

Р. М. Царьков, Н. В. Єрмілова

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

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЗА ОЗНАКОВИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СИГНАЛІВ

**Анотація.** З аналізу останніх досліджень і публікацій авторами виявлено, що усі практичні реалізації синтезаторів частоти з фазовим автопідстроюванням (ФАПЧ) страждають від небажаних частотних компонентів, і оскільки ці компоненти значною мірою впливають на продуктивність системи, постає задача їх передбачення та мінімізації. У статті розглядається принципи роботи дільника опорної частоти  $Q$ , дільника у петлі зворотного зв'язку  $P$  та дільника вихідної частоти  $N$  на ФАПЧ, їх вплив на роботу системи. Представлена блок-схема ФАПЧ з однією вихідною частотою. Продемонстрований псевдокод алгоритму пошуку найоптимальніших характеристик системи. Проілюстрована робота алгоритму на прикладі синтезування вихідної частоти 50 МГц за опорним сигналом, в якості котрого використана звичайна частота відеосигналу. Детально розглянуті основні параметри системи, а саме споживання, частота запуску та встановлення, тремтіння, фазовий шум, розглянуті взаємозв'язки їх меж. Визначено, що споживання визначається частотою генератора, керованою напругою (ГКН), струмом підкачування заряду і параметрами дільників частоти. У більшості ГКН для досягнення вищих частот потрібні великі струми, це означає, що із зростанням частоти збільшується енергоспоживання. Час запуску та встановлення для ФАПЧ визначається власною частотою петлі, цей параметр вважають показником швидкості зміни частоти ФАПЧ. Встановлено, що для мінімізації часу запуску та встановлення необхідно збільшити коефіцієнт підсилення ГКН та струм підкачування, а коефіцієнт поділу в контурі зворотного зв'язку та ємність фільтра, навпаки, встановити у мінімальне значення. Також в роботі визначено, що чим нижче коефіцієнт підсилення ГКН, тим менш чутлива схема ФАПЧ до дрейфу напруги фільтра. Авторами виявлено, що для зменшення фазового шуму зручно скористатися вихідним коефіцієнтом поділу дільника  $N$ . Встановлено, що при використанні малошумного вихідного дільника фазовий шум можна зменшити за рахунок збільшення частоти роботи ГКН і збільшення коефіцієнта поділу вихідної частоти  $N$ . Наведено приклади використання конфігурацій.

**Ключові слова:** фазове автопідстроювання, генератор, фазовий шум, оптимізація.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Синтезатори частоти з її фазовим автопідстроюванням (ФАПЧ) завдяки своїй здатності генерувати стабільну та програмовану вихідну частоту є в більшості сучасних систем телекомунікації. Усі практичні реалізації ФАПЧ страждають від небажаних частотних компонентів, таких як фазовий шум і паразитні тони, і оскільки ці компоненти впливають на продуктивність системи, їх необхідно передбачити та мінімізувати.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах авторів [1-5] піднімаються питання причин погіршення якості вихідного сигналу та приводяться методи рішення цих проблем. Області роботи варіюються від загальних моделей до конкретних рішень для покращення сигналу при передачі даних через систему 5G.

З аналізу робіт можливо зробити висновок, що підвищення точності функціонування фазового автопідстроювання було й буде актуальним до поки є потреба у передачі даних по телекомунікаційним системам.

**Мета роботи** – огляд методів підвищення точності функціонування ФАПЧ в телекомунікаційних системах за допомогою оптимізації їх параметрів.

### Основна частина

Призначення синтезатора частоти полягає в генерації потрібної вихідної частоти на основі заданої частоти опорного сигналу. При цьому зв'язок між вхідною і необхідною вихідною частотою не завжди

очевидний. Від коефіцієнтів поділу в петлі ФАПЧ залежить рівень шуму та рівень споживання схеми. У деяких випадках питання вибору оптимальних значень є одним із найважливіших, особливо коли наявне обладнання вже не відповідає новим вимогам.

Потрібно відзначити, що кожен елемент ФАПЧ має непрямий вплив на якість вихідного сигналу, тож буде логічним зауважити, що без оптимізації системи не можливо отримати якомога точніший вихідний сигнал.

Розглянемо типову архітектуру ФАПЧ з одною вихідною частотою та принципи її роботи, та оптимізації нижче.

Синтезатор частоти генерує вихідний сигнал на основі частоти опорного сигналу:

$$f_{\text{вих}} = k * f_{\text{опорн}}, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт поділу частоти (нормований множник), у цій статті буде розглядатися лише цілочислові значення  $k$ .

Коефіцієнт поділу  $k$  формується за допомогою декількох дільників, встановлених у схемі ФАПЧ (рис. 1). У загальному випадку використовуються три блоки дільників: дільник опорної частоти ( $Q$ ), дільник у петлі зворотного зв'язку ( $P$ ) та дільник вихідної частоти ( $N$ ). Коефіцієнт  $k$  для цього типу синтезатора частоти визначається так:

$$k = \frac{P}{QN}, \quad (2)$$

З рівнянь (1) і (2) отримуємо співвідношення між вхідною та вихідною частотами:

$$f_{\text{вих}} = \frac{P}{QN} f_{\text{опорн}} \quad (3)$$

Показана на рис. 1 блок-схема ФАПЧ спрощується, якщо коефіцієнти  $N$  чи  $Q$  рівні одиниці. Якщо ж обидва коефіцієнти будуть рівними одиниці, синтезатор може генерувати тільки частоти, кратні опорної.

В такому випадку значення  $P$  визначається простим арифметичним співвідношенням. Якщо один з коефіцієнтів  $Q$  або  $N$  дорівнює одиниці, то для синтезу бажаної частоти потрібно підібрати відповідну конфігурацію, що визначається співвідношенням  $Q/P$  чи  $N/P$ .



Рис. 1. Блок-схема ФАПЧ (ГКН – генератор, керований напругою)

Перепишемо формулу (3) так, щоб усі відомі величини були у правій частині рівняння, а невідомі – у лівій:

$$\frac{P}{QN} = \frac{f_{\text{вих}}}{f_{\text{опорн}}} \quad (4)$$

Отже, ми отримали рівняння з трьома невідомими. Зазвичай рішення знаходиться шляхом перебору різних поєднань  $P$ ,  $Q$  та  $N$ , які дають необхідну частоту. Для відображення роботи цього алгоритму перебору нижче представлений псевдокод:

```

FOR n = Nmin; n < Nmax; n++
  FOR q = Qmin; q < Qmax; q++
    IF p / (q * n) == fout / fref THEN
      CALL: Save (p, q, n)
    ELSE
      countinue
  ENDFOR
ENDFOR

```

Цей псевдокод відображає лише математичну реалізацію алгоритму без урахування додаткових вимог, що дозволяють отримати лише здійсненні на практиці конфігурації.

Для ілюстрації роботи алгоритму розглянемо приклад. Нехай слід синтезувати вихідну частоту 50 МГц за опорним сигналом 14,3181818 МГц (звичайна частота відеосигналу). Припустимо, ГКН має частотний діапазон 100...400 МГц. Використовуючи алгоритм пошуку, отримуємо результати, подані в табл. 1. Це список усіх можливих вимог конфігурацій, які будуть задовольняти дану систему. Тепер із них необхідно вибрати кращий варіант.

Використання всіх трьох дільників частоти дозволяє задавати вихідну частоту контуру ФАПЧ програмно. З іншого боку, в цьому випадку складніше знаходити потрібні значення  $P$ ,  $Q$  і  $N$  – одна й та сама вихідна частота може бути отримана за допомогою різних поєднань. При цьому інші характеристики контуру ФАПЧ, такі як споживання, час запуску, тремтіння і фазовий шум, будуть сильно відрзнятися.

Варто відзначити, що не всі ФАПЧ мають доступ до дільників  $Q$ ,  $P$ ,  $N$ . В деяких випадках для збільшення продуктивності системи кращим рішенням буде заміна компонентів кола з більш доречною до ситуації архітектурою.

Коли список всіх конфігурацій, які відповідають вимогам частоти, визначений, слід приступити до вибору найоптимальнішої. Універсальної оптимальної конфігурації немає, вона залежить від додатку. Для віддаленої станції моніторингу, наприклад, може знадобитися швидкий запуск, але не потрібна висока точність.

Для протоколу зв'язку, навпаки, не має значення час запуску та енергоспоживання, проте потрібне джерело частоти з дуже низьким тремтінням. У випадках, коли під час збору даних важливим є лише швидке пробудження, а під час передачі даних необхідна висока точність, можуть мати значення обидві ці характеристики. Застосування програмованих ФАПЧ дозволяє реалізувати будь-які вимоги та достатньо правильно вибрати конфігурацію.

Розглянемо деякі загальні параметри ФАПЧ, оптимізовані для різних програм. Список цих параметрів наведено в таблиці 2. Потрібно зауважити, що не у всіх програмованих ФАПЧ є можливість доступу до всіх параметрів цього списку.

- Споживання визначається частотою ГКН, струмом підкачування заряду і параметрами дільників частоти. У більшості ГКН для досягнення вищих частот потрібні великі струми. Це означає, що із зростанням частоти збільшується енергоспоживання. Генератор підкачування розряджається раз на цикл фазового детектора (ФД). При великому струмі підкачування заряду збільшується енергія, що витрачається за період ФД. Найбільше споживання припадає на початок такту. При великих значеннях коефіцієнтів розподілу потрібно більше дільників, що також призводить до збільшення споживаної потужності.

Таблиця 1 – Результати обрахунків

N	$F_{\text{опори}}$ , МГц	$f_{\text{ГКН}}$ , МГц	$F_{\text{вих}}$ , МГц	$f_{\text{ФД}}$ , МГц	Q	P
2	14,318..	100	50	0,227	63	440
3	14,318..	150	50	0,682	21	220
4	14,318..	200	50	0,227	63	880
5	14,318..	250	50	0,227	63	1100
6	14,318..	300	50	0,682	21	440
7	14,318..	350	50	1,591	9	220
8	14,318..	400	50	0,227	63	1760

Таблиця 2 – Список параметрів та способів їх оптимізації

Параметр	Ключові параметри системи	Оптимізація
Споживання	Частота ГКН ( $f_{\text{ГКН}}$ ) Частота фазового детектора ( $f_{\text{ФД}}$ ) Тон генератора підкачки заряду ( $I_{\text{ГПЗ}}$ ) Коефіцієнти ділення (P, Q, N)	Мінімізувати $f_{\text{ГКН}}$ Мінімізувати $f_{\text{ФД}}$ Мінімізувати $I_{\text{ГПЗ}}$ Мінімізувати P, Q, N
Час вмикання та час установки	Частота фазового детектора ( $f_{\text{ФД}}$ ) Струм генератора підкачки заряду ( $I_{\text{ГПЗ}}$ ) Ємність фільтра (C) Коефіцієнт підсилення ГКН ( $K_{\text{ГКН}}$ )	Максимізувати $f_{\text{ФД}}$ Максимізувати $I_{\text{ГПЗ}}$ Мінімізувати C Максимізувати $K_{\text{ГКН}}$
Тремтіння (між циклами)	Частота фазового детектора ( $f_{\text{ФД}}$ ) Ємність фільтра (C) Коефіцієнт підсилення ГКН ( $K_{\text{ГКН}}$ )	Максимізувати $f_{\text{ФД}}$ Максимізувати C Мінімізувати $K_{\text{ГКН}}$
Фазовий шум	Полоса частот при замкнутому контурі зворотного зв'язку Фазовий шум елементів ФАПЧ Коефіцієнт ділення вихідного сигналу (N)	Максимізувати $f_{\text{ГКН}}$ Максимізувати N Використовувати полосу для зниження шуму опорного резонатора та ГКН

• Час запуску та встановлення для ФАПЧ визначається власною частотою петлі. Цей параметр можна вважати показником швидкості зміни частоти ФАПЧ. Він характеризує, як швидко може змінюватися частота вихідного сигналу ФАПЧ. Час запуску пропорційний підсиленню ГКН і струму підкачування заряду і обернено пропорційний ємності фільтра та коефіцієнту поділу в контурі зворотного зв'язку. Таким чином, для мінімізації часу запуску та встановлення необхідно збільшити коефіцієнт підсилення ГКН та струм підкачування, а коефіцієнт поділу в контурі зворотного зв'язку та ємність фільтра, навпаки, встановити у мінімальне значення.

• Основний вплив на тремтіння системи здійснюють частота фазового детектора та коефіцієнт підсилення ГКН. При вищій частоті ФД напруга контуру ФАПЧ оновлюється з вищою швидкістю. Це запобігає виникненню дрейфу напруги в ланцюзі. При використанні фільтра з великою ємністю рівень тремтіння напруги за період ФД стає мінімальним. Оскільки коефіцієнт підсилення ГКН визначає, наскільки сильно змінюється напруга вихідного сигналу по відношенню до зміни напруги на фільтрі, то чим нижче коефіцієнт підсилення

ГКН, тим менш чутлива схема ФАПЧ до дрейфу напруги фільтра.

• Зазвичай фазовий шум, що вноситься опорним резонатором, зменшується шляхом встановлення ФАПЧ близько до нижньої межі частот. Фазові шуми, що вносяться ГКН, навпаки, пригнічуються шляхом встановлення частоти ФАПЧ ближче до верхньої межі смуги. Для зменшення фазового шуму зручно скористатися вихідним коефіцієнтом поділу N. Фазовий шум ділиться пропорційно до коефіцієнта вихідного дільника. Якщо використовується малошумний вихідний дільник, фазовий шум можна зменшити за рахунок збільшення частоти роботи ГКН і збільшення коефіцієнта поділу вихідної частоти N.

Якщо побудова системи з низьким енергоспоживанням є головним завданням проектування, слід знизити частоту ГКН і значення коефіцієнтів дільників. Тому поєднання  $N = 3$ ,  $Q = 21$ ,  $P = 220$  (табл. 1) є найкращим вибором. ГКН працює на низьких частотах, коефіцієнти P та Q мають невисокі значення, а частота ФД має прийнятне значення.

Якщо ж потрібно розробити пристрій з мінімальним часом вмикання та встановлення, то найбільш відповідною є конфігурація  $N = 7$ ,  $Q = 9$ ,  $P = 220$ . За

рахунок високої частоти ФД забезпечується досить висока частота оновлення напруги фільтра.

Щоб отримати схему з низьким тремтінням, оптимальним буде використання набору коефіцієнтів  $N = 7$ ,  $Q = 9$ ,  $P = 220$ . У цій конфігурації частота ФД більш ніж удвічі вища, ніж за інших. В результаті частота відновлення напруги фільтра підвищується. Відповідно, схема має найменше тремтіння. Відмінність оптимізації за тремтінням від оптимізації за часом запуску полягає в тому, що для отримання малощумливої схеми повинні бути обрані малі значення ємності та коефіцієнта підсилення ГКН.

## Висновки

1. Проведений аналіз джерел показує, що пошук методів підвищення точності для фазового автопідстроювання був і залишається актуальним нині та у майбутньому.

2. Проаналізований вплив дільників опорної частоти  $Q$ , зворотного зв'язку  $P$  та вихідної частоти  $N$  на ФАПЧ, їх роль у процесі роботи системи. Наведений псевдокод алгоритму пошуку дільників при визначених параметрах опорної та вихідної частоти. Приведений приклад, в якому потрібно знайти оптимальну конфігурацію при вихідній частоті 50 МГц, опорним сигналом 14,3181818 МГц, також припускається, що ГКН має частотний діапазон 100...400 МГц.

Результати приведені в табл. 1.

3. Більш детально розглянуті загальні параметри ФАПЧ, а саме споживання, час вмикання та установки, тремтіння та фаховий шум. Розглянуті взаємозв'язки їх меж. Для кожного з параметрів описано спосіб його оптимізації за рахунок інших параметрів системи. Наведено приклади по одному з параметрів, які підходять для реалізації конкретних цілей.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bakic D., Wu J. Pll For Mmwave 5g / Daniel Bakic, Jinzhao Wu // Lund UniversityLund University Publications. – Department Of Electrical And Information Technology Lund University – 2020. – P. 5-10.
2. Collins I. Phase-Locked Loop (PLL) Fundamentals [Електронний ресурс] / Ian Collins // AnalogDialogue – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-52/number-3/phase-locked-loop-pll-fundamentals.pdf>
3. Jonsson F. Design and Calibration of Integrated PLL Frequency Synthesizers / Fredrik Jonsson // Digitala Vetenskapliga Arkivet. – Royal Institute of Technology – 2008. – P. 84-87.
4. 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/>
5. Mentze E. Understanding the basics of PLL frequency synthesis [Електронний ресурс] / Erik Mentze // PLANET ANALOG. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.planetanalog.com/understanding-the-basics-of-pll-frequency-synthesis/>

Received (Надійшла) 26.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

## Increasing the accuracy of functioning of phase-locked loop according to the indicative characteristics of signals

R. Tsarkov, N.Yermilova

**Abstract.** From the analysis of recent research and publications by the authors, it is found that all practical implementations of phase-locked frequency synthesizers (PLLs) suffer from unwanted frequency components, and since these components significantly affect the performance of the system, the task of their prediction and minimization arises. The article considers the principles of operation of the reference frequency divider  $Q$ , the divider in the feedback loop  $P$  and the output frequency divider  $N$  on the PLL, their influence on the system operation. A block diagram of a PLL with one output frequency is presented. The pseudocode of the algorithm for finding the most optimal system characteristics is demonstrated. The work of the algorithm is illustrated on the example of synthesizing the output frequency of 50 MHz based on the reference signal, which uses the usual frequency of the video signal. The main parameters of the system are considered in detail, namely consumption, startup and settling frequency, jitter, phase noise, and the relationships between their limits are considered. It was determined that the consumption is determined by the frequency of the voltage-controlled oscillator (VCO), the charge pumping current and the parameters of the frequency dividers. In most VCOs, high currents are required to achieve higher frequencies, which means that power consumption increases with increasing frequency. The startup and settling time for a PLL is determined by the natural frequency of the loop, this parameter is considered an indicator of the rate of change of the PLL frequency. It was established that in order to minimize the time of startup and settling, it is necessary to increase the gain factor of the VCO and the pumping current, and the separation factor in the feedback circuit and the capacity of the filter, on the contrary, should be set to the minimum value. It is also determined in the work that the lower the gain factor of the VCO, the less sensitive the PLL circuit is to the drift of the filter voltage. The authors found that it is convenient to use the original division factor of the divider  $N$  to reduce phase noise. It was established that when using a low-noise output divider, the phase noise can be reduced by increasing the frequency of operation of the VCO and increasing the division coefficient of the output frequency  $N$ . Examples of the use of configurations are given.

**Keywords:** phase-locked loop, oscillator, phase noise, optimization