

¹Євген Віцентрович Лебідь²Сергій Миколайович Кононенко²Євген Олександрович Судніков²Руслана Григорівна Єфімова¹Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ, Україна²Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

МЕТОД ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СИСТЕМИ ФАЗОВОЇ АВТОПІДСТРОЙКИ ЧАСТОТИ

У роботі визначено динамічні, середньоквадратичні помилки, показники якості перехідних процесів, що викликаються змінами задаючого і збурюючих впливів, системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), диференціальний зв'язок якої синтезовано відповідно до умов підвищення динамічної точності і швидкодії при комплексних коренях характеристичного рівняння. Дана порівняльна оцінка динамічних характеристик цифрової системи ФАПЧ.

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

Вступ

Постановка проблеми. Для побудови загальнонаціональної мережі синхронізації з метою забезпечення синхронного режиму великого числа технічних пристроїв зв'язку, широко використовуються системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Від показників якості цих систем залежить ефективність роботи мережі синхронізації, достовірність передачі інформації.

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. [1], Карякін В. Л. [2, 3], Клеппер Дж. і Френк Дж. [4] та інші.

Проте вимоги до показників якості мережі синхронізації апаратури зв'язку безперервно зростають. Тому необхідно покращувати динамічні характеристики систем ФАПЧ, підвищувати основні показники якості цих систем - їх динамічну точність та швидкодію.

Метою є оцінка показників якості (динамічної точності та швидкодії) систем ФАПЧ, дослідження стійкості системи, визначення динамічної, середньоквадратичної помилки (СКП), та показників якості перехідних процесів з метою якісного проектування та реалізації цифрових систем ФАПЧ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Відомо [6, 8] що процес дискретизації, передачі і прийому даних у вигляді бінарного сигналу або кодованого бінарного сигналу, вимагає узгодженості частот передачі і прийому, інакше інформація яка передається буде некоректно прийнята. Проблеми синхронізації не

обмежуються тільки цифровою первинною мережею, але мають важливе значення при розгляді мереж ISDN, передачі даних, цифрової телефонії, мереж спеціального призначення і інших вторинних мереж. У технології сучасного зв'язку існує три основні поняття синхронізації: частотна, фазова і часова. Найбільш важливим типом синхронізації для первинної мережі є частотна синхронізація, яка означає узгодженість генераторів різних цифрових пристроїв в мережі по частоті. В цьому випадку в ідеалі усі генератори мережі працюють з однаковою частотою, швидкість передачі цифрової інформації з високою мірою точності дорівнює швидкості прийому, в результаті в системі зв'язку немає втрат інформації, тобто немає помилок, пов'язаних з порушеннями синхронізації. Це і є основною метою експлуатації - реалізувати менший рівень помилок в мережі.

Можливість мінімізації СКП залежить від властивостей передаточної функції системи, яка в свою чергу залежить від принципу керування, у відповідності з яким побудована ця система.

В системах з принципом керування по збурюючому впливу, як відомо [8, 9], існує протиріччя між умовами підвищення динамічної точності і стійкості, а в деякому діапазоні зміна коефіцієнта підсилення k_p системи в розімкнутому стані і показниками якості перехідних процесів. В цьому діапазоні зміна k_p при зменшенні динамічних помилок погіршуються показники якості перехідних процесів, і тому в цих системах доводиться приймати компромісне рішення.

Середньоквадратичну помилку СКП, тобто помилку взятую середньою за великий проміжок часу, можна віднести до розряду динамічних

помилки. Якщо СКП можна віднести до розряду динамічних, то виникає задача оцінки підвищення динамічної точності та швидкодії систем автоматичного керування враховуючи протиріччя між умовами мінімізації СКП і стійкістю.

Показники якості перехідних процесів системи ФАПЧ, що викликаються зміною задаючого впливу (попередній стан значення фази) ФАПЧ $\alpha_{\Delta\omega}(t)$.

Передавальна функція системи в розімкненому стані

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

де $k_p = k_1k_2$ – коефіцієнт підсилення,

T_1, T_2 , - час проходження сигналів на відповідній ділянці.

Виходячи з вимоги стійкості системи визначаємо первинне значення k_p . 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

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

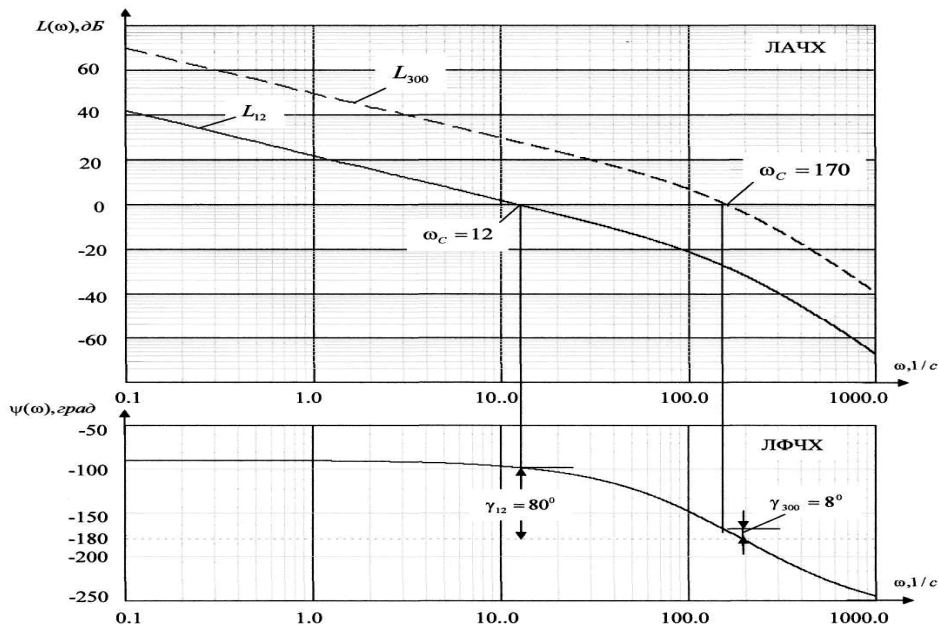


Рис. 1. Логарифмічні амплітудно-частотна (ЛАЧХ) (а), і фазо-частотна (ЛФЧХ) характеристики розімкненої системи (б)

На рис. 1. кривою L_{300} зображена логарифмічна амплітудно-частотна характеристика системи при $k_p = 300$. Як видно з малюнка, частота зрізу ω_n збільшується в порівнянні з випадком, коли, k_p набуває значень від 12 до 190. Отже, збільшилася і смуга пропускання системи.

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

$$\begin{aligned} \psi(\omega) &= -90^\circ - \arctg(\omega T_1) - \arctg(\omega T_2) \\ &= -90^\circ - \arctg(\omega \cdot 0.003) - \arctg(\omega \cdot 0.009) \end{aligned}$$

Логарифмічна фазо-частотна характеристика (ЛФЧХ) зображена на рис.1.

Як відомо, найбільш простим методом зменшення сталих динамічних помилок САУ є підвищення коефіцієнта підсилення 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 висновку підтверджується також порівнянням частотного спектру випадкової задаючої дії і частотної характеристики системи. Випадковий вхідний сигнал, як правило, має широкий частотний спектр тому, чим ширше смугу пропускання матиме система, тим краще відтворюватиметься системою випадкова задаюча дія. Підвищення k_p веде до збільшення частоти зрізу ω_n системи, тобто сприяє зменшенню СКП.

Переконаємося в тому, що із збільшенням k_p зменшується СКП ϵ системи шляхом аналітичних розрахунків. Для цього визначимо $I_4, \bar{\theta}^2, \epsilon$ при різних значеннях k_p . При розрахунках, результати зведено до в табл. 1. слід зважати, що згідно із зміною k_p змінюються лише два коефіцієнти: $c_3 = b_3 + b_2\beta = k_p + 1 \cdot 0,1$; $c_4 = b_3\beta = k_p \cdot 0,1$

Таблиця 1

k_p	I_4	θ^2	ε	I_{II}
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 $\varepsilon = f(k_p)$, побудований на підставі розрахунків за допомогою пакету MathCAD в логарифмічних масштабах по осі ординат і осі абсцис, зображений на рис. 2,а. Для

наочнішого уявлення про характер залежності в області великих k_p графік $\varepsilon = f(k_p)$ на рис. 2,б зображений в логарифмічному масштабі по осі ординат і в лінійному по осі абсцис.

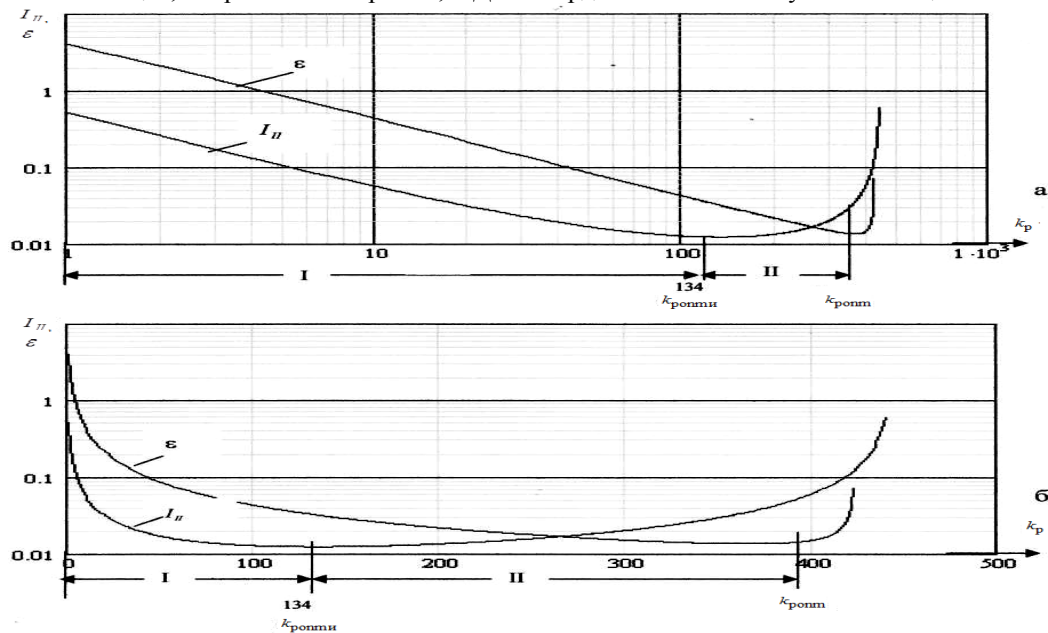


Рис. 2. Графіки залежності $\varepsilon = f(k_p)$ і $I_{II} = f(k_p)$ системи з принципом управління по відхиленню
 а – в логарифмічному масштабі по осі абсцис і ординат;
 б – в логарифмічному масштабі по осі ординат і лінійному по осі абсцис

Згідно графіку $\varepsilon = f(k_p)$, як і передбачалося, СКП зменшується із збільшенням k_p . Згідно графіку $I_{II} = f(k_p)$ рис. 2, на інтервалі I зі збільшенням k_p від $k_p = 1$ до $k_p = k_{\text{ропн}} = 134$ 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 рис. 2.б кривими перехідних процесів при різних значеннях k_p .

Ми бачимо, що на інтервалі I, зміни k_p рис.2 приводить до зменшення не тільки I_{II} , але також і СКП ϵ , тобто, для зменшення як ϵ , так і I_{II} необхідно виконати одну умову – необхідно збільшувати k_p . На інтервалі підвищення k_p до оптимального значення $k_{ponm\epsilon}$, тобто де немає протиріччя між умовами підвищення ϵ и I_{II} . Проте при подальшому збільшенні k_p от $k_{ponm\epsilon}$ до k_{ponm} (гілка II) ϵ продовжує зменшуватися, а I_{II} починає зростати – показники якості перехідного процесу погіршуються рис.3, де при $k_p > k_{ponm\epsilon}$ виникає суперечність між умовами мінімізації СКП і квадратичної інтегральної оцінки перехідних процесів.

Мінімум СКП досягається при $k_{ponm} = 421.28$ близькому до границі стійкості, коли в системі виникають поволи 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_{ponm} і $k_{ponm\epsilon}$, відповідними мінімуму СКП і мінімуму квадратичної інтегральної оцінки, тобто на інтервалі II.

Враховуючи, що мінімальне значення середньоквадратичних помилок в цих системах досягається практично на границі стійкості, коли виникають поволи затухаючі коливання. Тому при виборі k_p слід приймати компромісне рішення.

При компромісному виборі k_p , можна рекомендувати його значення, що знаходиться між

$$I_{IIK2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| K_{\theta K2}(jw) \cdot \frac{1}{jw} \right|^2 dw = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{a_0(jw)^4 + a_1(jw)^3 + a_2(jw)^2}{b_0(jw)^5 + b_1(jw)^4 + b_2(jw)^3 + b_3(jw)^2 + b_4(jw) + b_5} \right|^2 dw.$$

Приводимо інтеграл до табличного

$$I_{IIK2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d_0(jw)^4 + d_1(jw)^3 + d_2(jw)^2}{\left| b_0(jw)^5 + b_1(jw)^4 + b_2(jw)^3 + b_3(jw)^2 + b_4(jw) + b_5 \right|^2} dw$$

Значення табличного інтегралу

$$I_{IIK2} = \frac{(b_2 b_3 b_4 - b_2^2 b_5 - b_1 b_4^2 - b_0 b_4 b_5) d_0}{2 b_0 [-b_5^2 b_0^2 + (-b_1 b_5^2 + 2 b_0 b_1 b_4 - b_0 b_2 b_3) b_5 + (b_1 b_2 b_3 b_4 - b_1^2 b_4^2 - b_0 b_3^2 b_4)]} +$$

$$+ \frac{(-b_0 b_3 b_4 + b_0 b_2 b_5) d_1 + (b_0 b_1 b_4 - b_0^2 b_5) d_2}{2 b_0 [-b_5^2 b_0^2 + (-b_1 b_5^2 + 2 b_0 b_1 b_4 - b_0 b_2 b_3) b_5 + (b_1 b_2 b_3 b_4 - b_1^2 b_4^2 - b_0 b_3^2 b_4)]} +$$

$$+ \frac{(-b_0 b_1 b_2 + b_0^2 b_3) d_3 + (b_0^2 b_1 - b_0 b_1^2 \frac{b_4}{b_5} + b_0 b_1 b_2 \frac{b_3}{b_5} - b_0^2 \frac{b_3^2}{b_5}) d_4}{2 b_0 [-b_5^2 b_0^2 + (-b_1 b_5^2 + 2 b_0 b_1 b_4 - b_0 b_2 b_3) b_5 + (b_1 b_2 b_3 b_4 - b_1^2 b_4^2 - b_0 b_3^2 b_4)]}$$

k_{ponm} і $k_{ponm\epsilon}$, 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 $k_{ponm\epsilon}$, якщо ж більш важливо забезпечити вимоги, що пред'являються до СКП, то вони можуть бути задоволені при виборі k_p , ближчому до k_{ponm} . 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], що призведе до усунення помилки що встановилась і скоротити час перехідного процесу (збільшити швидкість системи), який викликаний зміною збурюючого впливу.

Суть методу оцінки показників якості цифрової системи фазової автопідстройки частоти, полягає у введенні похідних від задаючого та збурюючого впливу. Припустимо, що задаючим впливом є попередній стан значення фази ФАПЧ $\alpha_{\Delta\omega}(t)$, що змінюється у відповідності до графіку задаючого нестационарного впливу.

Виконаємо перетворення з метою зменшення СКП за допомогою введення в систему першої і другої похідної задаючого впливу.

За формулою Рейлі і передаточної функції комбінованої системи квадратична інтегральна оцінка

або при $d_4 = 0, d_3 = 0$

$$I_{IIK2} = \frac{(b_2 b_3 b_4 - b_2^2 b_5 - b_1 b_4^2 - b_0 b_4 b_5) d_0}{2b_0[-b_5^2 b_0^2 + (-b_1 b_2^2 + 2b_0 b_1 b_4 - b_0 b_2 b_3) b_5 + (b_1 b_2 b_3 b_4 - b_1^2 b_4^2 - b_0 b_3^2 b_4)]} + \frac{(-b_0 b_3 b_4 + b_0 b_2 b_5) d_1 + (b_0 b_1 b_4 - b_0^2 b_5) d_2}{2b_0[-b_5^2 b_0^2 + (-b_1 b_2^2 + 2b_0 b_1 b_4 - b_0 b_2 b_3) b_5 + (b_1 b_2 b_3 b_4 - b_1^2 b_4^2 - b_0 b_3^2 b_4)]}$$

Обчислені значення I_{IIK2} , при заданих k_p , I_{II}/I_{IIK2} , I_{IIK1}/I_{IIK2} зведені до таблиці 2.

Таблиця 2

k_p	$\bar{\theta}_{k2}^2$	$\varepsilon/\varepsilon_{K2}$	$\varepsilon/\varepsilon_{K2}$	$\varepsilon_{K1}/\varepsilon_{K2}$	I_{IIK2}	I_{II}/I_{IIK2}	I_{IIK1}/I_{IIK2}
1	$1,831 \cdot 10^{-6}$	$1,353 \cdot 10^{-3}$	$2,989 \cdot 10^3$	12,857	$4,857 \cdot 10^{-3}$	104,177	1,721
3	$1,829 \cdot 10^{-6}$	$1,352 \cdot 10^{-3}$	$1,029 \cdot 10^3$	7,703	$4,92 \cdot 10^{-3}$	35,102	1,706
6	$1,825 \cdot 10^{-6}$	$1,351 \cdot 10^{-3}$	519,171	5,514	$5,015 \cdot 10^{-3}$	17,831	1,684
12	$1,819 \cdot 10^{-6}$	$1,349 \cdot 10^{-3}$	261,296	3,948	$45,204 \cdot 10^{-3}$	9,192	1,643
60	$1,797 \cdot 10^{-6}$	$1,345 \cdot 10^{-3}$	52,945	1,885	$6,774 \cdot 10^{-3}$	2,254	1,405
100	$1,822 \cdot 10^{-6}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	31,681	1,531	$8,233 \cdot 10^{-3}$	1,548	1,28
200	$2,097 \cdot 10^{-6}$	$1,488 \cdot 10^{-3}$	15,003	1,196	0,013	1,006	1,094
330	$3,69 \cdot 10^{-6}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$	7,322	1,028	0,032	0,778	0,957
430	$3,63 \cdot 10^{-5}$	$6,025 \cdot 10^{-3}$	2,407	0,811	0,36	0,516	0,622

Із рис.3 випливає, що дійсно, введення першої і другої похідної задаючого впливу дозволяє значно зменшити квадратичну інтегральну оцінку у порівнянні із системою керування по збурюючому впливу і в декілька разів по відношенню до комбінованої САК. При введенні в систему першої похідної задаючого впливу, квадратична інтегральна оцінка при значному інтервалі зміни k_p (до $k_p = 100$) практично не залежить від k_p , залишаючись на малому рівні.

При подальшому збільшенні k_p квадратична інтегральна оцінка I_{IIK2} починає зростати, що пояснюється наближенням системи керування до границі стійкості, а починаючи з певного значення k_p (приблизно з $k_p = 200$) I_{IIK2} (як і I_{IIK1}) дещо перевищує величину I_{II} системи керування по збурюючому впливу.

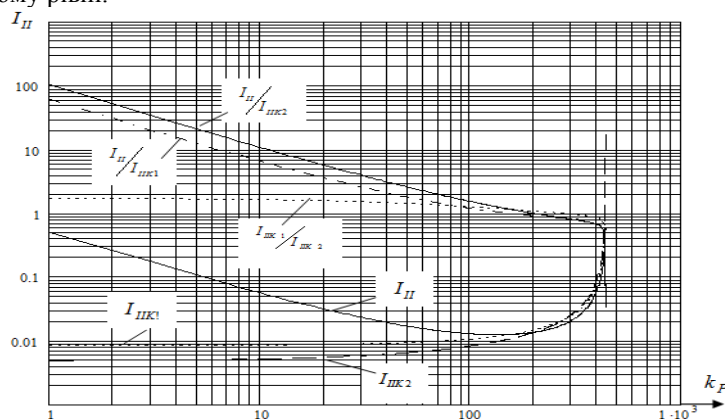


Рис.3. Графіки залежності $I_{II} = f(k_p)$, $I_{IIK1} = f(k_p)$, $I_{IIK2} = f(k_p)$.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Використання традиційних систем автоматичного керування дозволяють додатково зменшити як динамічні сталі помилки але не

враховують необхідності компромісного вибору коефіцієнта підсилення, що призведе до збільшення часу перехідного процесу, який викликаний зміною збурюючого впливу та встановлення сталі помилки.

Завдяки використанню запропонованого методу вдалося:

введення 1-ї і 2-ї похідних задаючого впливів в систему дозволяє значно зменшити СКП у порівнянні із системою з принципом керування по збурюючому впливу, з астатизмом 1-го порядку, так і відносно комбінованої системи, через розімкнутий зв'язок якої в систему подається 1-а похідна задаючого впливу;

за допомогою 1-ї і 2-ї похідних задаючого впливу вдалося не тільки зменшити СКП, але також і квадратичну інтегральну оцінку у порівнянні із системою з керуванням по збурюючому впливу і комбінованою системою;

завдяки введенню в систему 1-ї і 2-ї похідних

задаючого впливу одночасно вдається зменшити СКП і квадратичну інтегральну оцінку на одній і тій же (значній) ділянці зміни k_p , - тобто на цій ділянці відсутнє протиріччя між умовами мінімізації СКП і квадратичної інтегральної оцінки.

Таким чином запропонований метод оцінки показників якості (динамічної точності та швидкодії) систем автоматичного керування (САК) доцільно використовувати для дослідження стійкості, визначення динамічної, середньоквадратичної помилки (СКП) цифрової системи ФАПЧ.

Література

1. Шахгильдян А. А. Системы фазовой автоподстройки частоты / А. А. Шахгильдян, В. Л. Ляховкин. – М.: Связь, 1972. – 220 с. 2. Минимизация среднеквадратических ошибок и квадратичных интегральных оценок следящих систем с помощью разомкнутых и дифференциальных связей / Г. Ф. Зайцев, В. Г. Кривуца, В. Л. Булгач, В. Л. Радзивиллов. – К.: ГУИКТ, 2006. – 185 с. 3. Зайцев Г. Ф. Противоречие между условиями минимизации СКО и квадратичной интегральной оценки в следящих системах с принципом управления по отклонению / Г. Ф. Зайцев, Г. Д. Радзивиллов. // Проблемы управления и информатики. – 2004. – №1. – С. 48–59. 4. Повышение показателей качества корреляционных систем / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Н. В. Градобоева, Н. В. Сайко. // “Сучасні тенденції розвитку технологій в комунікаціях та освіті” (Київ, 24-25 листопада 2011р.). – 2011. – С. 226–231.

5. Комбинированная система фазовой автоподстройки частоты / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, А. П. Полоневич, Н. В. Градобоева // Часть 3. Показатели качества системы / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, А. П. Полоневич, Н. В. Градобоева., 2012. – (Зв'язок). – С. 64–68. 6. Milijevic S. An introduction to Synchronized Ethernet [Електронний ресурс] / Slobodan Milijevic – Режим доступа до ресурсу: www.videsignline.com/showArticle.jhtml?articleID=215801063&cid=NL_vidl. 7. Зайцев Г. Ф. Теорія автоматичного управління / Г. Ф. Зайцев, В. К. Стеклов. – К.: Техніка, 2002. – 688 с. 8. Generic functional architecture of transport networks – Geneva: ITU-T Rec. G.805, 2000. 9. Беляков Р. О. Аналіз якісних показників систем автоматичного керування діаграмою направленості активних фазованих антенних решіток / Р. О. Беляков. // Л.: “Збірник наукових праць” АСВ ім. П.Сагайдачного. – 2015. – С. 226–231.

МЕТОД ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

¹Евгений Вицентрович Лебедь

²Сергей Николаевич Кононенко

²Евгений Александрович Судников

²Руслана Григорьевна Ефимова

¹Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев, Украина

²Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

В работе определены динамические, среднеквадратические ошибки, показатели качества переходных процессов, вызываемых изменениями задающего и возмущающих воздействий, системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), дифференциальная связь которой синтезирована в соответствии с условиями повышения динамической точности и быстродействия при комплексных корнях характеристического уравнения. Дана сравнительная оценка динамических характеристик системы ФАПЧ.

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

THE QUALITY INDEXES ESTIMATION METHOD OF THE PHASE-LOCKED LOOP SYSTEM

¹Yevhen V. Lebid

²Serhii M. Kononenko

²Yevhen O. Sudnikov

²Ruslana H. Yefimova

¹Military Institute of Telecommunications and Informatization, Kyiv, Ukraine

²National Defense University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, Kyiv, Ukraine

The of article includes the definition of the dynamic, meansquared errors and quality of transients of the phase - locked loop (PLL) caused by the changes of the master and disturbing impacts, its differential coupling was synthesized under conditions of increasing the dynamic accuracy and fast response in the complex roots of the characteristic equation. The paper provides a comparative evaluation of the PLL dynamic characteristics.

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

References

1. **Shahgil'djan A.A.**, Ljahovkin V.L. (1972), A phase-locked loop [*Sistemy fazovoj avtopodstrojki chastoty*], Svjaz', 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 ozenok sledjashhih sistem s pomoshh'ju razomknutyh i differencial'nyh svyazej*], GUIKT, Kyiv, 185 p.
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 ozenki v sledjashhih sistemah s principom upravljenja po otkloneniju*], Problemy upravljenja i informatiki, Vol. 1, pp. 48–59.
4. **Zajcev G.F.**, Bulgach V.L., Gradoboeva N.V., Sajko N. V. (2011), Improving quality indicators correlation systems. [*Povyshenie pokazatelej kachestva korreljacionnyh sistem*], Suchasni tendentsii rozvytku tekhnolohii v komunikatsiakh ta osvity, Kyiv, pp. 226–231.
5. **Zaitsev H.F.**, Bulhach V.L., Polonevych A.P., Hradoboeva N. V. (2012), Combined phase-locked loop. [*Kombinirovannaja sistema fazovoj avtopodstrojki chastoty*], Chast' 3. Pokazateli kachestva sistemy, Zviazok, pp. 64–68.
6. **Milijevic S.** An introduction to Synchronized Ethernet [Electronic resource] / Slobodan Milijevic – Access to the resource: www.videsignline.com/showArticle.jhtml?articleID=215801063&cid=NL_vidl.
7. **Zaitsev H.F.**, Steklov V.K. (2002), Automatic Control Theory. [*Teoriia avtomatichnoho upravlinnia*], Tekhnika, Kyiv, 688 p.
8. **Generic functional architecture of transport networks** – Geneva: ITU-T Rec. G.805, 2000.
9. **Bieliakov R.O.** (2015), Analysis of quality indicators of automatic control diagram orientation active phased antenna arrays. [*Analiz yakisnykh pokaznykiv system avtomatichnoho keruvannia diahramoiu napravlenosti aktyvnykh fazovanykh antennykh reshitok*], Zbirnyk naukovykh prats ASV im. P.Sahaidachnoho, Lviv, pp. 226–231.

Отримано: 11.07.2015 року