

УДК 621.396.967

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

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

SIMULINK-МОДЕЛЬ БЕЗПОШУКОВОЇ СИСТЕМИ АПЧ ОГЛЯДОВИХ РЛС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕСТАБІЛЬНОСТЕЙ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТОТНОГО ДИСКРИМІНАТОРА НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

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 несиметричності плечей частотного дискримінатора на якість підстроювання частоти. Досліджено характер зміни смуги захоплення від різниці коефіцієнтів підсилення плечей частотного дискримінатора.

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

Вступ

Постановка проблеми. В оглядових РЛС традиційно використовуються радіоприймальні пристрої супергетеродинного типу, в яких основне підсилення сигналів здійснюється на проміжній частоті. Перетворення високої частоти прийнятих сигналів в проміжну здійснюється шляхом подавання на змішувач напруг сигналу та спеціальної гетеродинної напруги. При цьому на виході змішувача створюються сигнали різницевої частоти.

Якісне підсилення сигналів можливе лише при рівності різницевої частоти сигналів номінальному значенню проміжної частоти приймача, на яку настроєні контури підсилювачів проміжної частоти (ППЧ). Проте нестабільність частот передавача та гетеродину спричиняють відхилення різницевої частоти сигналів від номінального значення, що може призвести до виходу спектра прийнятих сигналів за межі смуги пропускання ППЧ, а значить, до невиявлення ехосигналів, і, як наслідок, невиконання завдань, покладених на РЛС.

Для запобігання таких явищ в РЛС застосовуються системи автоматичного підстроювання частоти (АПЧ), які мають забезпечити підтримання різницевої частоти, рівної номінальному значенню проміжної частоти приймача [1, 2].

Системи АПЧ характеризуються певними параметрами (точність підстроювання, ширина смуги захоплення, швидкодія і т.ін.). При впливі дестабілізуючих факторів (наприклад, велике початкове відхилення частоти, розстройка частотних дискримінаторів (ЧД), нечітка робота електромеханічних пристроїв) параметри систем АПЧ можуть не відповідати номінальним значенням.

Ступень відхилення параметрів системи АПЧ при впливі на їх роботу дестабілізуючих факторів може бути визначений різними шляхами, наприклад, безпосередньо на працюючій апаратурі, фізичним

або математичним моделюванням. Враховуючи те, що за принципом функціонування системи АПЧ являють собою системи автоматичного регулювання, доцільно для досліджень характеристик пристроїв АПЧ в різних умовах функціонування застосувати математичне моделювання.

Аналіз літератури. Окрім класичних описів роботи систем АПЧ [1, 2] чимало уваги приділяється підвищенню якості їх функціонування за рахунок використання в них фазових детекторів [3 – 5]. В той же час, незважаючи на певні переваги фазових АПЧ за окремими показниками, слід відзначити, що вони не забезпечують надійне підстроювання частоти в складних умовах, наприклад, при великих початкових розстройках (що має місце в багатьох оглядових РЛС [6, 7]), або потребують додаткового грубого каналу АПЧ. Тому доцільно дослідити системи АПЧ на основі частотних дискримінаторів [8], яким в останній час приділено менше уваги.

Метою статті є дослідження ступеню впливу нестабільностей параметрів частотного дискримінатора на показники якості підстроювання частоти в безпошукових системах АПЧ оглядових РЛС за допомогою Simulink-моделі на прикладі зміни ширини смуги захоплення внаслідок нерівності коефіцієнтів підсилення в плечах ЧД, що дозволить визначити шляхи удосконалення роботи зазначених систем АПЧ.

Основна частина

Для створення моделі системи АПЧ оглядових РЛС розглянемо принципи її функціонування. Система АПЧ має містити вимірювальний пристрій, що визначає відхилення різницевої частоти від проміжної, та керуючий пристрій, що забезпечує необхідне змінення частоти керуемого генератора.

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.

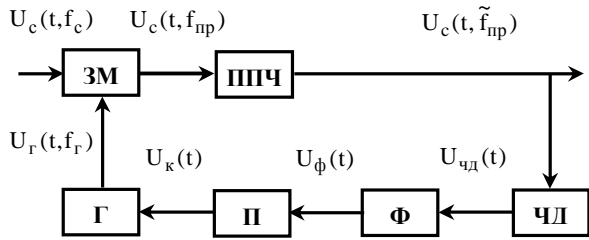


Рис. 1. Функціональна схема системи АПЧ гетеродина

Схема окрім функціональних блоків приймача (змішувача Зм, ППЧ та гетеродину Г) містить частотний дискримінатор ЧД, фільтр нижніх частот Ф і підсилювач П.

На основі наведеної схеми можна скласти лінеаризовану математичну модель системи. Користуючись цією моделлю, можливо за допомогою відомих методів лінійної теорії автоматичного керування [1, 2] провести аналіз систем ЧАПЧ за умов малого відхилення (в процесі роботи) частоти сигналу на вході ЧД від його перехідної частоти f_0 . Однак при більших зовнішніх збурюваннях і при включенні системи в роботу можливі такі режими, при яких на її поведінку істотно впливають нелінійності характеристик функціональних блоків, насамперед ЧД. Тому необхідно розглянути питання, які дозволять отримати залежність вихідної напруги частотного дискримінатора від частотної розстройки.

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

$$U_{\text{чд}}(f) = I_1 K_{\text{д}} R_{\text{е}} \psi(f),$$

де I_1 – амплітуда першої гармоніки вхідного струму дискримінатора;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт передачі амплітудних детекторів;

$R_{\text{е}}$ – еквівалентний резонансний опір контурів частотно-селективних ланцюгів;

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

Типовий вигляд статичної характеристики показаний на рис. 2.

При відповідному виборі взаємної розстройки контурів $2\Delta f_{\text{м}} = |f_{L_1 C_1} - f_{L_2 C_2}|$, де L_1, C_1, L_2, C_2 – параметри коливальних контурів ЧД, можна домогтися прийнятної лінійності й досить високої крутості характеристики $K_{\text{чд}}$, яка визначається як дотична до графіка характеристики в точці $f = f_0$:

$$K_{\text{чд}} = \left. \frac{dU_{\text{чд}}}{df} \right|_{f=f_0} = \left. \frac{dU_{\text{чд}}}{d(\Delta f)} \right|_{\Delta f=0},$$

де $\Delta f = f - f_0$.

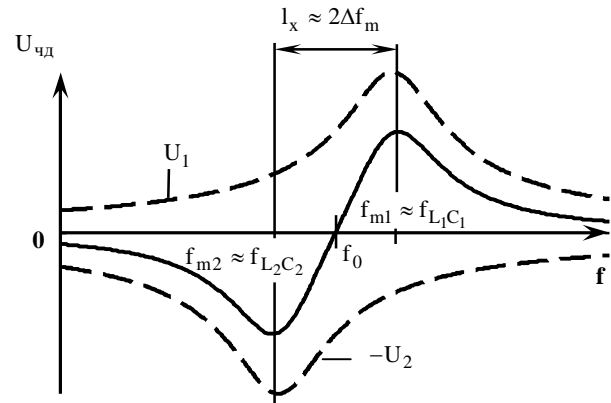


Рис. 2. Статична характеристика частотного дискримінатора

При розрахунку ЧД, як правило, полагають, що резонансні частоти контурів рознесені відносно частоти настроювання f_0 симетрично, й контури мають однакові параметри, тобто $C_1 = C_2 = C$; $Q_{e1} = Q_{e2} = Q_e$, де Q_e – еквівалентна добротність контурів з урахуванням впливу всіх внесених втрат.

Тоді, опускаючи проміжні викладки, маємо аналітичний вираз для статичної характеристики

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

де $\alpha_0 \approx \frac{2\Delta f_{\text{м}}}{f_0} Q_e$ – узагальнена розстройка між частотою настроювання дискримінатора й резонансних частот коливальних контурів.

Для з'ясування деяких особливостей роботи системи ЧАПЧ, пов'язаних з нелінійністю статичної характеристики ЧД, складемо необхідну для цих цілей математичну модель, прийнявши наступні спрощення.

1. Відсутній доплеровський зсув частоти ($\delta f_{\text{д}}(t) = 0$).

2. Взаємна розстройка частот сигналу й гетеродина (відносна нестабільність частоти), яка обумовлена дією дестабілізуючих факторів, у момент початку роботи системи ($t = 0$) дорівнює $\Delta f^{\text{п}}$ й надалі не змінюються (дестабілізуючі фактори “заморожені”). Тому $\delta f_c(t) - \delta f_r(t) = \Delta f^{\text{п}} = \text{const}$, $t \geq 0$.

3. ППЧ ширококутовий, внаслідок чого оператор передачі ППЧ за частотою дорівнює одиниці ($K_{\text{ф ппч}}(D) = 1$).

4. Впливом шумів на роботу ЧД можна знехтувати. Тоді $U_{\text{чд}}(t) = F(\Delta f(t))$, де $F(\Delta f)$ – статична характеристика ЧД.

5. Фільтр системи ЧАПЧ (фільтр нижніх частот) – аперіодична ланка з оператором

$$K_{\text{ф}}(D) = \frac{1}{TD + 1}$$

6. Нелінійністю регулювальної характеристики гетеродина можна знехтувати, а крутість регулювальної характеристики гетеродина Γ та коефіцієнт підсилення підсилювача Π визначити як K_{Γ} та K_{Π} відповідно.

На рис. 3 представлена схема математичної моделі системи ЧАПЧ, що відповідає всім прийнятим припущенням.

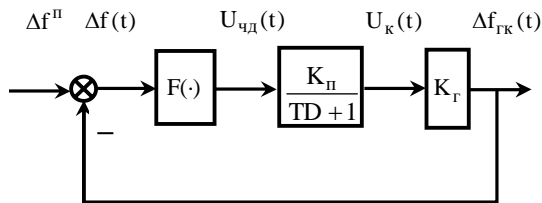


Рис. 3. Математична модель системи ЧАПЧ

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 (рис. 4).

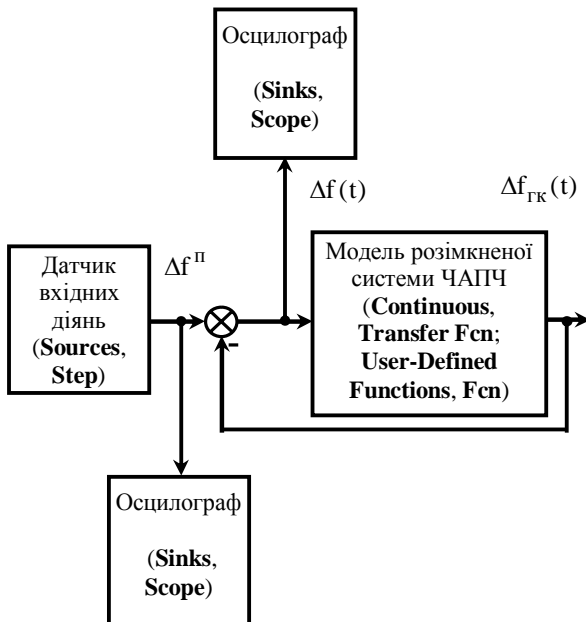


Рис. 4. Simulink-модель системи ЧАПЧ

Зміст складових моделі наступний.

Датчик вхідних діянь формує східчасте діяння, яке задає початкову частотну розстройку Δf^n . Модель розімкненої системи ЧАПЧ відповідає математичній моделі, зображеній на рис. 3. Осцилографи реєструють результати роботи моделі.

В якості прикладу була вибрана система ЧАПЧ на розстроєних контурах з параметрами: ширина смуги захоплення ± 5 МГц; точність відпрацювання системи ± 200 кГц; час відпрацювання системи $\leq 2,5$ с. Результати роботи моделі представлені у вигляді графіка залежності розстройки частоти від часу (рис. 5).

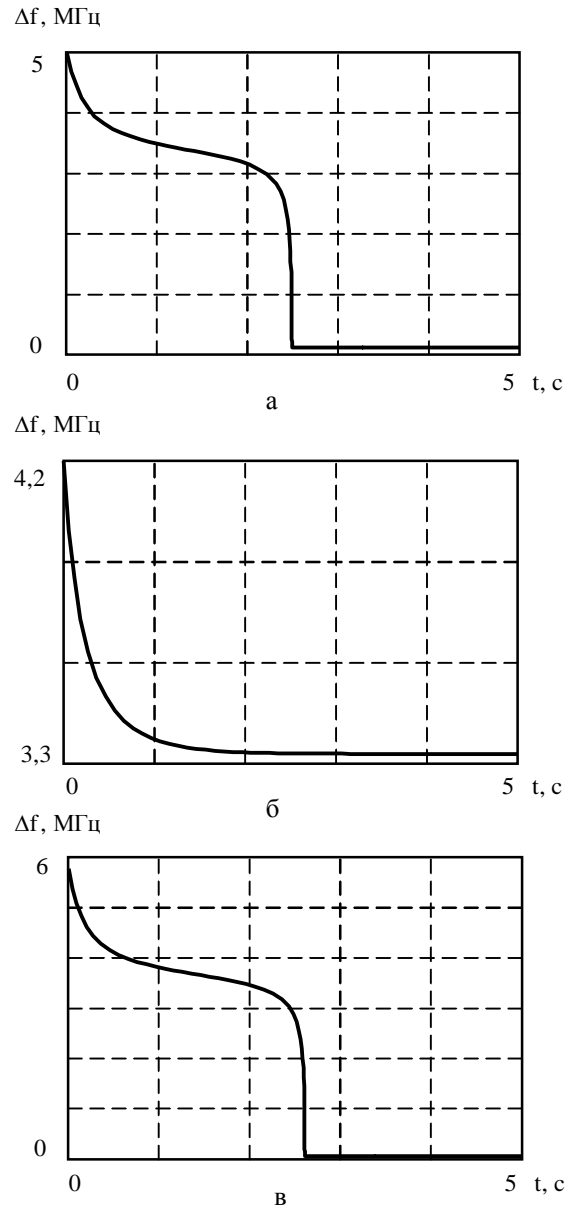


Рис. 5. Процеси захоплення частоти в різних умовах

За допомогою моделі було досліджено залежність точності та часу відпрацювання системи ЧАПЧ від величини початкової розстройки Δf^n (в момент часу $t = 0$). За умов нерозстроєної системи ЧАПЧ для випадку $\Delta f^n = 5$ МГц параметри системи відповідають номінальним (рис. 5, а).

При дослідженні впливу нестабільностей параметрів ЧД на показники якості підстроювання частоти в моделі змінювались параметри коливальних контурів. Зокрема, змінювались коефіцієнти підсилення

плечей ЧД. Для цього у виразі (1) корегувались чисельники дробів, що записані у дужках. Відхилення вибирались у межах $\pm 10\%$ від номінального значення. Результати моделювання для зазначених умов наведені на рис. 5, б, в.

Висновки

1. При відхиленні коефіцієнтів підсилення плечей ЧД від номінального значення в межах $\pm 10\%$ загальна ширина смуги захоплення практично не зменшується (залишається в межах ± 5 МГц).

2. При зміні коефіцієнтів підсилення плечей ЧД для випадку, коли в першому плечі коефіцієнт підсилення змінився на $+10\%$, а в другому – на -10% , захоплення частоти відбувається при $\Delta f^n < +4,2$ МГц. При $\Delta f^n = +4,2$ МГц захоплення частоти ще немає (рис. 5, б).

3. При зміні коефіцієнтів підсилення плечей ЧД для випадку, коли в першому плечі коефіцієнт підсилення змінився на -10% , а в другому – на $+10\%$, захоплення частоти здійснюється при $\Delta f^n \leq +6$ МГц (рис. 5, в).

4. При включенні системи АПЧ в роботу стан коливальних контурів може бути будь-яким. Тому, незважаючи на те, що загальна ширина смуги захоплення не зменшується (залишається в межах ± 5 МГц), фактично гарантована ширина смуги захоплення стає $\pm 4,2$ МГц (зменшується на $1,6$ МГц).

Практичне значення отриманих результатів полягає у виборі способу підтримання стабільностей параметрів системи АПЧ. При цьому можливі такі варіанти: по-перше, застосування традиційного для РЛС періодичного підстроювання параметрів;

по-друге, введення автоматичного підстроювання параметрів; по-третє, якісна заміна елементів системи АПЧ на сучасні, що виконані на цифровій елементній базі.

Список літератури

1. Алексейчев Д.Д. Системы автоматического управления в вооружении войск ПВО. Ч. 2: учебн. пособ. / Д.Д. Алексейчев, А.А. Казаков. – 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 / M. 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. Патент Российской Федерации № 2168267, H03L7/06, H03J7/00. Способ АПЧ и устройство для его реализации / Гармонов А.В., Манелис В.Б. – № 99112260/09; Заяв. 02.06.1999; Опубл. 27.05.2001. – 8 с.
6. Климченко В.Й. Озброєння радіотехнічних підрозділів і частин ППО. РЛС 5Н84А: навч. посіб. / В.Й. Климченко, О.А. Малишев. – Х: ХУПС, 2005. – 328 с.
7. Рисаков М.Д. Військова техніка ближньої радіолокаційної групи. Вип. 1. Оглядова РЛС 1РЛ131Р: навч. посіб. / М.Д. Рисаков, Д.Ю. Дукін, В.І. Хохлюк. – Х: ХВПС, 2003. – 150 с.
8. Вагин Ю.В. Частотный дискриминатор радиоприемных устройств / Ю.В. Вагин. – М.: Связь, 1971. – 48 с.

Надійшла до редколегії 17.09.2010

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

SIMULINK-MODEL' BESPOISKOVOY SYSTEMY APCH OBOZORNYYH RLS DLYA ISSLEDOVANIYA VLIYANIYA NESTABIL'NOSTEY PARAMETROV CHASTOTNOGO DISKRIMINATORA NA POказATELI KACHESTVA PODSTROYKI CHASTOTY

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 несимметричности плеч частотного дискриминатора на качество подстройки частоты. Исследован характер изменения полосы захвата от разницы коэффициентов усиления плеч частотного дискриминатора.

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

SIMULINK-MODEL OF NONSEARCH SYSTEM AFT SURVEY RADAR FOR EXPLORATION INFLUENCES OF INSTABILITY OF PARAMETERS OF THE FREQUENCY DISCRIMINATOR ON INDICATORS OF QUALITY OF FREQUENCY TRIM

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

At work of systems frequency AFT take place instability of parameters of the frequency discriminator. It leads to decrease in quality of frequency trim. In article the Simulink-model of search system frequency AFT survey radar which allows to investigate influence of asymmetry of shoulders of the frequency discriminator on quality of frequency trim is offered. Character of change of a strip of capture from a difference of factors of strengthening of shoulders of the frequency discriminator is investigated.

Keywords: automatic frequency trim, the frequency discriminator, a capture strip, Simulink-model.