

## АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ РІШЕНЬ ЗАСТОСОВАНИХ В СИСТЕМАХ ФАЗОВОЇ АВТОПІДСТРОЙКИ ЧАСТОТИ (ФАПЧ) СУЧАСНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ

У статті представлено застосування системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) в сучасних радіотехнічних пристроях. Розглянуто принцип роботи і основні властивості системи ФАПЧ. Деталізовано показано передавальні функції системи ФАПЧ на основі сучасної елементної бази. Введено поняття статичної та астатичної помилки слідкуючої системи.

*Лебедь Є.В. Анализ функциональных решений примененных в системах фазовой автоподстройки частоты современных радиотехнических устройств. В статье представлено применение системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) в современных радиотехнических устройствах. Рассмотрен принцип работы и основные свойства системы ФАПЧ. Детализированно показаны передаточные функции системы ФАПЧ на основе современной элементной базы. Введено понятие статичной и астатической ошибки следящей системы.*

*E. Lebed Analysis functional decisions of applied is in systems of phase locked loops of modern radiotechnical devices. In the article application of the system of Phase Locked Loops of frequency is presented in modern radiotechnical devices. Principle of work and basic properties of the system PLL are considered. The transmission functions of the system PLL are gone into detail shown on the basis of modern element base. The concept of static and astatic error of the tracker system is entered.*

**Ключові слова:** система фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ, астатизм).

### Вступ

Система ФАПЧ (система фазового автопідстроювання частоти є системою автоматичного регулювання (слідкуючою системою), частота налаштування якої визначається частотою керуючого сигналу, а сигналом розузгодження є різниця фаз керуючого сигналу і сигналу зворотнього зв'язку. У зв'язку з тим, що налаштування здійснюється по різниці фаз, система є астатичною по відношенню до частоти: в сталому режимі частота налаштування дорівнює частоті керуючого сигналу. За певних умов система ФАПЧ може бути астатичною і по фазі. Разом з основною властивістю автопідстроювання, система ФАПЧ має властивість фільтрації і функціонує, незалежно від функціонального призначення, як слідкуючий поліноміальний фільтр. Система ФАПЧ є системою з багатофункціональними можливостями і використовується для частотної модуляції і демодуляції, частотної фільтрації (у тому числі, фільтрації модулюючої функції частоти), множення і перетворення частоти, виділення опорного колювання для когерентного детектування та ін. Система ФАПЧ може бути аналоговою, імпульсною, цифровою або комбінованою (аналого-імпульсною, імпульсно-цифровою і так далі). У аналоговій системі ФАПЧ діє безперервний сигнал, що характеризується миттєвими значеннями параметрів в кожен момент часу. У імпульсній системі параметри сигналу характеризуються дискретними значеннями, які можуть бути миттєвими або інтервальними. Імпульсним сигналом з миттєвими відліками є, наприклад, прямокутний сигнал (типу „меандр”) керованого генератора, що характеризується миттєвими значеннями частоти в точках зміни рівнів. Імпульсним з інтервальними відліками є, наприклад, сигнал імпульсного фазового детектора (ФД), тривалість імпульсів якого визначається вимірюваним фазовим інтервалом. Інтервальний імпульсний сигнал може бути причиною тимчасових і інших видів спотворень. У цифровій системі ФАПЧ використовується, відповідно, цифровий сигнал, що є дискретним потоком даних, який визначається значеннями квантованих відліків аналогового сигналу і виражених цифровим кодом. Квантовані відліки цифрового сигналу також можуть бути як миттєвими, так і інтервальними.

Дані системи ФАПЧ знаходять широке застосування в мікроелектронних компонентах, виготовлених відомими фірмами. Так, наприклад, фірма Analog Devices використовує систему ФАПЧ :

– у одно - і двоканальних синтезаторах ADF410x/1x/5x і ADF420x/1x/5x типів „Integer-N” і „Fractional-N” з програмованими (перебудовуваними) частотами до 3,7 ГГц [4];

– для множення тактової частоти в ЦАП серії TxDAC+ AD9751/3/5 (300 МГц), AD9772/4 (400/128 МГц), в цифрових (DDS) синтезаторах-модуляторах AD9852/4 (300 МГц) і модуляторах AD9853/6 (168/200 МГц);

– для множення частоти в  $k = 2N/n$  раз, де  $n$  – ціле число з ряду 1, 2, ...  $2N/2,5$ , – з DDS - синтезаторами AD9850/1/2/4 в якості дільників частоти в ланцюзі зворотного зв'язку (наприклад, при  $N = 48$  і максимальній частоті після множення 300 МГц при використанні AD9852);

– в якості частотного модулятора, поєднаного з синтезатором частот, і частотного демодулятора, поєднаного з перетворювачем частоти, – в мікросхемі приймача AD6411 системи DECT;

– в якості квадратурного модулятора, поєднаного з квадратурним перетворювачем частоти, – в мікросхемі приймача AD6523, спільно з синтезатором AD6524 (також на базі ФАПЧ), – в системах GSM і DCS [5];

– в якості джерела опорної частоти з квадратурним виходом для демодулятора в мікросхемі приймача AD6432 системи GSM.

Фірма Texas Instruments використовує систему:

– у двох – і трьохканальних синтезаторах частот TRF2020 – до 0,25, 0,25 і 1,2 ГГц, TRF2050 – до 0,25 і 1,2 ГГц, TRF2052 – до 0,15 і 2,0 МГц і TRF3040, модулятором, що являється також, – до 0,2 і 2,0 ГГц;

– для синтезу сигналів опорної частоти для модуляторів в мікросхемах TRF3040 і TRF3520;

– для множення тактової частоти в цифрових сигнальних процесорах TMS320C54x, TMS320C62x, TMS320C67x і TMS320VC33.

Фірма Motorola (Semiconductor Product Sector) використовує систему в двоканальних синтезаторах частот MC145181 (до 550 і 60 МГц), MC145225 (до 1,2 і 0,55 ГГц), MC145230 (до 2,2 і 0,55 ГГц) та ін., призначених для апаратури радіозв'язку різних систем.

Фірма Gran – Jansen AS (Норвегія) використовує систему ФАПЧ в приймачі GJRF400 (GJRF10), працюючому в діапазоні частот 300-500 МГц, для синтезу опорного коливання і для аналогової частотної модуляції [6].

**Метою роботи** є дослідження функціональних рішень застосованих в системах фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) сучасних радіотехнічних пристроїв.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні питання:

– дослідити систему фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ).

– визначити статичні та астатичні помилки систем фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ)

– визначити напрямок подальшої роботи.

**Виклад основного матеріалу**

**Структурна схема системи фазового автопідстроювання частоти**

Структурна схема системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) показана на рис. 1.



Рис 1: Основна схема системи ФАПЧ

До складу системи входить фазовий детектор, що є помножувачем з коефіцієнтом підсилення  $K_d$ , петлевий фільтр  $F(s)$ , який формує напругу (чи сигнал помилки)  $e(t)$  і генератор керований напругою (ГКН).

### Генератор керований напругою (ГКН) і його властивості

Слідкуючий контур фазового автопідстроювання частоти повинен постійно вести супровід вхідного сигналу по фазі. Відповідно, генератор, що входить до складу контура повинен перебудовуватися по фазі. Для цього розроблені генератори керовані напругою (ГУН), (voltage – controlled oscillator „VCO”), миттєва частота сигналу на виході яких залежить від керуючої напруг, як це показано на рис. 2.



Рис. 2: Генератор керований напругою

На вході генератора керуюча напруга (сигнал помилки)  $e(t)$ , а на виході сигнал, повна фаза  $\Phi(t)$  якого дорівнює:

$$\Phi(t) = \omega_0 t + K_0 \int_0^t e(t) dt \quad (1)$$

Тоді миттєва частота на виході генератора  $\omega(t) = \frac{d\Phi}{dt} = \omega_0 + K_0 e(t)$  є похідною від повної фази і пропорційна керуючій напрузі  $e(t)$ ,  $K_0$  – коефіцієнт пропорційності.

На рисунку 3 показаний приклад залежності миттєвої частоти на виході ГКН від керуючої напруги  $e(t)$ .

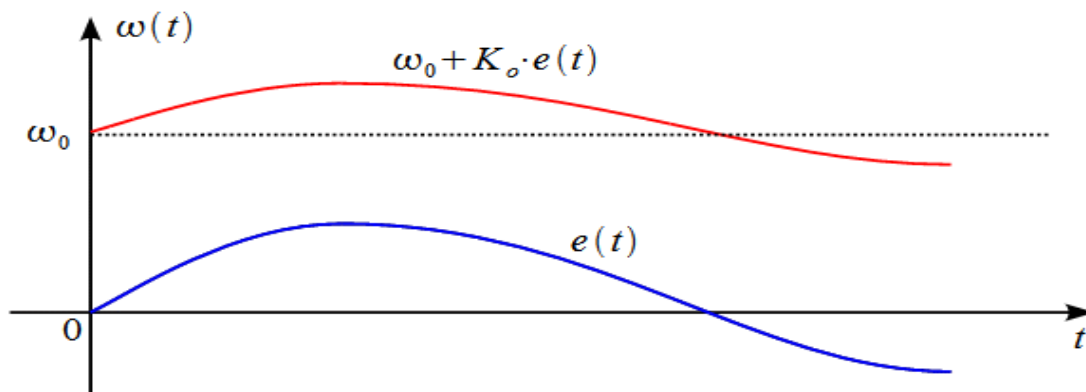


Рис 3: Миттєва частота на виході ГКН

### Аналіз структурної схеми системи ФАПЧ

Розглянемо структурну схему показану на рис 1. Для спрощення введемо наступне позначення:

$$\psi(t) = K_0 \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

тоді сигнал на виході ГКН дорівнює  $\cos(\omega_0 t + \psi(t))$ , а сигнал на виході фазового детектора :

$$\begin{aligned}
 v(t) &= K_d \sin(\omega_0 t + \psi(t)) \cos(\omega_0 t + \psi(t)) = \\
 &= \frac{K_d}{2} \sin(2\omega_0 t + \phi(t) + \psi(t)) + \frac{K_d}{2} \sin(\phi(t) - \psi(t))
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

Сигнал на виході фазового детектора є сумою сигналу на подвійній частоті  $2\omega_0$  і сигналу який залежить від різниці фаз вхідного сигналу і ГКН. Петлевий фільтр являє собою ФНЧ, який подавляє сигнал на подвійній частоті, тоді на виході петлевого фільтру отримуємо сигнал  $e(t)$ :

$$e(t) = \frac{K_d}{2} \sin(\phi(t) - \psi(t)) = \frac{K_d}{2} \sin(\Delta\phi(t)) \quad (4)$$

Керуючий сигнал на виході петлевого фільтру пропорційний синусу різниці фаз прийнятого і опорного сигналів.

#### Астатичний режим системи ФАПЧ

Система ФАПЧ може бути статичною або астатичною (у останньому випадку, з астатизмом 1-го або вищих порядків). Статична система ФАПЧ працює з фазовою помилкою на вході ФД (у сталому режимі). Їй пропорційна вихідна напруга ФД, що є керуючою для ГКН (з урахуванням  $K_\phi$  фільтру Ф).

На відміну від статичної, астатична система ФАПЧ працює з помилкою, рівною нулю, але при цьому напруга на вході ГКН дорівнює тій же величині, яка потрібна для отримання частоти на його виході, рівній частоті на вході системи ФАПЧ. Це забезпечується застосуванням в якості Ф інтегруючого фільтру. Середнє значення його вихідної напруги є інтегралом вихідної напруги ФД.

Після накопичення необхідної величини напруги на виході Ф фазова помилка, в результаті автопідстроювання, зводиться до нуля. У перехідному режимі, при зміні частоти на вході системи ФАПЧ, з'являється фазова помилка, що викликає перебудову системи. У простому випадку використовується інтегруючий фільтр 1-го порядку, який забезпечує в системі астатизм, того ж, 1-го, порядку (у системі ФАПЧ 2-го порядку). Можливе застосування фільтрів вищих порядків, що забезпечують, залежно від схеми побудови, підвищення порядку астатизму або додаткову фільтрацію.

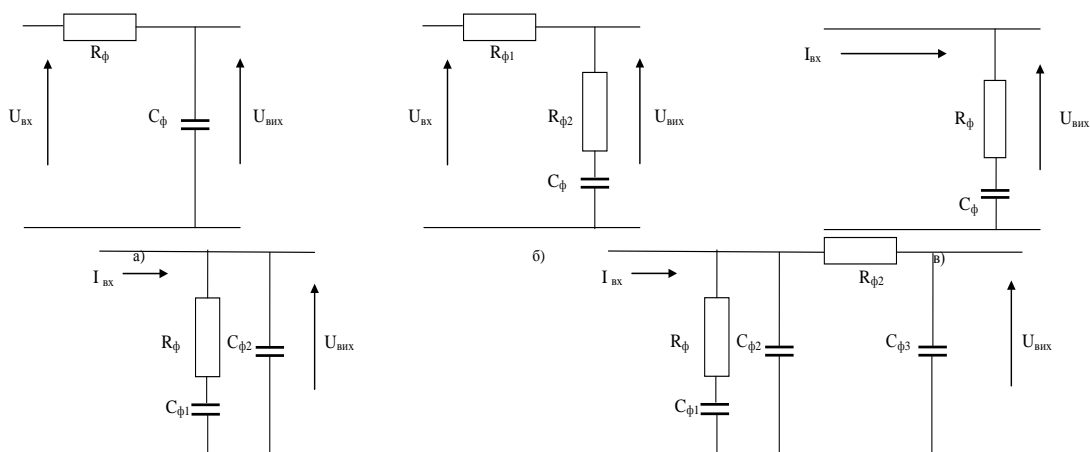


Рис. 4<sup>1</sup> Схема фільтрів : а) інерційного б) пропорційно-інерційний в) пропорційно-інтегруючий 1 –го порядку г) 2-го порядку д) 3-го порядку.

Простим інтегруючим фільтром є пропорційно-інтегруючий RC – ланцюг (рис. 4, в), підключений до джерела сигналу, що є джерелом струму (з нескінченно великим вихідним опором). Інтегрування здійснює конденсатор. На ньому – напруга, пропорційна інтегралу

вхідної напруги фільтру, а на резисторі – пропорційне вхідній напрузі. Останній потрібний для забезпечення стійкості системи ФАПЧ. Резистор так само, як і конденсатор, впливає на частотні властивості системи. Під інтегруючим фільтром розуміємо ланцюг, що має властивість не лише фільтрації, але і інтеграції, а під пропорційно-інтегруючим – інтегрування пропорційній передачі сигналу і фільтрації. Пропорційно-інтегруючий ланцюг (рис. 4, в) також називають фільтром. Звичайний фільтр – це ланцюг, що забезпечує фільтрацію без запам'ятовування. Його можна вважати „інерційним” фільтром (мал. 4, а). На рис. 4, б приведена схема фільтру, який, відповідно, є пропорційно-інерційним. А на рис. 2, г, д приведені схеми пропорційно-інтегруючих фільтрів, які додатково містять ланцюги інерційної фільтрації.

Передавальна функція ланцюга за схемою на рис. 4, в описується в даному випадку:

$$K_{\phi} = R_{\phi};$$

$$K_{\phi}(p) = 1 + \frac{1}{p\tau_{\phi}} = \frac{1 + p\tau_{\phi}}{p\tau_{\phi}} \quad (5)$$

де  $\tau_{\phi} = R_{\phi}C_{\phi}$  (при цьому  $K_{\phi}(p)$  і  $K_{\phi}$  мають розмірність опору, а  $K_{\phi}$  – А/рад). Відмітимо наступну особливість. Якщо для ланцюга на рис. 4,а постійна часу  $\tau_{\phi}$  – це параметр, що характеризує її інерційні властивості, то для ланцюга на рис. 4,б – умовний параметр, оскільки напруга, що знімається з  $R_{\phi}$  і  $C_{\phi}$ , є незалежною.

Передавальна функція системи ФАПЧ з вказаним фільтром описується наступним чином:

$$K_{\text{фач}}(p) = \left( \frac{1 + p\tau_{\phi}}{1 + p\tau_{\phi} + p^2\tau_0\tau_{\phi}} \right) = \left( \frac{1 + \frac{p}{\Omega_0 Q}}{\left( 1 + \frac{p}{\Omega_0 Q} \right) + \frac{p^2}{\Omega_0^2}} \right) \quad (6)$$

Основна відмінність полягає в тому, що другий член полінома в знаменнику (головного полінома передавальної функції) визначається постійною часу  $\tau_{\phi}$ , а не  $\tau_0$ , у зв'язку з чим

$$Q = \sqrt{\left( \frac{\tau_{\phi}}{\tau_0} \right)}; \sigma_{1,2} = -\frac{1}{2\tau_0} \quad (7)$$

В порівнянні із статичною системою ФАПЧ можна сказати, що постійні часу  $\tau_0$  і  $\tau_{\phi}$  „помінялися місцями”, внаслідок чого  $\tau_0$  має ті властивості, які мала  $\tau_{\phi}$  в статичній системі. Відмінністю функції (6) є також і те, що в чисельнику додатково міститься член  $p\tau_{\phi}$ , що впливає на частотні властивості пристрою (у області частоти зрізу ФНЧ).

#### Застосування системи ФАПЧ

##### Фільтруючі властивості системи ФАПЧ

На рис. 5 приведена схема простого пристрою, що використовує систему ФАПЧ і призначеного для фільтрації нижніх частот (ФНЧ). Це ФНЧ для сигналу, є носієм інформації і фізичною величиною якого є частота. Вхідним на рис. 5 є керуючий сигнал на вході системи (на першому вході ФД), частота якого  $\omega_{\text{вх}} = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{вх}}$ , а вихідним – сигнал на виході ГКН з  $\omega_{\text{вих}(p)} = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{вих}(p)}$ , залежним від передавальної функції пристрою, аргументом якої є  $p = j\Omega$ , – комплексна частота.

В той же час  $\Omega$  є частотою зміни частоти  $\omega_{\text{вих}}$ , тобто частотою модуляції, якщо вхідний сигнал, наприклад, модульований по частоті.

В даному випадку можна говорити про здатність системи ФАПЧ фільтрувати модулюючу функцію ЧМ сигналу.

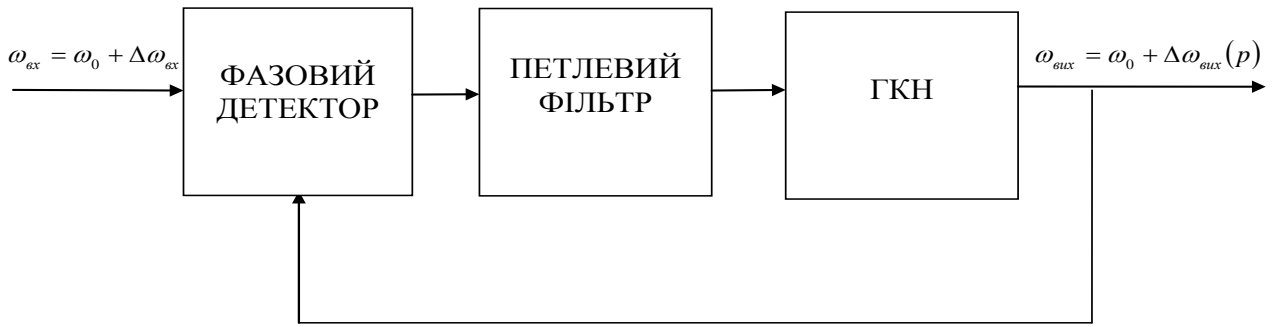


Рис. 5

У загальному вигляді передавальна функція пристрою за схемою на рис. 5, рівна

$$K_{\text{фавч}}(p) = \frac{\Delta\omega_{\text{вих}}(p)}{\Delta\omega_{\text{вх}}} = \frac{1}{\frac{1 + p\tau_0}{k_{\phi}(p)}}, \quad (8)$$

де

$$\tau_0 = \frac{1}{K_{\text{ФД}} K_{\phi} K_{\text{ГКН}}} \quad (9)$$

– постійна часу системи ФАПЧ (без урахування  $k_{\phi}(p)$ ),  $K_{\text{ФД}}$  і  $K_{\text{ГКН}}$  – коефіцієнти передачі ФД і ГКН. Причому  $K_{\text{ФД}}$  – з розмірністю В/рад, а  $K_{\text{ГКН}}$  – (рад/с)/В, якщо вихідними і вхідними величинами ФД і ГКН, відповідно, являється напруга. Фільтр  $\Phi$  характеризується функцією:

$$K_{\phi}(p) = K_{\phi} k_{\phi}(p) \quad (10)$$

де  $K_{\phi}$  – коефіцієнт передачі фільтру на „нульовій” частоті (якщо фільтр – ФНЧ), а  $k_{\phi}(p)$  – його частотно-залежний множник (у операторній формі).

Передавальна функція безфільтрової (при  $K_{\phi}(p) = 1$ ) системи ФАПЧ, згідно (8), рівна

$$K_{\text{фавч}}(p) = \frac{1}{1 + p\tau_0}, \quad \text{де } \tau_0 = \frac{1}{K_{\text{ФД}} K_{\text{ГКН}}}, \quad \text{і є функцією ФНЧ 1-го порядку. Відмітимо, що}$$

цей 1-й порядок обумовлений вказаною вище інтегральною залежністю фази від частоти. У загальному випадку порядок системи ФАПЧ визначається одиницею плюс порядок фільтру  $\Phi$ .

На рис. 2 а, приведена схема простого фільтру 1-го порядку, для якого:

$$K_{\phi} = 1; k_{\phi}(p) = \frac{1}{1 + p\tau_{\phi}} \quad (11)$$

де  $\tau_{\phi} = R_{\phi} C_{\phi}$  – його постійна часу. Для системи ФАПЧ з вказаним фільтром, системою 2-го порядку, є

$$K_{\text{фавч}}(p) = \left( \frac{1 + p\tau_{\phi}}{1 + p\tau_{\phi} + p^2\tau_0\tau_{\phi}} \right) = \left( \frac{1 + \frac{p}{\Omega_0 Q}}{\left(1 + \frac{p}{\Omega_0 Q}\right) + \frac{p^2}{\Omega_0^2}} \right) \quad (12)$$

де

$$\Omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_0\tau_{\phi}}}; Q = \sqrt{\frac{\tau_{\phi}}{\tau_0}} \quad (13)$$

– „власна” частота і добротність системи.

Як випливає з вираження (13), обидва постійні часи,  $\tau_{\phi}$  і  $\tau_0$ , впливають однаково на  $\Omega_0$ , але на  $Q$  по-різному: збільшення  $\tau_{\phi}$  збільшує добротність, а збільшення  $\tau_0$  зменшує її. Відмітимо по аналогії з електричною RLC – цепью, що  $\tau_{\phi}$  і  $\tau_0$  еквівалентні  $\tau_L = \frac{L}{C} i \tau_c = CR$  відповідно. У теорії фільтрів  $\Omega_0$  називають частотою двох комплексно-зв’язаних полюсів (на площині комплексної частоти  $p = j\Omega$ ), а замість  $Q$  використовують параметр  $\sigma_{1,2} = -\frac{\Omega_0}{2Q}$ , що є їх координатою на цій площині. Для даного пристрою, згідно (13).

$$\sigma_{1,2} = -\frac{1}{2\tau_{\phi}}$$

Передавальна функція (12), а також інші, розглянуті нижче, є функціями поліноміальної фільтрації. Для деяких з них (без ускладнених поліномів в чисельнику) можуть бути використані апроксимації характеристик по Бесселю, Чебышеву, еліптична і т. д. Система ФАПЧ може бути складовою частиною пристрою, в якому здійснюється фільтрація, порядок якої перевищує порядок системи.

### Синтезатори частот

Одно із застосувань системи ФАПЧ – в синтезаторах частот. На рис. 6, приведена структурна схема синтезатора, що містить додатково два дільника частоти „1/R” і „1/N” – з коефіцієнтами ділення  $R$  і  $N$  відповідно. Коефіцієнти ділення частоти можуть перемикатися, але в робочому режимі синтезатора вони постійні.

Відомі різновиди синтезаторів – типу „Integer-N” (з цілим коефіцієнтом ділення  $N$ ) і типу „Fractional-N” (з дробовим).

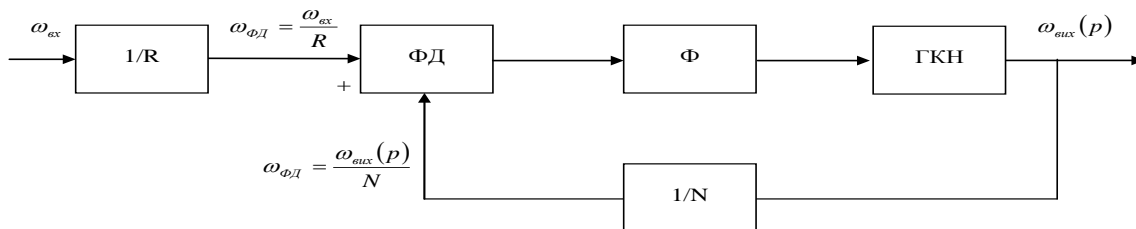


Рис.6

Частота на виході синтезатора (у сталому режимі)

$$\omega_{вих} = \frac{\omega_{вих} N}{R} = \omega_{ФД} N$$

де  $\omega_{ФД} = \frac{\omega_{ex}}{R}$  – частота на вході ФД. Дискретність синтезатора (дискретність перебудови частоти)

$$\Delta\omega_{вих} = \omega_{ФД} \Delta N$$

де  $\Delta N$  – дискретність перебудови коефіцієнта ділення  $N$ , яка рівна  $\Delta N = 1$  і  $\Delta N < 1$  для дільників з цілим і дробовим  $N$  відповідно. Наприклад, для синтезаторів ADF4107 і ADF4360  $\Delta N = 1$ , а для ADF4153  $\Delta N = 0,0001$  (8).

Постійна часу синтезатора, на відміну від (9), рівна

$$\tau_0 = \frac{N}{K_{ФД} K_{\Phi} K_{ГКН}}$$

В результаті, коефіцієнт ділення  $N$ , який може досягати в синтезаторах типу „Integer-N” декількох десятків тисяч, підвищує їх інерційність.

А це призводить до збільшення часу перебудови синтезатора, що неприпустимо в режимі швидкого переключення частоти, використовуваного в апаратурі зв'язку. Але в синтезаторах типу „Fractional-N” коефіцієнт  $N$  і, відповідно, постійна часу  $\tau_0$  може бути в

$\frac{1}{\Delta N}$  разів менше. Це є істотною перевагою синтезаторів цього типу. Мабуть, що усунення

цього явища (підвищення інерційності) можливе і в синтезаторах типу „Integer-N”, якщо збільшити посилення в системі і, зокрема, послідовно з фільтром включити підсилювач, коефіцієнт посилення якого  $K_{\Pi}$  компенсуватиме негативну дію  $N$  :

$$\tau_0 = \frac{N}{K_{ФД} K_{\Phi} K_{\Pi} K_{ГКН}} \approx \frac{1}{K_{ФД} K_{\Phi} K_{ГКН}}$$

Механізм забезпечення дробності  $N$  в синтезаторі типу „Fractional-N”. У ADF4153, в ланцюзі управління дільником, застосований сигма-дельта інтерполятор, вихідний сигнал якого є часовою послідовністю нулів („0”) і одиниць („1”), подібною до вихідної послідовності сигма-дельта модулятора (9).

Дробове число  $N$  отримують, як середнє значення двох комутованих (відповідно до даних, що програмують інтерполятор) цілих чисел  $N_0$  і  $N_1 = N_0 + 1$ : значенню  $N_0$  відповідає „0” у вказаній вихідній послідовності інтерполятора, а значенню  $N_1$  – що керуюча „1”.

У синтезаторах використовуються фільтри в основному за схемою, зображеною на рис. 4, д, і, відповідно, реалізується астатичний режим роботи.

При цьому в синтезаторах типу „Integer-N” відсутній, як було показано вище, фазове розузгодження на вході ФД, а в синтезаторах типу „Fractional-N” воно є. Але це розузгодження „астатичного характеру”.

На ФД впливає змінна двохполярна фазова помилка, середнє значення якої дорівнює нулю (завдяки застосуванню пропорційно-інтегруючого фільтру і відслідкуванню фази).

При цьому, завдяки фільтруючим властивостям системи ФАПЧ, пульсації частоти на виході ГКН (фазовий шум), обумовлені вказаною фазовою помилкою на вході ФД, понижені до допустимого рівня.

Але пульсації можуть бути додатково зменшені, якщо на виході синтезатора включити фільтр за схемою рис. 4, а.

#### Частотний (амплітудно-частотний) фільтр.

На рис. 7 приведена схема фільтру на базі системи ФАПЧ.



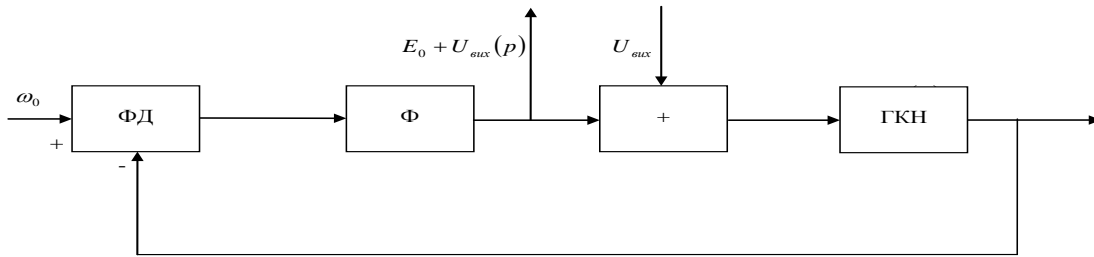


Рис. 7

Перед ГКН включений суматор, на один з входів якого подається вхідний сигнал  $U_{ex}$ , що підлягає фільтрації, а на іншій – сигнал зворотного зв'язку  $E_0 + U_{вих}(p)$  з приростом  $U_{вих}(p)$ , обумовленим  $U_{ex}$  і вихідним сигналом, що являється. Передавальна функція фільтру

$$K_{A\Phi}(p) = \frac{U_{вих}(p)}{U_{ex}} = \frac{1}{\left[ \frac{1 + p\tau_0}{k_\Phi(p)} \right]} \quad (14)$$

Згідно (14), при подачі  $U_{ex}$  система ФАПЧ працює таким чином, що постійна складова, якщо вона є у складі  $U_{ex}$ , компенсується постійній складовій  $U_{вих}(p)$ , а змінна – з деяким частотно-залежним розузгодженням, обумовленим передавальною функцією. Смуга пропускання системи ФАПЧ повинна відповідати спектру  $U_{ex}$  (з урахуванням його розширення в „частотному” ланцюзі ГКН – ФД) і забезпечувати відстежування змін, обумовлених  $U_{ex}$ , а виникаюче розузгодження (наприклад, по фазі) має бути в межах можливостей ФД.

Фільтр розглядається в якості прикладу одного з можливих застосувань системи ФАПЧ. Зазвичай застосовуються відносно прості і такі, що мають вищі параметри широко відомі фільтри на операційних підсилювачах.

**Частотний модулятор.** Частота на виході ГКН пропорційна напрузі на його вході. Це дає можливість використовувати систему ФАПЧ як частотний модулятор. При цьому модулятором є ГКН, а система забезпечує слідування несучої ,роблячи її рівній частоті опорного коливання. Схема модулятора показана на рис. 8,

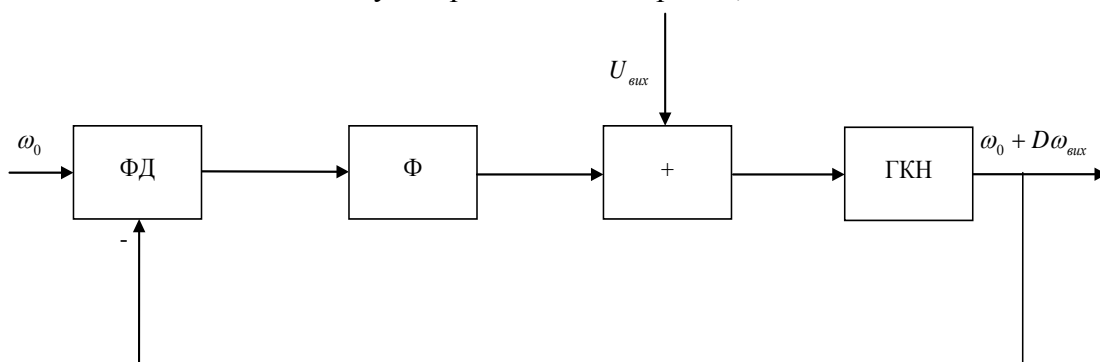


Рис. 8

а його передавальна функція рівна

$$K_{ЧМ}(p) = \frac{\Delta\omega_{вих}(p)}{U_{ex}} = K_{ГКН} \frac{1}{\left[ \frac{1 + k_\Phi(p)}{p\tau_0} \right]} \quad (15)$$

Функція (15), що характеризується відношенням  $\frac{k_\phi(p)}{p\tau_0}$  (замість  $\frac{p\tau_0}{k_\phi(p)}$ ), є

функцією фільтру верхніх частот (ФВЧ). В результаті, для модулятора з фільтром  $\Phi$ , згідно (11)

$$K_{\text{ЧМ}}(p) = \frac{K_{\text{ГКН}}(p\tau_0 + p^2\tau_0\tau_\phi)}{1 + p\tau_0 + p^2\tau_0\tau_\phi} \quad (16)$$

Функція (16) відрізняється від „стандартної” для поліноміального ФВЧ наявністю члена  $p\tau_0$  в поліномі чисельника (подібно до наявності члена  $p\tau_\phi$  в (12)). Проте останнє не є обов’язковим, і для модулятора з фільтром, згідно (5)

$$K_{\text{ЧМ}}(p) = \frac{K_{\text{ГКН}}p^2\tau_0\tau_\phi}{1 + p\tau_\phi + p^2\tau_0\tau_\phi}$$

Система ФАПЧ в даному модуляторі має бути більше низькочастотною, ніж у фільтрі за схемою рис. 4, а її частота  $\Omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_0\tau_\phi}}$ , близька до частоти зрізу ФВЧ, яка має бути в

області нижньої межі спектру модулюючого сигналу, тоді як аналогічна частота для ФНЧ знаходиться в області його верхньої межі. Спектр модулюючого сигналу знаходиться, відповідно, в смузі пропускання ФВЧ і не повинен мати складових в області нуля. При цьому, маючи обмеження знизу, спектр не обмежений згори. Проте в наступних пристроях (на виході модулятора) може бути здійснена смугова фільтрація частотно-модульованого сигналу.

#### Частотний демодулятор.

На рис. 9 приведена схема частотного демодулятора. ЧМ керуючий сигнал подається на вхід системи ФАПЧ, а той, що демодулюється знімається з виходу  $\Phi$ .

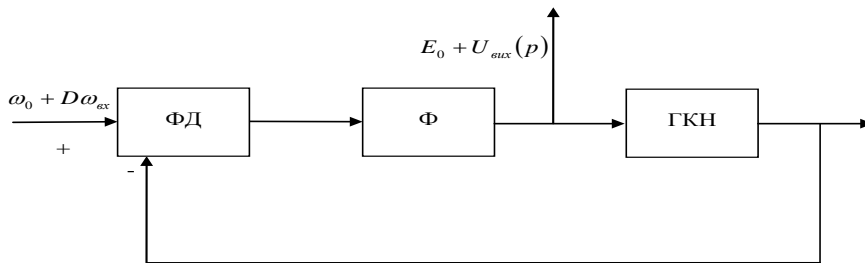


Рис. 9

Передавальна функція демодулятора є функцією ФНЧ

$$K_{\text{ЧД}}(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{\Delta\omega_{\text{ех}}} = \left( \frac{1}{\frac{K_{\text{ГКН}}}{1 + p\tau_0} \cdot \frac{1}{k_\phi(p)}} \right) \quad (17)$$

Відмітимо наступну особливість. Якщо в частотному модуляторі (рис. 8) система ФАПЧ забезпечує рівність несучої частоти, стабільній частоті опорного коливання, то в даному випадку, навпаки, демодулятор підлаштовується за допомогою системи ФАПЧ під частоту сигналу, що демодулюється.

У обох випадках „стабілізуюча” частота знаходиться на керуючому вході системи ФАПЧ.

З схем рис. 1 і 6 випливає, що вхідними і вихідними величинами в простій системі можуть бути напруга і зміна частоти.

Відповідно, можуть бути реалізовані чотири пристрої перетворення сигналу, які можна розглядати в якості основних. Це перетворювачі „напруга-напруга” (фільтр на рис. 4, а), „частота-частота” (фільтр на рис. 1, а), „напруга-частота” (частотний модулятор на рис. 4, б) і „частота-напруга” (частотний демодулятор на рис. 4, в).

У усіх чотирьох пристроях (в перших двох – за призначенням) здійснюється фільтрація сигналу відповідно до передавальних функцій (8), (14), (15) і (17). Після підстановки  $k_{\phi}(p)$  передавальні функції конкретизуються, визначаючи параметри фільтрації і інші параметри системи ФАПЧ.

Можливості системи ФАПЧ не обмежуються вказаними основними пристроями. На їх базі будуються пристрої, які можна розглядати в якості похідних.

Прикладом є синтезатори частот, розглянуті вище і побудовані на базі пристрої „частота-частота”.

**Комбіновані пристрої. Підвищуючий перетворювач частоти, з квадратурним модулятором .**

На рис. 10 представлена спрощена схема підвищуючого перетворювач частоти, з квадратурним модулятором .

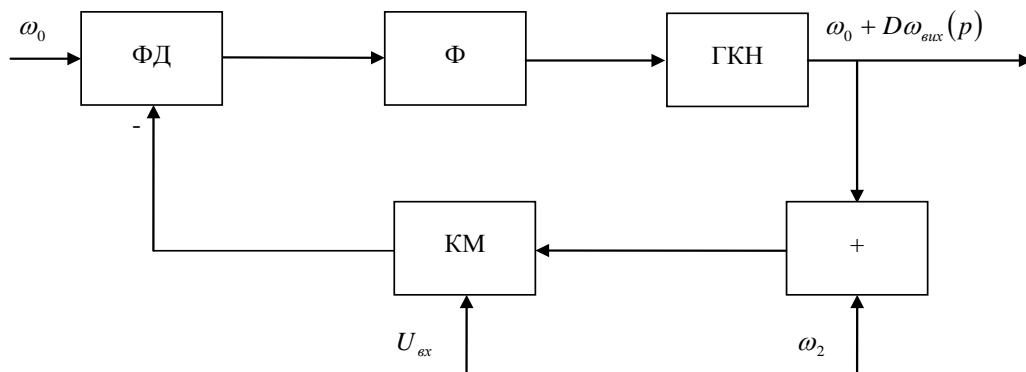


Рис. 10

Вказаний пристрій має дві відмінності від розглянутих вище.

По-перше, в ланцюзі зворотного зв'язку системи ФАПЧ застосований понижуючий перетворювач частоти ПЧ. Перетворювач – балансного типу, з квадратурним виходом.

По-друге, застосований квадратурний модулятор КМ, використовуваний в даному випадку в якості частотного (замість ГКН в модуляторі за схемою рис. 4, б), де  $U_{вх}$  – це дві квадратурні складові модулюючого сигналу (10).

Такий пристрій використовується в мікросхемах AD6523 (у складі чіпсета „Othello”) і AD6534 („Othello One”) фірми Analog Devices, призначених для систем зв'язку GSM (DCS, PCS), GPRS та ін. У вказаних системах застосовується GMSK – двопозиційна частотна маніпуляція Гауса з мінімальним зсувом.

На один з входів ПЧ (рис. 10) з виходу пристрою поступає модульований ВЧ сигнал с частотою  $\omega_1 + \Delta\omega_{вх}(p)$ , де  $\omega_1$  – його несуча, а на інший вхід – коливання від зовнішнього гетеродина з частотою  $\omega_2$ .

Несуча сигналу в КМ, вона ж на виході ПЧ (несуча так званої „віртуальної” проміжної частоти), визначається частотою опорного джерела  $\omega_0$  на керуючому вході ФД.

У результаті слідкування системою ФАПЧ, ВЧ несуча  $\omega_1$  (на виході пристрою) визначається частотами  $\omega_0$  і  $\omega_2$  і рівна  $\omega_1 = \omega_0 + \omega_2$ .

Передавальна функція пристрою

$$K_{\text{ЧМ}}(p) = \frac{\Delta\omega_{\text{вих}}(p)}{U_{\text{вх}}} = \left( -\frac{K_{\text{ЧМ}}}{\left( \frac{1+p\tau_0}{k_{\phi}(p)} \right)} \right) \quad (18)$$

де  $K_{\text{ЧМ}}(p) = \frac{\Delta\omega_{\text{ЧМ}}}{U_{\text{вх}}}$  – коефіцієнт перетворення в КМ, а  $\tau_0$  і  $k_{\phi}(p)$  – згідно (9) і (10). Істотною особливістю функції (18) є те, що вона, на відміну від функції (15), є функцією ФНЧ. В результаті, в системі забезпечуються модуляція сигналу, спектр якого – від нуля Гц, і пригнічення складових верхніх частот (за межами спектру модулюючого сигналу).

**Висновки:** В цій статті ми розглянули принцип роботи і основні властивості контура ФАПЧ. Були введені поняття статичної і астатичної помилки слідкуючої системи, а також порядок астатизму контура ФАПЧ.

Встановлено, що для супроводу сигналу по частоті і по фазі потрібно контур ФАПЧ 2-го порядку астатизму. Також була отримана передавальна характеристика контура ФАПЧ 2-го порядку і розглянуті її основні характеристики.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации. 2-е изд., доп. и перераб./ В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин, В.Л. Карякин и др.; Под ред. В.В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь, 1989. 320 с.
2. Pasternak G., Whalin R.L. Analysis and synthesis of a digital phase-locked loop for FM demodulation // Bell Syst. Tech. J. 1968. Dec. P. 97 – 105.
3. Cessna J.R., Levy D.M. Phase noise and transient times for a binary quantized digital phase-locked loop in which Gaussian noise // IEEE Trans. 1972. V. Com-20. № 2. P. 94 – 104.
4. Yukawa J., Mori S. A binary quantized digital phase-locked loop // IECSE. 1973. Vol. 56-A. № 12. P. 79 – 85.
5. Yamamoto H., Mori S. Performance of a binary quantized all digital phase-locked loop with a new class of sequential filter // IEEE Trans. 1978. V. Com-26. № 1. P. 35 – 45.
6. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / Под ред. В.В. Шахгильдяна. – М.: Радио и связь. – 1989.
7. Фомин А.А. и др. Аналоговые и цифровые синхронно-фазовые измерители и демодуляторы. – М.: Радио и связь. – 1987.
8. Левин В.А. и др. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. – М.: Радио и связь. – 1989.
9. Голуб В. ФАПЧ и ее применение // ChipNews. – 2000. – № 4.
10. Голуб В. Новые синтезаторы частот фирмы Analog Devices // ChipNews. Украина – 2003. – № 7.