

УДК 621.373

С.А. Макаров, С.М. Рот, О.М. Чекунова

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ШВИДКОДІЮЧОЇ НЕЛІНІЙНОЇ СИСТЕМИ ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ З РОЗШИРЕНОЮ СМУГОЮ ЗАХОПЛЕННЯ

У роботі запропонована математична модель швидкодіючої системи фазового автопідстроювання частоти синтезатора частот з додатковими зворотними зв'язками за фазою з динамічно регульованими параметрами по нелінійним законам з розширеною смугою захоплення, отримане нелінійне диференціальне рівняння четвертого порядку, яке дозволяє проаналізувати роботу удосконаленої системи.

Ключові слова: системи синхронізації, система фазового автопідстроювання частоти, фазовий модулятор, фазовий детектор, коло зворотного зв'язку по фазі, синтезатор частоти, смуга захоплення.

Вступ

Постановка проблеми. В умовах розмаїття нових технологій, їх швидкого прогресу, різноманітності типів та розгалуженості мереж, зростаючого попиту користувачів на нові послуги та підвищення вимог до їх якості, виникають усе нові й нові задачі, пов'язані з підвищенням якості синхронізації, надійності, точності, швидкодії окремих складових систем синхронізації. Серед цих складових найбільш поширеними є системи фазової автопідстройки (ФАП), можливості яких значно розширилися і підвищилася ефективність пристроїв на їх основі. Від показників якості системи ФАП, яка є основою синтезатора частоти, значно залежить ефективність системи зв'язку, правильність передаваної від джерела до одержувача інформації та ін.

Саме вибором структури кіл і вузлів, що входять до них, з'явилась можливість створювати варіанти побудови систем ФАП, які володіють необхідними характеристиками по точності і надійності роботи, завадостійкості та швидкодії. Швидкодія та фільтруючі властивості є одними із основних показників системи ФАП і часто вносять найбільш вагомий внесок в роботу системи.

Із проблемою підвищення швидкодії тісно пов'язана задача розширення смуги захоплення.

Звичайним однокільцевим системам ФАП властиве протиріччя між розширенням смуги захоплення і підвищенням їх фільтруючих властивостей. Дійсно, звужуючи смугу пропускання фільтру в колі управління і зменшуючи смугу утримання, можна значно збільшити фільтруючі властивості системи. Однак при цьому неуклібно зменшується смуга захоплення. Вирішення цього протиріччя досягається шляхом зміни структури побудови системи ФАП.

Проведений аналіз принципів побудови швидкодіючих синтезаторів частот на основі систем фазової синхронізації в [1] дає підстави стверджувати

про необхідність розширення смуги захоплення для підвищення швидкодії синтезаторів частот.

Отже, в даній статті буде запропонована математична модель швидкодіючої нелінійної системи фазового автопідстроювання частоти синтезатора частот з розширеною смугою захоплення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В літературі [1] проведений аналіз принципів побудови швидкодіючих синтезаторів частот на основі систем фазової синхронізації та систематизовані методи підвищення швидкодії синтезаторів частот. В [2] запропонована математична модель оптимальної по швидкодії нелінійної системи ФАП, в якій підвищення швидкодії досягається динамічним регулюванням коефіцієнту підсилення в колі додаткового зворотного зв'язку за нелінійними законами. В роботі [3] розглянуті методи розширення смуги захоплення швидкодіючих систем ФАП. Однак принципи побудови відомих в літературі систем ФАП не забезпечують достатньої смуги захоплення.

Метою даної статті є запропонувати математичну модель швидкодіючої системи фазового автопідстроювання частоти синтезатора частот з додатковими зворотними зв'язками за фазою з динамічно регульованими параметрами по нелінійним законам з розширеною смугою захоплення.

Виклад основного матеріалу

На підставі розглянутих методів розширення смуги захоплення швидкодіючих систем ФАП запропонована функціональна схема швидкодіючої системи ФАП синтезатора частот з додатковими зворотними зв'язками за фазою з динамічно регульованими параметрами по нелінійному закону з розширеною смугою захоплення, яка представлена на рис. 1.

У порівнянні з відомими нелінійними системами ФАП розроблена схема містить одночасно два фазових модулятора з прямим та інверсним включенням, один із яких встановлюється в тракці сигнала

лу опорного генератора, а другий – у ланцюгу зворотного зв'язку основного кола ФАП.

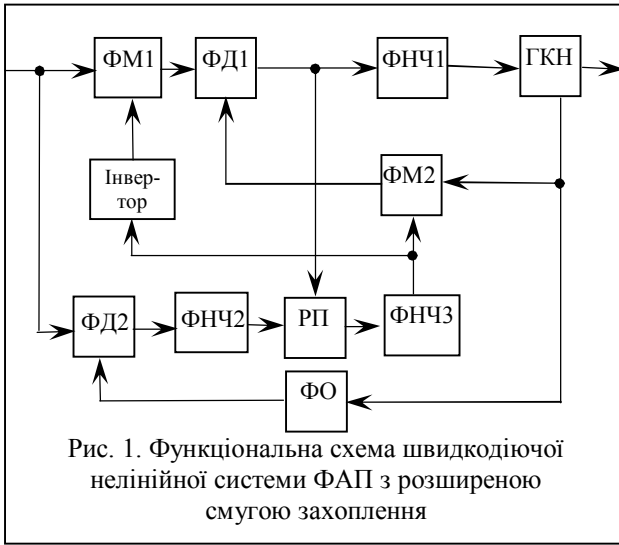


Рис. 1. Функціональна схема швидкодіючої нелінійної системи ФАП з розширеною смугою захоплення

Система містить:

- основне коло зворотного зв'язку по фазі;
- коло регулювання коефіцієнту підсилення;
- додаткове коло зворотного зв'язку по фазі з інверсним включенням фазового модулятора, яке дозволяє розширити смугу захоплення;
- канал оцінки стану системи.

До складу основного кола зворотного зв'язку по фазі входять перший фазовий детектор (ФД1), перший фільтр нижніх частот (ФНЧ1), генератор керованої напруги (ГКН) і другий фазовий модулятор (ФМ2). Коло регулювання коефіцієнту підсилення включає такі вузлові елементи: ФД1, регульований підсилювач (РП), третій фільтр нижніх частот (ФНЧ3), ФМ2. Додаткове коло зворотного зв'язку по фазі з інверсним включенням фазового модулятора містить перший фазовий модулятор (ФМ1), ФД1, РП, ФНЧ3, інвертор. До складу каналу оцінки стану системи ФАП входять фазообертувач (ФО) сигналу ГКН, другий фазовий детектор (ФД2), перший вхід якого з'єднаний із входом системи ФАП та ФМ1, а другий – з виходом ФО, другий фільтр нижніх частот (ФНЧ2).

Згідно загальноприйнятим правилам для систем радіоавтоматики в [4] і [5] кожний функціональний елемент системи замінимо відповідною групою ланок або самостійною ланкою з урахуванням виконуваних ним функцій та його основних характеристик. Отримана в операторній формі структурна схема моделі швидкодіючої системи ФАП синтезатора частот з додатковими зворотними зв'язками за фазою з динамічно регульованими параметрами по нелінійному закону з розширеною смугою захоплення представлена на рис. 2 та дозволяє провести аналіз процесів, що відбуваються в ній.

Складемо рівняння відносно різниці фаз сигналів $\alpha(t)$ на виході ФД1:

$$\alpha(t) = \phi_{M1} - \phi_{M2}, \quad (1)$$

де ϕ_{M1} – фаза сигналу на виході ФМ1; ϕ_{M2} – фаза сигналу на виході ФМ2.

Похідну від різниці фаз $\alpha(t)$ в операторній формі ($p \equiv d/dt$) запишемо у вигляді:

$$p\alpha = p\phi_{M1} - p\phi_{M2}. \quad (2)$$

Похідні від фаз вхідного сигналу ϕ_0 та ГКН ϕ_Γ є частота, яка дорівнює

$$\omega_0 = p\phi_0, \quad (3)$$

$$\omega_\Gamma = p\phi_\Gamma = \Phi_\Gamma \{E_1 F_1(\alpha(p)) K_1(p)\}, \quad (4)$$

де ω_0 – частота вхідного сигналу; ϕ_0 – фаза сигналу на вході системи ФАП; $\Phi_\Gamma \{ \cdot \}$ – нелінійна функція характеристики управління ГКН; E_1 – максимальна напруга на виході ФД1; $F_1(\alpha(p))$ – нормована характеристика ФД1; $K_1(p)$ – передаточна функція ФНЧ1.

Фаза сигналу на виході ФМ1 і ФМ2 змінюється відповідно за законами:

$$\phi_{M1} = \phi_0 + \psi_1 K_0 K_3(p) \times K_p \{ K_2(p) | E_2 F_2(\alpha(p) - \beta'(p)) \} \cdot \Phi_p \{ e_{д1} \}; \quad (5)$$

$$\phi_{M2} = C_1 \phi_\Gamma - \psi_2 K_0 K_3(p) \times K_p \{ K_2(p) | E_2 F_2(\alpha(p) - \beta'(p)) \} \cdot \Phi_p \{ e_{д1} \}, \quad (6)$$

де $e_{д1} = E_1 F_1(\alpha(p))$ – напруга на виході ФД1; C_1 – коефіцієнт перетворення частоти ГКН; ϕ_Γ – фаза сигналу на виході ГКН; ψ_1, ψ_2 – максимальні динамічні діапазони ФМ1, ФМ2 відповідно без врахування коефіцієнту підсилення РП; K_0 – максимальний коефіцієнт підсилення РП; $K_3(p)$ – передаточна функція ФНЧ3; $K_p \{ \cdot \}$ – нелінійна функція характеристики управління коефіцієнта підсилення РП; $K_2(p)$ – передаточна функція ФНЧ2; E_2 – максимальна напруга на виході ФД2; $F_2(\alpha(p) - \beta'(p))$ – нормована характеристика ФД2; $\beta'(p)$ – фазовий зсув сигналу у ФО; $\Phi_p \{ \cdot \}$ – нелінійна функція характеристики підсилення РП.

Підставляючи вирази (3) – (6) у (2), отримаємо рівняння вигляду:

$$p\alpha = \omega_0 - C_1 \Phi_\Gamma \{ E_1 F_1(\alpha(p)) K_1(p) \} + p(\psi_1 + \psi_2) K_0 K_3(p) K_p \times \{ K_2(p) | E_2 F_2(\alpha(p) - \beta'(p)) \} \Phi_p \{ E_1 F_1(\alpha(p)) \}. \quad (7)$$

Це рівняння в традиційній формі запису є нелінійним диференціальним рівнянням четвертого порядку і дозволяє проаналізувати роботу удосконаленої системи ФАП синтезатора частот.

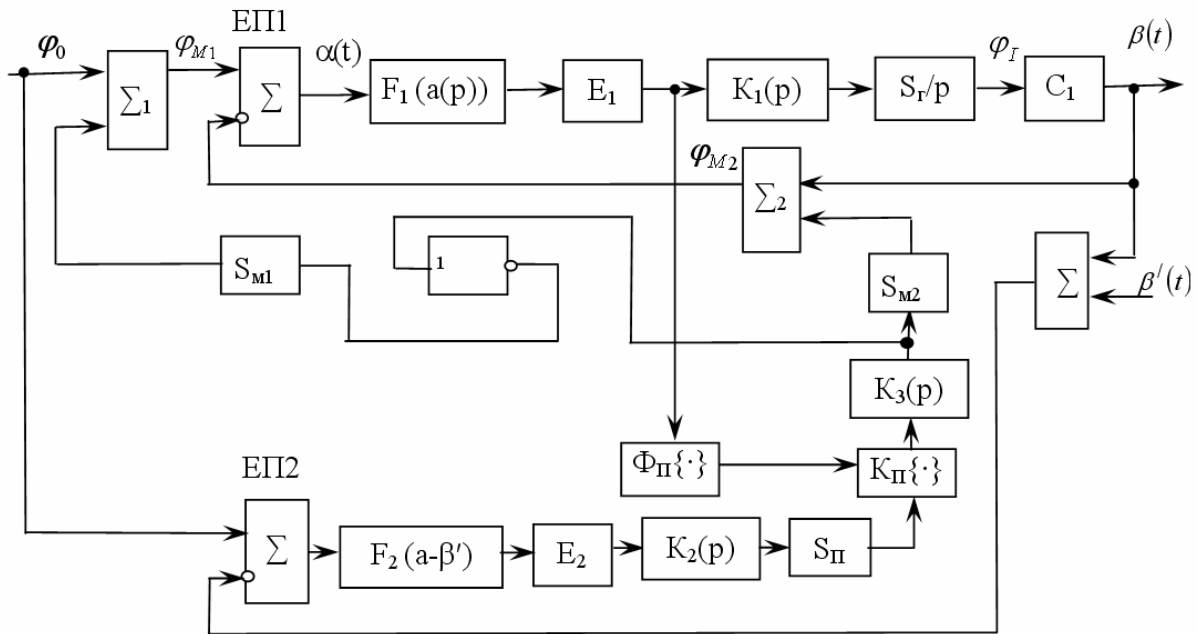


Рис. 2. Математична модель швидкодіючої нелінійної системи ФАП з розширеною смугою захоплення

Отримати його рішення у явному вигляді аналітичними методами немає можливості, але можна застосувати чисельні методи.

Однак такий шлях отримання результатів достатньо складний та не дозволяє точно встановити взаємозв'язок основних характеристик системи із параметрами функціональних ланок ланцюга управління.

З достатньою точністю для інженерних розрахунків можна вважати, що характеристика підсилення РП $\Phi_{\Pi}\{\cdot\}$ та регуляційна характеристика управління коефіцієнта підсилення РП $K_{\Pi}\{\cdot\}$ нелінійні у робочих межах змінювання відповідних керованих напруг, а саме змінюються за нелінійними законами регулювання виду $\text{arctg}(x)$. Це дозволяє спростити рівняння (7) до вигляду:

$$\frac{1}{\Omega} p\alpha + C_1 K_1(p) F_1(\alpha(p)) - \frac{(\psi_1 + \psi_2) K_0}{\Omega} p K_3(p) F_1(\alpha(p)) \times [1 - c K_{\Pi}\{K_2(p) F_2(\alpha(p) - \beta'(p))\}] = \gamma_0, \quad (8)$$

де $\Omega = S_T E_1$ – максимальна перестройка ГКН; $\psi_1 = S_{M1} E_1$ – максимальний динамічний діапазон ФМ1; $\psi_2 = S_{M2} E_1$ – максимальний динамічний діапазон ФМ2; $c = E_2 S_{\Pi} / K_0$ – нормований коефіцієнт управління РП; $\gamma_0 = \frac{\Omega_n}{\Omega} = \frac{\omega_0 - C_1 \omega_T}{\Omega}$ – відносна початкова розстройка ГКН за частотою; $\Omega_n = \omega_0 - C_1 \omega_T$ – початкова розстройка ГКН за

частотою; S_T, S_{Π} – крутизна характеристик $\Phi_T\{\cdot\}$, $\Phi_{\Pi}\{\cdot\}$ відповідно; S_{M1} – крутизна модуляційної характеристики ФМ1; S_{M2} – крутизна модуляційної характеристики ФМ2; ω_T – частота настройки ГКН.

Рівняння (8) отримане для довільних функцій $F_1(\alpha(p))$, $F_2(\alpha(p) - \beta'(p))$, $K_1(p)$, $K_2(p)$.

Завдамо дані функції у вигляді, які часто зустрічаються на практиці:

$$F_1(\alpha(p)) = \sin(\alpha(p)),$$

$$|F_2(\alpha(p) - \beta'(p))| = |\sin(\alpha(p) - \pi/2)| = |\cos(\alpha(p))|$$

при цьому $\beta'(p) = \pi/2$;

$K_1(p) = (1 + mpT_1)/(1 + pT_1)$ – пропорційно-інтегруючий фільтр;

$K_2(p) = 1/(1 + pT_2)$, $K_3(p) = 1/(1 + pT_3)$ – інтегруючі фільтри.

Тоді рівняння (8) буде мати такий вигляд:

$$\frac{1}{\Omega} p\alpha + C_1 \frac{1 + mpT_1}{1 + pT_1} \sin \alpha - \frac{(\psi_1 + \psi_2) K_0}{\Omega} \times \frac{1}{1 + pT_3} \left[\sin \alpha - \text{arctg} \left(\frac{|\cos \alpha|}{1 + pT_2} \right) \sin \alpha \right] = \gamma_0. \quad (9)$$

Помножимо обидві частини рівняння на такий вираз:

$$\Omega(1 + pT_1)(1 + pT_2)(1 + pT_3).$$

Після деяких перетворень отримаємо диференціальне рівняння (9) у традиційній формі запису:

$$\begin{aligned}
& T_1 T_2 T_3 \alpha^{IV} + \left\{ (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) \alpha + C_1 \Omega m T_1 T_2 T_3 \sin \alpha - (\psi_1 + \psi_2) K_0 T_1 T_3 \right\} \left(1 - \arctg \left(\frac{|\cos \alpha|}{1 + p T_2} \right) \right) \sin \alpha \Bigg\}''' + \\
& + \left\{ (T_1 + T_2 + T_3) \alpha + C_1 \Omega (T_2 T_3 + m T_1 T_2 + m T_1 T_3) \sin \alpha - (\psi_1 + \psi_2) K_0 (T_3 + T_1) \right\} \left(1 - \arctg \left(\frac{|\cos \alpha|}{1 + p T_2} \right) \right) \sin \alpha \Bigg\}'' + \quad (10) \\
& + \left\{ \alpha + C_1 \Omega (T_3 + T_2 + m T_1) \sin \alpha - (\psi_1 + \psi_2) K_0 \left(1 - \arctg \left(\frac{|\cos \alpha|}{1 + p T_2} \right) \right) \sin \alpha \right\}' + C_1 \Omega \sin \alpha = \gamma_0 \Omega .
\end{aligned}$$

Якщо γ_0 постійна, що відповідає постійній відносній розстройці по частоті, то права частина рівнянь (10) спрощується і приймає вигляд $\gamma_0 \Omega$.

Отримати рішення такого нелінійного диференційного рівняння четвертого порядку у загальному вигляді неможливо, тому для його аналізу будуть надалі використовуватися аналітичні, асимптотичні та якісні методи в поєднанні.

Висновки

Завдяки структурному синтезу системи ФАП отримана математична модель швидкодіючої нелінійної системи фазового автопідстроювання частоти синтезатора частот з додатковими зворотними зв'язками за фазою з динамічно регульованими параметрами по нелінійним законам з розширеною смугою захоплення.

Отримане нелінійне диференціальне рівняння четвертого порядку, яке дозволяє проаналізувати роботу удосконаленої системи.

Подальших досліджень потребують характеристики синтезованої системи та метод визначення основних властивостей систем ФАП синтезаторів частот.

Список літератури

1. Чекунова О.М. Аналіз принципів побудови швидкодіючих синтезаторів частот на основі систем фазової синхронізації / О.М. Чекунова, С.А. Макаров, Р.В. Коваленко // Системи озброєння і військова техніка. – 2006. – № 1 (5). – С. 122 – 126.
2. 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.
3. Лосев Ю.І. Методи розширення смуги захоплення швидкодіючих систем фазової автопідстройки частоти синтезаторів частот засобів радіозв'язку / Ю.І. Лосев, С.М. Рот, О.М. Чекунова // Системи обробки інформації. – X.: ХУПС, 2010. – Вип. 9 (90). – С. 67 – 69.
4. Стеклов В.К. Комбинированные системы ФАП / В.К. Стеклов, А.А. Руденко, А.К. Юдин. – К: Техніка, 2004. – 327 с.
5. Ваганов В.Б. Автоматика радиоэлектронных систем / В.Б. Ваганов. – К: Вища школа, 1988. – 351 с.

Надійшла до редколегії 27.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.О. Демідов, Харківський університет Повітряних Сил ім.І.Кожедуба, Харків.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ С РАСШИРЕННОЙ ПОЛОСОЙ ЗАХВАТА

С.А. Макаров, С.Н. Рот, О.Н. Чекунова

В работе предложена математическая модель быстродействующей системы фазовой автоподстройки частоты синтезатора частот с дополнительными обратными связями по фазе с динамически регулируемым параметрами по нелинейным законам с расширенной полосой захвата, получено нелинейное дифференциальное уравнение четвертого порядка, которое позволяет проанализировать работу усовершенствованной системы.

Ключевые слова: системы синхронизации, система фазовой автоподстройки частоты, фазовый модулятор, фазовый детектор, цепь обратной связи по фазе, синтезатор частоты, полоса захвата.

THE MATHEMATICAL MODEL OF QUICK-ACTION NON-LINEAR SYSTEM OF PHASE FREQUENCY AUTO-TUNING OF FREQUENCY SYNTHESIZER WITH EXPANDED CAPTURE BAND

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

The mathematical model of quick-action non-linear system of phase frequency auto-tuning of frequency synthesizer with additional feedbacks to phase with dynamic controlled parameters to non-linear orders with expanded capture band was proposed in research. The non-linear differential fourth - order equation, which permits to analyze a work of improved system, was received.

Keywords: synchronization system, phase frequency auto-tuning system, phase modulator, phase detector, feedback circuit to phase, frequency synthesizer, capture band.