

УДК 621.3.072.6

С.А. Юхновський, С.А. Макаров, О.М. Чекунова, С.В. Женжера

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ШВИДКОДІЮЧИХ СИСТЕМ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ ПРИСТРОЇВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

*Проаналізовані методи підвищення швидкодії систем фазової синхронізації пристроїв телекомунікацій, визначені напрямки підвищення їх швидкодії за умови високої точності стеження за фазою в сталому режимі.*

**Ключові слова:** система фазового автопідстроювання частоти, швидкодія, фільтр нижніх частот, генератор керований напругою, ділянка із дрібним змінним коефіцієнтом ділення.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На теперішній час жорсткі вимоги висуваються до таких характеристик пристроїв телекомунікації як стабільність частоти і фази коливань в широкому діапазоні робочих частот, швидкість перебудови з однієї частоти на іншу та висока чистота вихідного спектру. Дані вимоги можуть задовольнити пристрої синтезу і стабілізації частот, елементом яких є система фазового автопідстроювання частоти (ФАП). Однак час входження у синхронізм та чистота спектру вихідного коливання не завжди задовольняють сучасним вимогам із-за існуючого протиріччя між динамічними та фільтруючими характеристиками в існуючих системах ФАП. Для усунення даного протиріччя пропонується дослідити методи підвищення швидкодії з метою визначення перспективного та впровадженні його в подальших дослідженнях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У публікаціях [1 – 3] систематизовані існуючі методи підвищення швидкодії систем ФАП і систем імпуль-

сно-фазового автопідстроювання частоти (ІФАП). У монографії [3] проведено всебічний аналіз систем ІФАП із змінними структурою та параметрами елементів, розроблено метод параметричного синтезу системи ІФАП з комутацією структури і параметрів для зменшення тривалості перехідного процесу. У статтях [4 – 5] розглянуто метод параметричного синтезу системи ФАП з введенням додаткових зворотних зв'язків за фазою, параметри яких регулюються за нелінійними законами.

**Метою статті** є визначення перспективних напрямків подальшого підвищення швидкодії систем ФАП пристроїв телекомунікації за умови реалізації високих фільтруючих здібностей та високої точності стеження за фазою в сталому режимі.

### Виклад основного матеріалу

На рис. 1 наведено методи підвищення швидкодії систем ФАП з урахуванням підвищення вимог до стабільності частоти, швидкодії та чистоти вихідного спектру.

До першої групи методів підвищення швидкодії відносяться методи підвищення частоти порівняння сигналів в дискретних колах системи ФАП при збереженні заданого кроку сітки вихідних коливань, до другої групи – методи підвищення швидкодії кола системи ФАП при заданій частоті порівняння.

Серед методів підвищення швидкодії систем ФАП першої групи зазначимо: використання замість дільника із змінним коефіцієнтом ділення (ДЗКД) дільника з дрібним змінним коефіцієнтом ділення (ДДЗКД). Це дозволяє при високій частоті порівняння отримати крок сітки в коефіцієнт дрібності раз менший частоти порівняння. Однак на виході ДДЗКД маємо імпульсну послідовність, яка нерівномірна в часі, що призводить до появи в спектрі вихідного сигналу побічних складових завад дрібності. Але звуження смуги пропускання фільтру нижніх частот (ФНЧ) у колі керування для забезпечення заданої якості спектра зводить внівець весь вииграш від збільшення частоти порівняння, а також не дозволяє суттєво підвищити

швидкодію системи ІФАП. Зниження рівня таких завад можливо наступними способами: програмуванням дрібного розряду коефіцієнта ділення ДДЗКД; компенсацією завад дрібності; комбінацією обох способів.

Збільшувати розрядність дрібності ДДЗКД недоцільно із-за суттєвого схемного ускладнення та слабого ефекту зниження паразитних складових в спектрі вихідного сигналу. Компенсація завад дрібності може проводитися як в аналоговому, так і в цифровому вигляді. При аналоговій компенсації виникає складність точної настройки схеми та забезпечення стабільності всіх параметрів елементів кола ІФАП. Частково ці недоліки усуваються в методі цифрової компенсації завад дрібності, але його можливості обмежені із-за великої кількості нелінійностей в реальних системах ІФАП. Крім того, наявність багаторозрядного цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) ускладнює схему компенсації, а дискретизація керуючого сигналу за рівнем створює додаткові завади, які погіршують спектр вихідного сигналу.

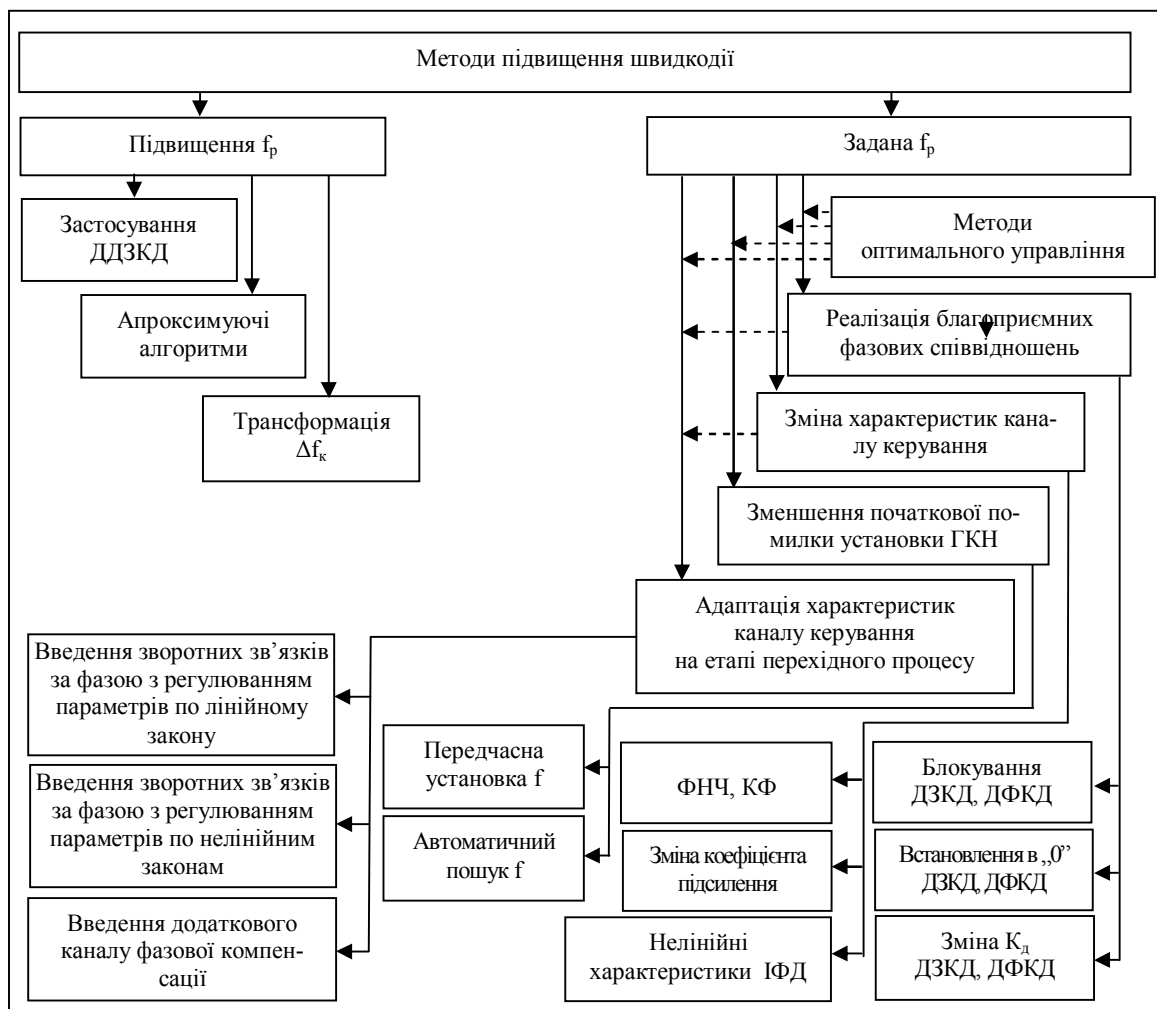


Рис. 1. Класифікація методів підвищення швидкодії систем фазового автопідстроювання частоти

Перевагою апроксимуючого методу є можливість отримання разом із високою швидкістю й добрих спектральних характеристик вихідного сигналу, так як підвищення  $f_p$  дозволяє зменшити інерційність

кола системи та суттєво розширити зону компенсації шумів генератора керованого напругою (ГКН). Також зменшується і дія шумів опорного генератора завдяки зменшенню коефіцієнта ділення ДЗКД. Підвищення  $f_p$

дозволяє суттєво спростити задачу подавлення дискретних побічних компонентів, однак призводить до нестійкості кроку сітки частот  $\Delta f_k$ , що накладає обмеження на область використання таких систем. Крім того, при реалізації апроксимуючого алгоритму коло ІФАП працює із змінною в широких межах  $f_p$ . Це суттєво ускладнює оптимізацію динамічних та фільтруючих властивостей кола. Виграш у швидкодії даного методу синтезу в порівнянні із звичайним тим більший, чим більше відношення  $\Delta f_k/f_{\text{вих}}$ .

Найбільш простим способом трансформації кроку сітки частот  $\Delta f_k$  є застосування додаткового дільника частоти на  $n$  на виході системи. Так, частота порівняння в  $n$  раз буде перевищувати крок сітки. Недоліком цього рішення є пониження вихідної частоти та звуження в  $n$  раз діапазону системи в цілому. Більш складним, але поширеним способом трансформації кроку сітки частот є побудова багатокільцевої ІФАП. Основний недолік такого способу трансформації полягає у складному взаємодіючому керуванні коефіцієнтами дрібності різних кіл.

Зменшення початкової частотної помилки ГКН може бути досягнуто введенням швидкого пошуку, а також шляхом передчасної установки частоти ГКН, близької до свого номінального значення. В якості пристроїв пошуку використовуються швидкодіючі системи імпульсно-частотного автопідстроювання частоти (ІЧАП) або безфільтрові кола ІФАП, що дозволяють ліквідувати „помилкові” захоплення, підвищити швидкодію кола ІФАП з інерційним ФНЧ при збереженні добрих спектральних характеристик системи. Треба зазначити, що закладений в частотнофазові детектори принцип індикації частотної помилки не дозволяє ефективно підвищити швидкодію в області малих частотних відстроювань. Ефективність таких схем визначається точністю установки частоти по закінченню пошуку та тривалістю останнього.

Пошуковий режим роботи може бути реалізований на основі ІФАП з цифровим інтегратором, який дозволяє автоматично відключати пошуковий вплив, тобто здійснювати паралельну роботу каналів керування без допоміжних індикаторів синхронізму. Застосування ФНЧ в колах ФАП накладає суттєве обмеження на швидкість пошуку в системі. Найбільша швидкість пошуку може бути досягнута при відсутності ФНЧ в точному каналі керування. При цьому задане подавлення дискретних компонентів забезпечується застосуванням фазового детектору (ФД) з добрим рівнем подавлення завад та розділом смуг перебудови між каналами керування.

Для підвищення швидкодії систем з передчасною установкою та пошуком можуть використовуватися принципи оптимального управління. Об'єктом керування в даному випадку є послідовно з'єднані ФНЧ та ГКН. Технічна реалізація методів оптимального управління отримується або шляхом формування спеціального керуючого впливу на вході керування ГКН, або зміни характеристик каналу керування, або реалі-

зації благоприємних фазових співвідношень, або сполучення вищенаведених способів на основі адаптації характеристик каналу керування на етапі перехідного процесу.

Методи оптимального управління, незважаючи на їх високу ефективність, не отримали широкого поширення в пристроях телекомунікації. Це пояснюється тим, що для їх реалізації потрібно виконання достатньо складних вирахувань за короткий інтервал часу: для кожного значення частотного відстроювання необхідно визначати функцію керування. Крім того, необхідно з високою точністю підтримувати постійність параметрів кола ФАП, що не завжди можливо із-за технологічного розкидування параметрів та дії дестабілізуючих факторів. На динаміку системи ФАП суттєво впливає початкова різниця фаз сигналів, які надходять на ФД ( $\varphi_0$ ). Керування цією величиною можливе за допомогою електронного ключа, який розмикає систему по каналу еталонного сигналу. Особливістю методу підвищення швидкодії, що реалізує благоприємні фазові співвідношення, є наявність пасивного інтервалу „очікування”, який залежить від допустимої величини відхилення  $\varphi_0$  від заданого значення  $\delta$  та початкового частотного відстроювання порівнювальних сигналів  $\Omega_n$ . Величина цього інтервалу може суттєво збільшуватися із зменшенням  $\delta$  та  $\Omega_n$ .

Другий спосіб керування величиною  $\varphi_0$  – це встановлення в „0” дільників частоти в каналі як опорного генератору, так і ГКН. Оскільки коефіцієнти ділення цих дільників частоти достатньо великі, то точність установки  $\varphi_0$  може бути високою ( $\delta = 360^\circ/N$ ).

Спосіб примусової зміни коефіцієнта ділення  $K_0$  ДЗКД призводить до затримки появи сигналу на його вході на деякий час. Інтервал „очікування” в таких схемах досягає тривалості одного періоду сигналу на виході дільника, а точність установки може бути такою, як у попередньому способі.

Максимальний ефект від впливу на величину  $\varphi_0$  (в тому числі і можливість досягнення межової для дискретних систем швидкодії) слід очікувати в системах ІФАП першого порядку, в яких при виборі їх параметрів та оптимальній величині  $\varphi_0$  вдається скоротити час перехідного процесу до одного періоду регулювання при лінійному режимі роботи кола ФАП. У реальних пристроях завжди існують різні фактори, які порушують лінійність режиму роботи ІФАП. Але існують методи, які дозволяють лінеаризувати роботу кола ІФАП, серед яких використання ГКН з підвищеною лінійністю керування, компенсація нелінійностей та зміни коефіцієнта ділення ДЗКД тощо.

Зміна характеристик каналу керування методами оптимального управління реалізується шляхом параметричного синтезу та оптимізації системи ІФАП з комутацією структури і параметрів елементів, яка враховує дискретні і нелінійні властивості кола автопідстроювання, що призначені для функціонування в складі швидкодіючої широкодіапазонної приймально-передатальної апаратури.

Застосування систем фазової синхронізації із змінною структурою та параметрами дозволяє підвищити швидкодню та розширити смугу захоплення при збереженні хороших фільтруючих властивостей кола ФАП. Для здійснення регулювання (комутації) параметрів частіше всього впливають на коефіцієнт підсилення кола, постійні часу ФНЧ, форму характеристики ФД, частоту порівняння в детекторі; в цифрових ІФАП – на величину струму заряду та розряду накачки, коефіцієнти ділення ДЗКД, ДФКД або ДДЗКД. Основна складність при реалізації таких систем – вибір швидкодіючого індикатора синхронізму.

До перспективних методів підвищення швидкодії систем ФАП належить адаптація характеристик каналу керування на етапі перехідного процесу, що дозволяє частково вирішити протиріччя між динамічними та фільтруючими характеристиками в системах ФАП.

Адаптація характеристик каналу керування під час перехідного процесу на практиці зводиться до введення у систему ФАП додаткових зворотних зв'язків за фазою, до складу якого звичайно входить фазовий модулятор та ФНЧ з постійною часу значно меншій ніж у ФНЧ основного кола регулювання частоти ГКН. Крім того, параметри додаткового зворотного зв'язку за фазою (наприклад, коефіцієнт підсилення) динамічно регулюються за сигналом каналу оцінки стану системи (швидкодіючого індикатора синхронізму) на основі квадратурного каналу відносно основного кола регулювання частоти ГКН. Особливістю каналу оцінки стану системи є використання ФНЧ з постійною часу значно меншій ніж у ФНЧ основного кола регулювання. Подальшого підвищення швидкодії досягають при застосуванні нелінійних законів регулювання параметрів додаткового зворотного зв'язку за фазою. Також напрямком підвищення швидкодії може бути введення додаткового каналу фазової компенсації, тобто використання двох фазових модуляторів у каналі опорного сигналу та каналі ГКН, вихідні сигнали яких подаються на відповідні входи ФД, а управляючі сигнали фазових модуляторів інверсні один до другого за полярністю напруги. Введення каналу фазової компенсації дозволяє розширити смугу захоплення та утримання, а також підвищити швидкодню, але це потребує додаткових досліджень.

Таким чином, адаптація характеристик каналу керування системи ФАП еквівалентно розширенню

смуги пропускання ФНЧ основного кола під час перехідного процесу для підвищення швидкодії системи та звуженню смуги пропускання до параметрів ФНЧ основного кола у сталому режимі синхронізму, що дозволяє забезпечити високу точність стеження за фазою. Використання адаптивних систем ФАП дозволить підвищити такі основні показники якості пристроїв приймання, синтезу та стабілізації частот приймально-передавальної апаратури телекомунікаційних систем як: швидкість перебудови з однієї частоти на іншу, широкодіапазонність, якість спектральних та модуляційних характеристик.

## Висновки

Проведений аналіз методів підвищення швидкодії систем ФАП дозволяє визначити перспективний напрямок подальшого підвищення швидкодії систем ФАП пристроїв телекомунікації за умови реалізації високих фільтруючих здібностей та високої точності стеження за фазою в сталому режимі. Це синтез адаптивних систем ФАП з обґрунтуванням нелінійних законів динамічного регулювання параметрів зворотних зв'язків за фазою та застосуванням каналу фазової компенсації.

## Список літератури

4. Шахгильдян В.В. Общие принципы построения быстродействующих синтезаторов частот на основе систем фазовой синхронизации / В.В. Шахгильдян, А.В. Пестряков, А.И. Кабанов // *Электросвязь*. – 1983. – №10. – С. 36-41.
5. Стеклов В.К. Комбинированные системы ФАП / В.К. Стеклов, А.А. Руденко. – К: Техніка, 2004. – 327 с.
6. Романов С.К. Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот / С.К. Романов, Н.М. Тихомиров, А.В. Леньшин. – М.: Радио и связь, 2010. – 327 с.
7. Макаров С.А. Підвищення швидкодії синтезаторів частот засобів радіозв'язку / С.А. Макаров, О.М. Чекунова // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2005. – Вип. 3(4). – С. 49-51.
8. Чекунова О.М. Аналіз принципів побудови швидкодіючих синтезаторів частот на основі систем фазової синхронізації / О.М. Чекунова, С.А. Макаров, Р.В. Коваленко // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2006. – Вип. 1(5). – С. 122-126.

Надійшла до редколегії 17.08.2012

Рецензент: д-р техн. наук, доцент К.С. Васюта, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЙ

С.А. Юхновский, С.А. Макаров, О.Н. Чекунова, С.В. Женжера

*Проанализированы методы повышения быстродействия систем фазовой синхронизации устройств телекоммуникаций, определены направления повышения их быстродействия при условии высокой точности слежения по фазе в стационарном режиме.*

**Ключевые слова:** система фазовой автоподстройки частоты, быстродействие, фильтр нижних частот, генератор управляемый напряжением, делитель с дробным переменным коэффициентом деления.

## ANALYSIS OF CONSTRUCTION PRINCIPLES OF FAST PHASE LOCKING SYSTEMS OF TELECOMMUNICATIONS DEVICES

S.A. Yuhnovsky, S.A. Makarov, O.N. Chekunova, S.V. Zhenzhera

*The methods of speed increase of the phase synchronization systems of telecommunications devices are analyzed. The directions of increase of their speed for the case of high accuracy of the phase tracking are determined.*

**Keywords:** phase locking system, speed, low-frequency filter, voltage-controlled oscillator businesses, divisor with variable fractional coefficient of division.