

УДК 621.3.072.6

С.А. Макаров<sup>1</sup>, О.М. Чекунова<sup>1</sup>, С.А. Юхновський<sup>2</sup>, О.В. Нікітін<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

<sup>2</sup> 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 елемента відповідною групою математичних елементів з урахуванням функцій, що ним виконуються, яка відбиває всі перетворення, що в ній відбуваються.

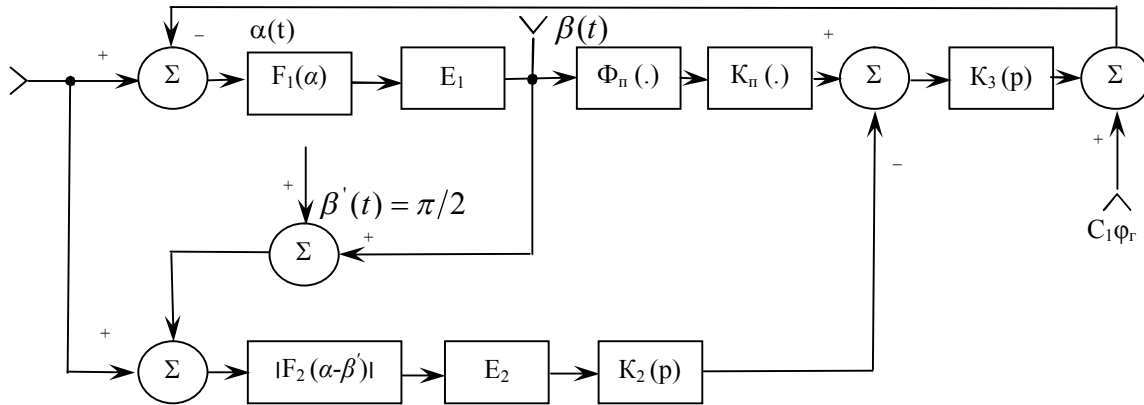


Рис. 1. Структурна схема математичної моделі ФДДРП

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;  $\Phi_n(.)$  – нелінійна функція характеристики підсилення МП;  $K_n(.)$  – 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;  $\beta'$  – фазовий зсув сигналу у ФО;  $C_1$  – коефіцієнт перетворення частоти ГКН.

Система рівнянь, що описує ФДДРП відносно різниці фаз  $\beta$  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  $\psi$  – 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  $\alpha$ , 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  $\psi$ . 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  $(K_0, \psi)$ . На рис. 2 представлені залежності  $K_0 = K1 = K2 = K3 = K4 = K5$  від  $\psi$  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  $\alpha$ .

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

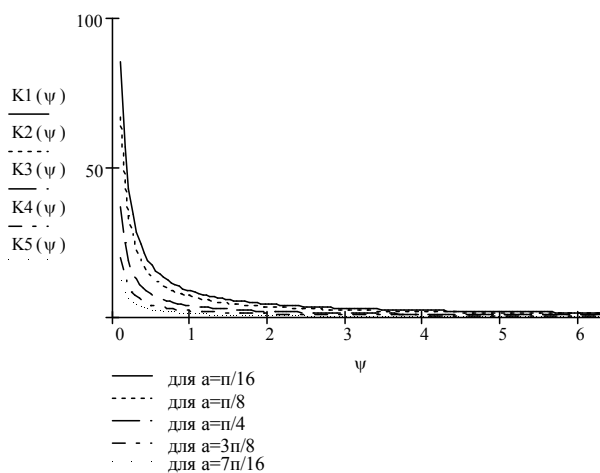


Рис. 2. Залежність  $K_0$  від  $\psi$  для різних початкових умов

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  $\psi$ .

Наявність постійної складової на вході управляючого елементу приводить до зменшення початкової розстройки по частоті до деякого комплексованого значення та дозволяє зменшити  $i$  при визначених  $\psi$  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  $\beta_0$  до  $\beta_3$ , 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).

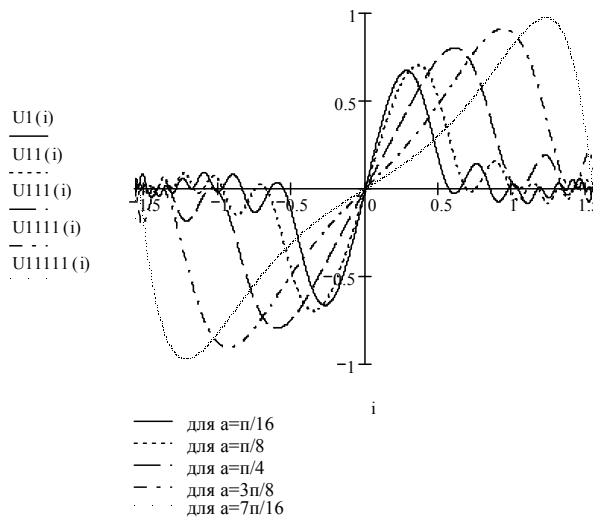


Рис. 3. Постійна складова ФДДРП для  $F_1(\beta)$

Приведені дослідження ФДДРП демонструють наявність динамічного регулювання параметрів зворотного зв'язку за фазою. Його здібності суттєво залежать від величини параметрів  $K_0$  і  $\psi$ . Із збільшенням  $\psi$  ФМ, буде розширюватися  $\psi$  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  $\psi$  ФМ, а відповідно, і  $\psi$  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 радіоелектроника. 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.