

УДК 621.3.072.6

О.М. Чекунова, С.А. Макаров, Р.В. Коваленко

АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ШВИДКОДІЮЧИХ СИНТЕЗАТОРІВ ЧАСТОТ НА ОСНОВІ СИСТЕМ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ

Систематизовані методи підвищення швидкодії синтезаторів частот на основі систем фазової синхронізації, розглянуто їх застосування та запропоновані подальші напрямки розвитку.

Постановка проблеми та аналіз літератури

Системи фазової синхронізації (СФС) знаходять все більше поширення в засобах радіозв'язку. Сьогодні практично жоден такий пристрій не обходиться без використання синхронних принципів формування та обробки сигналів. Такому розвитку техніки СФС передували десятиріччя напружених досліджень та інженерних робіт вчених всього світу. Однак всі наукові та технічні завдання в цьому напрямку не вирішені, оскільки з'являються нові технологічні можливості та елементна база, які відкривають широкі перспективи і дозволяють знаходити перспективні вирішення багатьох завдань цієї галузі. Крім того, у літературі практично відсутні роботи, які присвячені всебічному систематизованому аналізу питань підвищення швидкодії синтезаторів частот.

Актуальним є аналіз саме синтезаторів частот (СЧ), які побудовані за методом непрямого синтезу, тому що вони суттєво програють за швидкістю СЧ, які побудовані за методом прямого синтезу.

У [1] та [2] наведені основи теорії СЧ, приклади їх реалізації, які запропоновані в даній статті, та деякі з методів підвищення швидкодії. Подальший перспективний напрямок розвитку проаналізовано в [3].

Мета статті – систематизація робіт з підвищення швидкодії СЧ на основі систем фазової синхронізації та рекомендації щодо застосування різних методів підвищення їх швидкодії.

Викладення основного матеріалу

На рис. 1 наведено найбільш перспективні методи підвищення швидкодії синтезаторів частот, які можна поділити на дві групи.

У першій групі підвищення швидкодії відбувається за рахунок підвищення частоти порівняння сигналів у дискретних колах фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) при збереженні потрібного кроку сітки вихідних коливань, у другій – за раху-

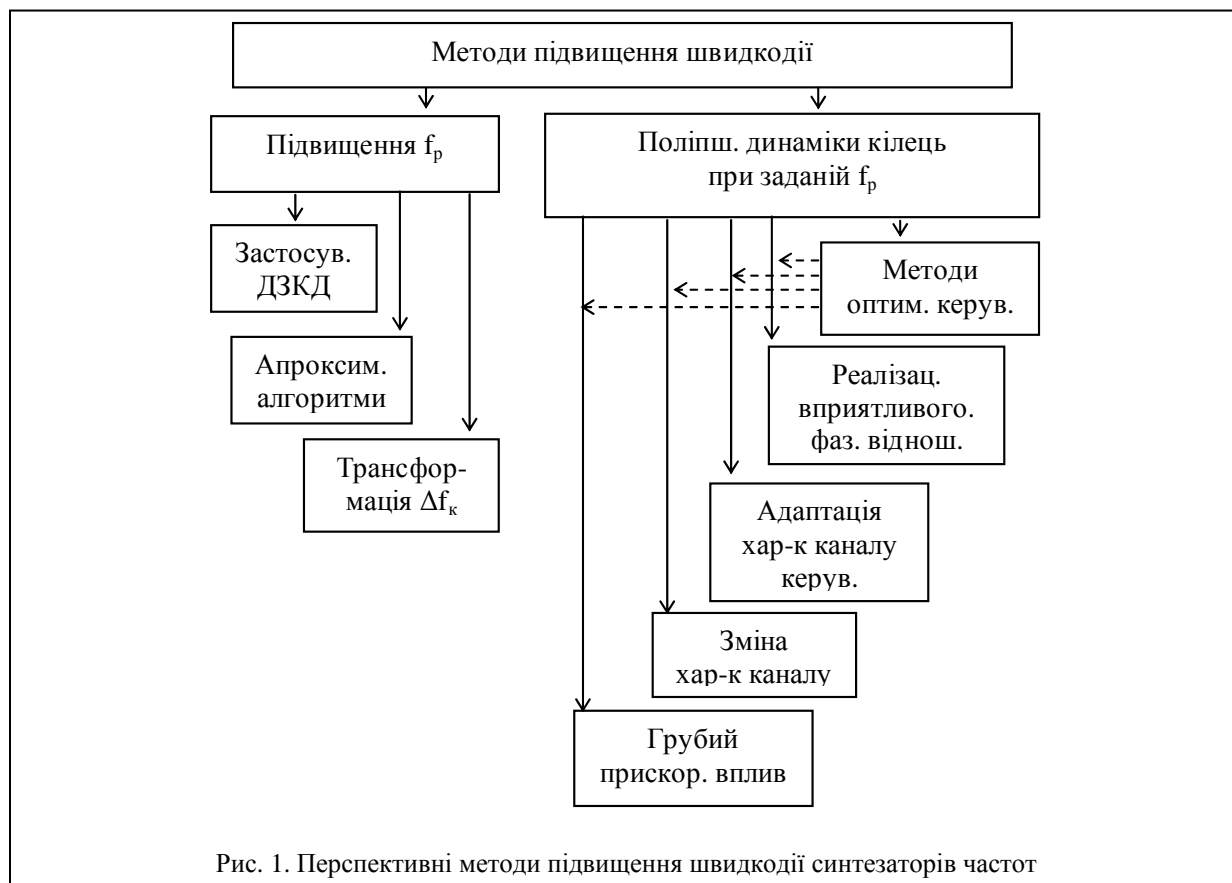
нок швидкодії самих кіл ФАПЧ при заданій частоті порівняння.

Синтезатори частот, які використовують дільники з дрібним змінним коефіцієнтом ділення. Серед ефективного методу підвищення швидкодії СЧ використовують замість дільника із змінним коефіцієнтом ділення (ДЗКД) дільник з дрібним коефіцієнтом ділення (ДДКД). Це дозволяє суттєво підвищити частоту порівняння при заданому кроці сітки вихідних частот Δf_k в імпульсній системі ФАПЧ, що покращує динамічні характеристики системи, фільтрацію шумів підстроювального генератора (ПГ) та знижує ефект перемноження флукутацій фази еталонного генератора (ЕГ).

На виході ДЗКД імпульсна послідовність являється нерівномірною, що призводить до появи в ланцюгу керування завад з частотами, які кратні Δf_k . Тому одна з найскладніших та найважливіших задач при побудові таких СЧ – це зниження рівня цих завад, що можливо такими способами: програмуванням дрібного розряду коефіцієнта ділення ДЗКД з метою мінімізації завад дрібності; компенсацією завад дрібності; комбінацією перших двох способів.

У першому випадку значно ускладнюється схема ДЗКД, оскільки потрібна маніпуляція коефіцієнтами ділення за визначеним алгоритмом. На практиці найбільше розповсюдження отримали алгоритми для двох маніпульованих коефіцієнтів ДЗКД. Основні труднощі виникають при подавленні першої та третьої гармонік Δf_k . Маніпулювати великою кількістю вихідних коефіцієнтів та збільшувати розрядність дрібності самого ДЗКД недоцільно через суттєве схемне ускладнення та слабкий ефект зниження паразитних складових у спектрі вихідного сигналу.

Компенсація завад дрібності може проводитися як в аналоговому, так і в цифровому вигляді. При аналоговій компенсації виникає складність точного настроювання схеми та забезпечення стабільності всіх параметрів кільця ІФАПЧ вузлів. Частково ці недоліки усуваються в методі цифрової компенсації



завад дрібності, але його можливості обмежені через велику кількість нелінійностей у реальних системах ІФАПЧ. Крім того, наявність багаторозрядного ПЦА ускладнює схему компенсації, а дискретизація керуючого сигналу за рівнем створює додаткові завади, які погіршують спектр вихідного сигналу.

Третій спосіб зменшення завад широкого поширення не отримав через надзвичайну складність реалізації.

Синтезатори частот на основі системи ІФАПЧ, які використовують апроксимовані алгоритми синтезу частот. На виході синтезатора (рис. 2) можуть бути отримані частоти, які визначаються формулою

$$f_{\text{вих}} = Nf_0/M,$$

де f_0 – частота задаючого генератора (ЗГ);

N, M – коефіцієнти ділення ДЗКД₁ та ДЗКД₂ відповідно.

Частота порівняння сигналів у колі ІФАПЧ

$$f_p = f_0/M.$$

Якщо допустима реалізація великих значень коефіцієнтів N, M , то можлива апроксимація точного значення потрібної вихідної частоти $f_{\text{вих}}$ із заданою похибкою при достатньо високій f_p . Точність апрок-

симації підвищується з підвищенням числа десятичних розрядів чисельника та знаменника дробу M/N , але при цьому зменшується f_p . Визначення N та M зводиться по суті до задачі знаходження деякого дробу з рядка дробу RG , який зводиться до числа $\alpha = f_0/f_{\text{вих}}$.

Дана задача може бути розв'язана за допомогою розрахункових алгоритмів або з використанням постійних запам'ятовуючих пристроїв, які зберігають коди N та M . Перший шлях практично не має обмежень на кількість синтезуючих частот, але потребує значної кількості операцій, тому реалізується при порівняно невисоких значеннях f_p . Другий шлях рекомендується у випадку високих частот порівняння, невисокої точності апроксимації та невеликої кількості вихідних частот. При реалізації апроксимуючого алгоритму синтезу кола ІФАПЧ працює з видозміненою в широких межах f_p . Це суттєво ускладнює оптимізацію динамічних та фільтруючих характеристик кола ІФАПЧ, а також реалізацію окремих його вузлів.

Виграш у швидкодії даного методу синтезу порівняно зі звичайним тим більший, чим більше відношення $\Delta f_k/f_{\text{вих}}$. Перевагою апроксимуючого методу синтезу є можливість отримання разом із високою

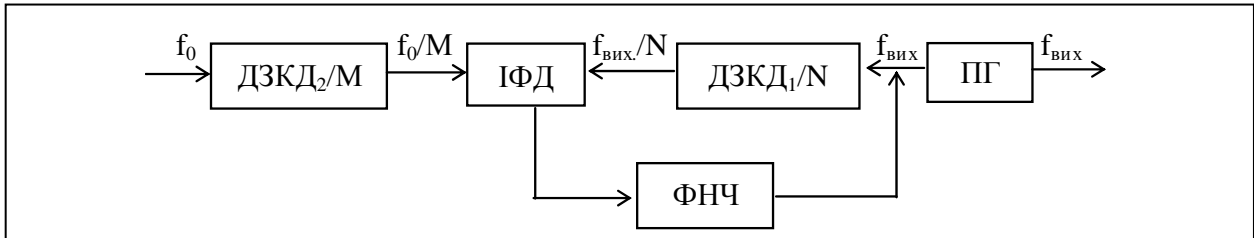


Рис. 2. Схема синтезатора частот на основі системи ІФАПЧ

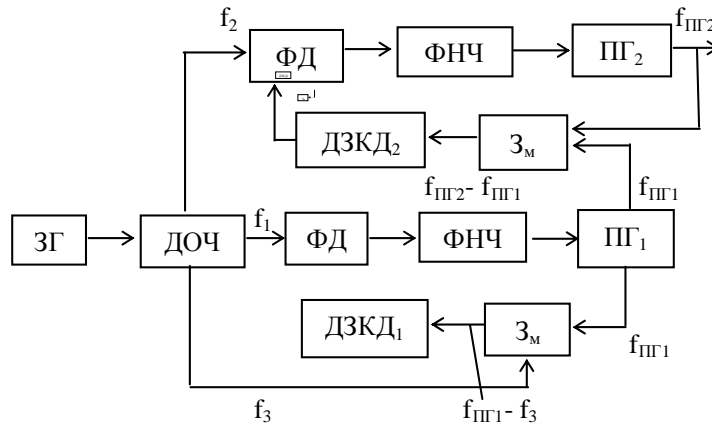


Рис. 3. Схема СЧ з трансформацією кроку сітки частот

швидкодією хороших спектральних характеристик вихідного сигналу, оскільки підвищення f_p дозволяє зменшити інерційність кола ІФАПЧ та суттєво розширити зону компенсації шумів ПГ. Крім того, зменшується і дія шумів еталонного генератора завдяки зменшенню коефіцієнта ділення ДЗКД. Підвищення f_p дозволяє суттєво спростити задачу подавлення дискретних побічних компонентів.

Синтезатори частот з використанням лінійної трансформації кроку сітки частот. На рис. 3 наведена одна з найбільш перспективних схем СЧ з трансформацією кроку сітки частот, у якій зменшення Δf_k досягається шляхом віднімання частоти, що сформована в першому колі ІФАПЧ, із вихідної частоти, яка отримана за допомогою другого кола ІФАПЧ. При цьому $f_{\text{вих}} = f_3 - N_1 f_{p1} + N_2 f_{p2}$. Змінюючи одночасно N_1 та N_2 на 1, можна отримати зміну вихідної частоти Δf_k , яка буде дорівнювати $f_{p2} - f_{p1}$. При правильному виборі частот на входах Z_M дискретні компоненти на його виході легко фільтруються колом ІФАПЧ, тому смугові фільтри на виході Z_M відсутні. У випадку застосування цифрових змішувачів таку схему застосовують для мікромініатюризації. Основний недолік такого способу трансформації полягає у

складному взаємодіючому керуванні коефіцієнтами N_1 та N_2 .

Синтезатори частот на основі систем ІФАПЧ з використанням грубого прискорювального впливу на частоту ПГ. Керування частотою ПГ здійснюється як за двома, так і за одним каналом. У першому випадку один канал виконується широкосмуговим („грубий канал”), який перекриває потрібний діапазон частот, а другий – вузькосмуговий, за яким здійснюється точне підстроювання ПГ. Щоб забезпечити високе подавлення дискретних завад, кратних Δf_k , необхідно в синхронному режимі підтримувати незмінним керуючий вплив за грубим каналом, тому його елементи найчастіше виконуються в цифровому вигляді з використанням перетворювачів цифрової інформації в аналогову (ПЦА). Повний час перехідного процесу в системах ІФАПЧ з двоканальним керуванням включає в себе час перехідних процесів за грубим t_1 та точним t_2 каналами. Час t_2 визначається інерційністю точного каналу та його смугою перестройки, яка залежить від точності роботи грубого каналу.

Один з найпростіших способів керування частотою ПГ за грубим каналом – передчасне установлення частоти ПГ (ПУЧ). При цьому весь діапазон

вихідних частот розбивається на піддіапазони; вибір піддіапазону залежно від потрібної $f_{\text{вих}}$ може здійснюватися шляхом комутації окремих генераторів, які перестроюються, або коливальних контурів ПГ, а також за допомогою емнісних матриць, індуктивних матриць та резисторних дільників напруги. Виграш від застосування схеми ПУЧ збільшується із збільшенням точності її роботи. Збільшенню точності ПУЧ заважають різні дестабілізуючі фактори. Перевага даного способу – мала інерційність та широкий діапазон перестройки.

При побудові СЧ використовуються системи ІФАПЧ з грубим каналом керування, які містять датчики частотної помилки (ДЧП), що називають системами частотнофазового автопідстроювання (ЧФАП). Як ДЧП застосовують частотні детектори (ЧД) та цифрові виділювачі різницевої частоти (ВРЧ). Цифрові ЧД будуються на базі мікропроцесора. При цьому їх швидкодія залежить від швидкості роботи обчислювача коду різницевої частоти та швидкодії ПЦА. Найбільше поширення отримали ЧД на основі цифрових ВРЧ.

Можливе використання в грубому каналі керування як ЧД допоміжних кіл ФАПЧ. Для скорочення часу перестройки необхідно зменшувати інерційність допоміжних кіл ФАПЧ. Цю вимогу задовольняють безфільтрові лінійні системи ІФАПЧ, у яких межа швидкодії досягає одного періоду регулювання.

Один з найпоширеніших способів грубого впливу на частоту ПГ – застосування в колі ФАПЧ частотно-фазового детектора (ЧФД) замість звичайного ФД, що дозволяє ліквідувати „помилкові” захоплення, підвищити швидкодію кола ІФАПЧ з інерційним ФНЧ при збереженні хороших спектральних характеристик СЧ. ЧФД прості в реалізації та дуже технологічні. Однак закладений у них принцип індикації частотної помилки не дозволяє ефективно підвищити швидкодію СЧ в області малих частотних розстроювань.

Керувати частотою ПГ за грубим каналом можна і за допомогою пошукових впливів. У цьому випадку для переключання грубого каналу необхідні індикатори синхронізму (ІС) або індикатори смуги захоплення (ІСЗ) точного каналу залежно від умов роботи каналів керування. Основні проблеми при побудові таких систем: вибір алгоритму пошуку, вибір ІС або ІСЗ, які здатні за мінімальний час прийняти рішення про наявність синхронізму або про величину частотної розстрочки в системі.

Існують такі алгоритми пошуку: з постійною швидкістю, із змінною швидкістю, дихотомічні. Останній – найбільш перспективний.

Пошуковий режим роботи може бути реалізований у СЧ на основі ІФАПЧ з цифровим інтегратором (ЦІ), який дозволяє автоматично відключати пошуковий вплив, тобто здійснювати паралельну роботу каналів керування без допоміжних індикаторів синхронізму. Застосування ФНЧ у колах ФАПЧ синтезатора накладає суттєве обмеження на швидкість пошуку в системі. Найбільша швидкість пошуку в СЧ може бути досягнута при відсутності ФНЧ в точному каналі керування. При цьому потрібне подавлення дискретних компонентів забезпечується застосуванням ФД з хорошим подавленням завад та розділом смуг перестроювання каналів керування.

Синтезатори частот, які використовують зміну характеристик каналу керування в колі. Застосування в СЧ систем із змінною структурою дозволяє розширити смугу захоплення та підвищити швидкодію при збереженні хороших фільтруючих властивостей петлі ФАПЧ. Для здійснення регулювання параметрів найчастіше впливають на коефіцієнт підсилення петлі та інерційність фільтра, у деяких випадках – на форму характеристики ФД. Основна складність при реалізації таких систем – вибір швидкодіючого індикатора синхронізму.

Можлива також зміна характеристик грубого каналу для підвищення швидкодії при збереженні високої точності підстроювання шляхом зміни кроку підстроювання залежно від величини помилки.

Реалізація сприятливих фазових співвідношень при замиканні петлі ФАПЧ у синтезаторах частот. На динаміку системи ФАПЧ суттєво впливає початкова різниця фаз сигналів, які надходять на ФД (φ_0).

Впровадження елементів цифрової техніки в СЧ на основі ІФАПЧ створило реальну можливість для покращення динамічних характеристик завдяки керуванню величиною φ_0 .

Керування цією величиною можливе за допомогою електронного ключа, який розмикає систему за каналом еталонного сигналу. Особливістю даного методу є наявність пасивного інтервалу „очікування”, який залежить від допустимої величини відхилення φ_0 від заданого значення δ та початкової частотної розстрочки порівняльних сигналів Ω_n . Величина цього інтервалу може суттєво збільшуватися із зменшенням δ та Ω_n .

Другий спосіб керування величиною φ_0 передбачає скидання в 0 дільників частоти в каналі як еталонного, так і підстроювального генераторів. Оскільки коефіцієнти ділення цих дільників частоти достатньо великі, то точність установ-

лення φ_0 може бути досить значною ($\delta = 360^\circ/N$).

Спосіб примусової зміни коефіцієнта ділення ДЗКД призводить до затримки появи сигналу на його вході на задану величину. Інтервал „очікування” в таких схемах досягає тривалості одного періоду сигналу на виході дільника, а точність установлення може бути така ж, як і в схемах із скиданням дільника в 0.

Максимальний ефект від впливу на величину φ_0 (у тому числі й можливість досягнення межової для дискретних систем швидкодії) слід очікувати в системах ІФАПЧ першого порядку, в яких при виборі їх параметрів та оптимальній величині φ_0 вдається скоротити час перехідного процесу до одного періоду регулювання при лінійному режимі роботи кола ФАПЧ. У реальних пристроях завжди існують різні фактори, які порушують лінійність режиму роботи ІФАПЧ, однак існують методи, що дозволяють лінеаризувати роботу кола ІФАПЧ (використання ПГ з підвищеною лінійністю керування, компенсація нелінійностей та зміни коефіцієнта ділення ДЗКД і т. д.).

Застосування методів оптимального керування. Підвищення швидкодії СЧ можна розглядати як задачу оптимального керування, у якій об'єктом керування є послідовно з'єднані ФНЧ та ПГ.

Технічна реалізація методів оптимального керування може бути різною (на рис. 1 відображено пунктирними стрілками), наприклад шляхом формування спеціального керуючого впливу на вході керування ПГ чи зміни характеристик каналу керування, чи реалізації сприятливих фазових співвідношень.

Методи оптимального керування, незважаючи на їх високу ефективність, не отримали широкого розширення в техніці синтезу частот. Це пояснюється передусім тим, що для їх реалізації потрібно виконання достатньо складних обчислень за короткий інтервал часу: для кожного значення частотної розстрочки необхідно заново визначати функцію керування. Окрім того, необхідно з високою точністю підтримувати постійність параметрів кола ФАПЧ,

що не завжди можливо через технологічний розкид параметрів та дії дестабілізуючих факторів.

Адаптація характеристик каналу керування. Проведений вище аналіз дає можливість стверджувати, що в існуючих варіантах побудови СЧ не досліджене питання адаптації характеристик каналу керування, вирішення якого дозволить підвищити швидкодію синтезатора в режимі, що встановився, а в стаціонарному режимі забезпечити задану точність та завадостійкість. Саме тому дане питання потребує подальшої уваги.

Висновок

Завдання побудови швидкодіючих СЧ з високою якістю вихідного сигналу може бути ефективно вирішене при оптимальному використанні різних методів як з першої, так і з другої групи. Вибір конкретної структури може бути здійснений з урахуванням усього різноманіття вимог, які ставляться до розробленого пристрою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование: Пер. с англ. / Под ред. В.А. Певзнера. – М.: Связь, 1979. – 69 с.
2. Шахгильдян В.В., Пестряков А.В., Кабанов А.И. Общие принципы построения быстродействующих синтезаторов частот на основе систем фазовой синхронизации. – М.: Электросвязь, 1983. – № 10. – 84 с.
3. Семенякін С.І., Макаров С.А. Адаптивна система фазової автопідстройки частоти // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. пр. – Х.: НАКУ "ХАІ", 2001. – Вип. 22. – 114 с.

Надійшла 24.02.2006

Рецензент: д-р техн. наук доцент О.В. Лемешко, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба.