УДК 621.3.072.6

С.А. Макаров[1], С.А. Юхновський[2], О.М. Чекунова[1], Д.В. Кепко[1]

[1] *Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*
[2] *Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця*

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДОВОГО ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА З ДИНАМІЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ КОЕФІЦІЄНТА ПІДСИЛЕННЯ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ ЗА ЗАКОНОМ КОРЕНЯ ЧЕТВЕРТОГО СТЕПЕНЯ

У роботі проаналізовано складовий фазовий детектор із динамічним регулюванням коефіцієнта підсилення за законом кореня четвертого степеня та проведено порівняння його динамічних та статистичних характеристик при застосуванні нелінійних законів регулювання квадратного кореня та арктангенсу за критерієм підвищення швидкодії системи фазового автопідстроювання частоти (ФАП).

Ключові слова: *фазовий детектор із регулюванням коефіцієнта підсилення (ФДРКП), нелінійний закон регулювання, коефіцієнт підсилення, коло зворотного зв'язку по фазі.*

Постановка проблеми

Успіхи в розвитку телекомунікаційних систем в значній мірі визначаються можливостями виконання стабільних по частоті і фазі джерел коливань. Висока стабільність частоти і фази є необхідною умовою якісної передачі інформації.

На сучасному етапі розвитку систем зв'язку особливої уваги потребують питання проектування систем ФАП, як основної складової пристроїв синтезу та стабілізації частоти. Їх широке використання в системах радіозв'язку, телебаченні і радіолокації і багатьох інших радіотехнічних системах висуває достатньо високі вимоги з швидкості перебудови за частотою та до чистоти спектру сигналу в передавальних і приймальних пристроях. Вимоги до динамічних та спектральних характеристик знаходяться в протиріччі, яке в даній публікації запропоновано вирішити шляхом застосування нелінійного закону - кореня четвертого степеня при регулюванні коефіцієнта підсилення кола зворотного зв'язку з фазовим регулятором.

Метою статті є порівняння динамічних та статистичних характеристик складового ФДРКП кола зворотного зв'язку за законом кореня четвертого степеня та ФДРКП із законами регулювання квадратного кореня та арктангенсу за критерієм підвищення швидкодії системи ФАП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У публікаціях [1, 2] реалізовано моделі нелінійних систем ФАП з урахуванням законів регулювання виду $arctg(x)$ або $\sqrt{x}$ [1], та $\sqrt[4]{x}$ [2].

На основі моделей, представлених у роботах [1, 2], у статті [3] запропоновано фазовий детектор із регулюванням параметра кола зворотного зв'язку за нелінійними законами виду $arctg(x)$ або $\sqrt{x}$.

У роботі [4] запропоновано обґрунтований підхід до вибору оптимального нелінійного закону регулювання з точки зору підвищення швидкодії.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 представлена функціональна схема моделі ФДРКП. На рис. 2 представлена узагальнена схема математичної моделі ФДРКП для нелінійних законів регулювання з урахуванням функцій, що ним виконуються, де α(t) – різниця фаз вхідного сигналу і сигналу з виходу ГКН; β(t) – різниця між фазою вхідного сигналу та фазою на виході ФДРКП; $F_1(a)$ – нормована характеристика ФД1; E_1 – максимальна напруга, яку видає ФД1; $Ф_п(.)$ – нелінійна функція характеристик підсилення модифікованого підсилювача (МП); $K_п(.)$ – нелінійна функція характеристик управління коефіцієнта підсилення МП; $K_3(p)$ – передаточна функція ФНЧ3; $|F_2(a - β')|$ – нормована характеристика ФД2; E_2 – максимальна напруга, яку видає ФД2; $K_2(p)$ – передаточна функція ФНЧ2; β' – фазовий зсув сигналу у фазовому обертувачі (ФО); C_1 – коефіцієнт перетворення частоти ГКН.

Відмінність представленої схеми ФДРКП від традиційного фазового детектора системи ФАП полягає у наявності додаткового входу регулювання коефіцієнта підсилення модифікованого підсилювача (МП), встановленого у колі зворотного зв'язку по фазі з фазовим регулятором, і каналу оцінки стану системи ФАП, що забезпечує динамічну зміну коефіцієнта підсилення за законом регулювання кореня четвертого степеня.

Особливістю схеми є її універсальність, тобто можливість застосування будь-якого нелінійного закону регулювання. У публікації [4] доведено ефективність закону регулювання кореня четвертого степеня в порівнянні з тригонометричними та ступінними законами за критерієм підвищення швидкодії системи ФАП. При виборі нелінійних функцій однією з умов застосування закону регулювання є убування першої похідної функції (закону регулювання) від аргументу.

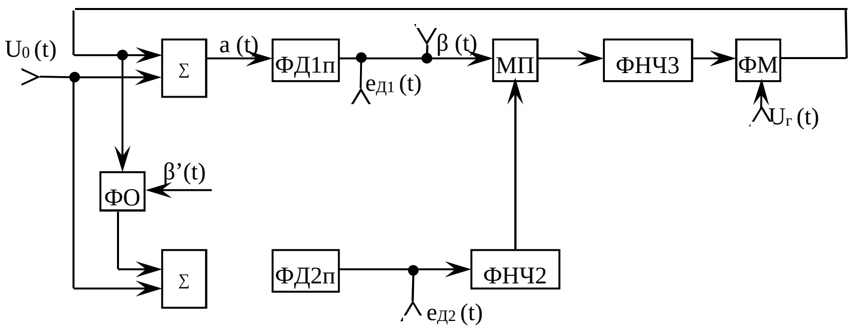

Рис. 1. Функціональна схема моделі ФДРКП для нелінійних законів регулювання

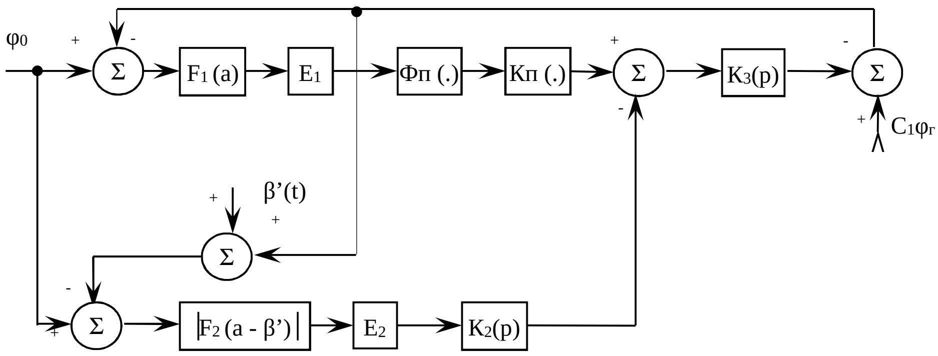

Рис. 2. Узагальнена схема математичної моделі ФДРКП для нелінійних законів регулювання

Система рівнянь, що описує ФДРКП відносно різниці фаз β для нелінійного закону регулювання коефіцієнта підсилення за виразом кореня четвертого степеня:

$$\left.\begin{aligned} F_1(\ ) &= F_1\left\{\ \ + \cdot K_0(1-\sqrt[4]{\left|F_2(\ )\right|K_2(p)})F_1(\ )K_3(p)\right\}; \\ F_2(\ ) &= F_2\left\{\ - \ '+ \cdot K_0(1-\sqrt[4]{\left|F_2(\ )\right|K_2(p)})F_1(\ )K_3(p)\right\}, \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

де $\cdot$ – максимальний динамічний діапазон ФМ; K_0 – максимальний коефіцієнт підсилення МП.

У випадку квазістатистичної зміни різниці фаз $p \equiv 0$, впливом фільтру ФНЧ2 каналу оцінки стану і фільтруючими здібностями ФНЧ3 можна знехтувати, тобто $K_2(p) = K_3(p) = 1$, тоді після нескладних перетворень із системи рівнянь (1) отримаємо залежність $(\sim)$ для закону регулювання виду $\sqrt[4]{x}$:

$$(\sim) = \sim - \cdot K_0 \sin\sim\left(1-\sqrt[4]{\cos(a)}\right). \quad (2)$$

Знайшовши похідну залежності (2), виразивши K_0 через $\cdot$ з урахуванням нормування, отримаємо:

$$K_0 = \frac{1}{\cdot\left[\cos\sim\left(1-\sqrt[4]{\left|\cos\sim\right|}\right)+\dfrac{\sin^2\sim}{4\sqrt[4]{\left|\cos^3\sim\right|}}\right]}. \quad (3)$$

Характер зміни за виразом (3) дослідимо залежностями $K_0(\cdot\ )$, які наведені на рис. 3 - 5.

На рис. 3 представлена залежність $K_0(\cdot\ ) = K1(\cdot\ )$ для початкової розстройки $\sim = ^{®}\!/_{16}$, на рис. 4 – $K_0(\cdot\ ) = K3(\cdot\ )$ для $\sim = ^{®}\!/_{4}$, на рис. 5 – $K_0(\cdot\ ) = K5(\cdot\ )$ для $\sim = ^{7®}\!/_{16}$. Дослідження залежностей $K_0(\cdot\ )$ доводять убуваючий характер K_0 МП від збільшення $\cdot$ ФМ, тому виникає необхідність обрання великого значення $\cdot$ ФМ, тому що при малих значеннях $\cdot$ ФМ є складність практичної реалізації підсилювачів із великим коефіцієнтом підсилення для систем ФАП.

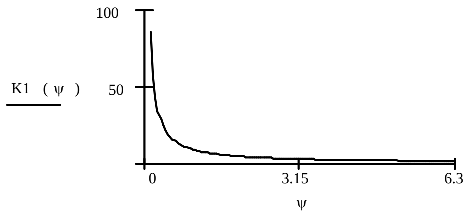

Рис. 3. Залежність K_0 від · для $\alpha = \pi / 16$

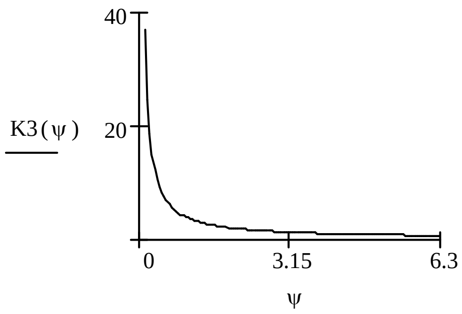

Рис. 4. Залежність K_0 від · для $\sim = ®/4$

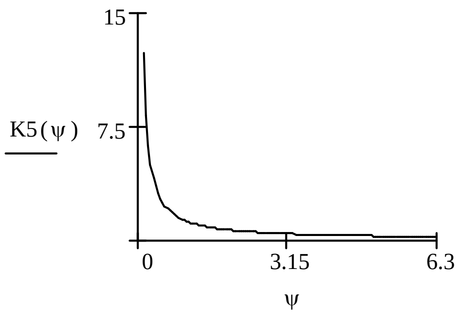

Рис. 5. Залежність K_0 від · для $\sim = 7®/16$

Поведінку ФДРКП у динамічному режимі оцінимо величиною постійної складової напруги на вході управляючого елементу ГКН. У загальному випадку розрахунок постійної складової на виході ФДРКП для нелінійних законів регулювання за період визначається наступним чином:

$$U_{01} = \frac{1}{2®} \int_0^{2®} F_1(\quad) d \quad , \qquad (4)$$

$$U_{02} = \frac{1}{2®} \int_0^{2®} F_2(\quad) d \quad . \qquad (5)$$

Розрахунок інтегралу проведено у межах, на яких функція однозначна. Результати розрахунків для ФД1 представлені залежностями $U_{01} = U1(i) = U11(i) = U111(i) = U1111(i) =$ $= U11111(i)$ для початкової різниці фаз $\sim = ®/16; ®/8; ®/4; 3®/8; 7®/16$ відповідно при значеннях K_0 з рис. 3-5 та $· = \text{i} = 2®$ (рис. 6) та для ФД2 аналогічно на рис. 7.

Для порівняння швидкодії системи ФАП із нелінійними законами регулювання на рис. 8 - 9 наведено залежності постійних складових на виході ФДРКП у динамічному режимі $U_{01} = U22222(i)$ та $U_{01} = U33333(i)$ відповідно для нелінійних законів регулювання виду $\sqrt{x}$ і $arctg(x)$ для $\sim = ®/16; ®/8; ®/4; 3®/8; 7®/16$.

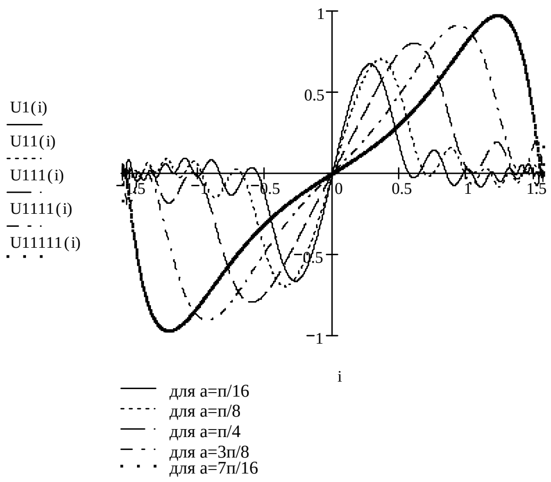

Рис. 6. Постійна складова ФДРКП з $F_1(\quad)$ для $\sqrt[4]{x}$

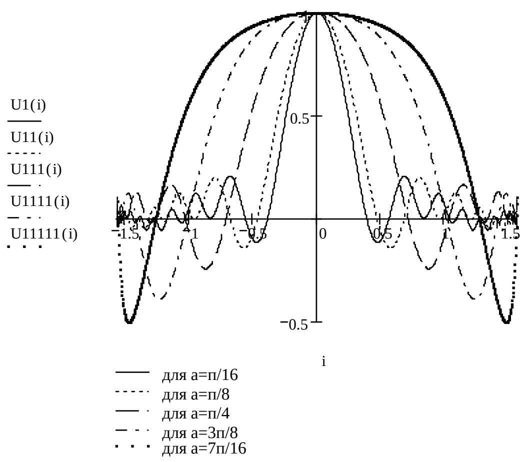

Рис. 7. Постійна складова ФДРКП з $F_2(\quad)$ для $\sqrt[4]{x}$

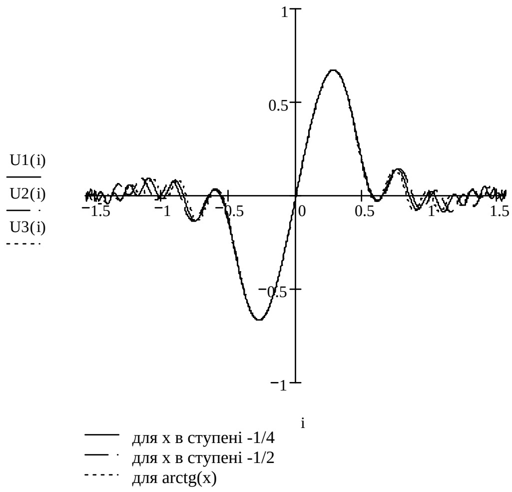

Рис. 8. Постійна складова ФДРКП з $F_1(\ )$ для $\sqrt{x}$

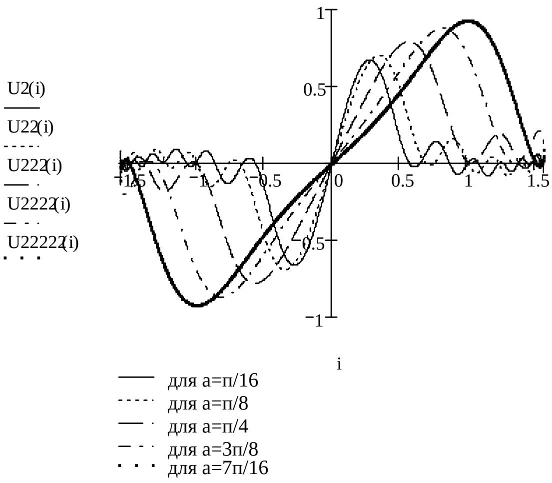

Рис. 9. Постійна складова ФДРКП з $F_1(\ )$

для $arctg(x)$

На рис. 10 наведено залежності постійних складових на виході ФДРКП $U_{01} = U1(i)$, $U_{01} = U2(i)$ і $U_{01} = U3(i)$ для законів регулювання виду $\sqrt[4]{x}$, $\sqrt{x}$ і $arctg(x)$ відповідно для початкової розстройки $\sim = ®/16$, а на рис. 11 – $U_{01} = U11111(i) =, = U22222(i) = U33333(i)$ для $\sim = 7®/16$.

Дослідження ФДРКП демонструють наявність динамічного регулювання параметрів зворотного зв'язку за фазою. З рис. 6 - 11 видно, що збільшення · ФМ призводить до розширення $F_1(\ )$ ФДРКП та зміни форми його динамічної характеристики, що підтверджує загальна обвідна характеристик $F_1(\ )$.

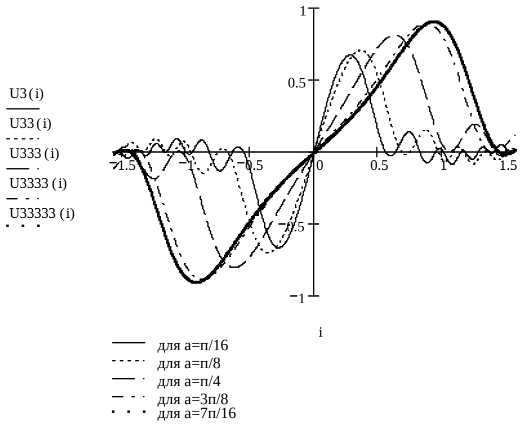

Рис. 10. Постійна складова ФДРКП з $F_1(\ )$

з нелінійними законами регулювання і $\sim = ®/16$

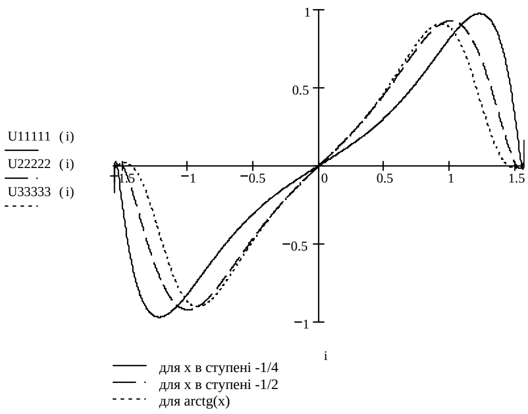

Рис. 11. Постійна складова ФДРКП з $F_1(\ )$

з нелінійними законами регулювання і $\sim = 7®/16$

Узагальнені результати розрахунків виграшу по швидкодії ФДРКП з нелінійними законами регулювання зведені до таблиці.

Числові значення виграшу по швидкодії

Вид закону	$\sqrt[4]{x}$	$\sqrt{x}$	$arctg(x)$
Площа	1,106	0,98	0,878
Виграш, %	11,4		
		10,5	
	порівняння $\sqrt[4]{x}$ з $arctg(x)$: 20,7		

Аналіз результатів розрахунків, що наведені у таблиці, свідчить про те, що постійна складова на виході ФДРКП у динамічному режимі із законом регулювання виду $\sqrt[4]{x}$ більша в порівнянні з нелінійними законами регулювання виду $\sqrt{x}$ та $arctg(x)$, оскільки загальна площа характеристики $F_1(\ )$ з урахуванням динамічного регулювання коефіцієнта підсилення кола зворотного зв'язку за фазою більша (див. табл.). Виграш по швидкодії складає між ступінними законами 11,4 %, між ступінним і тригонометричним: у випадку з $\sqrt{x}$ – 10,5 %, з $\sqrt[4]{x}$ – 20,7 %.

Висновки

У ході проведених досліджень статистичних та динамічних характеристик удосконаленого складового фазового детектора з динамічним регулюванням коефіцієнта підсилення системи ФАП за законом кореня четвертого степеня визначено, що виграш по швидкодії складає від 10 % до 20 %.

Список літератури

1. *Чекунова О.М. Математична модель оптимальної по швидкодії нелінійної системи ФАП / С.А. Макаров, О.В. Чечуй // Радіотехніка. – 2007. – Вип. 150. – С. 100 – 103.*
2. *Макаров С.А. Математична модель швидкодіючої самонастроювальної нелінійної системи фазового автопідстроювання частоти / О.М. Чекунова, С.А. Юхновський // Радіотехніка. – 2014. – Вип. 176. – С. 258 – 261.*
3. *Чекунова О.М. Фазовий детектор із нелінійними законами адаптації системи фазового автопідстроювання синтезатора частот / О.М. Чекунова // НАКУ «ХАИ». Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. –Вып.6(42). – С. 82 – 86.*
4. *Юхновський С.А. Обґрунтування виду нелінійного закону регулювання параметру додаткового зворотного зв'язку за фазою системи фазового автопідстроювання частоти / С.А. Макаров, О.М. Чекунова // Системи обробки інформації. – 2013. – Вип. 21(109). – С. 103 – 105.*

Надійшла до редакції 27.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук О.І. Тімочко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВНОГО ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА С ДИНАММЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ПО ЗАКОНУ КОРНЯ ЧЕТВЕРТОЙ СТЕПЕНИ

С.А. Макаров, С.А. Юхновский, О.Н. Чекунова, Д.В. Кепко

В работе проанализирован усовершенствованный фазовый детектор с регулированием коэффициента усиления по закону корня четвертой степени и проведено сравнение их динамических и статистических характеристик при применении нелинейных законов регулирования квадратного корня и арктангенса по критерию повышения быстродействия системы фазовой автоподстройки частоты (ФАП).

Ключевые слова: *фазовый детектор с регулированием коэффициента усиления (ФДРКУ), нелинейный закон регулирования, коэффициент усиления, цепь обратной связи по фазе.*

STUDIES COMPONENT PHASE DETECTOR WITH DYNAMICALLY REGULATED COEFFICIENT OF GAIN PLL SYSTEM ON LAW FOURTH ROOT.

S.A Makarov, S.A. Yuhnovsky, O.N. Chekunova, D.V. Kepko

In the course we estimate component phase detector with dynamically regulated coefficient of gain by law form and compared his dynamically and static characteristics when used nonlinear or law regulated by the criterion of increase performance the PLL system.

Keywords: *phase detector with a dynamically regulated coefficient of gain, nonlinear control law, amplification factor, the feedback circuit phase.*