

Р. М. Царьков, Р. О. Єрмілов, О. В. Шефер

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

## ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ГЕНЕРАТОРІВ, КЕРОВАНИХ НАПРУГОЮ, ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СИСТЕМ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

**Анотація.** В роботі розглядаються проблеми систем фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), які є одним з основних вузлів сучасної апаратури зв'язку. З аналізу останніх досліджень і публікацій авторами виявлено, що найкращі генератори, керовані напругою (ГКН) досі реалізуються здебільшого на дискретних схемах, які можуть вимагати напруги живлення до 30 В, тому перед розробниками сучасних систем ФАПЧ або радіочастотних систем постає завдання з'єднання низьковольтних мікросхем ФАПЧ та високовольтних ГКН. В роботі розглянуто структуру типової типової петлі високо частотних змішаних систем ФАПЧ, які містять як повністю цифрові блоки, так і як подільники в зворотному зв'язку та фазові детектори, так і прецизійні аналогові схеми – вузли накачки заряду та ГКН. Приведені характеристики основних блоків змішаних ФАПЧ, намічені способи їх удосконалення. Показаний приклад доступної схеми високої інтеграції. Виділено основні ознаки системи ФАПЧ, що впливають на якість її роботи – час захвату, фазовий шум та паразитні частоти, рекомендовані підходи включення елементів схем для покращення цих характеристик. Наведено приклади рекомендованих конфігурацій активних фільтрів із попереднім фільтруванням, з інвертуючим і неінвертуючим підключенням підсилювачів. Визначено переваги та недоліки інвертуючої та неінвертуючої топології схем. В роботі приділено увагу вибору операційного підсилювача для максимального використання можливостей активного фільтра в структурі ФАПЧ. Визначено, що крім смуги пропускання важливим є врахування таких основних параметрів як щільність шуму напруги, струмовий шум, вхідний струм та діапазон вхідної синфазної напруги. В результаті аналізу було виявлено, що для досягнення найкращих результатів роботи ФАПЧ потрібен операційний підсилювач з низькою щільністю шуму напруги для зниження загального фазового шуму, невеликим вхідним струмом для зменшення похибки та визначеним діапазоном вхідних напруг для можливості роботи з однополярним живленням. Наведений приклад та характеристики повністю інтегрованої високоякісної системи ФАПЧ, де широко смуговий ГКН є інтегрованим безпосередньо у кристал мікросхеми.

**Ключові слова:** фазове автопідстроювання, генератор, фазовий шум, щільність шуму напруги, детектор.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Одним з основних вузлів сучасної апаратури зв'язку є система фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Зазвичай ця система використовується при створенні локальних генераторів у радіоприймачах або передавачах, крім того, її можна застосовувати для розподілу сигналу тактової частоти та зменшення його шумів, а також при створенні джерел тактового сигналу для високошвидкісних АЦП (аналого-цифрових перетворювачів). В наш час внаслідок розвитку технологій виробництва інтегральних схем зменшується напруга живлення пристроїв, зокрема схем ФАПЧ та інших вузлів обробки змішаного сигналу. Однак практичні технології створення генераторів, керованих напругою (ГКН) — основних вузлів ФАПЧ — змінюються не так швидко, як це потрібно, тому виникає дисбаланс елементів системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах авторів [1-5] розглядається сучасний стан розробки ФАПЧ, переваги та недоліки будови різних архітектур цих систем. З оглянутої літератури можна зробити висновок, що найкращі ГКН досі реалізуються здебільшого на дискретних схемах, які можуть вимагати напруги живлення до 30 В. Тому перед розробниками сучасних систем ФАПЧ або радіочастотних систем постає завдання з'єднання низьковольтних мікросхем ФАПЧ та високовольтних ГКН.

**Мета роботи** – розглянути принципи створення високоякісних систем ФАПЧ та факторів, що впливають на точність таких систем, рекомендувати способи удосконалення їх параметрів.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо структуру типової петлі ФАПЧ (рис. 1). Це система, у якій фазовий детектор керує ГКН так, щоб частота і фаза генератора точно відповідали частоті та фазі вхідного (опорного) сигналу. Система має коло зворотного зв'язку.

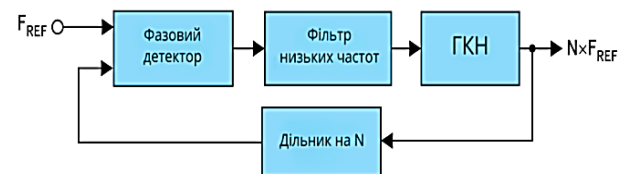


Рис. 1. Основна схема петлі ФАПЧ

Для інтеграції та згладжування позитивного або негативного сигналу помилки, а також для забезпечення стабільності петлі регулювання використовують фільтр низьких частот. Часто у зворотний зв'язок включають дільник частоти, щоб вихідна частота була кратною опорній частоті (в діапазоні реальних частот ГКН).

Оскільки ФАПЧ є системою з негативним зворотним зв'язком, сигнал помилки по частоті в стані рівноваги прагнучим до нуля. У результаті на виході ГКН буде вироблятися точна і стабільна частота. Система ФАПЧ може бути реалізована різними способами, з використанням повністю цифрових, повністю аналогових або змішаних схем, залежно від необхідного рівня шумів, розмірів і діапазону частот. Наразі високо частотні ФАПЧ містять як

повністю цифрові блоки, такі як подільники в зворотному зв'язку та фазові детектори, так і прецизійні аналогові схеми – вузли накачки заряду та ГКН. Змішані схеми ФАПЧ складаються з таких частин:

1. Фазово-частотний детектор – для формування сигналу помилки по фазі з сигналів опорної частоти і частоти зворотного зв'язку.

2. Петлевий фільтр встановлений для інтегрування імпульсів струму від схеми накачки заряду, забезпечуючи чисту напругу на керуючому вході ГКН.

3. Джерело опорної частоти. Призначене для подачі стабільної, точної частоти, під фазу якої підлаштується радіочастотний вихідний сигнал. Зазвичай її отримують за допомогою мікросхеми температурно-компенсованого кварцового генератора.

4. Схема накачки заряду призначена для перетворення сигналу помилки в послідовність позитивних або негативних імпульсів струму, пропорційних помилці по фазі.

5. ГКН. Це генератор, у якого частота на виході залежить від напруги на його керуючому вході ( $V_{tune}$ ).

ГКН має коефіцієнт перетворення, виражений в МГц/В. Основне рівняння, яке пов'язує частоту на виході ГКН з напругою на його вході, має вигляд

$$f_0 = f_c + K_V (V_{tune}), \quad (1)$$

де  $f_c$  – центральна частота коливань ГКН.

6. Дільник частоти на  $N$ . Ділить вихідну частоту так, щоб вона була рівною частоті фазового детектора або опорній частоті. Він може ділити строго на ціле число або ж на дробове. Дробовий подільник може бути реалізований шляхом перемикавання коефіцієнтів ділення в ціло-чисельному подільнику для отримання дробового середнього коефіцієнта. Наприклад, щоб отримати середній коефіцієнт ділення 4,25, потрібно три рази ділити на 4 і один раз на 5. Буде відраховано сімнадцять імпульсів і сформовано чотири імпульси, таким чином, виходить коефіцієнт ділення  $17/5 = 4,25$ .

На практиці кращі результати можуть бути досягнуті за допомогою техніки, яка використовується у шумоподібних перетворювачах високої роздільної здатності. Тому дробове ділення зазвичай реалізується з використанням сигма-дельта архітектури, перевагою якої є зменшення паразитних частотних складових. На рис. 2 показаний приклад доступної схеми високої інтеграції. Це функціональна схема мікросхеми ФАПЧ з дробовим коефіцієнтом ділення ADF4350 – ширококутового синтезатора з вбудованим генератором, керованим напругою (ГКН).

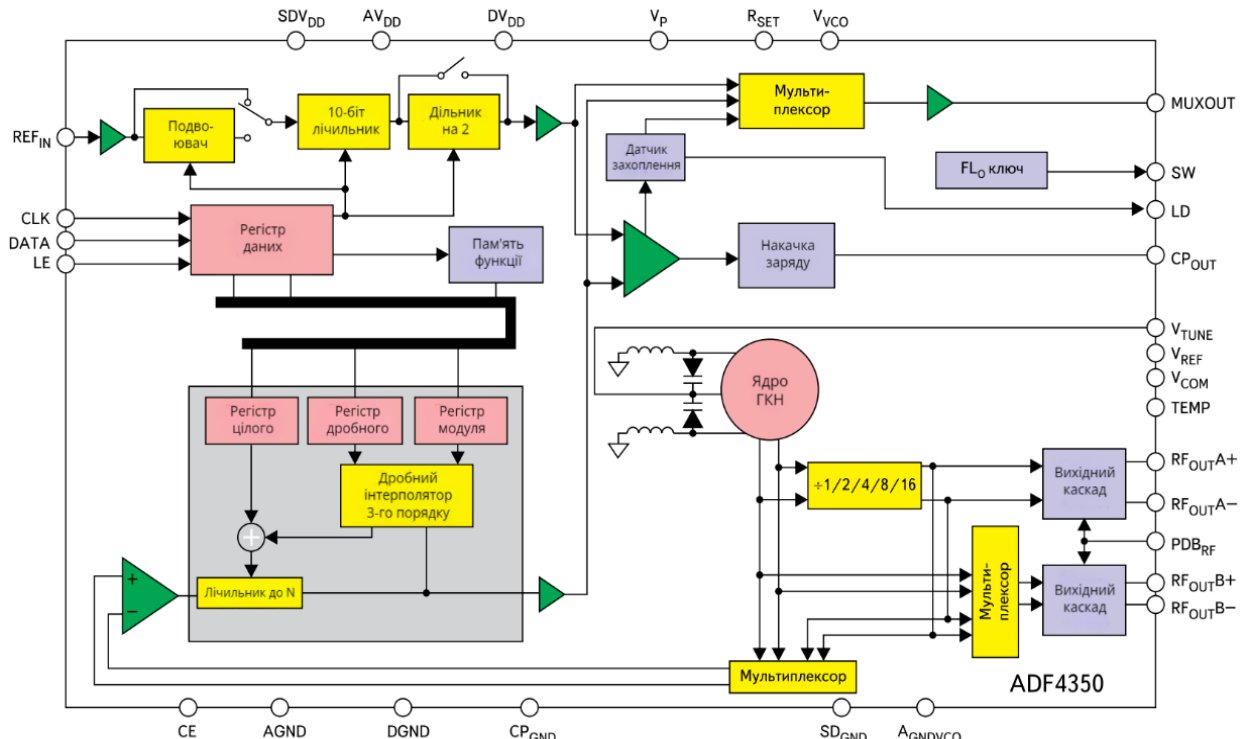


Рис. 2. Функціональна схема ширококутового синтезатора з ФАПЧ ADF4350

Діапазон вихідних частот синтезатора – від 137,5 до 4400 МГц. До основних характеристик системи ФАПЧ, що впливають на якість її роботи, можна віднести час захопту, фазовий шум та паразитні частоти. Час захопту – це час, протягом якого відновлюється ФАПЧ при стрибкоподібному переході від однієї частоти до іншої. Його можна задавати для встановлення частоти або фази. Ступінь важливості цього параметра залежить від сфери застосування.

Фазовий шум – це шум генератора або ФАПЧ, визначений для частотної області. Він являє собою середньоквадратичну суму шумів, які вносять різні компоненти ФАПЧ. У системі ФАПЧ з накачкою заряду подавляються шуми ГКН, які знаходяться в смузі петлевого фільтра. За межами смуги пропускання петлі домінують шуми ГКН. Паразитні частотні складові викликані періодичними імпульсами від схеми накачки заряду в керуючій напрузі ГКН. Вони

виглядають як зміщення частоти від несучої у фазово-частотному детекторі. У ФАПЧ з дробовим коефіцієнтом паразитні складові виникають також в результаті роботи дробового подільника.

Високоякісні ГКН залишаються одними з останніх електронних компонентів, які протистоять хвилям кремнієвої інтеграції. Лише в останні кілька років з'явилися ГКН, які повністю інтегровані в їхні радіочастотні чипсети. Однак базові станції для стільникового зв'язку, мікрохвильові системи зв'язку між двома точками, військові та аерокосмічні системи й інші складні високоякісні виробы все ще пред'являють надто високі вимоги до інтегрального кремнію, тому ці системи реалізуються на дискретних компонентах. Розглянемо причини цього явища, яких декілька.

У більшості доступних комерційних дискретних ГКН як керований елемент коливального LC-контру використовується варикап – діод зі змінною ємністю.

Якщо напруга на діоді буде змінюватися, то буде змінюватися й його ємність  $i$ , таким чином, зміниться резонансна частота коливального контуру. Будь-який шумовий сигнал на варикапі буде підсилюватися з коефіцієнтом перетворення варикапа  $K_V$ , вираженим у МГц/В, що призводить до появи фазового шуму. Щоб зберегти мінімально можливий рівень фазового шуму, необхідно робити  $K_V$  як можна найменшим. Однак, для досягнення досить великого діапазону перетворення потрібен достатньо високий  $K_V$ . Таким чином, для застосувань, де одночасно потрібні низький фазовий шум і широкий діапазон перетворення, виробники ГКН зазвичай розробляють генератори з малим коефіцієнтом перетворення і великим діапазоном вхідної напруги, щоб задовольнити ці суперечливі вимоги. Типовий діапазон зміни керуючої напруги для вузькосмугових ГКН становить від 0,5 до 4,5 В, а для широкосмугових ГКН він зазвичай лежить у межах від 1 до 14 В.

Генератор на коаксіальному резонаторі – це інший, спеціальний тип ГКН, у якому для досягнення наднизьких фазових шумів використовується дуже малий коефіцієнт перетворення і широкий діапазон керуючої напруги. Такі генератори зазвичай застосовуються у приватному мобільному радіозв'язку та наземних рухомих радіостанціях.

Більшість комерційних мікросхем синтезаторів з ФАПЧ мають вихід з накачкою заряду, максимальна напруга на якому не перевищує 5,5 В. Цього недостатньо для безпосереднього керування ГКН, який вимагає високої керуючої напруги, якщо петльовий фільтр реалізується лише на пасивних компонентах. Для отримання високих керуючих напруг необхідно використовувати активні петльові фільтри на операційних підсилювачах. Найпростіший підхід полягає в додаванні підсилювального каскаду після пасивного петльового фільтра. Однак тут є й недоліки – операційний підсилювач у інвертуючому включенні має низький вхідний імпеданс, який навантажує пасивний петльовий фільтр, що впливає на динаміку петлі.

При неінвертуючому включенні імпеданс досить високий, щоб не створювати навантаження на

фільтр, але в такому випадку підсилюється будь-який шум операційного підсилювача, який фільтр не зможе прибрати. Найкраще рішення – об'єднання підсилювального каскаду і фільтра в один активний фільтрувальний пристрій. Також тут доцільно додати попереднє фільтрування, щоб уникнути перенавантаження підсилювача короткими імпульсами зі схеми накачки заряду та обмеження діапазону вхідної напруги.

На рис. 3 показані два приклади рекомендованих конфігурацій активних фільтрів із попереднім фільтруванням, з інвертуючим і неінвертуючим підключенням підсилювача.

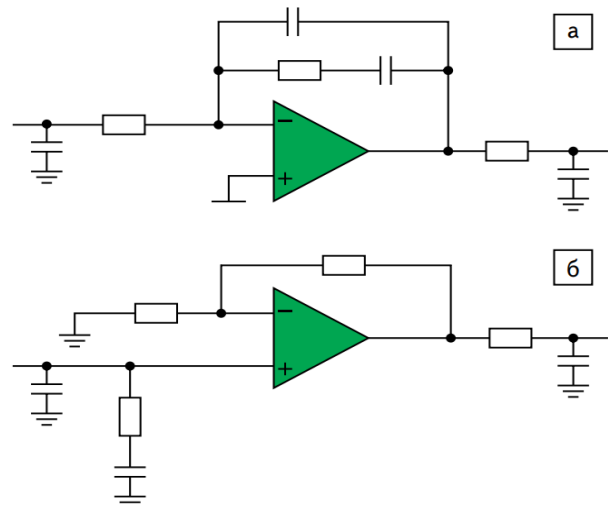


Рис. 3. Активний фільтр із попередньою фільтрацією: а – інвертуюче включення; б – неінвертуюче включення

Ці схеми підсилювачів містять інтегратори, котрі підтримують нульову розбіжність на входах фазового детектора. Напруга на виході такого підсилювача при розімкненій петлі ФАПЧ наближається до напруги одного з джерел живлення. Перевага інвертуючої топології полягає в зміщенні вихідної напруги схеми накачки заряду на фіксовану величину, зазвичай рівну половині повного діапазону напруги на виході цієї схеми ( $V_P/2$ ), що оптимально з точки зору спотворень.

У цьому випадку необхідно забезпечити чисту напругу зміщення, бажано від спеціального низькошумного лінійного регулятора та адекватний розв'язок якомога ближче до вхідних виводів операційного підсилювача. Крім того, треба мати якомога меншими номінали резисторів у ланцюзі дільника напруги для мінімізації шуму. При використанні інвертуючого підключення потрібно переконатися, що мікросхема ФАПЧ дозволяє інвертувати полярність фазово-частотного детектора. Сімейство ADF4xxx має таку можливість. Неінвертуюча конфігурація петльового фільтра не потребує спеціального зміщення, тому схема може бути більш компактною. Напруга накачки заряду замість зміщення на фіксований рівень змінюється в межах усього робочого діапазону. Тому для цього типу фільтра дуже важливо використовувати операційний підсилювач із діапазоном вхідних напруг, що охоплює весь діапазон живлення.

Вибір операційного підсилювача — це ключовий момент для максимального використання можливостей активного фільтра. Окрім смуги пропускання тут необхідно враховувати такі основні параметри: щільність шуму напруги (в  $\text{nV}/\sqrt{\text{Гц}}$ ), струмовий шум (в  $\text{nA}/\sqrt{\text{Гц}}$ ), вхідний струм та діапазон вхідної синфазної напруги.

Безпосередньо впливає на частоту та фазу генерації вихідна напруга фільтра. Тому щільність шуму напруги операційного підсилювача дозволяє оцінити, який фазовий шум внесе активний фільтр.

Шум підсилювача додається як у смугі пропускання петлі ФАПЧ, так і поза нею. Його вплив найбільш помітний на частоті зрізу петлевого фільтра, особливо для підсилювачів з високою щільністю шуму напруги. Тому для досягнення цілей підсилювача і високовольтного ГКН — забезпечення мінімального фазового шуму, важливо знижувати шум підсилювача. У якійсній схемі він не повинен перевищувати величини  $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Гц}}$ . Струмовий шум, як правило, набагато менший у порівнянні з імпульсами струму помилки, тому його вплив значно слабший, ніж вплив шуму напруги.

Значну похибку у вихідний спектр ФАПЧ можуть вносити операційні підсилювачі з великим струмом зміщення порівняно з вихідним струмом фазово-частотного детектора. Щоб зберегти стабільну керуючу напругу ГКН та ФАПЧ у стані захвату, схема накачування заряду повинна компенсувати витік струму через вхід операційного підсилювача на кожному циклі роботи фазово-частотного детектора. Це призводить до модуляції керуючої напруги ГКН ( $V_{\text{TUNE}}$ ) з частотою роботи детектора і викликає відхилення несучої частоти на цю величину. Збільшення вхідного струму зміщення підвищує модуляцію  $V_{\text{TUNE}}$  і збільшує амплітуду похибки.

Ще одним важливим параметром операційного підсилювача є діапазон синфазної напруги, або діапазон вхідної напруги. Часто на нього не звертають уваги, але він може викликати серйозні проблеми на завершальному етапі розробки.

Цей параметр визначає різницю між максимальною і мінімальною напругою на вхідних контактах і позитивним та негативним живленням відповідно. Старі операційні підсилювачі, що працювали при напрузі живлення  $\pm 15 \text{ В}$ , мали типовий діапазон вхідного синфазного сигналу  $\pm 12 \text{ В}$ . Більш пізні повільні додаткові вхідні ррр-каскади розширили діапазон синфазного сигналу до негативної напруги живлення у схемі. Незважаючи на те, що будь-який операційний підсилювач може працювати з напругою  $0 \text{ В}$  як негативною напругою живлення, необхідно обов'язково контролювати різницю між сигналом і напругами живлення. Наприклад, популярний підсилювач OP27 має діапазон вхідного сигналу  $\pm 12,3 \text{ В}$  при напрузі живлення  $\pm 15 \text{ В}$ . Це означає, що напруги на входах мікросхеми не повинні підходити ближче до напруги живлення, ніж на  $2,7 \text{ В}$ . Таке обмеження на нижній стороні діапазону робить цей операційний підсилювач непридатним для роботи з великим розмахом сигналу на вході при однополярному живленні.

Можливість використання двополярного живлення значно розширює вибір операційних підсилювачів і спрощує рішення щодо вхідного струму. Якщо потрібне однополярне живлення, слід використовувати операційні підсилювачі з діапазоном вхідних напруг "від живлення до живлення", але більшість з них мають високий шум напруги. Отже, для досягнення найкращих результатів потрібен операційний підсилювач з низькою щільністю шуму напруги для зниження фазового шуму, невеликим вхідним струмом для зменшення похибки та діапазоном вхідних напруг "від живлення до живлення" для можливості роботи з однополярним живленням. Незважаючи на те, що активний фільтр додає шуми у ФАПЧ, у деяких застосуваннях його буферні властивості надають переваги порівняно з пасивним фільтром. Наприклад, якщо вхід ГКН має великий струм витоку, що спричиняє значну похибку, для її зменшення можна використовувати операційний підсилювач. Вихід операційного підсилювача з низьким імпедансом легко компенсує струм витоку входу ГКН. За нашого часу з'явилася альтернатива використанню активних фільтрів з високовольтними ГКН — це використання повністю інтегрованих високоякісних систем ФАПЧ [6]. У цьому випадку ГКН є інтегрованим безпосередньо у кристал. Компроміс між широким діапазоном перебудови та низьким фазовим шумом, що неминуче виникає, тут вирішується застосуванням широко-смугового ГКН. У системі ФАПЧ з накачкою заряду пригнічуються ті шуми ГКН, які знаходяться в смугі петлевого фільтра, а за межами смуги пропускання петлі будуть домінувати шуми ГКН.

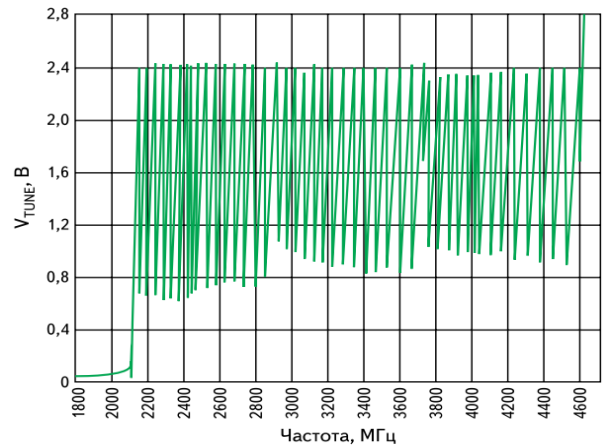


Рис. 4. Графік, що показує зв'язок керуючої напруги ГКН ADF4350 та частоти

В якості прикладу може виступати пристрій ADF4350, де на одному кристалі розміщено три окремих ГКН, кожен з яких має 16 перекриваючих піддіапазонів, що в результаті дає 48 піддіапазонів (рис. 4). При кожній зміні частоти відбувається автоматичне калібрування для вибору відповідного піддіапазону ГКН. Також вбудовано програмований вихідний дільник, який забезпечує повне перекриття діапазону частот від  $137,5 \text{ МГц}$  до частоти  $4,4 \text{ ГГц}$ . Дослідження показують, що якісні показники цього пристрою наближаються до рівня дискретних рішень за величиною фазового шуму  $114 \text{ дБн/Гц}$  при

відхиленні частоти 100 кГц і величини фазового шуму 134 дБн/Гц при відхиленні частоти 1 МГц.

### Висновки

1. З аналізу літературних джерел авторами виявлено, що перед розробниками сучасних систем ФАПЧ або радіочастотних систем постає завдання з'єднання низьковольтних мікросхем ФАПЧ та високовольтних ГКН.

2. Виділено основні ознаки систем ФАПЧ, що впливають на якість її роботи – час захвату, фазовий шум та паразитні частоти, рекомендовані підходи включення елементів схем для покращення цих характеристик.

3. Визначено, що крім смуги пропускання важливим для вдосконалення ФАПЧ є врахування таких основних параметрів як щільність шуму на

пруги, струмовий шум, вхідний струм та діапазон вхідної синфазної напруги.

4. В результаті аналізу було виявлено, що для досягнення найкращих результатів роботи ФАПЧ в схемі активного фільтра потрібен операційний підсилювач з низькою щільністю шуму напруги для зниження фазового шуму, невеликим вхідним струмом для зменшення похибки та визначеним діапазоном вхідних напруг для можливості роботи з однополярним живленням.

5. Наведений приклад повністю інтегрованої системи ФАПЧ, де широкосмуговий ГКН є інтегрованим безпосередньо у кристал мікросхеми, який підходить для реалізації підвищення якісних характеристик системи. Дослідження показали, що якісні показники цього пристрою наближаються до рівня дискретних рішень за величиною фазового шуму.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhibin Luo Jicheng Ding and Lin Zhao Adaptive Gain Control Method of a Phase-Locked Loop for GNSS Carrier Signal Tracking [Електронний ресурс] / Zhibin Luo Jicheng Ding and Lin Zhao // Hindawi. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2018/6841285/>
2. Collins I. Phase-Locked Loop (PLL) Fundamentals [Електронний ресурс] / Ian Collins // AnalogDialogue – 2018. – URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-52/number-3/phase-locked-loop-pll-fundamentals.pdf>
3. Bakic D., Wu J. Pll For Mmwave 5g / Daniel Bakic, Jinzhuo Wu // Lund UniversityLund University Publications. – Department Of Electrical And Information Technology Lund University – 2020. – P. 5-10.
4. Jonsson F. Design and Calibration of Integrated PLL Frequency Synthesizers / Fredrik Jonsson // Digitala Vetenskapliga Arkivet. – Royal Institute of Technology – 2008. – P. 84-87.
5. Mentze E. Understanding the basics of PLL frequency synthesis [Електронний ресурс] / Erik Mentze // PLANET ANALOG. – 2010. – URL: <https://www.planetanalog.com/understanding-the-basics-of-pll-frequency-synthesis/>
6. Царьков Р. М., Єрмілова Н.В. Підвищення точності функціонування фазового автопідстроювання за ознаковими характеристиками сигналів / Р.М. Царьков, Н.В. Єрмілова // Системи управління, навігації та зв'язку. Випуск 4 (70) – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. – С. 162 – 165. – Режим доступу до ресурсу: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/12048>
7. Basab Bijoy Purkayastha. A Digital Phase Locked Loop based Signal and Symbol Recovery System for Wireless Channel / Basab Bijoy Purkayastha, Kandarpa Kumar Sarma. — New Delhi: Springer, 2015. — 254 с.
8. Best R. E. Phase-locked loops: design, simulation, and applications (professional engineering) / Roland E. Best. — New York : McGraw-Hill Companies Inc., 2003. — 436 с.
9. Полікарівських О. І. Фазове коло як основа класифікації прямих синтезаторів частоти / О. І. Полікарівських // Вісник Хмельницького національного університету. — 2014. — № 5. — С. 133—139.

Received (Надійшла) 22.12.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.02.2025

### The usage of high-voltage VCG for increasing the accuracy of phase auto-adjustment systems of frequency

R. Tsarkov, R. Iermilov, O. Shefer

**Abstract.** Problems of phase-locked-frequency (PLL) systems are considered in the work, which are one of the main components of modern communication equipment. From the analysis of recent research and publications by the authors, it was found that the highest quality voltage-controlled generators (VCG) are still mostly implemented on discrete circuits that can require a supply voltage of up to 30 V, so the developers of modern PLL systems or radio frequency systems face the task of connecting low-voltage microcircuits PLL and high-voltage VCG. This work examines the structure of a typical loop of high-frequency mixed PLL systems, which contain both fully digital units, such as feedback dividers and phase detectors, as well as precision analog circuits - charge pump nodes and VCG. The characteristics of the main blocks of mixed PLLs, and methods of their improvement are outlined. An example of an available high-integration scheme is shown. The main features of the PLL system, which affect the quality of its operation, are highlighted - capture time, phase noise and parasitic frequencies, and approaches for including circuit elements to improve these characteristics are recommended. Examples of recommended active filter configurations with pre-filtering, inverting and non-inverting amplifier connections are given. The advantages and disadvantages of inverting and non-inverting scheme topology are determined. In the work, attention is paid to the selection of the operational amplifier for the maximum use of the capabilities of the active filter in the structure of the PLL. It was determined that, in addition to the bandwidth, it is important to take into account such basic parameters as voltage noise density, current noise, input current and the range of input common-mode voltage. As a result of the analysis, it was found that to achieve the best performance of the PLL, an operational amplifier with a low voltage noise density to reduce phase noise, a small input current to reduce error and a defined range of input voltages to be able to operate with a unipolar supply is required. An example and characteristics of a fully integrated high-quality PLL system is given, where the wideband VCG is integrated directly into the microcircuit crystal.

**Keywords:** phase self-adjustment, generator, phase noise, voltage noise density, detector.