

## ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ ПРИ УМОВІ МІНІМІЗАЦІЇ СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНИХ ПОМИЛОК І КВАДРАТИЧНОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

У статті представлені результати аналізу принципів побудови системи фазового автопідстроювання частоти на прикладі слідкуючої системи. Досліджено залежності коефіцієнта підсилення системи, середньоквадратичних помилок та квадратичної інтегральної оцінки перехідних процесів системи фазового автопідстроювання частоти. Представлені результати дозволяють покращити динамічні характеристики систем фазового автопідстроювання частоти в радіотехнічних засобах спеціального призначення.

**Ключові слова:** система ФАПЧ; середньоквадратична помилка; показники якості; динамічна характеристика.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Цифрові системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) широко використовуються в техніці зв'язку і управління, радіоавтоматиці, радіовимірювальних комплексах і інших системах автоматичного регулювання. Показники якості систем ФАПЧ, що застосовуються в різноманітних технічних засобах, значною мірою визначають ефективність та якість зв'язку. Останнім часом набуває усе більшої актуальності використання в перспективних радіотехнічних комплексах різного призначення (повітряні сили, військово-морські сили) повністю цифрових систем ФАПЧ, які застосовуються для детектування ЧМ, а також для дискретного підстроювання фази в системах передачі з ІКМ [3] і для синхронізації в цифрових мережах. Тому цифрові системи ФАПЧ набувають усе більш широкого використання у сучасних системах мобільного, супутникового, та транкінгового зв'язку.

Проте вимоги до показників якості системи ФАПЧ безперервно зростають. Тому необхідно покращувати динамічні характеристики систем ФАПЧ, підвищувати основні показники якості цих систем - їх динамічну точність та швидкодію.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналізу динамічних характеристик систем ФАПЧ і методам підвищення їх показників якості присвячено досить велике число наукових робіт таких вітчизняних і зарубіжних вчених, як Ліндсей В. Л. [5], Карякін В. Л. [6], Клеппер Дж. і Френк Дж. [7] та інші.

Над питанням підвищення динамічної точності систем автоматичного регулювання, в тому числі і в системах ФАПЧ працювали такі видатні вчені, як Зайцев Г.Ф., Гостев В.І., Попов Є.П.. Основними напрямками вдосконалення систем автоматичного управління та регулювання пропонуються в роботах [2, 3, 4].

У замкнутих системах підвищення динамічної точності можна досягти або зміною параметрів (коефіцієнтів передачі, постійних часу окремих ланок), або введенням різних пристроїв, що коригують [7].

В роботах [2, 3, 4] пропонуються шляхи покращення показників якості перехідних процесів систем автоматичного керування. Запропоновано синтез розімкнутого зв'язку комбінованої системи та синтез диференціального зв'язку, що виконані у відповідності з умовами зменшення динамічних помилок, середньоквадратичної помилки та підвищення швидкодії системи. Результати досліджень можуть бути використані під час проектування цифрових систем ФАПЧ. Для цифрових систем ФАПЧ справедливо дослідити залежність вимог стійкості системи та її швидкодії від коефіцієнта підсилення з урахуванням показників якості перехідних процесів.

**Метою роботи** є дослідження залежності коефіцієнта підсилення системи, середньоквадратичних помилок та квадратичної інтегральної оцінки системи, а також обґрунтування необхідності компромісного вибору коефіцієнту підсилення у зв'язку із протиріччям між умовами перехідних процесів.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Для вирішення поставленого завдання розглянемо принципи побудови ФАПЧ на прикладі слідкуючої системи, структурна схема якої зображена на рис. 1, де

$$K_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} = \frac{D_1(p)}{F_1(p)},$$

$$K_2(p) = \frac{k_2}{(T_2 p + 1)p} = \frac{D_2(p)}{F_2(p)} \quad \text{– передаточні функції}$$

системи управління  $K_1(p)$  та об'єкту управління  $K_2(p)$ ,  $p$  – функція запасу стійкості (комплексна передаточна функція системи з помилкою),  $T$  – час встановлення заданого режиму;

Вихідні дані прийmemo  $k_1 = 2; k_2 = 6; T_1 = 0.003 \text{ с}; T_2 = 0.009 \text{ с}$ . (в ході дослідження  $k_1$  змінюється);

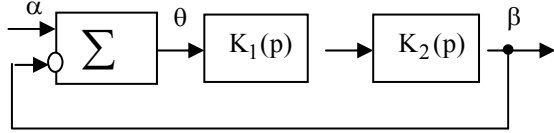


Рис. 1. Структурна схема слідкуючої системи з принципом управління по відхиленню

Передавальна функція системи в розімкненому стані

$$K_p(p) = K_1(p)K_2(p) = \frac{k_p}{(T_1p+1)(T_2p+1)p} = \frac{D(p)}{F(p)}, \quad (1)$$

де  $k_p = k_1k_2$  – коефіцієнт підсилення системи в розімкненому стані.

Виходячи з вимоги стійкості системи визначаємо первинне значення  $k_p$ . Наприклад, нехай потрібно забезпечити запас стійкості системи по фазі  $\gamma = 80^\circ$ . Користуючись логарифмічним частотним критерієм стійкості, визначимо значення  $k_p$ , при якому  $\gamma = 80^\circ$ .

Згідно (1) комплексна передавальна функція системи в розімкненому стані:

$$K_p(j\omega) = \frac{k_p}{(T_1j\omega+1)(T_2j\omega+1)j\omega} = N(\omega)e^{j\Psi(\omega)}. \quad (2)$$

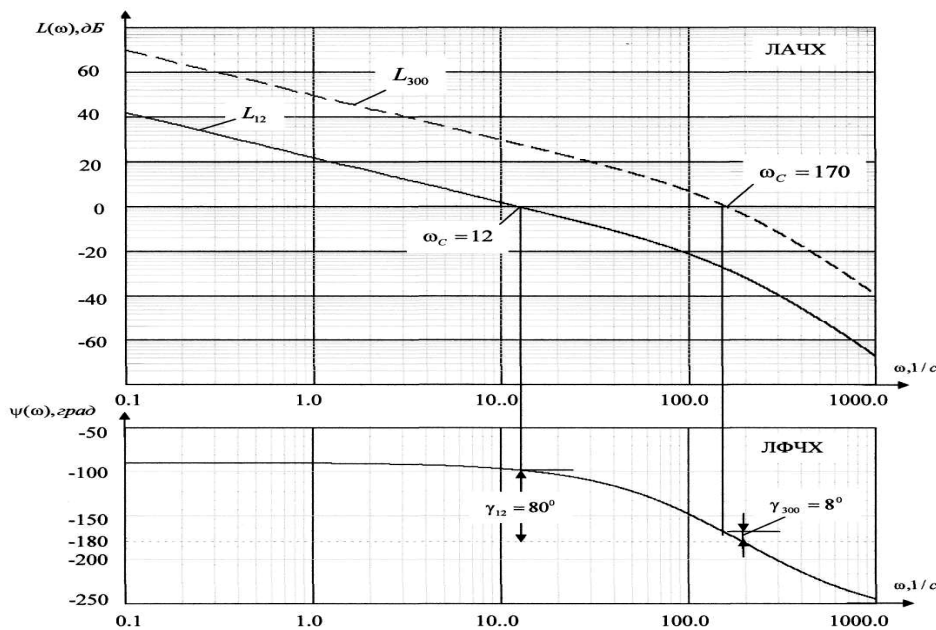


Рис. 2. Логарифмічні амплітудно–частотна (ЛАЧХ) і фазо–частотна (LFЧХ) характеристики розімкненої системи

Середнє значення квадрата помилки [10,11]:

$$\bar{\theta}^2 = \frac{1}{2\pi} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\theta}(\omega) d\omega = \frac{1}{T} \int_0^T \theta^2(t) dt. \quad (3)$$

$$\psi(\omega) = -90^\circ - \arctg(\omega T_1) - \arctg(\omega T_2) = -90^\circ - \arctg(\omega \cdot 0.003) - \arctg(\omega \cdot 0.009).$$

Логарифмічна фазо-частотна характеристика (LFЧХ) зображена на рис. 2.

Спектральна щільність помилки для одного задаючого впливу згідно [10,11]:

$$S_{\theta}(\omega) = |K_{\theta}(j\omega)|^2 S_{\alpha}(\omega),$$

де  $K_{\theta}(j\omega) = K_{\theta}(p)|_{p=j\omega}$  – комплексна передаточна функція системи з помилкою.

Припустимо, що задаючою дією є значення різниці фаз коливань  $\alpha(t)$ , що змінюється відносно миттєвої розстройки частоти  $\frac{d\phi}{dt}$ .

Відповідно до (2) вираз для фазо-частотної характеристики системи:

У будь-який момент часу стан системи характеризується певними значеннями різниці фаз коливань  $\phi$  і миттєвої розстройки частоти  $\frac{d\phi}{dt}$ .

Проте задаюча дія  $\alpha(t)$  не являється випадковим стаціонарним процесом, тому за допомогою статистичного методу [10] не можна описати СКП системи. Але похідну  $\frac{d\alpha}{dt} = \alpha t$  від нестационарного випадкового сигналу можна вважати стаціонарним випадковим процесом. Опишемо спектральну щільність похідною  $\alpha(t)$  через  $S_{\alpha}(\omega)$  визначаємо

спектральну щільність помилки системи за допомогою формули (1)

$$S_{\alpha}(\omega) = \frac{2\overline{\Omega^2}}{\omega^2 + \beta^2}, \beta = 0.1 \frac{1}{c}; \overline{\Omega^2} = 18 \frac{\text{рад}^2}{c^2}, \quad (4)$$

де  $\overline{\Omega^2}$  – середнє значення квадрату швидкості;

$\frac{1}{\beta}$  – середня довжина проміжків часу на протязі

яких швидкість є постійною.

Для визначення спектральної щільності помилки системи підставимо у вираз (5)

значення  $K_{\theta}(j\omega)$  із (1) замінивши  $p = j\omega$ , а  $S_{\theta}(\omega)$  з (4).

$$S_{\theta}(\omega) = \left| K_{\theta}(j\omega) \frac{1}{j\omega} \right|^2 S_{\alpha}(\omega) \quad (5)$$

Маємо

$$S_{\theta}(\omega) = \left| \frac{(T_1 j\omega + 1)(T_2 j\omega + 1)}{(T_1 j\omega + 1) + (T_2 j\omega + 1)j\omega + k_p} \right|^2 \frac{2\overline{\Omega^2}}{\omega^2 + \beta^2}. \quad (6)$$

Середнє значення квадрата помилки згідно (3):

$$S_{\theta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{(T_1 j\omega + 1)(T_2 j\omega + 1)}{(T_1 j\omega + 1) + (T_2 j\omega + 1)j\omega + k_p} \right|^2 \frac{2\overline{\Omega^2}}{\omega^2 + \beta^2} d\omega \quad (7)$$

Заданий інтеграл (7) зводиться до табличного

$$I_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{G(\omega)}{|H(j\omega)|^2} d\omega \quad (8)$$

де  $G(\omega) = c_0(j\omega)^n + c_1(j\omega)^{n-1} + \dots + c_n$ ;

$H(j\omega) = d_0(j\omega)^{2n-2} + d_1(j\omega)^{2n-4} + \dots + d_n$ .

$c_n, d_n$  – коефіцієнти характеристичних рівнянь системи у відповідності із [11]

Середньоквадратична помилка (СКП) системи визначається за формулою:

$$\varepsilon = \sqrt{\overline{\theta^2}} \quad (9)$$

Отримані значення розрахунків проведені у відповідності до [2].

Як відомо, найбільш простим методом зменшення сталих динамічних помилок САУ є підвищення коефіцієнта посилення системи в розімкненому стані  $k_p$ . Оскільки СКП є помилкою, усередненою за нескінченно великий проміжок часу і її можна віднести до класу сталих помилок, то природно припустити, що підвищення  $k_p$  дозволить зменшити і СКП.

Справедливість цього виводу підтверджується також порівнянням частотного спектру випадкової задаючої дії і частотної характеристики системи. Випадковий вхідний сигнал, як правило, має широкий частотний спектр і тому, чим ширше смугу пропускання матиме система, тим краще відтворюватиметься системою випадкова задаюча дія. Підвищення  $k_p$  веде до збільшення частоти зрізу  $\omega_c$  системи, тобто сприяє зменшенню СКП.

На рис. 2 кривою  $L_{300}$  зображена логарифмічна амплітудно-частотна характеристика системи при  $k_p = 300$ . Як видно з малюнка, частота зрізу  $\omega_c$  збільшується в порівнянні з випадком, коли,  $12 \leq k_p \leq 190$ . Отже, збільшилася і смуга пропускання системи.

Переконаємося в тому, що із збільшенням  $k_p$  зменшується СКП ε системи шляхом аналітичних розрахунків. Для цього визначимо  $I_4, \overline{\theta^2}, \varepsilon$  при різних значеннях  $k_p$ .

Результати розрахунків  $\overline{\theta^2}$  і ε при різних  $k_p$  зведені в табл. 1.

Таблиця 1

$k_p$	$I_4$	$\overline{\theta^2}$	$\varepsilon$	$I_n$
2	1.192	4.291	2.71	0.256
3	0.538	1.938	1.392	0.173
6	0.137	0.492	0.701	0.089
9	0.061	0.22	0.469	0.062
12	0.034	0.124	0.352	0.048
60	$1.389 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0.071	0.015
100	$5.009 \cdot 10^{-4}$	$1.823 \cdot 10^{-3}$	0.043	0.013
134	$2.793 \cdot 10^{-4}$	$1.005 \cdot 10^{-3}$	0.032	0.012
200	$1.257 \cdot 10^{-4}$	$4.524 \cdot 10^{-4}$	0.021	0.013
300	$5.63 \cdot 10^{-5}$	$2.027 \cdot 10^{-4}$	0.014	0.02
420	$3.146 \cdot 10^{-5}$	$1.132 \cdot 10^{-4}$	0.011	0.11
438	$3.739 \cdot 10^{-5}$	$1.346 \cdot 10^{-4}$	0.012	0.415

440	$4.218 \cdot 10^{-5}$	$1.519 \cdot 10^{-4}$	0.012	0.601
444	$1.875 \cdot 10^{-4}$	$6.751 \cdot 10^{-4}$	0.026	6.001

Графік залежності, побудований на підставі розрахунків за допомогою пакету MathCAD в логарифмічних масштабах по осі ординат і осі абсцис, зображений на рис. 4,а для наочнішого уявлення про характер залежності в області великих  $I_n$  графік  $\varepsilon = f(k_p)$  на рис. 4,б зображений в логарифмічному масштабі по осі ординат і в лінійному по осі абсцис. Згідно графіку  $\varepsilon = f(k_p)$ , як і передбачалося, СКП зменшується із збільшенням  $k_p$ . Згідно графіку  $I_{II} = f(k_p)$  (рис. 3), на інтервалі I зі зміною  $k_p$  від  $k_p = 1$  до  $k_p = k_{ропми} = 134$  квадратична інтегральна оцінка  $I_{II}$  зменшується, а потім при

подальшому збільшенні  $k_p$  (інтервал II)  $I_{II}$  зростає. Такий характер зміни  $I_{II}$  узгоджується з приведеними на мал. 3.б кривими перехідних процесів при різних значеннях  $k_p$ .

Ми бачимо, що на інтервалі I зміни  $k_p$  (рис. 4) приводить до зменшення не тільки  $I_{II}$ , але також і СКП  $\varepsilon$ , тобто, для зменшення як  $\varepsilon$ , так і  $I_{II}$  необхідно виконати одну умову – необхідно збільшувати  $k_p$ . На інтервалі підвищення  $k_p$  до оптимального значення  $k_{ропми}$  немає протиріччя між умовами підвищення  $\varepsilon$  і  $I_{II}$ .

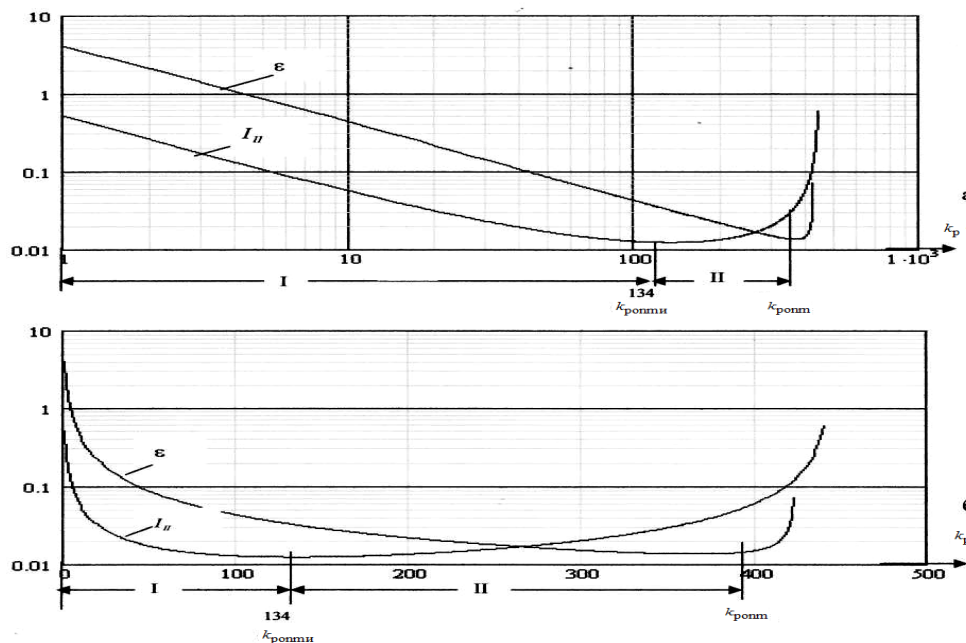


Рис. 3. Графіки залежності  $\varepsilon = f(k_p)$  і  $I_{II} = f(k_p)$  системи з принципом управління по відхиленню

а – в логарифмічному масштабі по осі абсцис і ординат;

б – в логарифмічному масштабі по осі ординат і лінійному по осі абсцис

Проте при подальшому збільшенні  $k_p$  от  $k_{ропми}$  до  $k_{ропнм}$  (інтервал II)  $\varepsilon$  продовжує зменшуватися, а  $I_{II}$  починає зростати – показники якості перехідного процесу погіршуються (рис. 3), де при  $k_p > k_{ропнм}$  виникає суперечність між умовами мінімізації СКП і квадратичної інтегральної оцінки перехідних процесів. Мінімум СКП досягається при  $k_{ропнм} = 421.28$  близькому до границі стійкості, коли в системі виникають поволі затухаючі коливання.

Оскільки такі коливання небажані, то при виборі  $k_p$  необхідно приймати компромісне

рішення, при якому окрім вимог до мінімізації СКП необхідно враховувати вимогу до показників якості перехідних процесів (квадратичній інтегральній оцінці). Очевидно, таке значення  $k_p$  знаходиться між значеннями  $k_{ропнм}$  і  $k_{ропми}$ , відповідними мінімуму СКП і мінімуму квадратичної інтегральної оцінки, тобто на інтервалі II (рис. 3).

### Висновки й перспективи подальших досліджень

1. Особливістю автоматичних систем з принципом управління по відхиленню (систем з від'ємним зворотним зв'язком) є те, що їм властива суперечність між умовами мінімізації

середньоквадратичних помилок і квадратичної інтегральної оцінки перехідних процесів.

2. Мінімальне значення середньоквадратичних помилок в цих системах досягається практично на границі стійкості, коли виникають поволі затухаючі коливання. Тому при виборі  $k_p$  слід приймати компромісне рішення.

3. При компромісному виборі  $k_p$ , можна рекомендувати його значення, що знаходиться між  $k_{ponm}$  і  $k_{ponmi}$ , відповідними мінімальним значенням СКП і квадратичної інтегральної оцінки. Причому, якщо пред'являються жорсткіші вимоги до показників якості перехідного процесу, то слід вибирати значення ближче до  $k_{ponmi}$ , якщо ж більш важливо забезпечити вимоги, що

пред'являються до СКП, то вони можуть бути задоволені при виборі  $k_p$ , ближчому до  $k_{ponm}$ .

4. Вказана суперечність обмежує можливості мінімізації СКП в класі систем з принципом управління по відхиленню.

Включення в систему різних традиційних коректуючих пристроїв, хоча і дозволяють додатково зменшити СКП (як динамічні сталі помилки) не знімають вказаної вище суперечності, що є перешкодою на шляху рішення задачі мінімізації СКП[3].

Таким чином, подальшим напрямком наукових досліджень є пошук шляхів усунення суперечності між умовами мінімізації СКП і квадратичної інтегральної оцінки перехідних процесів, та шляхи підвищення швидкодії та динамічної точності систем фазової автопідстройки частоти.

### Література

1. **Системы фазовой автоподстройки частоты** / В. В. Шахгильдян, А. А. Ляховкин, В. Л. Под ред. В. В. Шахгильдяна. М.: Связь, 1972. С. 1–220.  
2. **Зайцев Г. Ф.**, Кривуца В. Г., Булгач В. Л., Радзивил Г. Д. Минимизация среднеквадратических ошибок и квадратичных интегральных оценок следящих систем с помощью разомкнутых и дифференциальных связей. – К.: ГУИКТ, 2006. – С. 11–19.  
3. **Зайцев Г.Ф.**, Радзивил Г. Д. Противоречие между условиями минимизации СКО и квадратичной интегральной оценки в следящих системах с принципом управления по отклонению // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 1. – С. 48–59.  
4. **Зайцев Г. Ф.**, Булгач В. Л., Градобоева Н. В. Повышение показателей качества корреляционных систем: Мат. VIII Наук.конф. “Сучасні тенденції розвитку технологій в комунікаціях та освіті” (Київ, 24-25 листопада 2011р.). – К.:ДУИКТ, 2011. С. 226–231.  
5. **Линдсей В. Л.** Системы синхронизации в связи и управлении / В. Л. Линдсей. – Москва : – Советское радио, 1978. – 599 с.  
6. **Карякин В. Л.** Синтез оптимальных по быстродействию импульсных систем синхронизации / В. Л. Карякин // Оптимизация систем передачи информации по каналам связи : сб. науч. тр.;

учеб. ин-тов. связи. – Ленинград : ЛЭИС,1986. – С. 107-112.  
7. **Клэппер Дж.** Системы фазовой и частотной автоподстройки частоты / Дж. Клэппер, Дж. Фрэнк. – Москва : Энергия, 1977. – 440 с.  
8. **Системы фазовой автоподстройки частоты с принципом управления по отклонению. Часть 3(б).** Анализ динамических характеристик системы / [Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, В. В. Стась, Н. В. Градобоева] // Зв'язок. – 2011. – №2. – С. 54–63.  
9. **Пугачев В. С.** Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматгиз. 1960. – 884 с.  
10. **Зайцев Г. Ф.** Радиотехнические системы автоматического управления высокой точности / Г. Ф. Зайцев, В. К. Стеклов // – К.: Техніка. – 1988. – 160 с.  
11. **Пугачев В. С.** Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М.: Физматгиз. 1960. – 884 с.  
12. **Радиоавтоматика**, Г. Ф. Зайцев, Г. Н.Арсеньев, В. Г. Кривуца, В. Л. Булгач. – К.: ООО „Д.В.К.” 2004. – 504 с.  
13. **Лебідь Є. В.** Метод оцінки показників якості системи фазової автопідстройки частоти / Лебідь Є. В., Кононенко С. М., Судніков Є. О., Єфімова Р. Г. // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони № 2(23) – К., 2015. – С. 81–87.

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПРИ УСЛОВИИ МИНИМИЗАЦИИ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫХ ОШИБОК И КВАДРАТИЧНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

*Евгений Вицентрович Лебедь*

*Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев, Украина*

*В статье представлены результаты анализа принципов построения системы фазовой автоподстройки частоты на примере следящей системы. Исследованы зависимости коэффициента усиления системы, среднеквадратичных ошибок и квадратичной интегральной оценки переходных процессов системы фазовой автоподстройки частоты. Представленные результаты позволяют улучшить динамические характеристики систем фазовой автоподстройки частоты в радиотехнических средствах специального назначения.*

**Ключевые слова:** система ФАПЧ; среднеквадратичная ошибка; показатели качества; динамическая характеристика.

## THE STABILITY ESTIMATION OF AUTOMATIC CONTROL FEEDBACK SYSTEMS UPON THE CONDITION THAT MEANSQUARED ERRORS MINIMIZATION AND QUADRATIC INTEGRAL ESTIMATION OF PHASE LOCK LOOP SYSTEM TRANSIENT PROCESSES

Yevhen V. Lebid

*Military Institute of Telecommunications and Informatization, Kyiv, Ukraine*

In the article presented results analysis principles construction the system phase - locked loop (PLL) is on the example the tracker system. Dependences amplification the system, meansquared error and quadratic integral estimation transients the system phase - locked loop (PLL) factor are investigational. The presented results allow improving dynamic description the system phase - locked loop (PLL) in radiotechnical facilities the special setting.

**Keywords:** PLL system; meansquared error; quality indicators; dynamic characteristics.

### References

- 1. The phaseautomatic** frequency control (1972), A phase-locked loop [*Sistemy fazovoy avtopodstrojki chastoty*], Svyaz', Moscow, 220 p. **2. Zajcev G.F., Krivuca V.G., Bulgach V.L., Radzivilov V.L.** (2006), Minimizing standard errors and quadratic integral estimates tracking systems using open-loop and differential constraints. [*Minimizacija srednekvadraticeskikh oshibok i kvadraticnyh integral'nyh ocenok sledjashih sistem s pomoshh'ju razomknutyh i differencial'nyh svyazej*], GUIKT, Kyiv, pp. 11-19.
- 3. Zajcev G.F., Radzivilov G.D.** (2004), The contradiction between the terms of the MSE minimization of a quadratic integral and evaluation tracking systems with the principle of management by exception. [*Protivorechie mezhdru uslovijami minimizacii SKO i kvadraticnoj integral'noj ochenki v sledjashih sistemah s principom upravlenija po otkloneniju*], Problemy upravlenija i informatiki, Vol. 1, pp. 48–59.
- 4. Zajcev G.F., Bulgach V.L., Gradoboeva N.V.** (2011), Improving quality indicators correlation systems. [*Povyshenie pokazatelej kachestva korrelyacionnyh sistem*], Suchasni tendentsii rozvytku tekhnolohii v komunikatsiakh ta osvity, Kyiv, pp. 226–231.
- 5. Lindsej V.L.** (1978), Synchronization Systems in Communications and control. [*Sistemy sinhronizacii v svyazi i upravlenii*], Moscow, Sovetskoe radio, 599 p.
- 6. Karjakin V.L.** (1986), Synthesis-optimal pulse synchronization systems. [*Sintez optimal'nyh po bystrodejstviju impul'snyh sistem sinhronizacii*], sb. nauch. tr. ucheb. in-tov. Svyazi, Leningrad, LJeIS, pp. 107-112.
- 7. Kljepper Dzh.** (1977), System phase and frequency locked loop frequency. [*Sistemy fazovoy i chastotnoj avtopodstrojki chastoty*], Moscow, Jenergija, 440 p.
- 8. Zajcev G.F., Bulgach V.L., Stas' V.V., Gradoboeva N.V.** (2011) Phase locked loop systems in the frequency with the principle Office of otklonenju. Part 3 (b). Analysis of dynamic characteristics of the system. [*Sistemy fazovoy avtopodstrojki chastoty s principom upravlenija po otklonenju. Chast' 3(b). Analiz dinamicheskikh harakteristik sistemy*], Zviazok, No 2, pp. 54-63.
- 9. Pugachev V.S.** (1960). Theory of random functions and its application to automatic control tasks. [*Teorija sluchajnyh funkcij i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo upravlenija*], Moscow, Fizmatgiz, 884 p.
- 10. Zajcev G.F.** (1988), Radio automatic control system of high precision. [*Radiotekhnicheskie sistemy avtomaticheskogo upravlenija vysokoj tochnosti*], Kyiv, Tekhnika, 160 p.
- 11. Pugachev V.S.** (1960), Theory of random functions and its application to automatic control tasks. [*Teorija sluchajnyh funkcij i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo upravlenija*], Moscow, Fizmatgiz, 884 p.
- 12. Zajcev G.F., Arsen'ev G.N., Krivuca V.G., Bulgach V.L.**, (2004) Radioavtomatika, Kyiv, OOO „D.V.K.“, 504 p.
- 13. Lebid Y.V., Kononenko S.M., Sudnikov Y.O., Yefimova R.H.** (2015), Method of evaluation indexes of quality system evaluation auto-configuration frequency. [*Metod otsinky pokaznykiv yakosti systemy fazovoi avtopidstroiky chastoty*], Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony, No. 2(23), Kyiv, pp. 81–87.

Отримано: 11.10.2015 року