УДК 621.396

В.В. Жебка

Державний університет телекомунікацій, Київ

ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ФАЗОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

Розглянуто системи фазової синхронізації. Розв'язано задачу синтезу оптимальної за швидкодією комбінованої системи фазової синхронізації, яка полягає у синтезі такого пристрою управління, який забезпечував би переведення вектора стану керованої величини із початкової у кінцеву точку за мінімальний час.

Ключові слова: *системи фазової синхронізації, пристрій управління, формувач імпульсів, перехідний режим.*

Вступ

Для систем фазової синхронізації (СФС), які дуже поширені в техніці зв'язку, характерним є постійне вдосконалення та розвиток. Від показників якості СФС багато в чому залежить ефективність системи зв'язку, точність інформації, яка передається від джерела до отримувача.

Основними показниками СФС є точність в режимах, що встановилися та швидкодія. Найбільш ефективне розв'язання задачі підвищення точності досягається в комбінованих системах, в яких, в результаті поєднання принципів управління по відхиленню та по збуренню (задаючому впливу), усувається протиріччя між умовами зменшення вимушеної та перехідної складової помилки.

Метою статті є пошук шляхів розв'язання задачі синтезу оптимальної по швидкодії комбінованої СФС, у результаті чого можна говорити про підвищення швидкодії вказаних систем.

Основна частина

Оптимальні по швидкодії комбіновані системи фазової синхронізації відрізняються від традиційних оптимальних систем тим, що пристрій управління (УУ) із замкненого контуру винесено в розімкнений зв'язок по задаючому впливу (фазі вхідного сигналу СФС) [1]. Оптимальні по швидкодії комбіновані СФС відносяться до класу систем зі змінною структурою, які реалізують подвійне управління. Проте на відміну від відомих систем з подвійним управлінням, в яких перехідний процес закінчується не в оптимальному режимі, в запропонованих системах оптимальне управління відбувається протягом всього перехідного процесу. Так як розімкнений зв'язок з УУ не впливає на стійкість замкненої системи та на її точність в режимах, що встановилися, то стає можливим синтезувати пристрій управління лише у відповідності з умовами оптимальності, не враховуючи умову стійкості замкненої системи і вимог до її точності в режимах, що встановилися. Це забезпечує управління в комбінованих СФС в перехідних режимах із меншими відхиленнями від оптимального в порівнянні із замкненими системами. Що ж стосується замкненого контуру комбінованої системи, то він синтезується відповідно до умов стійкості і вимогами точності в установлених режимах без відповідного врахування умов оптимальності за швидкодією, що дає можливість досягнення високої динамічної точності. Крім того, для зменшення динамічних помилок системи в режимах, що встановилися, можна вводити додатковий зв'язок по заданому впливі.

Таким чином, в оптимальних за швидкодією комбінованих СФС відсутнє протиріччя між умовою за швидкодією і умовами стійкості і точності в установлених режимах.

Наголосимо на тому, що в оптимальних за швидкодією комбінованих СФС пристрій управління (УУ) включено в розімкнений зв'язок по заданому впливу.

Нашою метою є синтез такого УУ, який забезпечував би переведення вектора стану керованої величини (фази вхідного сигналу керованого генератора) із початкової точки $\bar{\ } = \bar{\ }_0$ в кінцеву $\bar{\ }_k = \tilde{\ }$ за мінімальний час. А це є задача синтезу оптимальної за швидкодією комбінованої СФС.

При оптимальному за швидкодією управлінні вхідний сигнал (фаза) змінюється за законом ступінчатої функції

$$\sim(t) = Q_0(t)\,. \tag{1}$$

Сигнал управління, який генерується УУ, у відповідності з принципом Понтрягіна Л.С. [2] повинен представляти собою постійний за величиною сигнал, полярність якого змінюється в

певні моменти часу (моменти переключення $t_1, t_2, ..., t_n$).

Уточнимо структуру оптимальної по швидкодії комбінованої СФС, в якій би виконувалася вимога постійності величини (амплітуди) результуючого сигналу управління, незалежно від абсолютного значення заданого впливу. Рівняння елементів оптимальної за швидкодією комбінованої СФС визначається наступним чином

$$\left.\begin{aligned} &\Delta\ddot{\ }(t) = \sim(t) - \ \ (t);\\ &\ \ (t) = K_Г(p)K_И(p)\sum(t);\\ &\sum(t) = U(t) + K_Ф(p)\Delta\ddot{\ }(t);\\ &U(t) = f\left[\sim(t)\right], \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

де $\Delta\ddot{\ }(t)$ – різниця фаз; $\sim(t)$ – задаючий вплив; $\ (t)$ – управляюча величина; $K_Г(p)$, $K_И(p)$, $K_Ф(p)$ – оператори генератора, еквівалентного інтегратора та фільтра відповідно; $U(t)$ – функція управління; $f\left[\sim(t)\right]$ – нелінійний оператор УУ; $p \equiv \frac{d}{dt}$.

Із рівняння елементів (2) отримуємо рівняння динаміки СФС відносно керованої величини

$$\begin{aligned} &\left[1 + K_Ф(p)K_Г(p)K_И(p)\right]\ \ (t) =\\ &= K_Г(p)K_И(p)\left[K_Ф(p)\sim(t) + U(t)\right] \end{aligned} \quad (3)$$

Із рівняння (3) випливає, що еквівалентний керуючий вплив має вигляд

$$U_E(t) = K_Ф(p)\sim(t) + U(t), \quad (4)$$

та змінюється зі зміною впливу $\sim(t)$ і не відповідає вимозі постійності амплітуди у відповідності з вимогою максимуму Понтрягіна.

Оптимальне за швидкодією управління може бути досягнуто при виконанні умов

$$K_Ф(p)\sim(t) + U(t) = U_m(t), \quad (5)$$

де $U_m(t)$ – максимально можлива постійна по величині знакозмінна результуюча управляюча взаємодія. Із виразу (5) маємо

$$U(t) = U_m(t) - K_Ф(p)\sim(t). \quad (6)$$

Структурна схема СФС, в якій виконується умова оптимальності (6) зображена на рис. 1. Для формування імпульсів з амплітудою *Um* служить формувач імпульсів ФИ. За допомогою додаткового зв'язку по заданому впливу, який містить модель ланки з оператором $K_Ф(p)$ і логічний комутуючий пристрій (ЛКУ) $Ф(U_m, Z)$, під час перехідного процесу [при $U_m(t) \neq 0$] створюється компенсуючий сигнал $Z(t) = K_Ф(p)\sim(t)$. По закінченню перехідного процесу [$U_m(t) = 0$] ЛКУ розриває ланцюг компенсації і починає функціонувати замкнений контур управління без впливу на нього сигналу управління $U(t)$.

Рівняння елементів системи рис.1 визначається виразами

$$\left.\begin{aligned} &\Delta\ddot{\ }(t) = \sim(t) - \ \ (t);\\ &\ \ (t) = K_Г(p)K_И(p)\sum(t);\\ &\sum(t) = K_Ф(p)\Delta\ddot{\ }(t) - Ф(U_m, Z) + U_m(t);\\ &Ф(U_m, Z) = \begin{cases} Z(t),\ U_m(t) \neq 0,\ t < t_p\\ 0,\ U_m(t) = 0,\ t < t_p \end{cases}\\ &Z(t) = K_Ф(p)\sim(t) \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Із рівняння (7) отримуємо рівняння динаміки СФС при $U_m(t) \neq 0$, тобто в режимі перехідного процесу

$$\begin{aligned} &\left[1 + K_Ф(p)K_Г(p)K_И(p)\right]\ \ (t) =\\ &= K_Г(p)K_И(p)U_m(t) \end{aligned}. \quad (8)$$

При закінченні перехідного процесу $U_m(t) = 0$ в установленому динамічному режимі СФС у відповідності з виразом (7) описується рівнянням

$$\begin{aligned} &\left[1 + K_Ф(p)K_Г(p)K_И(p)\right]\ \ (t) =\\ &= K_Ф(p)K_Г(p)K_И(p)\sim(t) \end{aligned}, \quad (9)$$

тобто в установленому динамічному режимі УУ відключається і система працює як звичайна СФС з принципом управління по відхиленню.

У частковому випадку, коли сигнали управління та помилки додаються на вході фільтру замкненого контуру СФС, рівняння (3) системи рис. 1 приймає вигляд

$$\begin{aligned} &\left[1 + K_Ф(p)K_Г(p)K_И(p)\right]\ \ (t) =\\ &= K_Ф(p)K_Г(p)K_И(p)[\sim(t) + U(t)] \end{aligned}. \quad (10)$$

Умовою оптимальності по швидкодії в цьому випадку є вираз $\sim(t) + U(t) = U_m(t)$. Звідки

$$U(t) = U_m(t) - \sim(t). \quad (11)$$

Структурна схема СФС, в якій виконується умова оптимальності (11) зображена на рис. 2. Для формування імпульсів з амплітудою *Um* служить формувач імпульсів ФИ, а для корекції значень сигналу *U(t)* в залежності від величини $\sim(t)$ використовується ЛКУ, який описується функцією

$$Ф(U_m, \sim) = \begin{cases} \sim(t),\ U_m(t) \neq 0,\ t < t_p\\ 0,\ U_m(t) = 0,\ t < t_p \end{cases}. \quad (12)$$

Рівняння динаміки СФС (рис. 2) в режимі перехідного процесу [$U_m(t) \neq 0$] визначається виразом

$$\begin{aligned} &\left[1 + K_Ф(p)K_Г(p)K_И(p)\right]\ \ (t) =\\ &= K_Ф(p)K_Г(p)K_И(p)U_m(t) \end{aligned}. \quad (13)$$

А рівняння СФС в установленому режимі визначається виразом (9).

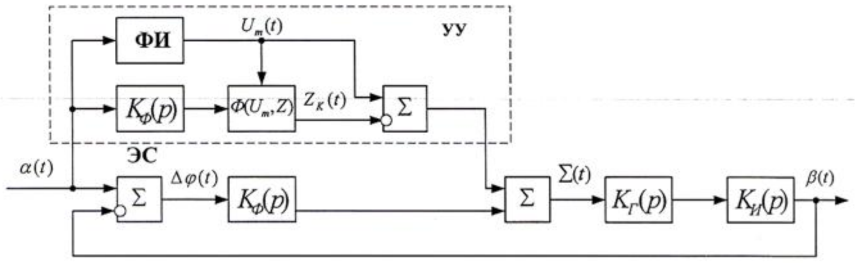

Рис. 1. Структурна схема оптимальних по швидкодії комбінованих систем

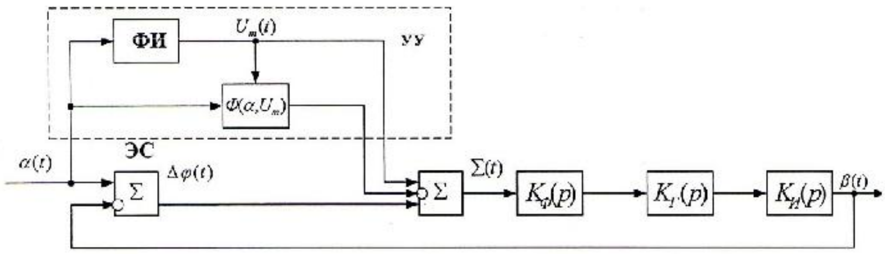

Рис. 2. Структурна схема СФС при сумуванні сигналу управління на вході фільтру

Для реалізації УУ необхідно знати значення вироблявочого управляючого впливу $U_m(t)$ і моменти його переключення $t_1, t_2, ..., t_n$. Визначення значення $U_m(t)$ звичайно обумовлене гранично допустимими експлуатаційно-технічними вимогами до функціонування необхідних елементів СФС, а для визначення моментів переключення $t_j \left(j = \overline{1, n} \right)$ сигналу управління використовується метод стикування розв'язків диференціальних рівнянь зі знакозмінною правою частиною [3]. Після стикування залишається система з трансцендентних рівнянь $t_1, t_2, ..., t_n$. Отримана система є функцією оптимального управління, яка в загальному вигляді визначається виразом

$$T = f\left(ª_1, ª_2, ..., ª_n, \overline{\ \ }_0, \ _n, U_m \right), \tag{14}$$

де $ª_1, ª_2, ..., ª_n$ – корені характеристичного рівняння замкнутого контуру СФС.

Для систем СФС другого порядку система трансцендентних рівнянь має наступний вигляд [4]:

$$\left.\begin{aligned} &\left(1 + \frac{2}{K_p U_m}\right) e^{ª_1 t_2} - 2e^{ª_1 t_1} + 1 = 0; \\ &\left(1 + \frac{2}{K_p U_m}\right) e^{ª_2 t_2} - 2e^{ª_2 t_1} + 1 = 0. \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

де K_p – передаюча функція системи в розімкненому стані.

Розв'язання системи трансцендентних рівнянь (15) звичайно виконується графічним способом або за допомогою комп'ютерних програм [5]. Формувач імпульсів, функціональна схема якого зображена на рис. 3, містить 4 перетворювача амплітуди задаючого впливу $\sim(t)$ в тривалості імпульсів (П1,…,П4). Перетворювач П4 реагує на позитивний стрибок задаючого впливу $\sim(t)$ і генерує імпульс $U_1(t)$ додатної полярності тривалістю $² = t_1$, яка залежить від амплітуди $\sim(t)$. Формувач П2 запускає заднім фронтом імпульсу перетворювача П1 і генерує імпульс $U_2(t)$ від'ємної полярності тривалістю $² = t_2 - t_1$, яка залежить також від амплітуди $\sim(t)$. Перетворювач П3 і П4 працюють при від'ємному стрибку задаючого впливу.

Вихідні напруги всіх перетворювачів додаються в суматорі С. При цьому

$$U(t) = \begin{cases} U(t) = U_1(t) + U_2(t), \ \sim(t) > 0 \\ U(t) = U_3(t) + U_4(t), \ \sim(t) < 0 \end{cases}. \tag{16}$$

У результаті отримаємо управляючий вплив необхідної форми, який забезпечує за мінімальний час переведення вектору стану керованої величини (фази вхідного сигналу керованого генератора) із початкової точки в кінцеву.

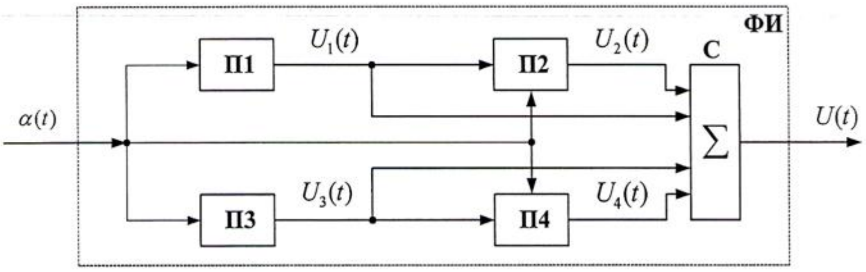

Рис. 3. Функціональна схема формувача імпульсів

Висновки

В оптимальних за швидкодією комбінованих системах СФС зникає протиріччя між умовами стійкості та оптимальності за рахунок розташування УУ в розімкненому каналі управління по задаючому впливу $\sim(t)$. Проте в цьому випадку виникає задача врахування задаючого впливу $\sim(t)$ на моменти переключення сигналу управління $U(t)$, який виробляється УУ, а також різних дестабілізуючих факторів, які впливають на об'єкт. Для виключення цього впливу необхідно будувати СФС змінної структури, коли замкнений контур СФС «розмикається», а сигнал $U(t)$ забезпечує оптимальний за швидкодією перехідний процес об'єкта. При «розімкненні» контуру збільшується вплив еквівалентного збурення на точність СФС.

Список літератури

1. *Беркман Л.Н.Системы фазовой синхронизации / Л.Н. Беркман, В.П. Охрущак, А.А. Руденко, И.А. Тарасенко / К: КИС УГАС им. А.С. Попова, учебное пособие, 1996. – 74 с.*
2. *Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ // ч. 1. – М.: Наука, 1992. – 336 с.*
3. *Жодзишский М.И. Расчетные модели цифровых систем ФАП / М.И. Жодзишский, В.А. Прасолов, С.Ю. Сила-Новицкий / Радиотехника, 1976, т. 19, № 3. – с. 43-49.*
4. *Мартынов Е.М. Синхронизация в системах передачи дискретных сообщений // М.: Связь, 1972. – 216 с.*
5. *Стеклов В.К. Комбинированые системы фазовой автоподстройки / В.К. Стеклов, А.А. Руденко, А.К. Юдин. – К.: Техника, 2004. – 328 с.*

Надійшла до редколегії 30.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

В.В. Жебка

Рассмотрены системы фазовой синхронизации. Решена задача синтеза оптимальной по быстродействию комбинированной системы фазовой синхронизации, которая заключается в синтезе такого устройства управления, который обеспечивал бы перевод вектора состояния управляемой величины с начальной в конечную точку за минимальное время.

Ключевые слова: *системы фазовой синхронизации, устройство управления, формирователь импульсов, переходный режим.*

IMPROVE THE HIGH-SPEED PERFORMANCE OF THE COMBINED SYSTEMS PHASE SYNCHRONIZATION IN TRANSIENT REGIMES

V.V. Zhebka

Systems of phase synchronization are considered. The problem of synthesis optimum on high-speed performance of the combined system of phase synchronization which consists in synthesis of such control unit which would provide the translation of a vector of a condition of the operated size with initial in a final point for the minimum time is solved.

Keywords: *systems of phase synchronization, control unit, shaper of impulses, transitional mode.*