

## Лекція 12

### ФОРМУВАННЯ СІТКИ ДИСКРЕТНИХ ЧАСТОТ МЕТОДОМ НЕПРЯМОГО СИНТЕЗУ

#### 1. Системи ДКСЧ з фазовою автоматичною підстройкою частоти автогенератора

В попередньому розділі було розглянуто сутність формування сітки частот методом непрямого синтезу. При цьому було констатовано, що системи, в яких використовується цей метод, розрізняються за принципом побудови і функціонування систем автоматичної підстройки частоти автогенератора.

Розглянемо більш детально такі системи.

В системах з фазовою автоматичною підстройкою частоти (ФАПЧ) в якості порівняльного пристрою використовується фазовий детектор (рис. 1).

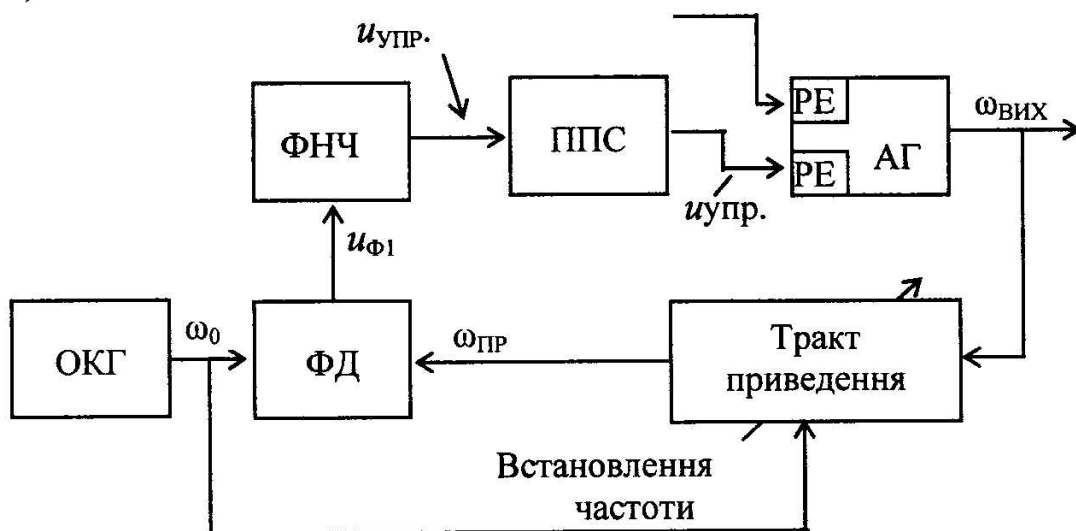


Рис. 1

Кільце системи фазової автоматичної підстройки частоти складається із тракту приведення частоти, фазового детектора (ФД), фільтра нижніх частот (ФНЧ), підсилювача постійного струму (ППС) і реактивного елемента (РЕ), який включено в контур автогенератора (АГ).

На фазовий детектор подаються високостабільні опорні коливання частоти  $\omega_0$  від опорного кварцового генератора (ОКГ) і коливання від автогенератора, що перестроюється. Частота АГ в тракті приведення перетворюється до частоти приведення  $\omega_{\text{ПР}} \approx \omega_0$  методом прямого

синтезу за участю коливань ОКГ. Тому нестабільність  $\omega_{\text{ПР}}$  визначається, в основному, нестабільністю частоти АГ.

Система функціонує наступним чином.

Фазовий детектор можна розглядати як перемножувач двох коливань, що подаються на його входи:

$$u_0(t) = U_0 \sin \omega_0 t; \quad \text{і} \quad u_{\text{ПР}}(t) = U_{\text{ПР}} \sin (\omega_{\text{ПР}} t + \varphi), \quad (1)$$

де  $\varphi$  – початковий фазовий кут коливання.

Результат перемноження цих коливань визначає напругу на виході детектора

$$u_{\text{ФД}}(t) = K U_0 U_{\text{ПР}} \sin \omega_0 \cdot \sin (\omega_{\text{ПР}} t + \varphi). \quad (2)$$

Оскільки фазовий кут може бути зведений до нуля вибором початку відліку, то рівняння (2) можна записати у вигляді

$$u_{\text{ФД}}(t) = \frac{K U_0 U_{\text{ПР}}}{2} [\cos (\omega_0 - \omega_{\text{ПР}}) t - \cos (\omega_0 + \omega_{\text{ПР}}) t]$$

Фільтр нижніх частот придушує частоту  $(\omega_0 + \omega_{\text{ПР}})$  і на його виході буде напруга управління

$$u_{\text{УПР}}(t) = K U_0 U_{\text{ПР}} \cos (\omega_0 - \omega_{\text{ПР}}) t = U_{\text{УПР}} \cdot \cos \Delta \varphi(t). \quad (3)$$

Фазовий кут  $\Delta \varphi(t) = \omega_0 t - \omega_{\text{ПР}} t$  є поточна різниця фаз опорного і приведенного коливання генератора і управляюча напруга буде пропорційна цій різниці.

Якщо частота  $\omega_0$  і  $\omega_{\text{ПР}}$  нерівні то  $\Delta \varphi(t)$  буде змінюватися в часі і управляюча напруга буде підстроювати генератор таким чином, щоб звести різницю частот до нуля.

Різницю частот можливо виразити через  $\Delta \varphi$

$$\omega_0 - \omega_{\text{ПР}} = \Delta \omega = \frac{\Delta \varphi(t)}{d t}.$$

При закінченні процесу регулювання  $\Delta \omega = 0$ , тобто  $\frac{\Delta \varphi(t)}{d t} = 0$ , це

означає, що  $\Delta \varphi$  є постійна величина, якій відповідає деяка управляюча напруга на реактивному елементі АГ (рис. 2).

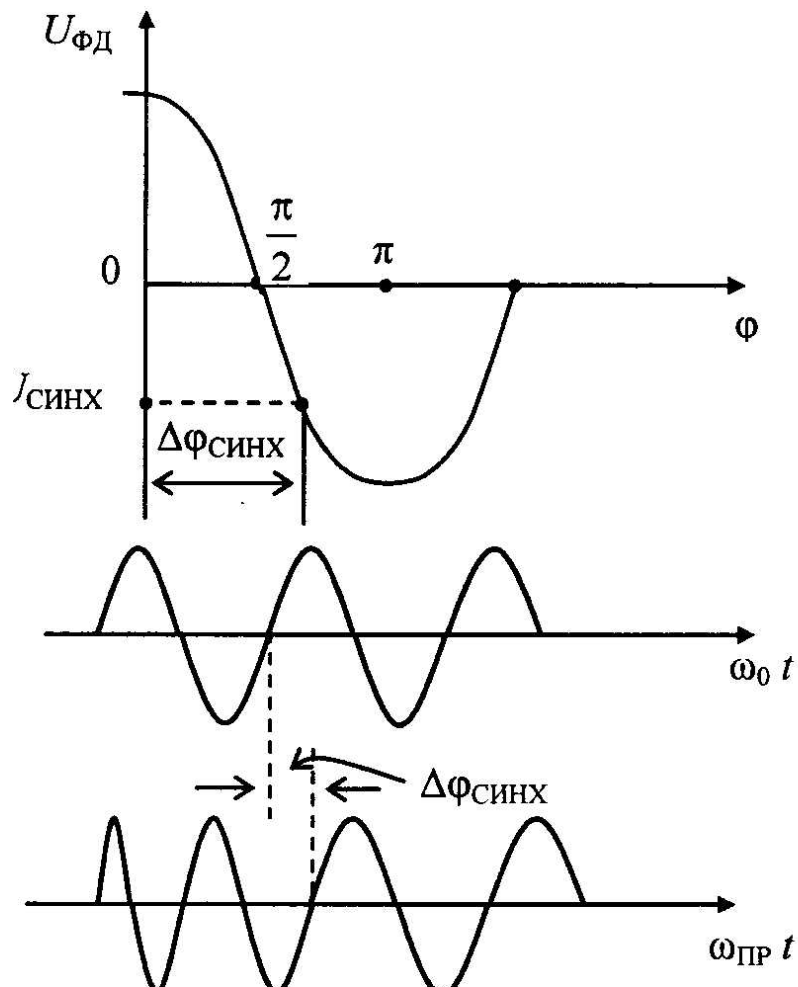


Рис. 2

Таким чином, фазовий детектор з допомогою реактивного елемента АГ встановлює і підтримує постійну різницю поточних фаз коливань, що порівнюються. При цьому частоти цих коливань будуть рівні і такий режим системи ФАПЧ називається режимом синхронізації. В режимі синхронізації стабільність частоти вихідних коливань визначається стабільністю коливань опорного генератора.

\ Процес регулювання системи ФАПЧ характеризується смугою захоплення і смугою утримання. Під смугою захоплення розуміється подвоєне значення різниці частот  $|\omega_0 - \omega_{\text{ГР}}|$ , на межах якого починається процес регулювання. Ширина смуги захоплення суттєво залежить від смуги пропускання ФНЧ. Розширення смуги пропускання ФНЧ збільшує смугу захоплення. Але при цьому погіршується придушення побічних коливань, які можуть модулювати генератор. Тому при вирішенні цієї проблеми виходять з останніх міркувань, а для вводу частоти АГ в смугу захоплення ФАПЧ використовується більш широкосмугова система (генератор пошуку, система ЧАПЧ).

Під смугою утримання системи ФАПЧ розуміють подвоєне значення різниці частот при якому процес регулювання зривається. Це буде мати місце, якщо різниця фаз коливань, що порівнюються, буде більше  $\pm \frac{\pi}{2}$ , тобто  $0 - \pi$  (кажучи точніше, смуга утримання залежить також від коефіцієнту підсилення ППС і характеристики регулювання РЕ).

Тракт приведення частоти являє собою інтерполяційну схему перетворення частоти АГ до постійної достатньо низької частоти  $\omega_{\text{пр}}$ , яка порівнюється з опорною частотою  $\omega_0$ . Перетворення частоти “вниз” дає можливість використання на виході схеми вузькосмугового фільтра, що забезпечує добре ослаблення побічних коливань (докладно дивіться [1], с. 105).

В деяких синтезаторах знайшли застосування імпульсні фазові детектори (ІФД). У звичайних ФД в якості комутуючого коливання використовуються коливання синусоїдної або прямокутної форми (меандр). В ІФД для комутування використовується послідовність коротких імпульсів. Перевагою ІФД є можливість порівняння на ньому не тільки однакових частот але і кратних

## 2. Особливості систем ДКСЧ з частотною підстройкою автогенератора

Структурна схема синтезатора частот приведена на рис. 3.

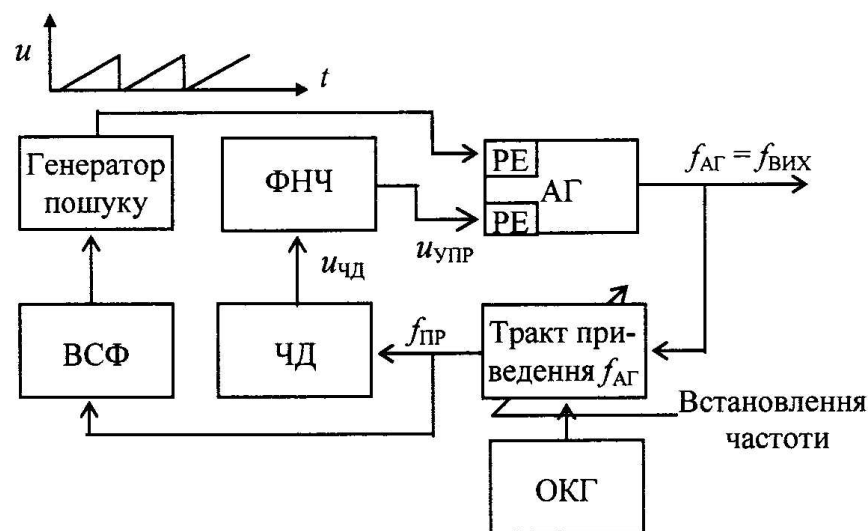


Рис. 3.

Джерелом сітки вихідних частот є генератор АГ, частота якого змінюється в деякому діапазоні. Дискретне встановлення його частоти забезпечується з допомогою тракту приведення  $f_{AG}$  та системи АПЧ. Тракт приведення являє собою інтерполяційну схему дискретного перетворення частоти  $f_{AG}$  до частоти  $f_{ПР}$  більш низької чим  $f_{AG}$ . Порівняльним елементом системи АПЧ є частотний детектор (ЧД) у якому частота  $f_{ПР}$  порівнюється з частотою настройки детектора  $f_{ЧД}$ . Якщо внаслідок дестабілізуючих факторів частота  $f_{AG}$  змінюється на  $\Delta f$ , частота приведення зміниться на таку ж величину. При цьому пропорційно зміниться напруга на виході ЧД, якою, з допомогою РЕ, встановлюється попередня частота  $f_{AG}$ .

Перестройка АГ на іншу частоту здійснюється зміною коефіцієнта ділення тракту приведення. При цьому коливання  $f_{ПР}$  виходять за межі смуги пропускання вузькосмугового фільтра (ВСФ) і вмикається генератор пошуку. Пілоподібною напругою генератора пошуку здійснюється перестройка АГ поки  $f_{ПР}$  попадає в смугу пропускання ВСФ і вимкне генератор пошуку. Подальше регулювання здійснюється частотним детектором.

Особливості процесу регулювання в системі ЧАПЧ розглянемо з допомогою характеристик частотного детектора і реактивного елемента (рис. 4).

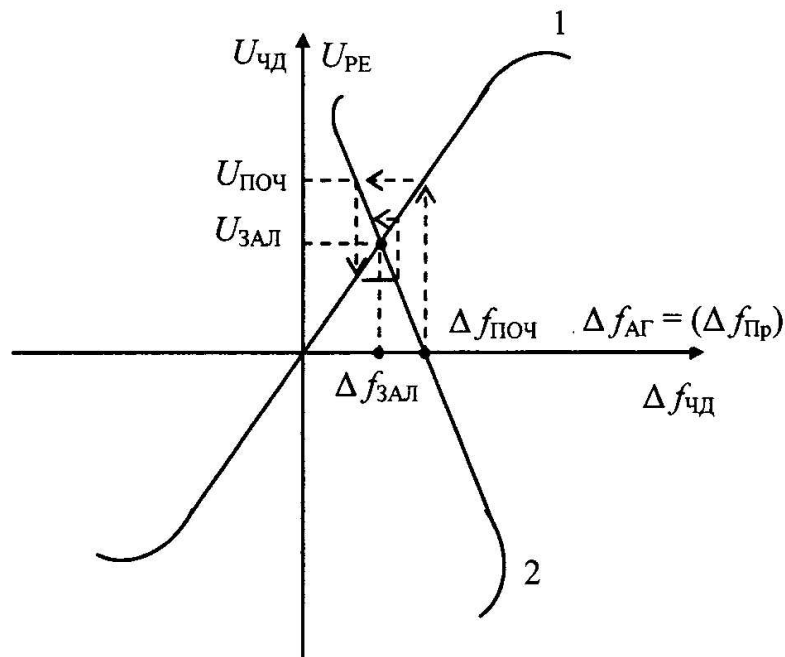


Рис. 4

Характеристика ЧД (крива 1), це є функція  $U_{\text{чд}} = \varphi(\Delta f_{\text{д}})$ , де  $\Delta f_{\text{д}} = |f_{\text{очд}} - f_{\text{гр}}| = \Delta f_{\text{Г}}$  – розстройка частоти приведення відносно частоти настройки детектора, яка чисельно дорівнює нестабільності частоти генератора.

Характеристика РЕ (крива 2), це є функція  $\Delta f_{\text{Г}} = \varphi(U_{\text{РЕ}})$ , де  $\Delta f_{\text{Г}}$  – відхилення частоти АГ від номіналу під дією регулюючої напруги на РЕ.

Припустимо, що спочатку частота АГ відхилилася від  $f_{\text{ном}}$  на величину  $\Delta f_{\text{Г}} = \Delta f_{\text{поч}}$  (див. рис. 4). При цьому на виході ЧД з'явиться напруга  $U_{\text{поч}}$ . Але внаслідок інерційності ФНЧ управляюча напруга на РЕ генератора з'явиться із затримкою, яка визначається сталою часу фільтра.

Далі піде процес послідовної підстройки АГ:  $U_{\text{поч}}$  діючи на РЕ зменшує розстройку генератора  $\Delta f_{\text{Г}}$ . У свою чергу зменшення розстройки призводить до зменшення управляючої напруги і т.д., доки управляюча напруга і відповідна до неї залишкова розстройка не досягають величин, які визначаються точкою перетинання характеристик дискримінатора і РЕ:  $U_{\text{зал}} \rightarrow \Delta f_{\text{зал}}$ . Ця точка визначає динамічну рівновагу системи.

З розглянутого видно, що початкова розстройка генератора у системі ЧАПЧ зменшується, але не зводиться до нуля. Ефективність системи ЧАПЧ оцінюється виразом ЧАП

$$K_{\text{ЧАП}} = \frac{\Delta f_{\text{поч}}}{\Delta f_{\text{зал}}}$$

Величина  $\Delta f_{\text{зал}}$  залежить від крутизни характеристик детектора і РЕ (управителя). Для лінійної частини характеристик

$$S_{\text{чд}} = \frac{\Delta U_{\text{чд}}}{\Delta f_{\text{чд}}}; \quad S_{\text{РЕ}} = \frac{\Delta f_{\text{Г}}}{\Delta U_{\text{РЕ}}}$$

Виграш ЧАПЧ можливо представити (рис. 4)

$$K_{\text{ЧАП}} = \frac{\Delta f_{\text{поч}}}{\Delta f_{\text{зал}}} = \frac{\Delta f_{\text{зал}} + (\Delta f_{\text{поч}} - \Delta f_{\text{зал}})}{\Delta f_{\text{зал}}} = 1 + \frac{\Delta f_{\text{поч}} - \Delta f_{\text{зал}}}{\Delta f_{\text{зал}}}$$

Для точки рівноваги ( $\Delta U_{\text{чд}} = \Delta U_{\text{ре}} = U_{\text{зал}}$ )

$$\Delta f_{\text{пoch}} - \Delta f_{\text{зал}} = -U_{\text{зал}} S_{\text{ре}}; \quad \Delta f_{\text{зал}} = \frac{U_{\text{зал}}}{S_{\text{чд}}}.$$

Таким чином

$$K_{\text{чап}} = 1 - S_{\text{ре}} S_{\text{чд}}$$

Оскільки  $S_{\text{ре}}$  і  $S_{\text{чд}}$  протилежні за знаком то

$$K_{\text{чап}} = 1 + S_{\text{ре}} S_{\text{чд}}$$

Збільшення виграшу системи ЧАПЧ (зменшення  $\Delta f_{\text{зал}}$ ) можливо збільшенням  $S_{\text{ре}}$  і  $S_{\text{чд}}$ , але оскільки система ЧАПЧ є замкненою системою зі зворотнім зв'язком то збільшення  $K_{\text{чап}}$  обмежено її збуджуванням.

**Смуга захоплення системи ЧАПЧ** визначається максимальною початковою розстройкою генератора при якій забезпечується підстроювальна дія системи (у межах лінійної частини характеристики ЧД).

**Смуга утримання ЧАПЧ** є максимальна розстройка генератора для якої зберігається підстроювальна дія системи (при збільшенні початкової розстройки в замкненій системі).

Системи ЧАПЧ забезпечують зменшення відносної нестабільності автогенераторів з параметричною стабілізацією на 1–2 порядки (з  $\delta_f = 10^{-3}$  до  $\delta_f = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ ), а також ефективно придушення побічних коливань. Але внаслідок залишкової похибки регулювання, вони використовуються як допоміжні разом з іншими системами стабілізації.

### 3. Цифрові методи синтезу діапазону дискретних частот

Принцип цифрового синтезу є подальшим розвитком систем с ФАПЧ і відрізняється від них тим, що замість інтерполяційного перетворення частоти АГ здійснюється її ділення (рис. 5). В якості дільника використовується подільвач зі змінним коефіцієнтом ділення ПЗКД. Це дає можливість спряжено змінювати частоту АГ і коефіцієнт ділення, тому що  $f_{\text{АГ}} = K_{\text{д}} \cdot f_0$ . При цьому коефіцієнт ділення може бути виражений, безпосередньо, у частоті вихідних коливань.

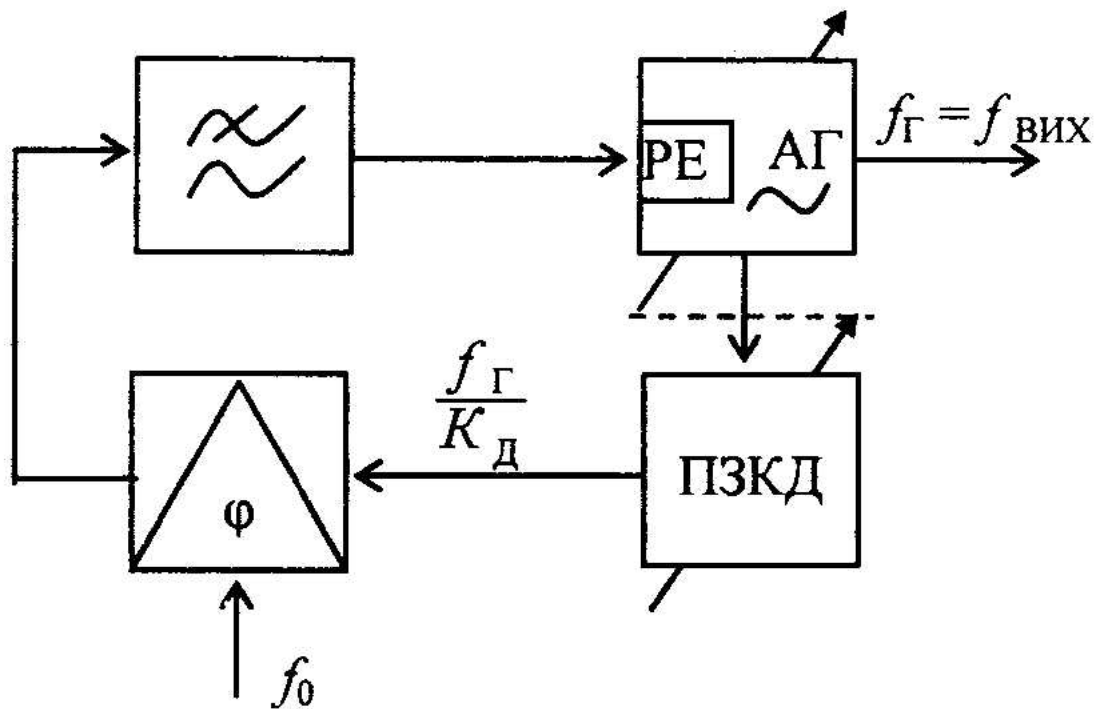


Рис. 5

Крок сітки частот на виході синтезатора визначається коефіцієнтом ділення і фільтруючими можливостями ФНЧ. Якщо  $K_D$  є ціле число, то  $\Delta f_{кр} = f_0$ ; при дрібному  $K_D$  буде ділитися і крок сітки. Наприклад:

$$f_{\Gamma} = K f_0; \quad f_{\Gamma} = (K + 0,1) f_0; \quad \Delta f_{кр} = f_{\Gamma} - f_{\Gamma} = \frac{f_0}{10}.$$

Смуга захоплення системи ФАПЧ з подільвачем приблизно в  $K_D$  раз ширша чим при інтерполяційному перетворювачі, тому що абсолютне відхилення частоти генератора під дією дестабілізуючих факторів на вході ФД зменшується в  $K_D$  разів. Але при наявності паразитної частотної модуляції коливаний генератора погіршується її фільтрація ФНЧ.

### Питання для власного контролю та повторення

1. За яким параметром здійснюється регулювання в системах ФАПЧ?
2. Як впливає смуга пропускання ФНЧ на характеристики системи ФАПЧ?
3. Які параметри порівнюються в системах ЧАПЧ?
4. Який основний недолік систем ЧАПЧ?
5. Що обмежує зменшення залишкової похибки регулювання в системах ЧАПЧ?