

УДК 621.396.967

О.А. Малишев, О.О. Сосунов, С.В. Яхніс

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕСТАБІЛЬНОСТЕЙ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТОТНОГО ДИСКРИМІНАТОРА НА РОЗСТРОЄНИХ КОНТУРАХ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ АПЧ ОГЛЯДОВИХ РЛС ЗА ДОПОМОГОЮ SIMULINK-МОДЕЛІ**

*При роботі систем частотного АПЧ мають місце нестабільності параметрів частотного дискримінатора. Це призводить до зниження якості підстроювання частоти. В статті запропонована Simulink-модель безпошукової системи частотного АПЧ оглядових РЛС, яка дозволяє дослідити вплив розбалансування плечей частотного дискримінатора та відхилення часового параметру в колі зворотного зв'язку на якість підстроювання частоти.*

**Ключові слова:** автоматичне підстроювання частоти, частотний дискримінатор, смуга захоплення, Simulink-модель.

### **Вступ**

**Постановка проблеми.** У сучасній радіоапаратурі різного призначення широке застосування одержав супергетеродинний метод побудови радіоприймальних пристроїв [1], при якому основне підсилення прийнятого сигналу здійснюється після переносу його спектра з високої несучої частоти на більш низьку проміжну частоту. Перетворення несучої частоти сигналу здійснюється за допомогою змішувача, на один вхід якого надходить сигнал на високій частоті (ВЧ), а на другий вхід подаються синусоїдальні коливання від спеціального генератора (гетеродина). З виходу змішувача знімається сигнал (його частота дорівнює різниці ВЧ та частоти гетеродина), який подається на підсилювач проміжної частоти (ППЧ). У ППЧ здійснюється основне підсилення прийнятого сигналу. Фактично ППЧ є узгодженим фільтром [1], який настроєний на номінальну проміжну частоту і забезпечує найкраще виділення сигналу із суміші його із шумом.

Необхідною умовою високої якості підсилення сигналу в ППЧ є рівність частоти сигналу й резонансної частоти ППЧ. У протилежному випадку неминучі втрати енергії сигналу. Однією з причин невідповідності центральної частоти спектра сигналу номінальному значенню проміжної частоти ППЧ є нестабільність генераторних приладів (зокрема, передавача та гетеродина) РЛС.

Для підтримання необхідної різницевої частоти сигналу в РЛС використовують системи автоматичного підстроювання частоти (АПЧ), які характеризуються певними параметрами [1]. При впливі дестабілізуючих факторів ці параметри можуть не відповідати номінальним значенням.

Отже, важливим стає питання визначення ступеню впливу дестабілізуючих факторів на відхилення параметрів системи АПЧ. Одним із доцільних шляхів таких досліджень може бути математичне моделювання за допомогою ЕОМ.

**Аналіз літератури.** Основними джерелами інформації про особливості роботи систем АПЧ є класичні описи, наприклад [1, 2]. Серед шляхів підвищення ефективності функціонування таких систем в сучасних умовах багато уваги приділяється підстроюванню частоти з використанням фазових детекторів [3, 4]. Але в багатьох оглядових РЛС [5, 6], де застосовується частотний спосіб підстроювання, принципово неможливе застосування таких рішень без суттєвої модернізації станцій. Первісні спроби досліджень таких систем викладені в [7], але узагальненого характеру вони не мають.

**Метою статті** є дослідження ступеню впливу нестабільностей параметрів частотного дискримінатора (ЧД) на розстроєних контурах на показники якості підстроювання частоти в безпошукових системах АПЧ оглядових РЛС "старого парку" за допомогою Simulink-моделі з метою визначення шляхів підвищення ефективності роботи таких систем.

### **Основна частина**

При створенні моделі системи АПЧ на основі частотного дискримінатора на розстроєних контурах за основу вибирались положення, викладені в [1, 2]. В межах статті доцільно навести лише головні з них.

Система АПЧ, як система автоматичного регулювання, містить вимірювальний пристрій, що визначає відхилення різницевої частоти від проміжної, та керуючий пристрій, що забезпечує необхідне змі-

нення частоти керуемого генератора. Така побудова системи АПЧ створює замкнуту систему автоматичного регулювання (САР), динамічні властивості якої визначаються сукупністю частотних та підсилювальних властивостей елементів. Класифікують системи АПЧ в залежності від принципів роботи вимірювального та керуючого пристрою, а також режимів підстроювання частоти керуемого генератора. Стосовно розглядаємої в статті системи АПЧ, величиною, що регулюється, в наведеної САР є різниця частота, а заданою – номінальне значення проміжної частоти.

Серед різновидностей систем АПЧ розглянемо безпошукові системи з ЧД на розстроєних контурах з електронною перестройкою частоти, де керуючий пристрій є конструктивною частиною керуемого гетеродина.

Функціональна схема відповідної системи частотного автоматичного підстроювання частоти (ЧАПЧ) гетеродина наведена на рис. 1.

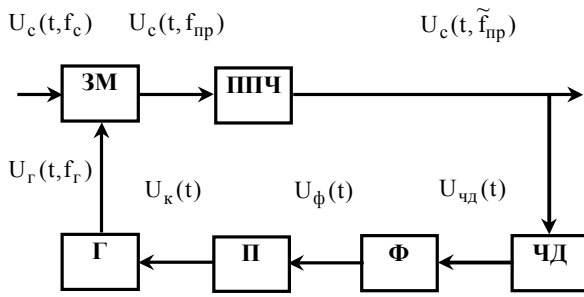


Рис. 1. Функціональна схема системи АПЧ гетеродина

Зміст позначень на схемі (окрім введених раніше) такий: ЗМ – змішувач, Г – гетеродин, Ф – фільтр нижніх частот, П – підсилювач.

При створенні лінеаризованої математичної моделі системи використовувались відомі методи лінійної теорії автоматичного управління [1, 2]. Це надало змогу проводити аналіз системи ЧАПЧ за умов, що в процесі роботи частота сигналу на вході частотного дискримінатора мало відхиляється від його перехідної частоти  $f_0$ . При великих відхиленнях мають місце нелінійності характеристик функціональних блоків, насамперед частотного дискримінатора.

Для моделювання роботи системи необхідно отримати залежність вихідної напруги частотного дискримінатора від частотної розстройки  $\Delta f$  та ввести певні обмеження.

В досліджуваній системі ЧАПЧ використовується ЧД з двома розстроєними контурами [8]. Вихідна напруга ЧД (статична характеристика) пропорційна різниці амплітудно-частотних характеристик двох коливальних контурів і може бути визначена, як

$$U_{\text{чд}}(f) = I_1 K_a R_a \psi(f),$$

де  $I_1$  – амплітуда першої гармоніки вхідного струму дискримінатора;

$K_a$  – коефіцієнт передачі амплітудних детекторів;  
 $R_a$  – еквівалентний резонансний опір контурів частотно-селективних ланцюгів;

$\Psi(f)$  – функція, що враховує властивості частотно-селективних ланцюгів.

Типовий вигляд статичної характеристики ЧД показаний на рис. 2.

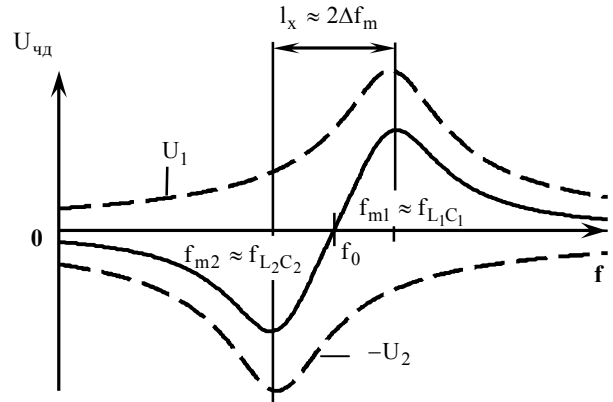


Рис. 2. Статична характеристика частотного дискримінатора

З урахуванням параметрів коливальних контурів [8], опускаючи проміжні викладки, маємо аналітичний вираз для статичної характеристики

$$U_{\text{чд}}(\Delta f) = U_1 - U_2 = \frac{I_1 K_a \alpha_0}{\pi I_x C} \times \left( k_1 / \sqrt{1 + \alpha_0^2 \left(1 - \frac{2\Delta f}{I_x}\right)^2} - k_2 / \sqrt{1 + \alpha_0^2 \left(1 + \frac{2\Delta f}{I_x}\right)^2} \right), \quad (1)$$

де  $\alpha_0 \approx (2\Delta f_m / f_0) \cdot Q_e$  – узагальнена розстройка між частотою настроювання дискримінатора й резонансних частот коливальних контурів ( $Q_e$  – еквівалентна добротність контурів з урахуванням впливу всіх внесених втрат);  $C$  – величина ємності контура;  $k_1, k_2$  – нормовані коефіцієнти підсилення відповідно лівого та правого плечей дискримінатора:  $k_i = K_{\text{підс } i} / K_{\text{підс номін}}$ .

В моделі введені наступні спрощення, які пов'язані з нелінійністю статичної характеристики частотного дискримінатора [1].

1. Відсутній доплерівський зсув частоти сигналу.
2. Початкова розстройка частот сигналу й гетеродина  $\Delta f^0$  в процесі роботи моделі не змінюються.
3. ППЧ широкосмуговий (оператор передачі ППЧ за частотою дорівнює одиниці).
4. Впливом шумів на роботу ЧД нехтується.
5. Фільтр П (рис. 2) – аперіодична ланка з оператором

$$K_\delta(D) = 1 / (TD + 1).$$

6. Кругість регульовальної характеристики гетеродина Г та коефіцієнт підсилення підсилювача П визначаються як  $K_r$  та  $K_n$  відповідно.

Для наочного дослідження впливу нестабільностей параметрів ЧД на показники якості підстроювання частоти в системах ЧАПЧ розроблена модель за допомогою пакета програм Simulink програмної оболонки Matlab.

В якості вихідних номінальних значень параметрів системи АПЧ вибирались наступні:  $f_0 = 10$  МГц;  $\Delta f_m = 1,5$  МГц;  $K_{\text{ЧД}} = 40$  В/МГц;  $K_r \cdot K_n = 1000000$ ;  $T = 0,1$ ; ширина смуги захоплення  $\Delta f_{\text{зах}} = \pm 5$  МГц; час відпрацювання (швидкодія) системи  $T_{\text{роб}} = \leq 2,5$  с.

При моделюванні оцінювався вплив початкової розстройки  $\Delta f^{\text{п}}$  на величину залишкової розстройки  $\Delta f^3$  та час  $T_{\text{роб}}$ .

При дослідженнях змінювались окремі вихідні параметри системи. Зокрема, імітувалось розбалансування плечей ЧД та відхилення постійної часу  $T$  фільтра Ф.

Розбалансування плечей ЧД припускалося симетричним, тобто при збільшенні коефіцієнта підсилення одного з плечей ЧД  $k_1$  на величину  $\Delta k$ , коефіцієнт підсилення другого плеча  $k_2$  зменшується на таке ж значення.

Результати моделювання за умов зміни коефіцієнтів  $k_1$  та  $k_2$  наведені на рис. 3.

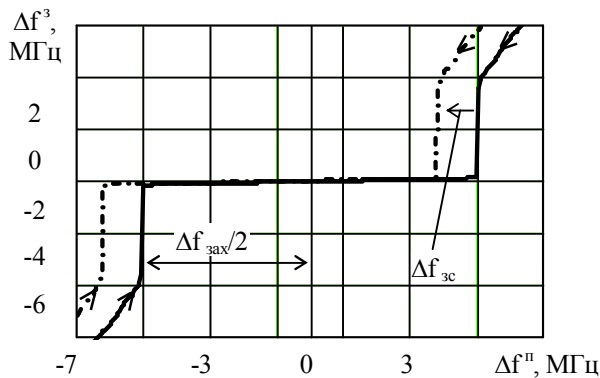


Рис. 3. Вплив розбалансування плечей ЧД на залишкову розстройку частоти

Суцільною лінією показано залежність залишкової розстройки  $\Delta f^3$  від початкової розстройки  $\Delta f^{\text{п}}$ . Графік має симетричний (відносно центру координат) вигляд. Зокрема, при  $\Delta f^{\text{п}} = 0$  розстройка  $\Delta f^3 = 0$ . Виділяються також межі смуги захоплення  $\Delta f_{\text{зах}}$ .

При розбалансуванні плечей графік зміщується в певний бік (напрямок залежить від співвідношення значень  $k_1$  і  $k_2$  виразу (1)) на величину  $\Delta f_{\text{зс}}$ . Це в свою чергу призводить до появи систематичної похибки (при  $\Delta f^{\text{п}} = 0$  розстройка  $\Delta f^3 = \Delta f_{\text{пєн0}}^{\text{с}}$ ;  $\Delta f_{\text{пєн0}}^{\text{с}} \neq 0$ ).

Залежність часу відпрацювання системи АПЧ  $T_{\text{роб}}$  від  $\Delta f^{\text{п}}$  наведено на рис. 4. При рівних величинах  $k_1$  та  $k_2$  (суцільна лінія) при значеннях  $\Delta f^{\text{п}}$ , бли-

зких до  $\Delta f_{\text{зах}}/2$  параметр  $T_{\text{роб}}$  стрімко зростає. За умов розбалансування плечей відбувається (відповідно до рис. 3) зсув графіка.

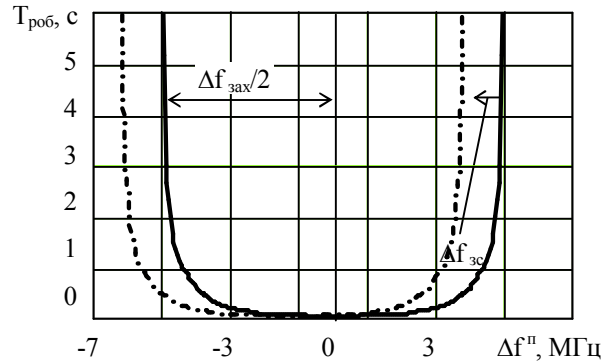


Рис. 4. Вплив розбалансування плечей ЧД на час роботи системи

При дослідженні ступеню впливу розбалансування плечей ( $\Delta k$ ) на  $\Delta f^3$  та  $T_{\text{роб}}$  розглядалися:

1. Гарантована ширина смуги захоплення системи АПЧ  $\Delta f_{\text{зах гар}}$ , яка визначається як  $\Delta f_{\text{зах гар}} = 2 \cdot (\Delta f_{\text{м min}})$ .

2. Зменшення величини  $\Delta f_{\text{зах гар}}$  відносно вихідного значення  $\Delta f_{\text{зах 0}}$  при різному ступеню розбалансування плечей ЧД.

3. Збільшення часу відпрацювання системи АПЧ  $\Delta T_{\text{роб}}$  в межах  $\Delta f_{\text{зах гар}}$ .

Відповідні залежності наведені на рис. 5.

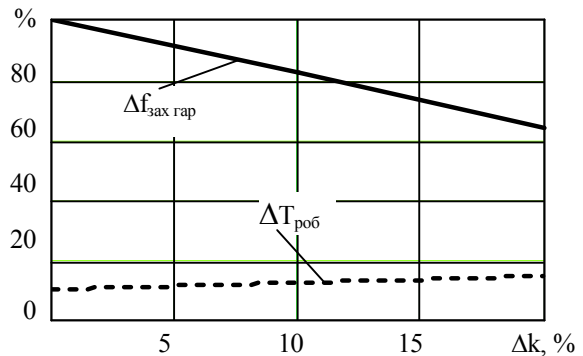
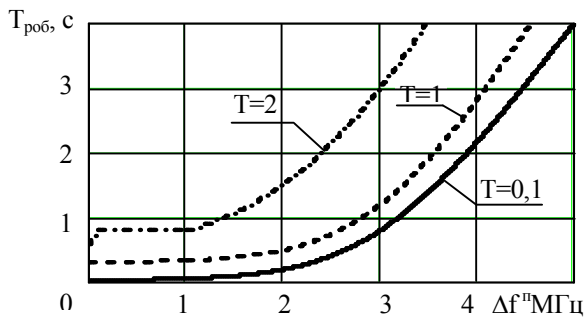


Рис. 5. Вплив розбалансування плечей ЧД на значення гарантованої смуги захоплення та час роботи системи

Аналіз результатів показує, що параметр  $\Delta f_{\text{зах гар}}$  є більш чутливим, ніж час  $T_{\text{роб}}$ . Зокрема, при 10% розбалансуванні плечей ЧД  $\Delta f_{\text{зах гар}}$  зменшується на 18%, а при 20% – вже на 36%. Подальше розбалансування плечей ЧД може призвести взагалі до непрацездатності системи.

При зміні величини  $T$  залишкова частотна розстройка  $\Delta f^3$  практично не залежить від значення  $T$ . Проте час відпрацювання системи  $T_{\text{роб}}$  зі збільшенням значення  $T$  зростає. Для прикладу на рис. 6 наведено сімейство графіків для значень  $T=0,1, 1$  та 2.

Рис. 6. Вплив значення  $T$  на швидкодію системи

### Висновки

Таким чином, запропонована в статті Simulink-модель роботи системи АПЧ дозволяє дослідити вплив ступеню розбалансування плечей ЧД та уходу значень постійної часу фільтра в колі зворотного зв'язку на показники якості системи.

Наслідком розбалансування плечей ЧД є:

– зуження гарантованої ширини смуги захоплення системи  $\Delta f_{\text{зах гар}}$ , яка, зокрема, зменшується на 10% вже при сьомивідсотковому розбалансуванні плечей ЧД;

– з'явлення систематичної похибки роботи системи, що зменшує відношення «сигнал/шум» на виході приймального пристрою.

Час відпрацювання системи в межах гарантованої ширини смуги захоплення при розбалансуванні плечей ЧД практично не змінюється.

При виборі параметра постійної часу  $T$  фільтра в колі зворотного зв'язку доцільно її значення вибирати якомога меншим ( $T_{\text{min}}$ ). Збільшення значення  $T$  не приводить до підвищення точності відпрацювання системи (оскільки точність залежить від коефіцієнта підсилення ланок розімкнутої системи), а час її роботи  $T_{\text{роб}}$  значно збільшується (зокрема, при  $T = 10 \cdot T_{\text{min}}$  та  $\Delta f^{\text{II}} = 1$  МГц значення  $T_{\text{роб}}$  збільшується в 6 разів).

Практичне значення отриманих результатів полягає у виборі послідовності та способів настроювання й підтримання стабільностей параметрів системи АПЧ. При цьому можуть бути вибрані такі шляхи: настроювання параметрів ЧД (автоматичне або «вручну»); настроювання часових (частотних) параметрів кола зворотного зв'язку; часткова або комплексна заміна елементної бази системи АПЧ розглядаємого класу.

### Список літератури

1. Алексейчев Д.Д. Системы автоматического управления в вооружении войск ПВО: навч. посіб. / Д.Д. Алексейчев, А.А. Казаков. Ч. 2. – Х: ВИРТА, 1985. – 173 с.
2. Хісмагулін В.Ш. Системы керування. Аналіз лінійних стаціонарних систем автоматичного керування: навч. посіб. / В.Ш. Хісмагулін. – Х: ХВУ, 2004. – 123 с.
3. Curtin M. Phase-Locked Loops for High-frequency Receivers and Transmitters. Part 1/ М. Curtin, P. O'Brien // Analog Dialogue, 1999. – Vol. 33. – No 3. – P. 28-34.
4. Келин Т. Характеристики цифровой системы ФАПЧ / Т. Келин, Д. Супонников // Радио. – 2002. – № 9. – С. 45-46.
5. Климченко В.Й. Озброєння радіотехнічних підрозділів і частин ППО. РЛС 5Н84А: навч. посіб. / В.Й. Климченко, О.А. Малишев. – Х.: ХУПС, 2005. – 328 с.
6. Рисаков М.Д. Військова техніка ближньої радіолокаційної групи. Вип. 1. Огляд РЛС ІРЛІ31Р: навч. посіб. / М.Д. Рисаков, Д.Ю. Дукін, В.І. Хохлюк. – Х.: ХІ ВПС, 2003. – 150 с.
7. Simulink-модель безпошукової системи АПЧ для дослідження впливу нестабільностей параметрів ЧД на показники якості підстроювання частоти / О.А. Малишев, О.О. Сосунов, С.В. Яхніс // Наука і техніка ПС ЗСУ. – Х., 2010. – Вип. 2 (4). – С. 103-106.
8. Вагин Ю.В. Частотный дискриминатор радиоприемных устройств / Ю.В. Вагин. – М.: Связь, 1971. – 48 с.

Надійшла до редколегії 11.01.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, доцент Р.Е. Пашенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТОТНОГО ДИСКРИМИНАТОРА НА РАССТРОЕННЫХ КОНТУРАХ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ СИСТЕМЫ АПЧ ОБЗОРНЫХ РЛС С ПОМОЩЬЮ SIMULINK-МОДЕЛИ

А.А. Малишев, А.А. Сосунов, С.В. Яхнис

При работе систем частотной АПЧ имеют место нестабильности параметров частотного дискриминатора. Это приводит к снижению качества подстройки частоты. В статье предложена Simulink-модель беспоисковой системы частотной АПЧ обзорных РЛС, которая позволяет исследовать влияние разбалансировки плеч частотного дискриминатора и уход временного параметра в цепи обратной связи на качество подстройки частоты.

**Ключевые слова:** автоматическая подстройка частоты, частотный дискриминатор, полоса захвата, Simulink-модель.

### RESEARCH OF INFLUENCE OF INSTABILITIES PARAMETERS OF FREQUENCY DISKRIMINATOR ON OFF-TUNE CONTOURS ON THE INDEXES OF QUALITY OF WORKING OF THE SYSTEM FLL SURVEY RADAR BY A SIMULINK-MODEL

A.A. Malyshev, A.A. Sosunov, S.V. Yahnis

There are some instabilities of parameters of the frequency discriminator at work of FLL systems. It leads to decrease in quality of trim. In article the Simulink-model of search system frequency FLL survey radar which allows to investigate influence of asymmetry of shoulders of the frequency discriminator and a care of times parameter is in the chain of feed-back on quality of frequency trim is offered.

**Keywords:** Frequency-Locked Loop, the frequency discriminator, a capture strip, Simulink-model.