

УДК 621.3.072.6

С.А. Макаров¹, О.М. Чекунова¹, С.А. Юхновський², О.В. Нікітін¹

¹ Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

² Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця

СКЛАДОВИЙ ФАЗОВИЙ ДЕТЕКТОР З ДИНАМІЧНО РЕГУЛЬОВАНИМ ПАРАМЕТРОМ ЕЛЕМЕНТУ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ФАЗОВИМ РЕГУЛЯТОРОМ ЗА НЕЛІНІЙНИМ ЗАКОНОМ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

У роботі досліджені властивості складового фазового детектору (ФД) з регулюванням коефіцієнта підсилення модифікованого підсилювача (МП) за нелінійним законом регулювання виду $\sqrt[4]{x}$, встановленого у колі зворотного зв'язку по фазі.

Ключові слова: система фазового автопідстроювання частоти (ФАП), фазовий детектор з динамічно регульованими параметрами (ФДДРП), нелінійний закон регулювання, коефіцієнт підсилення, коло зворотного зв'язку по фазі.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні пристрої зв'язку потребують постійного удосконалення при вирішенні перспективних телекомунікаційних задач. Потенційні можливості використання і перспективи розвитку таких систем переважно визначаються технічними характеристиками радіобладнання, що входить до його складу. Особливої уваги потребують системи автоматичного регулювання (САР), до яких слід віднести і системи ФАП. Основним у всіх САР є поведінка системи у невстановлених режимах, яка вимагає більше уваги приділяти питанням

вивчення і аналізу якості перехідних процесів даних систем, так як час встановлення синхронізму в колі ФАП – один з основних показників експлуатаційно-технічних характеристик.

Основною складовою системи ФАП є ФД. В даній статті досліджено удосконалений складовий ФД з регулюванням коефіцієнта підсилення МП за нелінійним законом регулювання виду $\sqrt[4]{x}$, встановленого у колі зворотного зв'язку по фазі. Метою статті є дослідження властивостей зазначеного складового ФД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В монографії [1] запропоновано використання адап-

тивних систем синтезу і стабілізації частоти. В роботі [2] реалізовано модель лінійної системи ФАП з урахуванням динамічного регулювання параметрів додаткового зворотного зв'язку за фазою. В публікаціях [3, 4] представлено моделі нелінійних систем ФАП з урахуванням законів регулювання виду $\arctg x$ та \sqrt{x} .

Виклад основного матеріалу

ФДДРП, на відміну від фазового детектора із зворотнім зв'язком (ФДДЗЗ), містить додатковий

вхід регулювання коефіцієнта підсилення МП, що встановлений у колі зворотного зв'язку по фазі, і канал оцінки стану системи ФАП, що забезпечує динамічну зміну коефіцієнта підсилення МП за нелінійним законом регулювання виду $\sqrt[4]{x}$ [3, 4].

На рис. 1 представлена функціональна схема математичної моделі ФДДРП з урахуванням заміни кожного функціонального елементу відповідною групою математичних елементів з урахуванням функцій, що ним виконуються, яка відбиває всі перетворення, що в ній відбуваються.

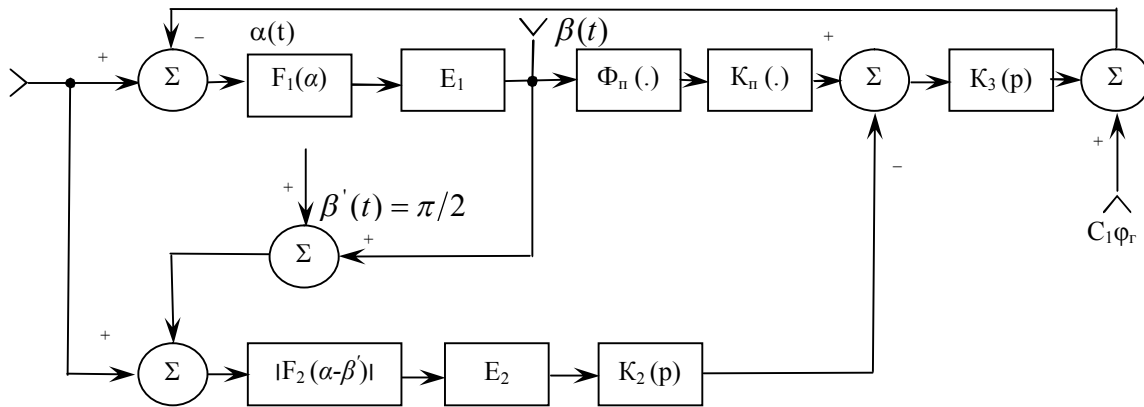


Рис. 1. Структурна схема математичної моделі ФДДРП

В представленій моделі $\alpha(t)$ – різниця фаз вхідного сигналу і сигналу з виходу ФМ; $\beta(t)$ – різниця між фазою вхідного сигналу та фазою на виході ФДРП; $F_1(\alpha)$ – нормована характеристика ФД1; E_1 – максимальна напруга, яку видає ФД1; $\Phi_n(\cdot)$ – нелінійна функція характеристики підсилення МП; $K_n(\cdot)$ – нелінійна функція характеристики управління коефіцієнта підсилення МП; $K_3(p)$ – передаточна функція МП; $|F_2(\alpha - \beta')|$ – нормована характеристика ФД2; E_2 – максимальна напруга, яку видає ФД2; $K_2(p)$ – передаточна функція ФНЧ2; β' – фазовий зсув сигналу у ФО; C_1 – коефіцієнт перетворення частоти ГКН.

Система рівнянь, що описує ФДДРП відносно різниці фаз β має наступний вигляд:

$$\begin{cases} F_1(\beta) = F_1 \times \\ \times \left\{ \beta + \psi K_0 (1 - \sqrt[4]{|F_2(\beta)| K_2(p)}) F_1(\beta) K_3(p) \right\}; \\ F_2(\beta) = F_2 \times \\ \times \left\{ \beta - \beta' + \psi K_0 (1 - \sqrt[4]{|F_2(\beta)| K_2(p)}) F_1(\beta) K_3(p) \right\}, \end{cases} \quad (1)$$

де ψ – максимальний динамічний діапазон ФМ; K_0 – максимальний коефіцієнт підсилення МП.

З урахуванням синусоїдальних нелінійностей F_1 і F_2 , а також того, що різниця фаз змінюється квазістатистично та $\beta' = \pi/2$, отримаємо:

$$\begin{cases} F_1(\beta) = \sin \left\{ \beta + \psi K_0 (1 - \sqrt[4]{\cos(\alpha)}) \sin(\alpha) \right\}; \\ F_2(\beta) = \cos \left\{ \beta + \psi K_0 (1 - \sqrt[4]{\cos(\alpha)}) \sin(\alpha) \right\}. \end{cases} \quad (2)$$

У (2) під знаком \sin і \cos записані вирази для α , внаслідок чого можливо отримати залежність $\beta(\alpha)$:

$$\beta(\alpha) = \alpha - \psi K_0 \sin \alpha \left(1 - \sqrt[4]{\cos(\alpha)} \right). \quad (3)$$

Подальші дослідження будуть потребувати досліджень функції $\beta(\alpha)$ та отримання і дослідження статистичних характеристик $F_1(\beta)$ і $F_2(\beta)$.

Знайдемо похідну залежності (3) $\beta'(\alpha)$ та дослідимо характер їх зміни.

$$\beta'(\alpha) = 1 - \psi K_0 \left[\cos \alpha \left(1 - \sqrt[4]{|\cos \alpha|} \right) + \frac{\sin^2 \alpha}{4 \sqrt[4]{|\cos^3 \alpha|}} \right]. \quad (4)$$

Виразимо K_0 через ψ . Отримаємо:

$$K_0 = \frac{1}{\psi \left[\cos \alpha \left(1 - \sqrt[4]{|\cos \alpha|} \right) + \sin^2 \alpha / 4 \sqrt[4]{|\cos^3 \alpha|} \right]}. \quad (5)$$

Результати дослідження $\beta'(\alpha)$ представлено на площині (K_0, ψ) . На рис. 2 представлені залежності $K_0 = K1 = K2 = K3 = K4 = K5$ від ψ для виразу (5) та для початкових умов $\alpha = \pi/16, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8, 7\pi/16$.

Отримані результати досліджень показують, що для закону регулювання виду $\sqrt[4]{x}$ K_0 зменшується із збільшенням α .

Результати досліджень дозволяють стверджувати, що очікуваний характер статистичних характеристик ФДДРП можливо отримати вибором оптимального K_0 за рахунок оптимального вибору ψ .

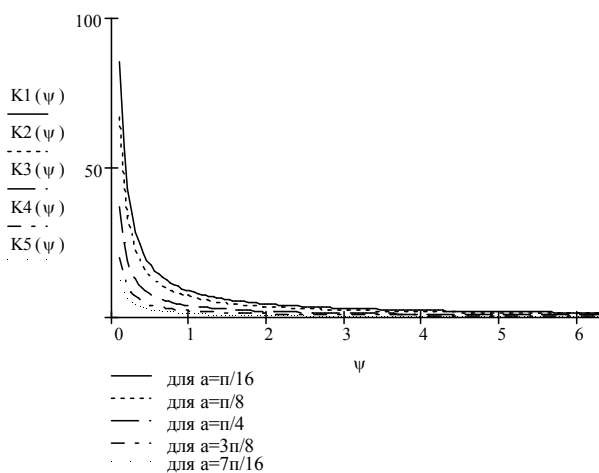


Рис. 2. Залежність K_0 від ψ для різних початкових умов

Розглянемо тепер поведінку ФДДРП у динамічному режимі, тобто у процесі биття.

Дякуючи безперервному наростанню різниці фаз у часі, робоча точка системи ФАП при досягненні екстремального положення на ділянці характеристики з позитивною крутизною стрибком переходить на таку ж робочу ділянку динамічної характеристики. У результаті динамічна характеристика ФДДРП стане у загальному випадку асиметричною.

Крім напруги биття, на виході детектора з'являється постійна складова позитивного знаку, що збільшується з ростом ψ .

Наявність постійної складової на вході управляючого елемента приводить до зменшення початкової розстройки по частоті до деякого комплексованого значення та дозволяє зменшити і при визначених ψ вирівняти смугу захоплення і смугу утримання у системі ФАП.

Розрахуємо постійну складову на виході ФДДРП. Середнє значення $F_1(\beta)$ та $F_2(\beta)$ за період:

$$U_{01} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_1(\beta) d\beta, \quad U_{02} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_2(\beta) d\beta. \quad (6)$$

Розрахунок інтегралу проведено у межах від β_0 до β_3 , на яких функція неоднозначна. На ділянках, де функції $F_1(\beta)$ та $F_2(\beta)$ однозначні, інтеграли обертаються у нуль. Розрахунок інтегралів на ділянці $[\beta_0; \beta_3]$ проведемо шляхом заміни змінної:

$$U_{01} = \int_{\beta_0}^{\beta_3} F_1(\beta) d\beta = \int_{\alpha(\beta_0)}^{\alpha(\beta_3)} F_1[\beta_1(\alpha)] \frac{d\beta_1}{d\alpha} d\alpha = \int_{\alpha(\beta_0)}^{\alpha(\beta_3)} \sin \alpha \frac{d\beta_1}{d\alpha} d\alpha, \quad (7)$$

$$U_{02} = \int_{\beta_0}^{\beta_3} F_2(\beta) d\beta = \int_{\alpha(\beta_0)}^{\alpha(\beta_3)} F_2[\beta_2(\alpha)] \frac{d\beta_2}{d\alpha} d\alpha = \int_{\alpha(\beta_0)}^{\alpha(\beta_3)} \cos \alpha \frac{d\beta_2}{d\alpha} d\alpha. \quad (8)$$

Результати розрахунків наведені залежностями $U_{01} = U_1(i) = U_{11}(i) = U_{111}(i) = U_{1111}(i) = U_{11111}(i)$ для початкових умов $\alpha = \pi/16; \pi/8; \pi/4; 3\pi/8; 7\pi/16$ відповідно при визначених значеннях K_0 з рис. 2 та $\psi = 2\pi$, де $\psi = i$ (рис. 3).

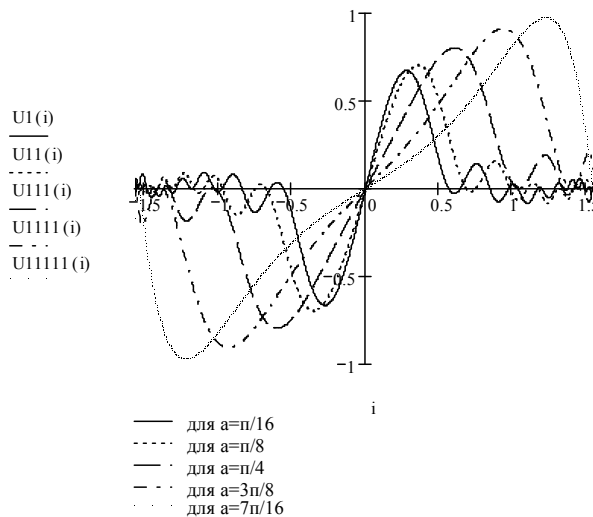


Рис. 3. Постійна складова ФДДРП для $F_1(\beta)$

Приведені дослідження ФДДРП демонструють наявність динамічного регулювання параметрів зворотного зв'язку за фазою. Його здібності суттєво залежать від величини параметрів K_0 і ψ . Із збільшенням ψ ФМ, буде розширюватися ψ характеристики ФДДРП, тим самим змінювати форму його характеристики, що наочно видно із загальної обвідної усіх представлених характеристик на рис. 3. Тоді як збільшення K_0 призводить до звуження ψ ФМ, а відповідно, і ψ характеристики самого ФДДРП.

Висновки

Створення процесу динамічного регулювання коефіцієнта підсилення МП з нелінійним законом регулювання виду $\sqrt[4]{x}$ дозволило принципово змінити характер перехідних процесів і властивості системи ФАП та досягти зменшення часу входження в синхронізм системи ФАП, що підтверджується отриманою величиною постійної складової на виході ФДДРП.

Список літератури

1. Леньшин А.В. Системи імпульсно-фазової автоподстройки в пристроях синтезу та стабілізації частот / А.в. Леньшин. – М.: Радио и связь, 2010. – 327 с.
2. Макаров С.А. Система фазової автопідстройки з колом зворотного зв'язку, параметри якого регулюються динамічно / С.А. Макаров, К.В. Подоляко // 1-й Міжнародний радіоелектронний Форум «Прикладна радіоелектроніка. Состояние и перспективы развития»: Сб. научн. тр. – Х.: АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2002. – С. 494 – 497.

3. Чекунова О.М. Математична модель оптимальної по швидкодії нелінійної системи ФАП / О.М. Чекунова, С.А. Макаров, О.В. Чечуй // Радіотехніка. – 2007. – Вип. 150. – С. 100 – 103.

4. Макаров С.А. Математична модель швидкодіючої самонастроювальної нелінійної системи фазового автоподстроювання частоти / С.А. Макаров, О.М. Чекуно-

ва, С.А. Юхновський // Радіотехніка. – 2014. – Вип. 176. – С. 258 – 261.

Надійшла до редколегії 20.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.І. Лосев, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

СОСТАВНОЙ ФАЗОВЫЙ ДЕТЕКТОР С ДИНАМИЧЕСКИ РЕГУЛИРОВАННЫМ ПАРАМЕТРОМ ЭЛЕМЕНТА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ С ФАЗОВЫМ РЕГУЛЯТОРОМ ПО НЕЛИНЕЙНОМУ ЗАКОНУ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

С.А. Макаров, О.Н. Чекунова, С.А. Юхновский, О.В. Никитин

В работе исследованы свойства составного фазового детектора с регулированием коэффициента усиления модифицированного усилителя по нелинейному закону регулирования вида $\sqrt[4]{x}$, установленного в кольцо обратной связи по фазе.

Ключевые слова: система фазовой автоподстройки, фазовый детектор с динамически регулирующими параметрами, нелинейный закон регулирования, коэффициент усиления, кольцо обратной связи по фазе.

COMPONENT PHASE DETECTOR WITH DYNAMICALLY REGULATED PARAMETER OF ELEMENT OF THE FEEDBACK PHASE REGULATOR ON NONLINEAR LAW AS A PART OF THE FAP SYSTEM

S.A. Makarov, O.N. Chekunova, S.A. Yuhnovsky, O.N. Nikitin

The properties of the phase detector with gain control of modified amplifier on nonlinear control law with form $\sqrt[4]{x}$, that is established in the phase feedback, are investigated in the paper.

Keywords: system of phase-locked loop, phase detector with a dynamically adjustable parameters, nonlinear control law, amplification factor, the feedback circuit phase.