

<sup>1</sup>Євген Віцентрович Лебідь<sup>1</sup>Григорій Данилович Радзівілов (канд. техн. наук)<sup>2</sup>Анатолій Анатолійович Кизима<sup>2</sup>Ігор Ігорович Кулинич<sup>1</sup>Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ, Україна<sup>2</sup>Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

## АНАЛІЗ ДІЇ ФЛУКТУАЦІЙНИХ ЗАВАД НА ЦИФРОВУ СИСТЕМУ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

У статті розглядаються питання випадкових завад системи фазового автопідстроювання частоти які впливають на еталонний сигнал. Досліджено вплив флуктуаційних завад системи ФАПЧ для оцінки фільтруючих властивостей при слабких флуктуаціях завад на вході системи ФАПЧ. Розглянуто використання системи ФАПЧ в якості фільтра фази в системах з пропорційно-інтегруючим та RLC-фільтром.

**Ключові слова:** система ФАПЧ; дисперсія фази; коефіцієнт фільтрації фази.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На практиці в системі фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) мають місце завади випадкового характеру, наприклад у вигляді флуктуаційного шуму, накладеного на опорний сигнал.

Шуми, проникаючи в систему ФАПЧ разом з опорним сигналом, викликають паразитну модуляцію керованого генератора, що знижує якість роботи системи ФАПЧ.

При малих завадах допустима лінеаризація характеристики фазового детектора (ФД) у невеликій області, що охоплює точку стійкої рівноваги, вирішується просто [1]. Однак навіть при малих завадах аналіз дії флуктуаційних завад на цифрову систему фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) значно відрізняється від аналізу впливу детермінованих перешкод. Так, при гармонійній заваді фільтруюча здатність системи повністю визначається її передавальною функцією. За відомим значенням зазначеної функції і параметрами завади можна визначити параметри відхилення фази керованого генератора (КГ). При випадкових перешкодах відхилення фази КГ мають випадковий характер, тому необхідно використовувати статистичні характеристики випадкових процесів, такі як функції розподілу, енергетичний спектр і дисперсія.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо випадок коли флуктуаційному збуренню підлягає фаза еталонного сигналу, а його амплітуда постійна. Це відповідає флуктуаційній модуляції фази еталонного сигналу за відсутності шуму, або при наявності усунення амплітудної модуляції сигналу на вході системи ФАПЧ. При цьому результатуючі коливання на вході системи можна представити у вигляді

$$u_{\text{вх}}(t) = E(t) \cos[\omega_{\text{ОГ}} t + \phi_{\text{ОГ}} N(t)],$$

де  $\phi_{\text{ОГ}} N(t) = \phi(t) + \phi_N(t)$ ,

$$E(t) = \sqrt{[A(t) + U]^2 + C^2(t)}.$$

Отже, дія шуму призводить до додаткової амплітудно-фазової модуляції сигналу на вході системи ФАПЧ. Якщо амплітудна модуляція усувається, то вхідний сигнал системи залишається модульованим тільки по фазі.

При паразитній модуляції опорного коливання нормальним флуктуаційним шумом з енергетичним спектром  $S_{\Delta\phi}(\omega)$  відповідно з роботою Б. Р. Левіна [2] дисперсія фази вихідного сигналу КГ системи ФАПЧ дорівнює:

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{\Delta\phi\Delta\phi_0}(i\omega)| S_{\Delta\phi}(\omega) d\omega. \quad (1)$$

де  $W_{\Delta\phi\Delta\phi_0}(i\omega) = \frac{\Delta\phi(i\omega)}{\Delta\phi_0(i\omega)}$  – комплексна частотна

характеристика (КЧХ) системи ФАПЧ, що є відношенням відповідно комплексних зображень миттєвих відхилень фаз керованого та опорного генераторів.

Як впливає з еквівалентних схем, що відображають реакцію системи ФАПЧ на паразитні збільшення частоти сигналу опорного генератора [3],

$$W_{\Delta\phi\Delta\phi_0}(i\omega) = W_{\Delta f\Delta f_0}(i\omega),$$

де  $W_{\Delta f\Delta f_0}(i\omega) = \frac{\Delta f(i\omega)}{\Delta f_0(i\omega)}$  – КЧХ системи ФАПЧ.

У цьому випадку формулу (1) можна записати у вигляді

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{\Delta f\Delta f_0}(i\omega)| S_{\Delta\phi}(\omega) d\omega, \quad (2)$$

У випадку рівномірного енергетичного спектру флуктуаційного шуму вираз (2) можна переписати у вигляді

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 = \frac{1}{2\pi} S_{\Delta\phi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{\Delta f\Delta f_0}(i\omega)|^2, \quad (3)$$

Так як реальні пристрої мають обмежену смугу пропускання, представляється доцільним

обмежити смугу частот шумової фазової модуляції значенням  $\omega_{ш}$ , рівним смузі робочих частот генератора шумових сигналів при вимірюванні ширини смуги частот випромінювання передавача.

У цьому випадку з виразу (3) отримаємо

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 = \frac{1}{2\pi} S_{\Delta\phi} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_{\Delta\phi f_0}(i\omega)|^2 d\omega = S_{\Delta\phi} \Delta F_{ш}, \quad (4)$$

де  $\Delta F_{ш}$  – шумова смуги системи ФАПЧ, визначена наступним виразом:

$$|W_{\Delta\phi}(i\omega)| = \frac{\sqrt{\left\{1 + \omega^2 \left[ m^2 T_p^2 - T_p T_{sp} (1-m) \right] \right\}^2 + \omega^2 T_{sp}^2 \left[ 1 - m T_p^2 \omega^2 \right]^2}}{\left( 1 - \omega^2 T_p T_{sp} \right)^2 + \omega^2 \left( T_{sp} + m T_p \right)^2} \quad (6)$$

Розглянемо випадок використання системи ФАПЧ як фільтра фази. Для визначення коефіцієнта фільтрації фази необхідно знати величину її дисперсії на виході системи:

$$S_{\phi N_1}(\omega) = \frac{b}{\Pi \left[ h^2 + \left( \frac{\omega}{\Pi} \right)^2 \right]^2} \quad (7)$$

$$\Phi_{\phi} = \frac{\sigma_{\phi}^2}{\sigma_{\phi 0}^2} = \frac{am^2(m+2a)T_p^3 + [a^2m^2 + 2a(a+m)^2]T_p^2 + a^2m(m+a)T_p^2 + (a+m)[2am(1+a) + a^2(a+m)]T_p^2 + (4a^2 + 4am + m)T_p + 1 + 2a}{a^2m(m+a)T_p^2 + (a+m)[2am(1+a) + a^2(a+m)]T_p^2 + (4a^2 + 4am + m)T_p + 1 + 2a} \rightarrow \frac{1}{[2a(1+m) + m(1+a)](1+a)T_p + (1+a)^2} \quad (8)$$

Модуль комплексно-передавальної функції системи з RLC-фільтром має вигляд

$$|W_{\Delta\phi}(i\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - kdT_{sp}\omega^2)^2 + T_{sp}^2(1 - k^2\omega^2)^2}} \quad (9)$$

$$\Phi_{\phi} = \frac{2av^2d + 4a(1+v^2)d^2 + [2a(1+v^2)^2 + 1 - 4v^2]d - k}{a^2v^2d^3 + \frac{v^2}{k} [2(v^2a + 1) - v^2]d^2 + [(1+a)(2av^2 + 1 + a)]d - k} \rightarrow \frac{-2v - 4v^3}{+a^2v^4 - 2v^2(av^2 - 1)d - k[(1+a)(2av^2 + 1 + a) + a^2v^4]} \quad (10)$$

де  $v = ka = \frac{\Pi}{\omega_{п}} 0,93\pi$

Ефективність застосування ППФ та RLC-фільтрів та комбінації його параметрів визначимо шляхом порівняння величин  $\Phi_{\phi}$  при постійному значенні  $\omega_3$ .

Найкращою системою ФАПЧ будемо рахувати ту систему, яка має задану відносну смугу захоплення та найменший коефіцієнт фільтрації фази.

Порівняння залежностей проведемо чисельним методом при цьому задамо значення

$$\Delta F_{ш} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_{ш}} |W_{\Delta\phi f_0}(i\omega)|^2 d\omega. \quad (5)$$

Поняття шумової смуги характеризує площа під кривою квадрата модуля КЧХ і часто виявляється зручним для практичних розрахунків.

Для оцінки фільтруючих можливостей системи ФАПЧ при слабких флюктуаційних завадах на вході введемо поняття коефіцієнта фільтрації фази з пропорційно-інтегруючим фільтром (ППФ) та RLC-фільтром [1].

Модуль комплексно-передавальної функції системи з ППФ має вигляд:

Підставивши формули (6) при  $(T_{sp} = 1)$  та (7),(1) і виконавши інтегрування, отримаємо вираз для коефіцієнта фільтрації фази системи ФАПЧ з ППФ:

Коефіцієнт фільтрації фази системи ФАПЧ з RLC-фільтром знайдемо підставивши в формулу

(1) формули (9) при  $(T_{sp} = 1)$  та (7)

$\frac{\Pi}{\omega_{п}}$ ,  $m, T_p$  – для системи з ППФ та  $k, d$  – для системи з RLC-фільтру за формулами (9),(10) розрахуємо величини  $\Phi_{\phi}$ .

Для тих самих значень визначимо величини  $\omega_3$  за формулами для системи ФАПЧ з ППФ

$$K_p(\omega) = \frac{1 + mT_y^2\omega^2}{1 + T_y^2\omega^2}$$

для системи ФАПЧ з RLC-фільтром

$$K_p(\omega) = \frac{1 - k\omega^2}{(1 - k^2\omega^2) + \omega^2 k^2 d^2}$$

$k=0,45$

Будуємо криві  $\omega_3 = f(\Phi_\phi)$  рис 1.

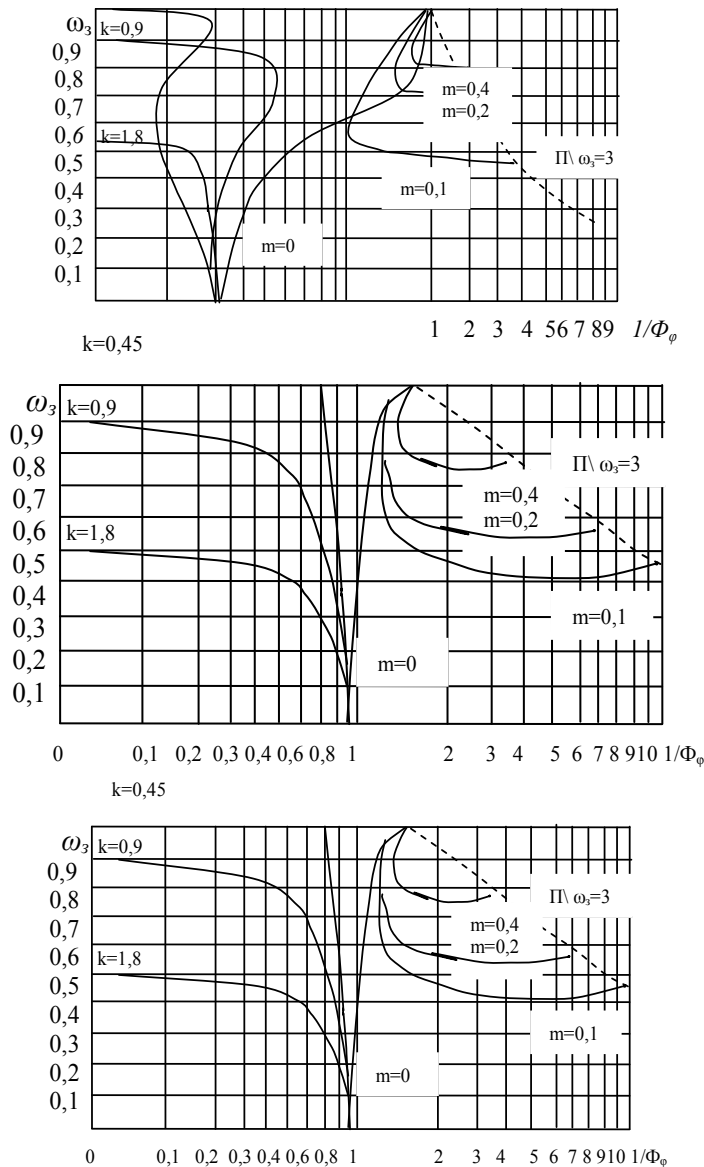


Рис. 1.

З рис .1 видно, що при малому відношенні  $\frac{\Pi}{\omega_\Pi}$   $T_p$  завжди вище чим в системі першого порядку ( $T_p = 0$ ).  
 залежність  $\omega_3$  від  $(\Phi_\phi)$  неоднозначна.

Тому потрібно вибирати параметри системи ФАПЧ і фільтра такими, щоб при заданій фільтрації отримати найбільше значення  $\omega_3$

**Висновки й перспективи подальших досліджень**

В системі ФАПЧ зі звичайним інтегруючим фільтром збільшення постійної часу  $T_p$  призводить до одночасному збільшенні дисперсії фази перебудованого генератора та зниженню смуги захоплення. Відповідно застосування такого фільтру недоцільно оскільки дисперсія фази перебудованого генератора при любому значенні

Дисперсія фази перебудованого генератора в системі ФАПЧ з RLC-фільтром при значеннях постійних коефіцієнтів  $k, d$  залишається вище ніж в системі з RC-фільтром. Відповідно застосування такого фільтру теж недоцільно.

Використання в системі з ППФ у якого значення дисперсії фази перебудованого генератора менше чим в системі першого порядку ( $\Phi_\phi \ll 1$ ). При фіксованому значенні коефіцієнта фільтрації частоти для зменшення зниження коефіцієнту фільтрації частоти  $\Phi_\phi$  потрібно вибрати достатньо велике значення  $T_p$ . Якщо  $mT_p \gg 1$  то вираз (8)

спрощується  $\Phi_{\phi} = \frac{m(m+2a)}{a(m+a)}$ . З цього виразу

можна зробити висновок, що при великому значенні  $T_p$  і заданій величині для зниження

$\Phi_{\phi}$  потрібно знижувати значення коефіцієнта фільтрації частоти. При цьому смуга захоплення також зменшується. Зі зменшенням значення коефіцієнта фільтрації частоти полоса захоплення зменшується повільніше ніж коефіцієнт фільтрації частоти.

### Література

1. Шахгильдян В. В. Системы фазовой автоподстройки частоты / В. В. Шахгильдян, А. А. Ляховкин. – Москва: Связь, 1972. 2. Левин Б. Р. Теоретические основы статической радиотехники : в 2 т. / Б. Р. Левин., 1974. – 552 с. 3. Печенин Е. А. Анализ действия флуктуационных помех на систему импульсно-фазовой автоподстройки частоты синтезаторов / Е. А. Печенин. // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2013. – №1. – С. 22–25. 4. Зайцев Г. Ф., Кривуца В. Г., Булгач В. Л., Радзивиллов Г. Д. Минимизация среднеквадратических ошибок и квадратичных интегральных оценок следящих систем с помощью разомкнутых и дифференциальных связей. – К.: ГУИКТ, 2006. – 185 с. 5. Зайцев Г.Ф., Радзивиллов 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. 6. 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.: ДУІКТ, 2011. С. 226–231. 7. Комбинированная система фазовой автоподстройки частоты. Часть 3. Показатели качества системы / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, А. П. Полоневич, А. П. Градобоева, 2012. – С. 64–68.

## АНАЛИЗ ДЕЙСТВИЯ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПОМЕХ НА ЦИФРОВУЮ СИСТЕМУ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

<sup>1</sup>Евгений Вицентрович Лебедь

<sup>1</sup>Григорий Данилович Радзивиллов (канд. техн. наук)

<sup>2</sup>Анатолий Анатольевич Кизима

<sup>2</sup>Игорь Игоревич Кулинич

<sup>1</sup>Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев, Украина

<sup>2</sup>Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

В статье рассматриваются вопросы случайных помех системы фазовой автоподстройки частоты которые влияют на эталонный сигнал. Исследовано влияние флуктуационных помех системы ФАПЧ, для оценки фильтрующих свойств при слабых флуктуациях помех на входе системы ФАПЧ. Рассмотрено использование системы ФАПЧ в качестве фильтра фазы, в системах с пропорционально-интегрирующим и RLC - фильтром.

**Ключевые слова:** система ФАПЧ; дисперсия фазы; коэффициент фильтрации фазы.

## ANALYSIS OF FLUCTUATION INTERFERENCE ON DIGITAL PHASE-LOCKED LOOP

<sup>1</sup>Yevhen V. Lebid

<sup>1</sup>Hryhorii D. Radzivilov (Candidate of Technical Sciences)

<sup>2</sup>Anatolii A. Kyzyma

<sup>2</sup>Ihor I. Kulynych

<sup>1</sup>Military Institute of Telecommunications and Informatization, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovsky, Kyiv, Ukraine

In the article the questions of casual hindrances the system PLL of frequency are examined which influence on a standard signal. Investigated influence of fluctuation hindrances the system PLL of frequency, for the estimation filter properties at weak fluctuations of hindrances on the entrance the system PLL of frequency. Using the system PLL of frequency is considered as a filter phase, in the systems with proportionally - integrating and RLC - filter.

**Keywords:** PLL system; phase of dispersion; phase of filtration coefficient.

### References

1. Shahgil'djan V.V., Ljahovkin A.A. (1972). A phase-locked loop, [Sistemy fazovoj avtopodstrojki chastoty], Svjaz', Moscow, pp. 219-221. 2. Levin B.R. (1974). Theoretical Foundations of Radio static: in 2 volumes, [Teoreticheskie osnovy staticheskoy radiotekhniki : v 2 t.], Moscow, Sovetskoe radio, volume 2, 552 p. 3. Pechenin E.A., (2013). Analysis of impact of the fluctuation of interference on the system of pulse-phase-locked loop synthesizers, [Analiz dejstvija fluktuacionnyh pomeh na sistemu impul'sno-fazovoj avtopodstrojki chastoty sintezatorov], Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii, No 1, pp. 22-25. 4. 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 srednekvadraticheskikh oshibok i kvadratichnyh integral'nyh ocenok sledjashhijh sistem s pomoshh'ju razomknutyh i differencial'nyh svyazej], GUİKT, Kyiv, pp. 11-19.

5. 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 mezdu uslovijami minimizacii SKO i kvadratichnoj integral'noj ocnki v sledjashhijh sistemah s principom upravlenija po otkloneniju], Problemy upravlenija i informatiki, Vol. 1, pp. 48-59. 6. Zajcev G.F., Bulgach V.L., Gradoboeva 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. 7. Zajcev G.F., Bulgach V.L., Polonevich A.P., Gradoboeva N.V. (2012). Combined phase-locked loop. Part 3: Indicators of Quality System, [Kombinirovannaja sistema fazovoj avtopodstrojki chastoty. Chast' 3. Pokazateli kachestva sistemy], Zv'jazok, No 3, pp. 64-68.

Отримано: 21.02.2016 року.