальна і апроксимуюча шумові характеристики для фазового детектора з корекцією коефіцієнтів приведені у виразі (3) і на рис. 4.

$$S_{\Phi Д}(F) = \frac{10^{-14} + 10^{-28} f_{cp}^2}{F} + 10^{-15.2} + 10^{-23} f_{cp}, \quad (3)$$

де f_{cp} – частота порівняння фазового детектора ФАПЧ.



а



б

Рис. 3. Експериментальні (а) і апроксимуючі залежності СЦП фазових шумів ГКН Ros-1800+

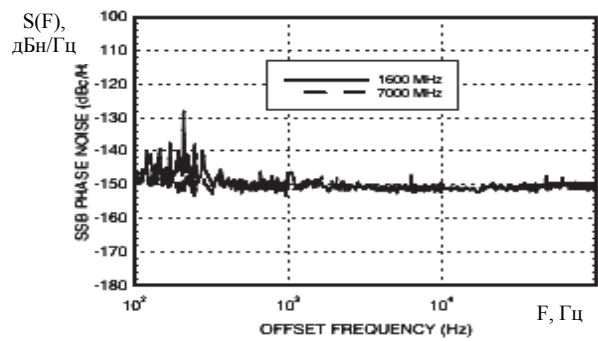
Моделями СЦП фазових шумів дільників частоти скористаємося з [3] які представлені наступним виразом

$$S_{Д}(F) = \frac{10^{-15.15} + 10^{-32} \cdot f_{д}^2}{F} + 10^{-16.8} + 10^{-24} \cdot f_{д}, \quad (4)$$

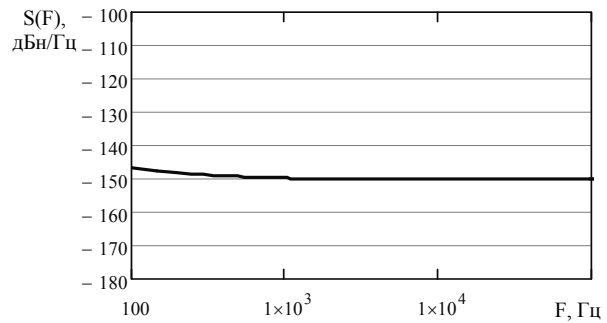
де $f_{д}$ – частота на виході дільника частоти.

Потрібно відзначити, що і в цьому випадку збіг експериментальних і розрахункових шумових характеристик дуже хороший.

Сигнал в діапазоні 1,7–1,8 ГГц формується за допомогою ГКН, частота якого контролюється схемою ФАПЧ, виконаною на інтегральній схемі ADF4153A [9], яка працює з сигналами в смузі частот до 4 ГГц. У своєму складі вона має малешумливий цифровий фазочастотний детектор (з максимальною частотою порівняння 32 МГц), прецизійну схему накачування заряду, дільник з дробовим коефіцієнтом ділення N_2 на основі сигма-дельта модулятора і програмований дільник опорної частоти N_1 .



а



б

Рис. 4. Експериментальна (а) і апроксимуюча (б) залежності СЦП фазових шумів ФД ADF4153A

Експериментальна СЦП фазових шумів мікросхеми ФАПЧ ADF4153A для вихідної частоти 1720,2 МГц приведена на рис. 5, а.

Для моделювання шумових характеристик системи ФАПЧ на мікросхемі ADF4153A скористаємося моделлю СЦП фазових шумів системи ФАПЧ з [3; 4; 6; 10].

$$S_{\Phi АПЧ}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_1^2} + S_{ДПКД1}(F) + S_{ДПКД2}(F) + \frac{S_{\Phi Д}(F) + S_{\Phi НЧ}}{E_{\Phi Д}^2} \right] \cdot N_2^2 \cdot |H_{31}(p)|^2 + S_{ГКН}(F) \cdot |H_{32}(p)|^2, \quad (5)$$

де

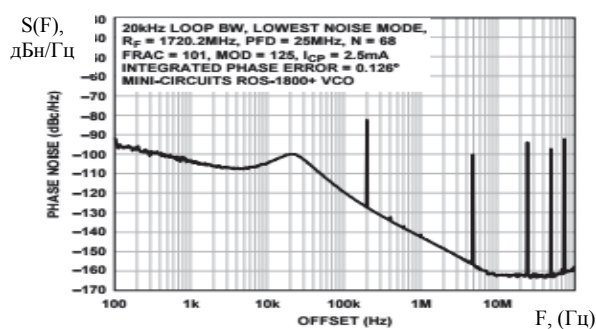
$$H_{31}(p) = \left[\frac{H(p)}{1 + H(p)} \right] \text{ та } H_{32}(p) = \left[\frac{1}{1 + H(p)} \right] - (6)$$

передавальні функції ФАПЧ по зовнішніх і внутрішніх шумах відповідно; $H(p) = \left[\frac{K_0 \cdot F_{\Phi НЧ}(p)}{p + N_2} \right]$ –

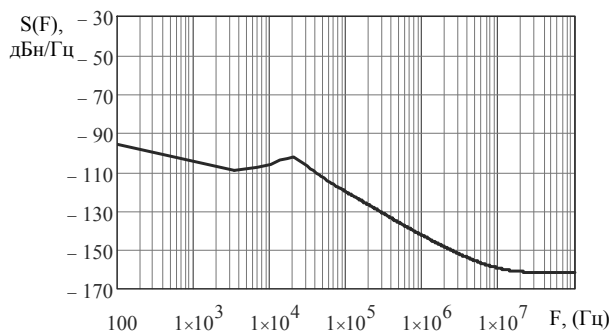
передавальна функція розімкненого кільця ФАПЧ; K_0 – коефіцієнт посилення розімкненої системи.

При використанні пропорційно-інтегруючого фільтру другого порядку передавальна функція знаходиться з виразу [11]:

$$F_{\Phi НЧ}(p) = \left[\frac{p \cdot T_{\Phi НЧ1} + 1}{p \cdot (p \cdot T_{\Phi НЧ2} + 1)} \right] \cdot \frac{1}{C1 = C2}, \quad (7)$$



а



б

Рис. 5. Експериментальна (а) і розрахована (б) залежності СЦП фазових шумів мікросхеми ADF4153A при вихідній частоті ГКН рівній 1720,2 МГц

де постійні часу $T_{ФНЧ1} = R1 \cdot C1$ і $T_{ФНЧ2} = R1 + C1/C1 + C2$.

У виразі (5) $S_{ГОЧ}(F)$, $S_{ГКН}(F)$, $S_{ДПКД1}(F)$, $S_{ДПКД2}(F)$, $S_{ИФД}(F)$ – моделі СПМ фазових шумів відповідних ланок.

Результат моделювання шумових характеристик системи ФАПЧ на мікросхемі ADF4153A по виразу (5) з використанням скоректованих моделей (1–4) для вихідної частоти 1720 МГц представлений на рис. 5, б.

Аналіз шумових залежностей рис. 5 показує хороший їх збіг, що говорить про правильний вибір і адаптацію моделей СПМ фазових шумів основних функціональних ланок.

Вживання ЦСС в зворотному зв'язку ФАПЧ дозволяє отримати довільний коефіцієнт ділення частоти, а відповідно і отримати скільки завгодно малий крок зміни частоти властивий лише прямому цифровому синтезу.

Моделлю для СЦП фазових шумів ЦСС скористаємося з [12; 13]:

$$S_{ЦСС}(F) = \left(\frac{10^{k2}}{F^2} + \frac{10^{k1}}{F^1} + 10^{k4} \right) K_{ЦСС}^2 + 10^{k3} + 2^{-2N-0.59} \left(\frac{f_{ВИХ}}{f_T^2} \right), \quad (8)$$

де коефіцієнти $k1, k2, k3, k4$ визначають рівень відповідних фазових шумів і визначаються для кожної мікросхеми окремо по методиці [14]; $f_{ВИХ}$, f_T – вихідна і тактова частоти ЦСС; $K_{ЦСС} = f_{ВИХ}/f_T$ – коефіцієнт ділення ЦСС; N – кількість розрядів ЦАП. Шумові характеристики ЦСС AD9914 приведені на рис. 6.

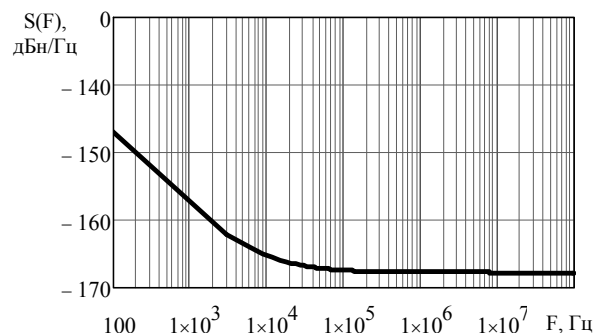


Рис. 6. Розрахункові СЦП фазових шумів AD9914 для вихідної частоти 25 МГц при тактовій частоті 1750 МГц

Для моделі СЦП фазових шумів ЦСС AD9914 [15] розраховані коефіцієнти по [14] складають $k1=-9,2, k2=-8,4, k3=-16,8, k4=-14,5$.

Наявність математичних моделей СЦП фазових шумів всіх складових елементів схеми рис. 1 дозволяє нам записати загальний вираз для СЦП фазових шумів комбінованого синтезатора у вигляді

$$S_{ФАПЧ_ЦСС}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_1^2} + S_{ДФКД1}(F) + S_{ДФКД2}(F) + \left(\frac{S_{ЦСС}(F)}{N_2^2} + \frac{S_{ФД}(F) + S_{ФНЧ}(F)}{E_{ФД}^2} \right) \right] \cdot N_{21}^2 \times \times |H_{31}(p)|^2 + S_{ГКН}(F) \cdot |H_{32}(p)|^2. \quad (9)$$

У цьому виразі $N_{21} = K_{ЦСС}/N_2$ – результуючий коефіцієнт ділення в петлі ФАПЧ, а передавальна функція розімкненої системи ФАПЧ дорівнює

$$H(p) = \left[\frac{K_0 \cdot F_{ФНЧ}(p)}{p \cdot N_{21}} \right].$$

Вживання цієї моделі СЦП фазових шумів комбінованого синтезатора дозволить провести аналіз його шумових характеристик при будь-яких робочих частотах вживаних мікросхем.

На рис. 7 приведені розрахункові шумові характеристики по (9) для комбінованого синтезатора (рис. 1) і вклад шумів кожного складового елементу схеми в загальний результуючий шум.

Результати аналізу залежностей на рис. 7 показують, що фазові шуми ЦСС в ланцюзі зворотного

зв'язку системи ФАПЧ і ГОЧ мало впливають на результуючий рівень фазових шумів комбінованого синтезатора. Основний вклад в результуючі фазові шуми в смузі пропускання вносить фазовий детектор, а за смугою пропускання збільшуються шуми ГКН.

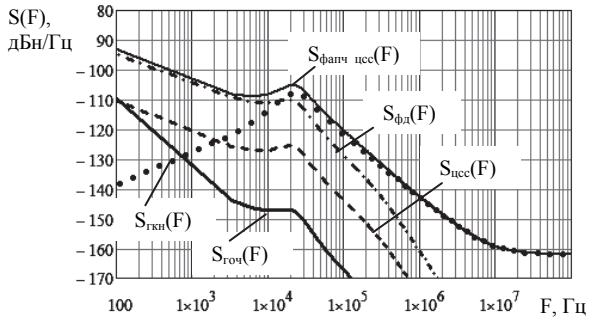


Рис. 7. Залежність СЦП фазових шумів ФАПЧ ADF4153A з ЦСС в ланцюзі зворотного зв'язку при вихідній частоті ГКН рівною 1720 МГц і вкладу шумів ФД, ГКН, ГОЧ і ЦСС в загальний шум

Шумові залежності на рис. 8 вихідного сигналу комбінованого синтезатора, розраховані для трьох вихідних частот, ілюструють вживання моделі (9) для побудови шумових характеристик аналізованої схеми при синтезуванні різних частот.

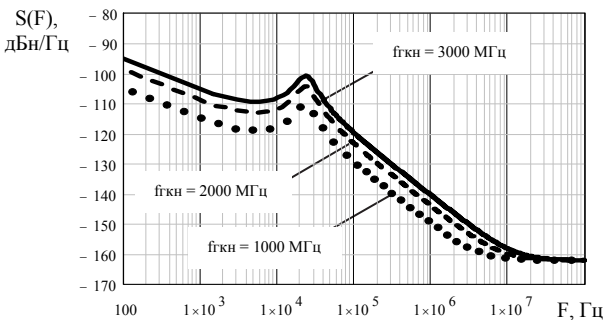


Рис. 8. Шумові характеристики комбінованого синтезатора для різних вихідних частот

При цьому використовувалися ГКН на відповідні частоти, а значення коефіцієнтів ділення дільників в схемі складали $N_1 = 4$ і $N_2 = 1$.

Отримані результати моделювання показують хороший збіг теоретичних розрахунків з експериментальними шумовими характеристиками. Використовуючи такий підхід при проектуванні, можна моделювати шумові характеристики комбінованих синтезаторів на різній елементній базі.

Цікаво, а як же бути, коли вихідна частота ГКН набагато більше тактових частот нині існуючих ЦСС. В цьому випадку схема рис. 1, наприклад, для формування вихідних частот другого діапазону не придатна і її необхідно трохи видозмінити, додавши попереднього дільника частоти (прескаллер) перед ЦСС.

Це дозволить поділити вихідну частоту ГКН в дільнику, з коефіцієнтом ділення N_3 , в необхідну кількість разів для здобуття потрібної тактової частоти для будь-якого вживаного ЦСС.

Структурна схема такого комбінованого синтезатора з переддільником в зворотному зв'язку петлі ФАПЧ приведена на рис. 9.

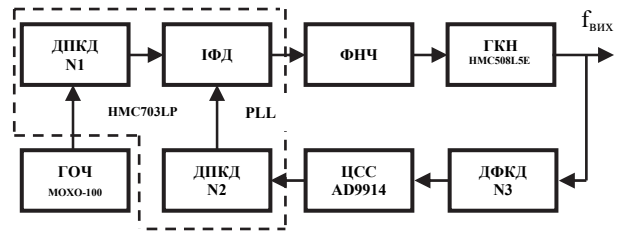
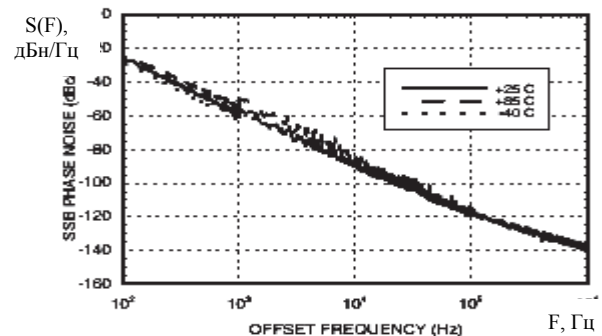


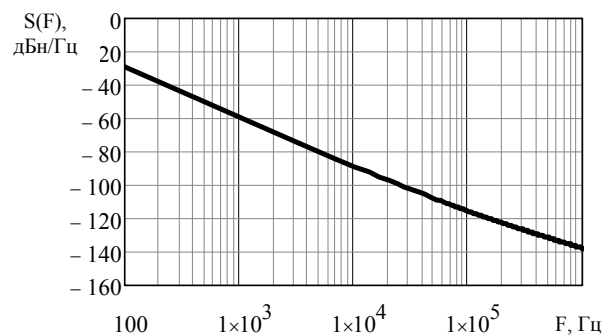
Рис. 9. Структурна схема комбінованого синтезатора для діапазону вихідних частот 7,2–8,2 ГГц

Визначальним елементом цієї схеми є ГКН. На сьогоднішній день існує великий асортимент ГКН на різні діапазони частот. Ми ж зупинимо свій вибір на найпростіший і доступніший зразок з досить хорошим рівнем фазових шумів – це ГКН типа HMC508L5E з вихідним діапазоном частот 7,3–8,2 ГГц.

Експериментальні шумові характеристики ГКН приведені на рис. 10, а.



а



б

Рис. 10. Експериментальна (а) і розрахункова (б) СЦП фазових шумів ГКН HMC508L5E

Після коректування апроксимуючих коефіцієнтів, вираження для СЦП фазових шумів ГКН прийме наступний вигляд

$$S_{ГКН}(F) = \frac{10^{-11.5}}{F^3} \cdot \frac{f_{ГКН}^2}{Q^2} + \frac{10^{-16.2}}{F^2} \cdot \frac{f_{ГКН}^2}{Q^2} + \frac{10^{-10.5}}{F} + 10^{-19.0}, \quad (10)$$

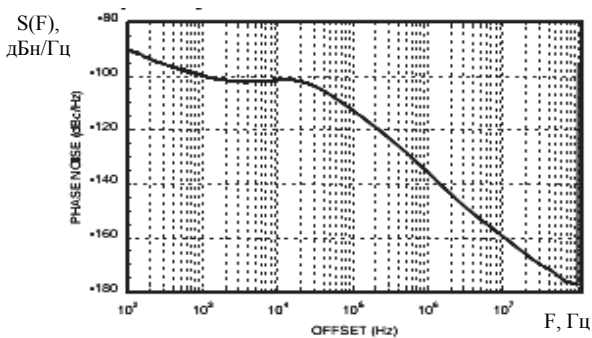
де Q – добротність котушки коливального контуру при апроксимації приймалася рівною 600; $f_{ГКН}$ – частота ГКН.

Розраховані шумові характеристики ГКН по (10) приведені на рис. 10, б. З аналізу шумових характеристик малюнка видно їх хороший збіг.

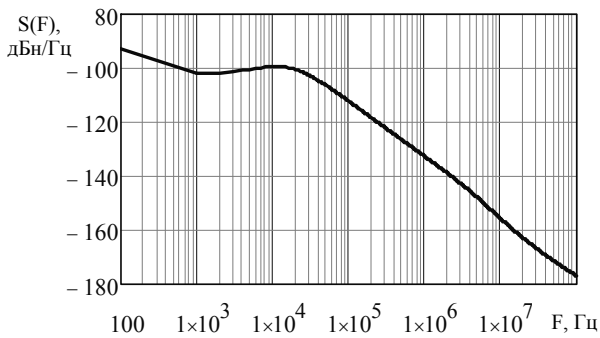
Останні елементи схеми ГОЧ, ФД, ДПКД, ЦСС і ФНЧ ідентичні елементам схеми (рис. 1), тому при подальших розрахунках СЦП фазових шумів системи ФАПЧ і всього комбінованого синтезатора в цілому, користуватимемося їх скоректованими моделями які були отримані в першій частині цієї роботи.

Далі, відповідно до вихідного частотного діапазону комбінованого синтезатора, як система ФАПЧ виберемо мікросхему НМС703LP4Е, яка працює в смузі частот до 8 ГГц [16].

На рис. 11, а представлена експериментальна шумова характеристика цієї мікросхеми.



а



б

Рис. 11. Експериментальна (а) і розрахункова (б) СЦП фазових шумів мікросхеми ФАПЧ НМС703LP4Е на частоті 8000 МГц

По своїй функціональній побудові і призначенню вона ідентична мікросхемі ADF4153A, лише фазовий детектор, що входить до її складу, працює з максимальною частотою порівняння, рівною 100 МГц.

А раз так, то і вираз для СЦП ФШ системи ФАПЧ на мікросхемі НМС703LP4Е з врахуванням додавання в схему рис. 9 переддільника виглядатиме таким чином

$$S_{ФАПЧ}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_1^2} + S_{ДПКД1}(F) + S_{ДПКД2}(F) + S_{ДФКД3}(F) + \frac{S_{ФД}(F) + S_{ФНЧ}}{E_{ФД}^2} \right] \cdot N_2^2 \cdot N_3^2 \cdot |H_{31}(p)|^2 + S_{ГКН}(F) \cdot |H_{32}(p)|^2. \quad (11)$$

На рис. 11, б приведена шумова характеристика, розрахована по формулі (11) для вихідної частоти ГКН, рівної 8000 МГц.

Тепер з врахуванням власних фазових шумів ЦСС вираз для розрахунку шумових характеристик всього комбінованого синтезатора рис. 9 запишеться в наступному вигляді

$$S_{ФАПЧ_ЦСС}(F) = \left[\frac{S_{ГОЧ}(F)}{N_1^2} + S_{ДФКД1}(F) + S_{ДПКД2}(F) + S_{ДФКД3}(F) \cdot K_{ЦСС}^2 + \left(\frac{S_{ЦСС}(F)}{N_2^2} + \frac{S_{ФД}(F) + S_{ФНЧ}(F)}{E_{ФД}^2} \right) \right] \times N_{21}^2 \times |H_{31}(p)|^2 + S_{ГКН}(F) \cdot |H_{32}(p)|^2, \quad (12)$$

де $N_{21}^2 = \frac{N_3^2 \cdot K_{ЦСС}^2}{N_2^2}$ – результуючий коефіцієнт

ділення в петлі ФАПЧ, а $H(p) = \left[\frac{K_0 \cdot F_{ФНЧ}(p)}{p \cdot N_{21}} \right]$.

На рис. 12 приведені результати розрахунків СЦП фазових шумів комбінованого синтезатора по (12) для різних вихідних частот.

Розрахунки проводилися при наступних значеннях параметрів синтезатора: $f_{ГОЧ}=100$ МГц; $f_{ГКН1}=14$ ГГц; $f_{ГКН2}=8$ ГГц; $f_{ГКН3}=5$ ГГц; $N_1=1$; $N_2=$; $N_3=4$.

Як і в першому випадку, ГОЧ і ЦСС вносять невеликий вклад шумів до низькочастотної області, приблизно до 100 Гц. Основний вклад в сумарні шуми вносить фазовий детектор. Шуми ГКН в смузі пропускання системи ФАПЧ сильно ослаблені і впливають лише на кордоні смуги пропускання.

Шумові залежності на рис. 12 ще раз показують, що модель (12) для побудови шумових характеристик аналізованих схем при проектуванні комбінованих синтезаторів для різних вихідних частот з ЦСС в зворотному зв'язку ланцюга ФАПЧ сповна придатна.

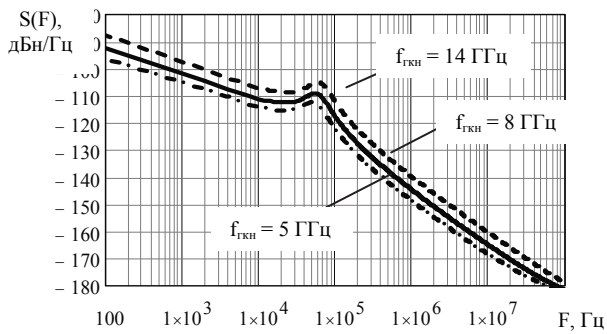


Рис. 12. Шумові характеристики комбінованого синтезатора для різних вихідних частот

Висновки

Таким чином, показано два приклади проектування комбінованого синтезатора на інтегральних мікросхемах для формування двох діапазонів вихідних частот.

Показано вживання моделей СЦП фазових шумів функціональних ланок для аналізу шумових характеристик при проектуванні комбінованих синтезаторів сигналів на основі системи ФАПЧ і ЦСС.

Використання моделей СЦП фазових шумів для аналізу схем комбінованих синтезаторів сигналів дозволяє прискорити процес їх проектування на різній елементній базі.

Список літератури

1. Kroupa V.F. *Phase Lock Loops and Frequency Synthesis*, 2003, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-84866-9 – 320 с.
2. Шапиро Д.Н. *Основы теории синтеза частот / Д.Н. Шапиро, А.А. Паин. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.*
3. Рыжков А.В. *Синтезаторы частот в технике радиосвязи / А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с., ил.*
4. Кандырин Н.П. *Анализ фазовых шумов комбинированных синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. №3(40). – С. 63-68.*
5. Кандырин Н.П. *Исследование фазовых шумов системы ФАПЧ со смесителем в цепи обратной связи / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 8(124). – С. 30-32.*
6. Кандырин Н.П. *Перспективы использования комбинированных формирователей на основе ФАПЧ и ЦСС для формирования СВЧ сигналов. Фазовые шумы системы ФАПЧ / Н.П. Кандырин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил / Н.П. Кандырин. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. №2(39). – С. 70-73.*
7. Drucker Erik. *Model PLL Dynamics and Phase-Noise Performance / Erik Drucker // Microwaves & RF. – 2000. – №2. – P. 35-42.*
8. ROS – 1800+ [Електронний ресурс]: сайт фірми Mini-Circuits <http://www.minicircuits.com/>.
9. ADF4153A.pdf [Електронний ресурс]: сайт фірми Analog Devices, Inc., 2013. URL: <http://www.analog.com/rf/rfif-components/pll-synthesizersvcos/adf4153a/products/product.html>.
10. Ромашова Л.В. *Исследование спектральных характеристик системы ФАПЧ в режиме умножения частоты / Л.В. Ромашова, А.Н. Фомичев // Вопросы радиоэлектроники, сер. ОТ. 2010. Вип. 1. – С. 23-28.*
11. Холладей К. (Перевод Ю. Потапова). *Проектирование ФАПЧ по полосе пропускания. EDN, 2000. http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200009/40.html*.
12. Кандырин Н.П. *Моделирование шумовых характеристик цифровых синтезаторов сигналов / Н.П. Кандырин // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип.4(120). – С. 7-10.*
13. Ромашова Л.В. *Моделирование спектральных характеристик цифровых вычислительных синтезаторов частот / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. – №1.*
14. Ромашова Л.В. *Методика расчета коэффициентов аппроксимации спектральной плотности мощности фазовых шумов цифровых вычислительных синтезаторов / Л.В. Ромашова, А.В. Ромашов // Проектирование и технология электронных средств. – 2011. – №1. – С. 22-25.*
15. AD9914.pdf [Електронний ресурс]: сайт фірми Analog Devices, Inc., 2013. URL: <http://www.analog.com/rf/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/ad9914/product.html>.
16. HMC703LP4E.pdf [Електронний ресурс]: сайт фірми Analog Devices, Inc., 2015. URL: <http://www.analog.com/rf/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/hmc703lp4e/product.html>.

Надійшла до редколегії 12.05.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.І. Сухаревський, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, Харків.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СИНТЕЗАТОРОВ СВЧ СИГНАЛОВ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ

Н.П. Кандырин

Рассмотрены варианты практического проектирования комбинированных синтезаторов на интегральных микросхемах. Получены выражения для модели СПМ фазовых шумов комбинированных синтезаторов на основе системы ФАПЧ с ЦСС в цепи обратной связи. Приведены результаты моделирования шумовых характеристик таких синтезаторов для ряда выходных сигналов.

Ключевые слова: комбинированный синтезатор, ФАПЧ, шумовые характеристики.

DESIGNING THE COMBINED SYNTHESIZERS OF SHF SIGNALS ON THE INTEGRATED CHIPS

N. Kandyrin

The variants of practical application of combined synthesizers on the integrated chips are considered. The expressions for phase noises power spectral density model of combined synthesizers on the basis of phase lock system with DDS feedback circuit are given. The simulation results of noise characteristics such synthesizers for a number of output signals are displayed.

Keywords: combined synthesizers, phase lock, noise characteristics.