

УДК 681.5.011

Полоневич А. П., канд. техн. наук (Тел.: +380 (97) 7516093. E-mail: Polonevuch@mail.ru)  
(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

## ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СИСТЕМ ФАЗОВОЇ АВТОПІДСТРОЙКИ ЧАСТОТИ

**Полоневич А. П. Підвищення показників якості систем фазової автопідстройки частоти.** Вирішена наукова задача синтезу системи фазової автопідстройки частоти, що дозволяє підвищити ефективність роботи мережі синхронізації та вірогідність переданої інформації. Головна увага в роботі приділена методам підвищення показників якості систем фазової автопідстройки частоти. Виконано синтез розімкненого зв'язку по задаючій дії комбінованої системи фазового автопідстроювання частоти і системи фазового автопідстроювання частоти з диференціальним зв'язком відповідно до умов підвищення її динамічної точності і швидкодії.

**Ключові слова:** система фазової автопідстройки, мережа синхронізації, частота, динамічна точність, швидкодія, похибка, математична модель

**Полоневич А. П. Повышение показателей качества систем фазовой автоподстройки частоты.** Решена научная задача синтеза системы фазовой автоподстройки частоты, которая позволяет повысить эффективность работ сети синхронизации и вероятность передаваемой информации. Главное внимание в работе уделено методам повышения показателей качества систем фазовой автоподстройки частоты. Выполнен синтез разомкнутой связи по задающему воздействию комбинированной системы фазовой автоподстройки частоты и системы фазовой автоподстройки частоты с дифференциальной связью в соответствии с условиями повышения ее динамической точности и быстродействия.

**Ключевые слова:** система фазовой автоподстройки, сеть синхронизации, частота, динамическая точность, быстродействие, ошибка, математическая модель

**Вступ.** Для побудови загальнонаціональної мережі синхронізації з метою забезпечення синхронного режиму великої кількості технічних пристроїв зв'язку, розташованих на великій території, широко використовуються системи фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ). Від показників якості цих систем залежить ефективність роботи мережі синхронізації, вірогідність переданої інформації від джерела до її одержувача.

Аналізу динамічних характеристик систем ФАПЧ і методів підвищення їх показників якості присвячено досить велика кількість наукових та науково-практичних досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених, серед яких: Пестряков В. Б., Ліндсей В. Л., Шахільдян В. В., Клеппер Дж. і Френк Дж., Гостев В. І., Панкратов В. П., Зайцев Г. Ф., Стеклов В. К. та ін. [1...6]

Однак вимоги до показників якості мережі синхронізації апаратури зв'язку постійно зростають. Тому актуальною є задача поліпшення динамічних характеристик систем ФАПЧ і підвищення основних показників якості цих систем – динамічної точності і швидкодії.

**Комбіновані системи ФАПЧ.** Одним із способів зменшення динамічних помилок систем автоматичного управління, до яких відноситься і система ФАПЧ, є підвищення коефіцієнту підсилення системи в розімкненому стані  $k_p$ . Однак при збільшенні  $k_p$  зменшується запас стійкості системи, що призводить до погіршення перехідних процесів, зменшенню її швидкодії, тобто в традиційних системах ФАПЧ з принципом управління по відхиленню є протиріччя між умовою підвищення динамічної точності і умовою стійкості.

Суперечність між умовами підвищення динамічної точності та стійкості виключається при побудові систем автоматичного управління з принципом комбінованого управління [7], тобто поєднання принципу управління по відхиленню (реалізованого за допомогою негативного зворотнього зв'язку) і принципу управління по збуренню (задаючій дії). Останній реалізується за допомогою розімкненого зв'язку по задаючій (збурюючій) дії. Цей зв'язок не впливає на стійкість замкнутої частини системи і тому її параметри можуть бути синтезовані відповідно до умов підвищення показників якості системи – умовами

підвищення динамічної точності, мінімізації середньоквадратичних похибок, підвищення швидкодії, не турбуючись про стійкість системи.

Тому для підвищення динамічної точності та швидкодії системи ФАПЧ введений розімкнений зв'язок по задаючій дії, тобто побудована система ФАПЧ з принципом комбінованого управління, загальний вигляд математичної моделі якої зображений на Рис.1.

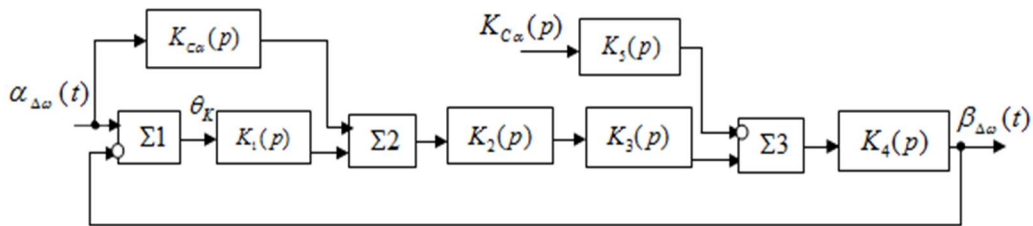


Рис.1. Загальний вигляд математичної моделі комбінованої системи ФАПЧ

Він відрізняється від математичної моделі традиційної системи наявністю зв'язку по задаючій дії  $\alpha_{\Delta\omega}$  з передавальною функцією  $K_{c\alpha}(p)$ .

Виконано синтез зв'язку по задаючій дії комбінованої системи ФАПЧ відповідно до умов підвищення динамічної точності та швидкодії системи при комплексних коренях характеристичного рівняння системи, побудові функціональної та принципової схем і математичної моделі комбінованої системи ФАПЧ [8, 9].

Показано, що передавальна функція зв'язку по задаючій дії  $K_{c\alpha}(p)$  відповідна абсолютній інваріантності, фізично не може бути реалізована і тому абсолютна інваріантність в системі ФАПЧ недосяжна.

Як було встановлено, традиційна система ФАПЧ з принципом управління по відхиленню, має астатизм першого порядку відносно задаючої дії. Їй притаманні динамічні похибки – обмежена по значенню швидкісна похибка і зростаючі похибки, які викликають зміни задаючої дії  $\alpha_{\Delta\omega}(t)$  по квадратичному і більш складним законам.

Обмежимося вимогою повного усунення основної похибки – швидкісної динамічної похибки і поставимо за мету, щоб похибка при квадратичному законі зміни задаючої дії не прагнула до нескінченності, а мала кінцеве значення. Ці, а також вимогу зменшення середньоквадратичної похибки, можна задовольнити шляхом підвищення порядку астатизму системи щодо задаючої дії  $\alpha_{\Delta\omega}(t)$  з першого до другого.

Підвищення порядку астатизму з першого до другого досягається подачею в систему через розімкнутий компенсаційний зв'язок першої похідної задаючої дії.

Підвищення швидкодії системи ФАПЧ досягається методом компенсації слабозатухаючих компонент перехідної складової похибки за допомогою зв'язку по задаючій дії.

Компонента перехідного процесу, відповідна парі комплексно-сполучених коренів  $p_1 = -17,628236 + j21,69587$ ,  $p_2 = -17,628236 - j21,69587$  характеристичного рівняння замкненого контуру системи є повільно затухаючою компонентою, що має коливальний характер і визначаючий час перехідного процесу системи  $t_{p\alpha} = 0,33\text{ с}$ . Підвищення швидкодії системи можна досягти, якщо усунути дану компоненту перехідного процесу, компенсуючи два комплексно-сполучених кореня ( $p_1$  та  $p_2$ ) характеристичного рівняння. Для компенсації двох комплексно-сполучених коренів характеристичного рівняння необхідно в систему за допомогою розімкненого зв'язку подати дві (другу і третю) похідні задаючого впливу.

У відповідності з перерахованими вимогами через розімкнений компенсаційний зв'язок в систему необхідно подавати три похідні задаючої дії. Необхідна фізично реалізуєма передавальна функція зв'язку по задаючій дії при цьому повинна мати вигляд:

$$K_{c\alpha}(p) = \frac{U_c(p)}{\alpha_{\Delta\omega}(p)} = \frac{\tau_0 p^3 + \tau_1 p^2 + \tau_2 p}{(T_{1c}p + 1)(T_{2c}p + 1)(T_{3c}p + 1)} \quad (1)$$



**Моделювання систем ФАПЧ.** Підтвердження висновків про зменшення динамічних похибок по фазі і частоті, середньоквадратичних похибок системи ФАПЧ і підвищення її швидкодії при комплексних коренях характеристичного рівняння за допомогою розімкнутого зв'язку по задаючій дії і диференційного зв'язку виконане моделювання цих систем у середовищі MATLAB [12].

Схема моделювання традиційної системи ФАПЧ з принципом управління по відхиленню, комбінованою системою із зв'язком по задаючій дії  $\alpha_{\Delta\omega}(t)$  і системи з диференціальним зв'язком (без каналів по збуренню) по різним законам вимірювання  $\alpha_{\Delta\omega}(t)$  зображена на Рис. 4.

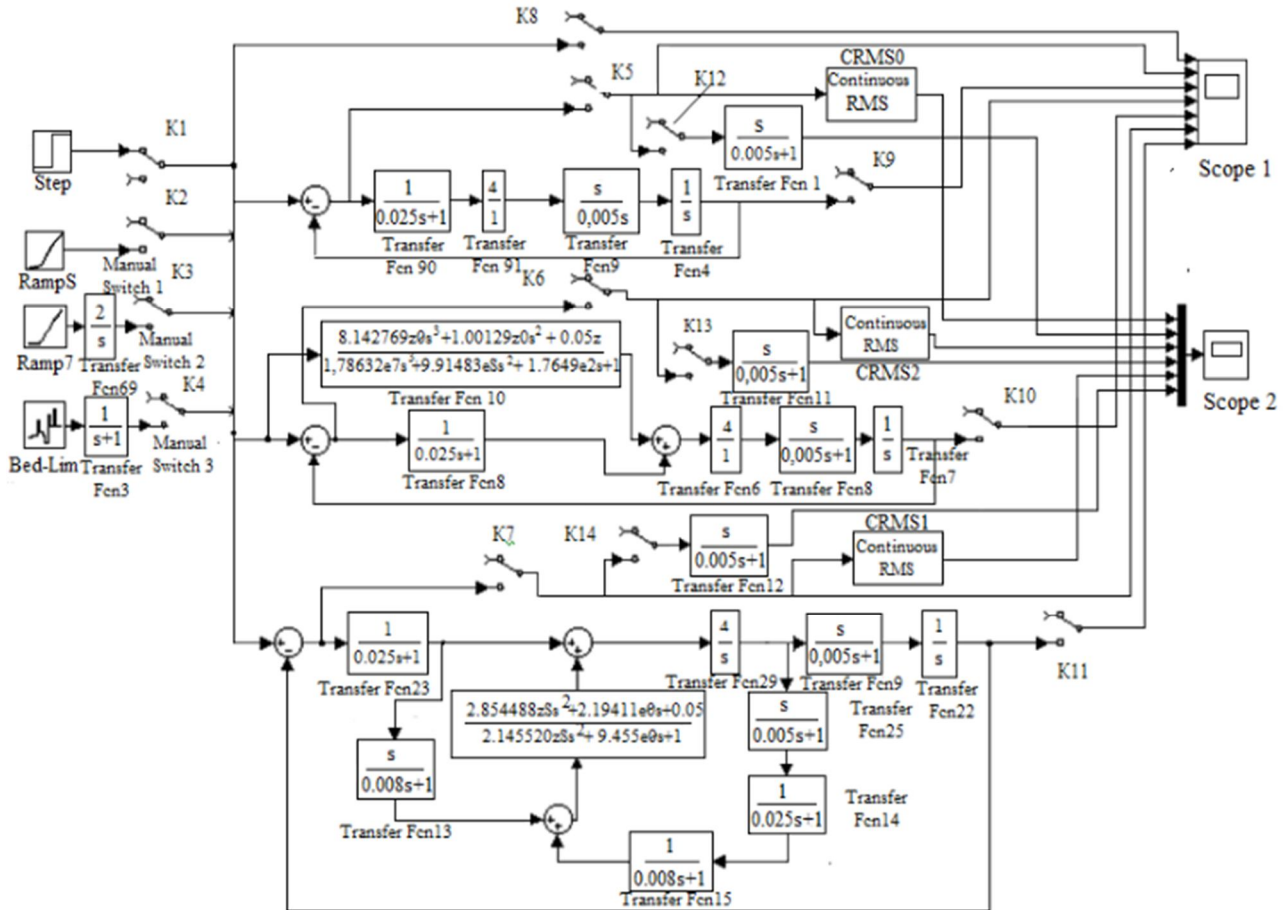


Рис. 4. Схема моделювання традиційної системи ФАПЧ

При замиканні ключів  $K_1$ ,  $K_2$  і  $K_3$  на всі системи надходить задаюча дія  $\alpha_{\Delta\omega}(t)$ , яка змінюється по східчастому, лінійному і квадратичному законам. Осцилограма межі похибок по фазі і частоті систем з принципом управління за відхиленням, комбінованої системи ФАПЧ та системи ФАПЧ з диференціальним зв'язком приведені в роботі [6].

Результати моделювання з великою точністю збігаються з розрахованими значеннями.

При замкнутому ключі  $K_4$  (Рис. 4) на всі три системи паралельно надходить випадкова задаюча дія  $\alpha_{\Delta\omega}(t)$  із спектральною щільністю  $S_a(w) = \frac{1}{w^2 + \beta^2}$ , ( $\beta = 1$ ), сформована з білого шуму за допомогою аперіодичної ланки з передавальною функцією  $\frac{1}{S+1}$ .

В цьому випадку при замиканні ключів  $K_8$ ,  $K_5$ ,  $K_6$  і  $K_7$  на індикатор Scope 1 буде подана задаюча дія  $\alpha(t)$  і похибки по фазі трьох систем, осцилограми яких зображені на Рис. 5.

Для кількісної оцінки впливу на СКП розімкнутої системи зв'язку і диференційного зв'язку випадкові похибки відтворення всіх трьох систем обчислювальних пристроїв

CRMS1, CRMS2, і CRMS3, визначаючи СКП відповідним рівнянням  $\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \theta^2(t) dt}$ , подаються на індикатор Score 2.

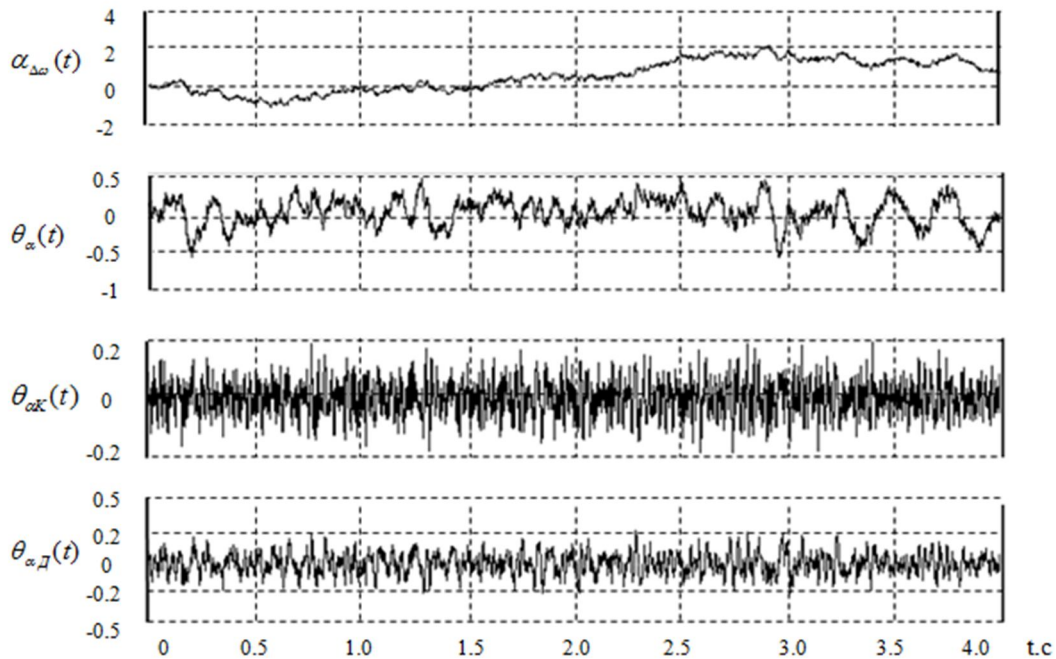


Рис. 5. Осцилограми випадкової задаючої дії та похибки по фазі

Крива  $\varepsilon_\alpha(t)$  (Рис. 6) відповідає середньоквадратичному значенню похибки вихідної системи, крива  $\varepsilon_{\alpha K}(t)$  – СКП комбінованої системи, а крива  $\varepsilon_{\alpha D}(t)$  – СКП системи з диференційним зв'язком. В Табл. 1 приведені розрахунки значення СКП  $\varepsilon_\alpha$  вихідної системи, значення СКП  $\varepsilon_{\alpha K}$  комбінованої системи, системи з диференційним зв'язком і їх значення  $\varepsilon_{\alpha D}$ , отримані в результаті моделювання (Рис. 6).

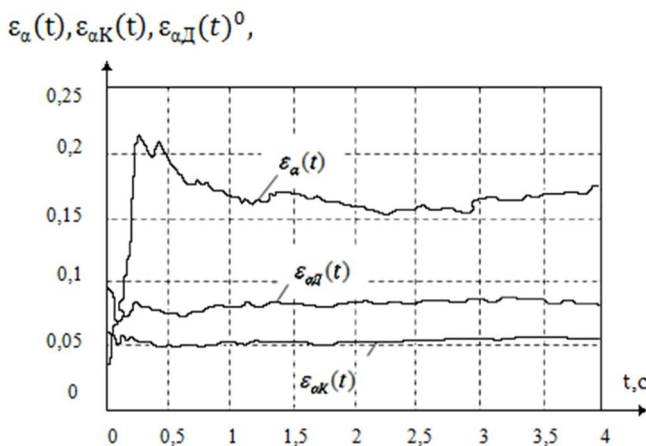


Рис. 6. Осцилограми СКП по фазі

Розрахунки значення СКП		Табл. 1.
СКП систем і їх співвідношення	Розрахункові значення	Результати моделювання
$\varepsilon_\alpha$	0,2 <sup>0</sup>	0,18 <sup>0</sup>
$\varepsilon_{\alpha K}$	0,057 <sup>0</sup>	0,056 <sup>0</sup>
$\varepsilon_\alpha / \varepsilon_{\alpha K}$	3,509	3,214
$\varepsilon_{\alpha D}$	0,0865 <sup>0</sup>	0,084 <sup>0</sup>
$\varepsilon_\alpha / \varepsilon_{\alpha D}$	2,312	2,143

Осцилограми випадкової задаючої дії  $\alpha_{\Delta W}(t)$  і керованої величини  $\beta_\alpha(t)$  вихідної системи ФАПЧ з принципом управління по відхиленню (а), задаючої дії  $\alpha_{\Delta W}(t)$  і керованої величини  $\beta_{\alpha K}(t)$  комбінованої системи (б), задаючої дії  $\alpha(t)$  і керованої величини  $\beta_{\alpha D}(t)$  системи з диференційним зв'язком (в) зображені на Рис. 7.

Осцилограми, приведені на Рис. 5...7, в Табл. 4 наглядно підтверджують висновок про можливість суттєвого підвищення точності відтворення випадкової задаючої дії (різниця фаз  $\alpha_{\Delta W}(t)$  вхідних напруг) за допомогою введення в систему ФАПЧ розімкнутого зв'язку по різниці фаз  $\alpha_{\Delta W}(t)$  сигналів, а також за допомогою диференційного зв'язку.

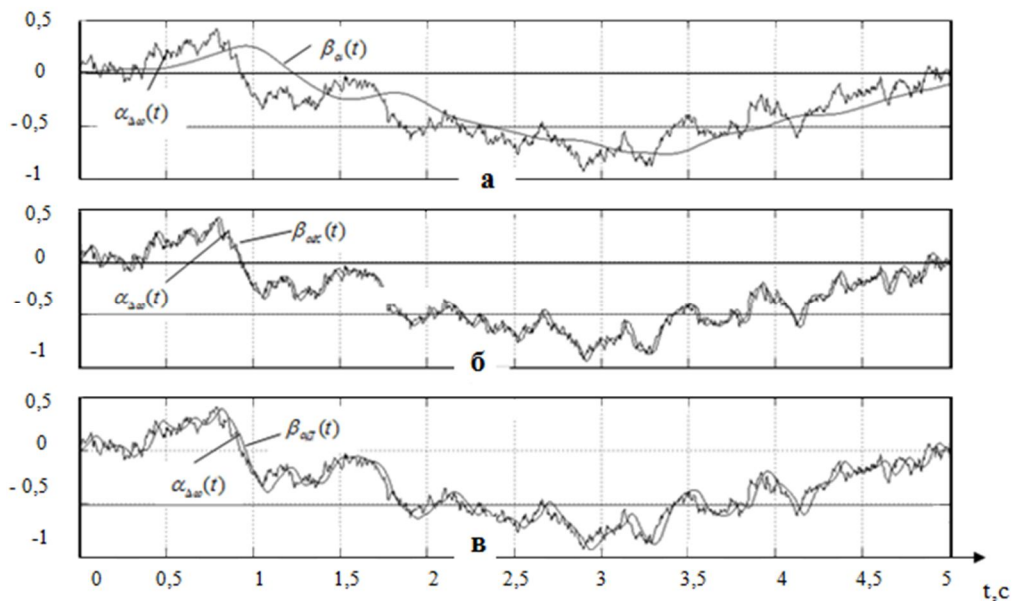


Рис. 7. Осцилограми випадкової задаючої дії  $\alpha_{\Delta W}(t)$

Схема моделювання, яка включає структурні схеми (математичні моделі) традиційної системи ФАПЧ з принципом управління по відхиленню, комбінованої системи і системи з диференціальним зв'язком, на які паралельно поступає збурююча дія  $\Delta L(t)$ , яка змінюється по різним законам аналогічна схемі, зображеній на Рис. 4.

Осцилограми випадкової збурюючої дії  $\Delta L(t)$ , похибки по фазі традиційної системи  $\theta_L(t)$ , похибки  $\theta_{LK}(t)$  комбінованої системи і похибки  $\theta_{LD}(t)$  системи ФАПЧ з диференціальним зв'язком зображені на Рис. 8.

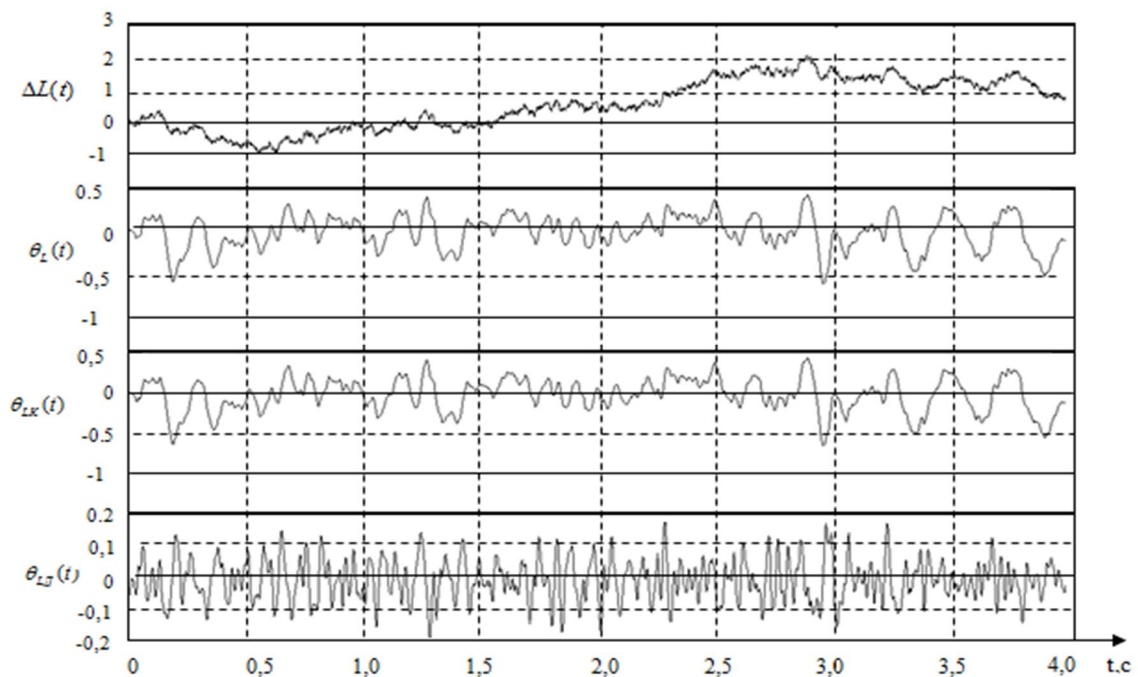


Рис. 8. Осцилограми випадкової збурюючої дії  $\Delta L(t)$

В Табл. 2 приведені розрахунки значення СКП  $\varepsilon_L$  традиційної системи ФАПЧ, значення СКП  $\varepsilon_{LK}$  – комбінованої системи, значення СКП  $\varepsilon_{LD}$  – системи з диференціальним зв'язком, та їх значення, що були отримані в результаті моделювання.

СКП систем і їх співвідношення	Розрахункові значення	Результати моделювання
$\varepsilon_L$	0,042 <sup>0</sup>	0,047 <sup>0</sup>
$\varepsilon_{LK}$	0,042 <sup>0</sup>	0,047 <sup>0</sup>
$\varepsilon_{LD}$	0,00109 <sup>0</sup>	0,001 <sup>0</sup>
$\varepsilon_L / \varepsilon_{LK}$	1	1
$\varepsilon_L / \varepsilon_{LD}$	38,49	47

Осцилограми, приведені на Рис. 8 і дані Табл. 2 підтверджують достовірність отриманих теоретичних результатів.

**Висновок.** У роботі вирішена наукова задача підвищення показників якості систем ФАПЧ, аналізу і синтезу аналогових систем ФАПЧ із комбінованим принципом управління і диференціальними зв'язками. Рішення цієї задачі дозволяє зменшити динамічні та середньоквадратичні похибки, підвищити швидкодію систем ФАПЧ.

Отримані результати завдяки розробці *комбінованої системи* ФАПЧ дозволили:

- усунути швидкісну похибку по фазі, яка викликана зміною задаючої дії по лінійному закону;
- зростаючу динамічну похибку по фазі, яка викликана зміною задаючої дії по квадратичному закону, обмежити кінцевим значенням;
- усунути динамічну похибку по частоті, яка викликана зміною задаючої дії по квадратичному закону;
- середньоквадратичну похибку, яка викликана випадковою зміною задаючої дії, зменшити в 3,5 рази;
- час перехідного процесу, який викликаний східчастою зміною задаючої дії, зменшити (швидкодію системи збільшити) у 5,5 рази.

Отримані результати завдяки розробці системи ФАПЧ з *диференціальним зв'язком* дозволили:

- усунути швидкісну похибку по фазі, а зростаючу похибку при квадратичному законі зміни задаючої дії  $\alpha_{\Delta\omega}(t)$  обмежити кінцевим значенням;
- усунути динамічну похибку по частоті (як і в комбінованій системі) при зміні задаючої дії по квадратичному закону;
- усунути похибку по фазі при лінійній зміні збурюючої дії  $\Delta L(t)$ , а зростаючу швидкісну похибку, викликану зміною збурюючої дії  $\Delta L(t)$ , обмежити кінцевим значенням;
- усунути динамічну похибку по частоті в порівнянні з традиційною системою ФАПЧ із принципом керування по відхиленню і комбінованій системі із зв'язком по задаючій дії, при зміні збурюючої дії по лінійному закону;
- зменшити середньоквадратичну похибку по фазі, викликану зміною задаючої дії у 2,3 рази;
- зменшити середньоквадратичну похибку по фазі, викликану збурюючою дією, у порівнянні з традиційною системою з принципом керування по відхиленню і комбінованою системою із зв'язком по задаючій дії у десятки разів;

– зменшити час перехідного процесу (підвищити швидкодiю) системи, викликаного східчастою зміною задаючої дії, як і в комбінованій системі в 4,5 рази;

– зменшити час перехідного процесу, викликаного східчастою зміною збудовуючої дії у порівнянні з традиційною системою ФАПЧ із принципом управління по відхиленню і комбінованій системі із зв'язком по задаючій дії в 4 рази.

### **Література**

1. Best R. E. Phase-Locked Loops. Design, simulation, and applications / Roland E. Best. – McGraw-Hill, 2004. – 424 p.
2. Гостев В. И. Фаззи-системы частотной и фазовой автоподстройки : монография / В. И. Гостев, С. Н. Скуртов. – Ніжин : ООО «Видавництво Аспект-Поліграф», 2010. – 388 с.
3. Клэппер Дж. Системы фазовой и частотной автоподстройки частоты / Дж. Клэппер, Дж. Фрэнк. – Москва : Энергия, 1977. – 440 с.
4. Гостев В. И. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами / В. И. Гостев, В. К. Стеклов. – Київ : Радиоаматор, 1998. – 704 с.
5. Egan W. Phase-lock basics / William Egan. – John Wiley & Sons, 2007. – 455 p.
6. Зайцев Г. Ф. Повышение динамической точности и быстродействия систем традиционной фазовой автоподстройки и систем фазовой автоподстройки частоты : монография / Г. Ф. Зайцев, В. Г. Кривуца, В. Л. Булгач, А. В. Самков, Н. В. Градобоева, А. П. Полоневич. – Київ : Ин-т электродинамики НАН Украины. – 2013. – 227 с.
7. Зайцев Г. Ф. Комбинированная система фазовой автоподстройки частоты (Часть 1. Общий вид математической модели системы и ее анализ) / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Н. В. Градобоева, А. П. Полоневич // Зв'язок. – 2012. – № 1. – С.67-70.
8. Зайцев Г. Ф. Комбинированная система фазовой автоподстройки частоты (Часть 2. Синтез связи по задающему воздействию при комплексных корнях характеристического уравнения. Математическая модель системы) / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Н. В. Градобоева, А. П. Полоневич // Зв'язок. – 2012. - №2. – С. 67-73.
9. Зайцев Г. Ф. Комбинированная система фазовой автоподстройки частоты (Часть 3. Показатели качества) / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Н. В. Градобоева, А. П. Полоневич // Зв'язок. – 2012. – №3. – С. 64-68.
10. Зайцев Г. Ф. Система фазовой автоподстройки частоты с дифференциальной связью. (Часть 1. Математическая модель системы с дифференциальной связью) / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Н. В. Градобоева, А. П. Полоневич // Зв'язок. – 2012. – № 4. – С. 69-74.
11. Зайцев Г. Ф. Система фазовой автоподстройки частоты с дифференциальной связью. Математическая модель системы с дифференциальной связью (Окончание) / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Н. В. Градобоева, А. П. Полоневич // Зв'язок. – 2013. – №1. – С. 68-74.
12. Дробик А. В. Моделирование систем фазовой автоподстройки с принципом управления по отклонению комбинированной и дифференциальной связью/ А. В. Дробик, А. П. Полоневич // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика». – Курск: ЮЗГУ. – 2013. – №3. – С. 48-53.

Дата надходження в редакцію: 12.03.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В. І. Гостев