



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 96830

(13) C2

(51) МПК (2011.01)

H04L 7/00

H03L 7/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИОПИС  
ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СИСТЕМА ФАЗОВОГО АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ ІЗ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

1

(21) а201003194

(22) 19.03.2010

(24) 12.12.2011

(46) 12.12.2011, Бюл.№ 23, 2011 р.

(72) ЗАЙЦЕВ ГРИГОРІЙ ФРОЛОВИЧ, БУЛГАЧ ВІКТОР ЛЕОНАРДОВИЧ, ГРАДОБОЄВА НЕЛЯ ВІКТОРІВНА, СТАСЬ ВАДИМ ВОЛОДИМИРОВИЧ

(73) ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

(56) UA 89872 C2; 10.03.2010

UA 15169 A; 30.06.1997

SU 1103356 A; 15.07.1984

RU 2280321 C2; 20.07.2006

JP 8330952 A; 13.12.1996

JP 3141725 A; 17.06.1991

US 2009189659 A1; 30.07.2009

Зайцев Г.Ф., Степков В.К. Радиотехнические системы автоматического управления высокой точностью. - К.: Техника, 1988. - С. 36-39.

(57) Система фазового автопідстроювання частоти з диференціальним зв'язком для стабілізації частоти напруги керованого генератора чи її зміни відповідно до частоти опорної напруги завдяки підтримці рівності фаз опорної і керованої напруг, яка включає фазовий дискримінатор (1), на пря-

2

мий вхід якого подається опорна напруга, а вхід, що інвертує, з'єднаний з виходом керованого генератора (4), вхід якого з'єднаний з виходом підсилювача-перетворювача (3), а вихід фазового дискримінатора з'єднаний із входом згладжувального фільтра (2), яка відрізняється тим, що додатково включено диференціальний зв'язок, що складається з п'яти динамічних ланок - математичних моделей аперіодичної ланки генератора (5), фазового дискримінатора з фільтром (6), ланки, що диференціює (8), аперіодичної ланки (7), коригувальної ланки (9), і двох суматорів (10, 11), причому перший вхід першого суматора (10) через ланку, що диференціює (8), з'єднаний з виходом фільтра фазового дискримінатора (2), другий його вхід через послідовно з'єднані моделі аперіодичної ланки генератора (5), фазового дискримінатора з фільтром (6), аперіодичної ланки (7) з'єднаний з виходом підсилювача-перетворювача (3), вихід першого суматора (10) через коригувальну ланку (9) з'єднаний з першим входом другого суматора (11), другий вхід якого з'єднаний з виходом фільтра фазового дискримінатора (2), а вихід другого суматора (11) з'єднаний із входом підсилювача-перетворювача (3).

Винахід належить до систем автоматичного керування, зокрема, до систем фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), призначених для стабілізації частоти напруги керованого генератора відповідно до частоти опорної чи відслідковування частоти напруги керованого генератора за частотою опорної напруги, що змінюється.

Особливістю систем ФАПЧ є те, що стабілізація частоти напруги керованого генератора чи її відслідковування за частотою опорної напруги, що змінюється, досягається завдяки підтримці з визначеною точністю рівності фаз опорної і керованої напруг. Тому системи ФАПЧ застосовуються також для синфазування опорної і керованої напруг.

Відома система ФАПЧ ([1], стор. 36-39, рис. 2.7). Дана система являє собою систему, що стежить за частотою керованого генератора, задавальним впливом якої є фаза опорної напруги, а ке-

рованою величиною - керована фаза напруги генератора.

На фіг. 1 зображена структурна схема системи ФАПЧ без диференціального зв'язку, де

$$K_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} - \text{передатна функція фазового}$$

дискримінатора з фільтром,

$K_2(p) = k_2$  - передатна функція підсилювача-перетворювача,

$$K_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1} - \text{передатна функція генерато-}$$

ра,

$$K_4(p) = \frac{k_4}{p} - \text{передатна функція інтегруючої}$$

ланки генератора,

(13) C2

(11) 96830

(19) UA

$$K_5(p) = \frac{k_5}{T_5 p + 1} \text{ - передатна функція каналу}$$

збурювання генератора.

Точність такої системи ФАПЧ визначається помилкою спостереження за фазою і частотою опорної напруги. Помилка спостереження за фазою опорної напруги дорівнює нулю, але помилка спостереження за частотою (швидкістю зміни фази вхідного сигналу), а також помилки від значення впливу, що збурює, існують і впливають на точність системи:

$$\theta(p) = \theta_\alpha(p) + \theta_L(p),$$

де

$$\theta_\alpha(p) = \frac{1}{1 + K_1(p)K_2(p)K_3(p)} \frac{1}{p} \alpha_{\Delta\omega}(p),$$

$$\theta_L(p) = \frac{K_5(p) \frac{1}{p}}{1 + K_1(p)K_2(p)K_3(p)} \frac{1}{p} \Delta L(p).$$

Аналіз помилки системи показує, що підвищення точності, наприклад, шляхом зміни загального коефіцієнта передачі або введенням коригувальної ланки, приводить до зміни знаменника, а отже обов'язково впливає на стійкість системи.

Дана система ФАПЧ прийнята за найближчий аналог. Недолік системи полягає в тому, що вона побудована на підставі принципу керування по відхиленню і їй властиве протиріччя між умовами підвищення точності і стійкості [2]. Це протиріччя є перешкодою підвищення точності системи-прототипу й обумовлює низькі його показники якості.

Винахід дозволяє виключити зазначене вище протиріччя і підвищити точність системи ФАПЧ.

Це досягається тим, що в систему ФАПЧ, що складається з фазового дискримінатора 1, фільтра, що згладжує 2, підсилювача-перетворювача 3, керованого генератора 4 (фіг. 3) уведений диференціальний зв'язок, що складається з динамічних ланок 5, 6, 7, 8 і 9 з передатними функціями  $K_3(p)$ ,  $K_1(p)$ ,  $K_7(p)$ ,  $K_8(p)$ ,  $K_9(p)$  відповідно і двох суматорів 10 і 11.

На фіг. 1 зображена структурна схема (математична модель) системи ФАПЧ без диференціального зв'язку ([1], рис. 2.7,6);

на фіг. 2 - структурна схема системи ФАПЧ із диференціальним зв'язком;

на фіг. 3 - функціональна схема системи ФАПЧ із диференціальним зв'язком.

На фіг. 1-3:

$$K_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} \text{ - передатна функція фазового}$$

дискримінатора (1) з фільтром (2) і відповідної математичної моделі (6),

$K_2(p) = k_2$  - передатна функція підсилювача-перетворювача (3),

$$K_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1} \text{ - передатна функція генерато-$$

ра (4) без інтегруючої ланки і моделі (5) диференціального зв'язку,

$$K_4(p) = \frac{k_4}{p} \text{ - передатна функція інтегруючої}$$

ланки генератора (4),

$$K_5(p) = \frac{k_5}{T_5 p + 1} \text{ - передатна функція каналу}$$

збурювання генератора (4),

$$K_7(p) = \frac{1}{T_7 p + 1}, K_8(p) = \frac{p}{T_8 p + 1} \text{ - передатні фу-}$$

нкції аперіодичної (7) і ланки, що диференціює (8), диференціального зв'язку.

Відповідно до запропонованої структурної схеми (фіг. 2) система ФАПЧ із диференціальним зв'язком описується наступним рівнянням для помилки:

$$\begin{aligned} \left[ 1 + K_1(p)K_2(p)K_3(p) \frac{1}{p} \right] \theta_D(p) = \\ = \left[ 1 - K_3(p)K_1(p) \frac{1}{T_7 p + 1} K_B(p)K_2(p) \right] \alpha_{\Delta\omega}(p) + \\ + \left[ 1 - K_3(p)K_1(p) \frac{1}{T_7 p + 1} K_B(p)K_2(p) \right] K_5(p) \frac{1}{p} \Delta L(p) \end{aligned}$$

Звідки зображення помилки

$$\theta_D(p) = \theta_{\alpha D}(p) + \theta_{LD}(p),$$

де

$$\theta_{\alpha D}(p) = \frac{1 - K_3(p)K_1(p) \frac{1}{T_7 p + 1} K_B(p)K_2(p)}{1 + K_1(p)K_2(p)K_3(p) \frac{1}{p}} \alpha_{\Delta\omega}(p), \quad (1)$$

$$\theta_{LD}(p) = \frac{\left[ 1 - K_3(p)K_1(p) \frac{1}{T_7 p + 1} K_B(p)K_2(p) \right] K_5(p) \frac{1}{p}}{1 + K_1(p)K_2(p)K_3(p) \frac{1}{p}} \Delta L(p) \quad (2)$$

- складові помилки, викликані задавальним впливом  $\alpha_{\Delta\omega}(t)$  й збурюючим впливом  $\Delta L(t)$  відповідно.

Згідно з (1) і (2) умови інваріантності (незалежності) помилки системи щодо впливів, що задає  $\alpha_{\Delta\omega}(t)$  й збурює  $\Delta L(t)$ , збігаються і визначаються виразом:

$$1 - K_3(p)K_1(p) \frac{1}{T_7 p + 1} K_B(p)K_2(p) = 0, \quad (3)$$

а характеристичне рівняння, що визначає корені замкнутої частини системи і її стійкість, має вигляд:

$$1 + K_1(p)K_2(p)K_3(p) \frac{1}{p} = 0. \quad (4)$$

З рівнянь (3) і (4) випливає, що передатна функція  $K_B(p)$ , за рахунок якої може бути досягнута інваріантність (3), не входить у характеристичне рівняння, тобто в запропонованій системі ФАПЧ відсутнє протиріччя між умовами підвищення точності і стійкості, і передатна функція  $K_B(p)$  коригувальної пристрою може вибиратися з умови інваріантності (підвищення точності), не впливаючи на стійкість замкнутої частини системи. З урахуванням структурної схеми ФАПЧ (фіг. 2) функціональна схема ФАПЧ із диференціальним зв'язком зображеним на фіг. 3.

Система ФАПЧ із диференціальним зв'язком працює в такий спосіб.

На керований генератор (4) подається напруга уставки  $U_{уст}$  (на фігурах не позначене), за допомогою якого в розімкненому стані системи встановлюється напруга  $U_1(t)$  генератора з частотою  $\omega_2$ , яка дорівнює номінальній чи середній частоті опорної напруги  $\omega_0$ . Завдяки цьому помилка системи  $\theta$  при частоті опорної напруги  $\omega_1 = \omega_0$  стає рівною нулю і помилка буде викликатися тільки різницею частоти  $\Delta \omega = \omega_1 - \omega_0$  опорної напруги щодо номінальної (середньої) частоти  $\omega_0$  і різницею частоти за рахунок впливу, що збурює,  $\Delta L(t)$ . У цьому випадку впливом, що задає, буде вже не  $\alpha(t)$ , фаза опорної напруги, частота якої  $\omega_1$ , а фаза  $\alpha \Delta \omega(t)$  напруги, частота якої дорівнює відхиленню  $\Delta \omega(t) = \omega_1(t) - \omega_0$ , частоти  $\omega_1(t)$  опорної напруги від свого номінального (середнього) значення  $\omega_0$ . Керованою величиною є керована зміна  $\beta_{\Delta \omega}(t)$  фази  $\beta(t)$  напруги  $U_2(t)$  генератора.

Якщо у випадку  $\omega_1 = \omega_0$  фаза  $\alpha_{\Delta \omega}(t)$  опорної напруги змінилася на постійну величину, то виникає помилка - різниця фаз  $\theta(t) = \alpha_{\Delta \omega}(t) - \beta_{\Delta \omega}(t)$ . При цьому на виході фільтра (2) з'являється напруга неузгодженості  $U_{\Phi Д}(t)$ , пропорційна в сталому режимі помилці  $\theta(t)$ :  $U_{\Phi Д}(t) = k_1 \theta(t)$ . Напруга  $U_{\Phi Д}(t)$  через підсилювач-перетворювач (3) у системі-прототипі надходить на керований генератор (4). Під впливом вихідної напруги  $U_y(t)$  підсилювача-перетворювача змінюється зміна  $\beta_{\Delta \omega}(t)$  фази  $\beta(t)$  вихідної напруги  $U_2(t)$  генератора (4) таким чином, що помилка зменшується. Зміна  $\beta_{\Delta \omega}(t)$  буде відбуватися доти, поки напруга  $U_y(t)$ , що надходить на генератор, не стане рівною нулю, що можливо при  $\alpha_{\Delta \omega}(t) = \beta_{\Delta \omega}(t)$  і  $\theta(t) = 0$ . Якщо ж частота  $\omega_1(t)$  опорної напруги буде відрізнятися від оптимального (середнього)  $\omega_0$  значення ( $\Delta \omega(t) = \omega_1(t) - \omega_0$ ), то  $\alpha_{\Delta \omega}(t)$  буде змінюватися відповідно до формули:

$$\alpha_{\Delta \omega}(t) = \int_0^t \Delta \omega(t) dt.$$

Для відповідної зміни  $\beta_{\Delta \omega}(t)$  на генератор (4) необхідно подавати відповідну напругу. У системі-прототипі ця напруга (напруга  $U_y(t)$ ) формується з напруги помилки  $\theta(t)$ , тобто в системі-прототипі при зміні  $\alpha_{\Delta \omega}(t)$  виникає помилка  $\theta(t)$  і  $\beta_{\Delta \omega}(t) \neq \alpha_{\Delta \omega}(t)$ .

Наприклад, якщо  $\Delta \omega(t) = \omega_1(t) - \omega_0 = \text{const}$ , то фаза  $\alpha_{\Delta \omega}(t)$  буде змінюватися з постійною швидкістю  $\alpha_{\Delta \omega}(t) = \Delta \omega t$ , яка дорівнює  $d\alpha_{\Delta \omega}(t)/dt = \Delta \omega$ . Необхідно змінювати фазу  $\beta_{\Delta \omega}(t)$  з такою ж швидкістю. У системі-прототипі це досягається за рахунок подачі постійної напруги  $U_y$  на вхід генератора (передатна функція якого містить інтегруючу ланку), яка формується з напруги помилки  $U_{\Phi Д}(t)$ , тобто в системі-прототипі при виникненні постійного відхилення частоти  $\Delta \omega(t)$  опорної напруги виникає постійна помилка  $\theta(t)$ .

У системі ФАПЧ із диференціальним зв'язком напруга  $U_{\Phi Д}(t)$  на виході суматора (10) у сталому режимі дорівнює:

$$U_{\Phi Д}(t) = k_1 \frac{d\theta(t)}{dt} + k_1 \frac{d\beta_{\Delta \omega}(t)}{dt} = k_1 \frac{d\alpha_{\Delta \omega}(t)}{dt},$$

тобто напруга  $U_{\Phi Д}(t)$  при  $\Delta \omega = \text{const}$  дорівнює постійному значенню, пропорційному

$$\Delta \omega = \frac{d\alpha_{\Delta \omega}(t)}{dt}. \text{ Напруга } U_{\Phi Д}(t) \text{ через коригувальну}$$

ланку (9) (у розглянутому випадку пропорційна ланка з передатною функцією  $K_B(p) = k_B$ ) подається у вигляді  $U_B(t)$  напруги на суматор (11), де складається з напругою  $U_{\Phi Д}(t)$  помилки  $U_{\Sigma}(t) = U_{\Phi Д}(t) + U_B(t)$ .

Тому що напруга керування дорівнює:

$$U_y(t) = k_2 U_{\Sigma}(t) = k_2 (U_{\Phi Д}(t) + U_B(t)),$$

тобто формується із суми напруги помилки  $U_{\Phi Д}(t)$  і напруги  $U_B(t)$  диференціального зв'язку, то необхідна швидкість зміни  $\beta_{\Delta \omega}(t)$  може бути досягнута (при відповідному коефіцієнті  $k_B$  коригувальної ланки) тільки за рахунок вихідної напруги  $U_B(t)$  диференціального зв'язку. Помилка системи  $\theta(t)$  в сталому режимі (швидкісна помилка) при цьому стає рівною нулю.

У системі-прототипі при зміні фази  $\alpha_{\Delta \omega}(t)$  по квадратичному чи більш складному законі (при зміні  $\Delta \omega(t)$ ) виникає зростаюча помилка  $\theta(t)$ , завдяки нелінійності статичної характеристики фазового дискримінатора зривів синхронної роботи. У системі з диференціальним зв'язком, вибираючи відповідним чином (синтезуючи) передатну функцію  $K_B(p)$  коригувального пристрою (9), можна підвищити динамічну точність (за рахунок підвищення порядку астатизму системи) і показники якості перехідних процесів (наприклад, завдяки мінімізації квадратичної інтегральної оцінки, компенсації повільно загасаючих компонентів [2] і ін.) не тільки при  $\Delta \omega(t) = \text{const}$  і  $\alpha_{\Delta \omega}(t) = \Delta \omega(t)$ , але і при зміні  $\Delta \omega(t)$  і  $\alpha_{\Delta \omega}(t)$  по більш складних законах.

У системі ФАПЧ помилка по частоті  $\Delta \omega_C(t) = \omega_1(t) - \omega_2(t)$ , де  $\Delta \omega_C(t) = d\theta(t)/dt$ . Тому в системі-прототипі виникає помилка по частоті при  $\Delta \omega(t) \neq \text{const}$ , у системі ж з диференціальним зв'язком помилка по частоті  $\Delta \omega_C(t)$  може бути зведена до нуля (як і помилка по фазі  $\theta(t)$ ) при зміні  $\Delta \omega(t)$ .

У системі ФАПЧ із диференціальним зв'язком, як випливає з (2), помилки по фазі і частоті можуть усуватися також при зміні впливу, що  $\Delta L(t)$  збурює, (напруги живлення генератора).

Технічним результатом, який досягається при застосуванні заявленої системи, є підвищення показників якості перехідних процесів і забезпечення нульової помилки спостереження не тільки за фазою, як у прототипі, але і за частотою, тобто швидкістю зміни фази, а також забезпечення нульової помилки при дії впливу, що збурює, тобто забезпечення інваріантності помилки системи до вхідного сигналу, швидкості його зміни (фази і частоти опорного генератора) і до впливу, що збурює

