

УДК 621.3.072.6

С.А. Юхновський<sup>1</sup>, С.А. Макаров<sup>2</sup>, О.М. Чекунова<sup>2</sup><sup>1</sup> Командування Повітряних Сил Збройних Сил України, Вінниця<sup>2</sup> Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ОБҐРУНТУВАННЯ ВИДУ НЕЛІНІЙНОГО ЗАКОМУ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРУ ДОДАТКОВОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ ЗА ФАЗОЮ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

У роботі проаналізовано алгебраїчні нелінійні закони зміни аргументу та проведено їх порівняння між собою й з лінійним законом з одиначною крутизною за параметром площі під функцією у межах зміни аргументу від 0 до  $\pi/2$ . Обґрунтовано вибір нелінійного закону регулювання параметру зворотного зв'язку за фазою системи фазового автопідстроювання частоти (ФАП) для синтезу оптимальної по швидкодії системи ФАП.

**Ключові слова:** техніка синтезу і стабілізації частот (ТССЧ), система фазового автопідстроювання частоти (ФАП), адаптивна система, швидкодія, закон регулювання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При розробці сучасних радіотехнічних телекомунікаційних систем різного призначення неможливо обійтися без застосування систем фазової синхронізації. Це обумовлено передусім їх потенційною можливістю забезпечувати рівність частот двох або декількох сигналів, реалізацією з високою точністю режиму стеження по частоті одного сигналу за іншим, якісною фільтрацією сигналів на фоні завад тощо.

Особливість ТССЧ полягає в тому, що при підвищених вимогах до чистоти спектра вихідного сигналу неможливо вирішити поставлені завдання за допомогою простих технічних рішень і доводиться застосовувати складні, комбіновані та багатокілі структури побудови систем.

Стрімке удосконалення широкодіапазонної приймально-передавальної апаратури телекомунікаційних мереж весь час потребує підвищення вимог до якісних показників ТССЧ, зокрема до систем ФАП. Однак виконання заданих вимог часто буває технічно не реалізованим системами ФАП, синтезованими відомими методами. Ситуація ускладнюється також тим, що вимоги до сучасних систем ФАП є взаємно протилежними. Тому в якості перспективного напрямку досліджень, який дозволяє частково вирішити протиріччя між динамічними та спектральними характеристиками таких систем запропоновано використання систем синтезу і стабілізації частоти із змінною структурою та параметрами елементів. Однак такі адаптивні системи потребують знань їх поведінки в нелінійних режимах, що характеризуються складною динамікою та можливою появою додаткових фазових помилок в синхронному режимі.

В даній статті запропоновано обґрунтувати оптимальний по швидкодії закон регулювання пара-

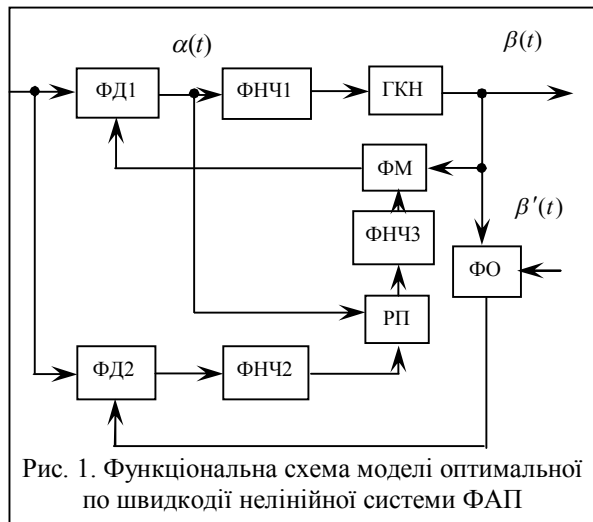
метру зворотного зв'язку за фазою для будь-якої нелінійної системи ФАП.

**Метою статті** є вибір закону регулювання параметру зворотного зв'язку за фазою системи ФАП для підвищення її швидкодії за умови високих фільтруючих здібностей та заданої точності стеження за фазою в сталому режимі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В монографії [1] запропоновано використання систем синтезу і стабілізації частоти із змінною структурою та параметрами елементів. В публікаціях [2, 3] розглянуто існуючі класи систем ФАП та приклади підвищення їх якісних показників. В роботі [4] реалізовано модель нелінійної системи ФАП з урахуванням закону регулювання параметрів додаткового зворотного зв'язку за фазою виду  $\arctg$ .

### Виклад основного матеріалу

В адаптивних системах ФАП структурний синтез полягає у введенні зворотних зв'язків за фазою, параметри яких регулюються напругою каналу оцінки стану системи; а параметричний синтез - у динамічній зміні параметрів системи ФАП під час перестройки. Як приклад, на рис. 1 наведена функціональна схема моделі оптимальної по швидкодії нелінійної системи ФАП, яка містить додатковий вхід регулювання коефіцієнту підсилення регульованого підсилювача (РП), що встановлений у одному з ланцюгів зворотного зв'язку по фазі (ФД1, РП, ФНЧ3, ФМ), який забезпечує динамічну зміну коефіцієнту підсилення РП за законом регулювання виду  $\arctg$ , і канал оцінки стану системи ФАП (ФО, ФД2, ФНЧ2). При реалізації даної моделі використано як структурний, так і параметричний синтез, але не обґрунтовано вибір закону регулювання параметру зворотного зв'язку за фазою. Тому питання вибору закону динамічного регулювання параметру зворотного зв'язку за фазою залишається актуальним.



Серед алгебраїчних функцій були проаналізовані як лінійні, так і нелінійні функції. Дослідження ряду лінійних функцій дозволило зробити висновок про невідповідність сучасним вимогам по швидкодії під час динамічної зміни параметрів системи ФАП. В якості нелінійних функцій досліджувалися тригонометричні, гіперболічні, логарифмічні та ступінні функції. При виборі функцій однією з умов застосування закону регулювання є те, що перша похідна від функції (закону регулювання) повинна бути убиваючою функцією від аргументу. Даній умові серед тригонометричних функцій задовольняє функція  $\arctg(x)$ , серед гіперболічних –  $\operatorname{arsh}(x)$ , серед логарифмічних –  $\ln(x)$ , серед ступінних –  $\sqrt{x}$  та  $\sqrt[3]{x}$ . Інші існуючі алгебраїчних функцій або не задовольняють умові, або потребують накладення жорстких обмежень.

На рис. 2 побудовано наведені вище функції, де  $a(x)$  зображено лінійну функцію для порівняння з нелінійними:

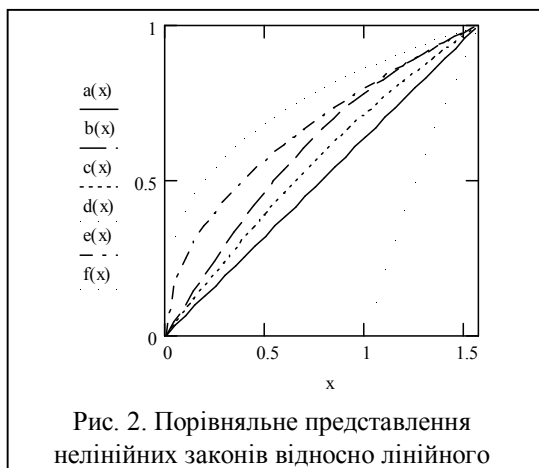
$$b(x) = \arctg(x), c(x) = \operatorname{arsh}(x),$$

$$d(x) = \ln(x), e(x) = \sqrt{x}, f(x) = \sqrt[3]{x};$$

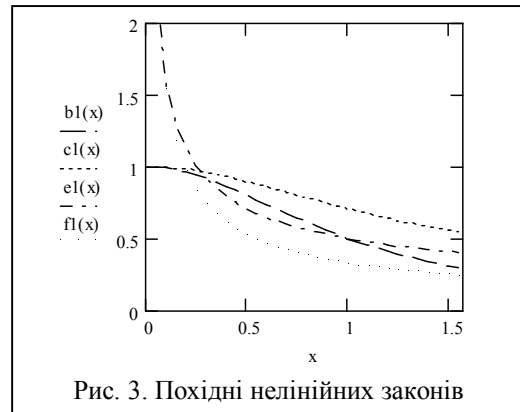
а на рис. 3 – їх похідні:

$$b1(x) = (\arctg(x))', c1(x) = (\operatorname{arsh}(x))',$$

$$e1(x) = (\sqrt{x})', f1(x) = (\sqrt[3]{x})'.$$



З рис. 2 видно, що функція  $\ln(x)$  розташована нижче лінійної функції, тобто постійна складова сигналу управління буде меншою, що призводить до зменшення швидкодії, тому в подальшому ця функція не розглядається. Всі інші функції відповідають вимозі підвищення швидкодії, крім того, слід зазначити, що ступінні функції найкраще, ніж гіперболічна та тригонометрична. Тому саме вони потребують подальшого детального аналізу.



Аналіз похідних обраних функцій, які наведені на рис. 3, свідчить, що вони убиваючі від аргументу.

Подальші дослідження проводилися в напрямку аналізу ступінних функцій. З рис.2 видно, що площа під функцією  $\sqrt{x}$  менша, ніж під функцією  $\sqrt[3]{x}$ . А саме площа фігури пов'язана з величиною постійної складової напруги на виході ФД1 (рис.1), що і визначає швидкодію системи ФАП в цілому, тому саме площу фігур ступінних функцій необхідно порівняти.

На рис. 4 побудовано ступінні функції у порівнянні з функцією  $\arctg(x)$ , де

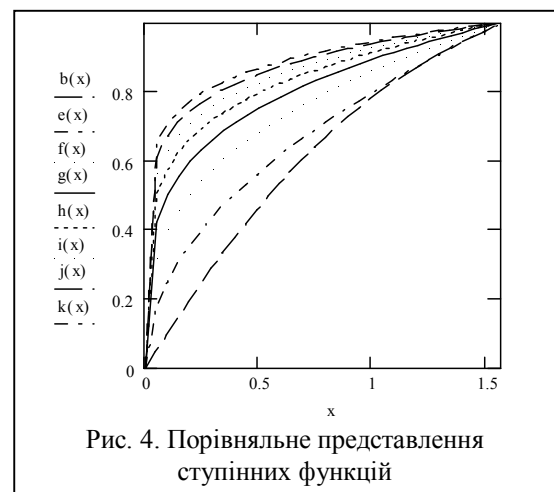
$$b(x) = \arctg(x), e(x) = \sqrt{x}, f(x) = \sqrt[3]{x}, g(x) = \sqrt[4]{x},$$

$$h(x) = \sqrt[5]{x}, i(x) = \sqrt[6]{x}, j(x) = \sqrt[7]{x}, k(x) = \sqrt[8]{x},$$

а на рис. 5 – їх похідні  $b1(x) = (\arctg(x))'$ ,

$$e1(x) = (\sqrt{x})', f1(x) = (\sqrt[3]{x})', g1(x) = (\sqrt[4]{x})', h1(x) = (\sqrt[5]{x})',$$

$$i1(x) = (\sqrt[6]{x})', j1(x) = (\sqrt[7]{x})', k1(x) = (\sqrt[8]{x})'.$$



Аналіз функцій, наведених на рис. 4, свідчить, що з ростом ступеню кореневої функції прирощення площі фігури під функцією або визначеного інтегралу від функції зменшується.

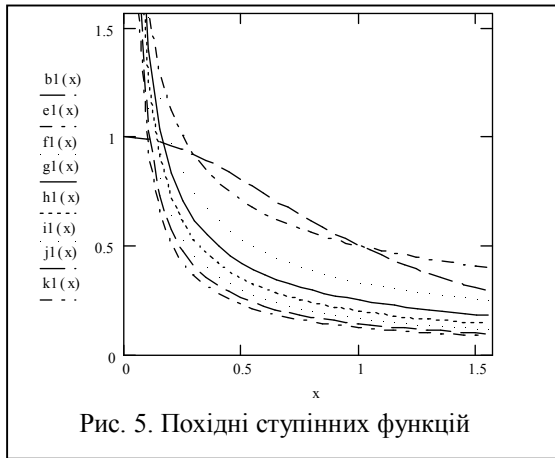


Рис. 5. Похідні ступінних функцій

Аналіз похідних всіх ступінних функцій, які наведені на рис. 5, свідчить, що вони також є убываючими від аргументу.

Для обґрунтування виду нелінійного закону регулювання результати розрахунків визначеного інтегралу відповідної функції або площі фігури (S) та її прирощення ( $\Delta$ ) відносно визначеного інтегралу функції  $\arctg(x)$  зведені до таблиці.

Таблиця 1

Числові значення визначеного інтегралу ступінних функцій та його прирощення

	$\sqrt{x}$	$\sqrt[3]{x}$	$\sqrt[4]{x}$	$\sqrt[5]{x}$	$\sqrt[6]{x}$	$\sqrt[7]{x}$	$\sqrt[8]{x}$
S	1,047	1,178	1,256	1,308	1,346	1,374	1,396
$\Delta$ , %	9,2	19,3	24,3	27,3	29,3	30,8	31,9
Різниця	10,1		3		1,5		
$\Delta$ , %		5		2		1,1	

Аналіз результатів розрахунків, що наведені у таблиці, свідчить про те, що починаючи із ступінної

функції  $\sqrt[5]{x}$  різниця прирощення складає від 3 % і менше, тобто незначна, тому дану функцію та наступні  $\sqrt[6]{x}$ ,  $\sqrt[7]{x}$ ,  $\sqrt[8]{x}$  застосовувати не має сенсу. Доцільно обрати функцію  $\sqrt[4]{x}$ .

## Висновки

Використання адаптивних систем ФАП з високими динамічними характеристиками забезпечує можливість підвищення сукупності основних показників якості (швидкість перебудови з однієї частоти на іншу, широкodiaпазонність, якість спектральних та модуляційних характеристик) ТССЧ приймально-передавальної апаратури телекомунікаційних систем.

Дослідження нелінійних функцій дозволило зробити висновок про обґрунтованість вибору нелінійного закону регулювання з однієї із ступінних функцій, а саме  $\sqrt[4]{x}$ , що забезпечує підвищення величини постійної складової напруги на виході ФД1, тобто підвищує швидкість системи.

## Список літератури

1. Романов С.К. Системы импульсно-фазовой автоподстройки в устройствах синтеза и стабилизации частот / С.К. Романов, Н.М. Тихомиров, А.В. Леньшин. – М.: Радио и связь, 2010. – 327 с.
2. Стеклов В.К. Комбинированные системы ФАП / В.К. Стеклов, А.А. Руденко, А.К. Юдин. – К: Техніка, 2004. – 327 с.
3. Стеклов В.К. Анализ нелинейных систем фазовой автоподстройки / В.К. Стеклов, В.В. Мирошников // К: Зв'язок, 2005. – № 1. – С. 60 – 63.
4. 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.

Надійшла до редколегії 1.02.2013

Рецензент: д-р техн. наук, доцент К.С. Васюта, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ОБОСНОВАНИЕ ВИДА НЕЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ФАЗЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

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

В работе проанализировано алгебраические нелинейные законы изменения аргумента и проведено их сравнение между собой и с линейным законом с одиночной крутизной за параметром площади под функцией в пределах изменения аргумента от 0 до  $\pi/2$ . Обосновано выбор нелинейного закона регулирования параметра обратной связи по фазе системы ФАП для синтеза оптимальной по быстродействию системы ФАП.

**Ключевые слова:** техника синтеза и стабилизации частот (ТССЧ), система фазовой автоподстройки частоты (ФАП), адаптивная система, быстродействие, закон регулирования.

## JUSTIFICATION FOR THE FORM OF NONLINEAR CONTROL LAW OF THE PARAMETER OF ADDITIONAL FEEDBACK IN PHASE-LOCKED LOOP SYSTEM

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

Nonlinear algebraic laws of the argument variation are analyzed in the paper and compared with each other and with the linear law of a single slope area parameter under the function within the argument from 0 to  $\pi/2$ . The choice of a nonlinear control law of the parameter of additional feedback in phase-locked loop system for the synthesis of time-optimal PLL system is justified.

**Keywords:** technique of frequencies synthesis and stabilization (TSSF), phase-locked loop system (PLL), adaptive system, operation speed, law of control.