

УДК 621.396: 681.3

В.В. Печенин<sup>1</sup>, К.А. Щербина<sup>1</sup>, О.В. Войтенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

<sup>2</sup> *Житомирский военный институт НАУ, Житомир*

## **АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СЛЕДЯЩЕГО ФИЛЬТРА С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА**

*Приведена структурная динамическая модель следящего фильтра с принудительной перестройкой синхронизированного автогенератора, учитывающая особенности управляющих воздействий и их отклонений на соответствующие входы управляемого генератора. Получены конкретные аналитические соотношения, пригодные для анализа динамической точности и быстродействия. Показано, что СФ с принудительным управлением синхронизированного автогенератора устраняет фазовые ошибки при скачкообразном изменении фазы входного сигнала и удерживает равенство частот входного сигнала и синхронизированного генератора при линейном законе изменения фазы входного сигнала.*

**Ключевые слова:** *синтез, фильтр, частота, автогенератор, синхронизация, регулирование, точность, быстродействие, контур.*

### **Введение**

В традиционных следящих фильтрах доплеровской частоты, построенных на основе фазовой, ча-

стотной и частотно-фазовой автоподстройки частоты управляемого генератора (УГ) – ФАП, ЧАП и ЧФАП условия повышения динамической точности, устойчивости и быстродействия носят противоречивый

характер [1 – 3]. Существующим оптимальным по быстродействию следящим фильтром (СФ) с управляющим устройством в замкнутом контуре противоречия между условиями достижения оптимальности, устойчивости и повышения динамической точности, обусловлены: естественными нелинейностями элементов в цепи управления, такими как дискриминатор, фильтр нижних частот и элементами управления (УГ + УЭ, УЭ – управляющий элемент). Они повышают вероятность срыва слежения.

В [4] рассмотрен класс оптимальных по быстродействию и точности следящих систем автоматического управления, называемых комбинированными радиотехническими системами автоматического управления (РСАУ), в которых компенсационный канал управления генератором вынесен за пределы замкнутого контура управления. Однако, это в общем случае приводит к усложнению РСАУ по сравнению с традиционными следящими системами.

В [5] предложен класс СФ с принудительной перестройкой УГ, который в свою очередь синхронизирован внешним входным сигналом. Схемные решения такой следящей системы (следящего филь-

тра) оказывается существенно проще. Однако отсутствует анализ динамических свойств данного класса следящих систем.

**Цель выполненных исследований.** Состояла в теоретической оценке динамических ошибок по измерениям задающего и возмущающего воздействий на СФ с принудительной перестройкой автогенератора с внешней синхронизацией, в дальнейшем просто синхронизированного генератора (СГ).

**Изложение основного материала**

Ошибки в СФ вызываются, во-первых, отклонениями, или изменениями параметров входного управляющего воздействия, являющегося полезным (например частоты и фазы), или их изменениями по какому-либо временному закону, во-вторых, отклонениями параметров элементов самого СФ от номинальных значений под действием изменения условий функционирования (температуры, влажности, давления и т.д.).

Для достижения поставленной в работе цели исследований необходимо воспользоваться функциональной схемой СФ, приведенной в [5] (рис. 1).

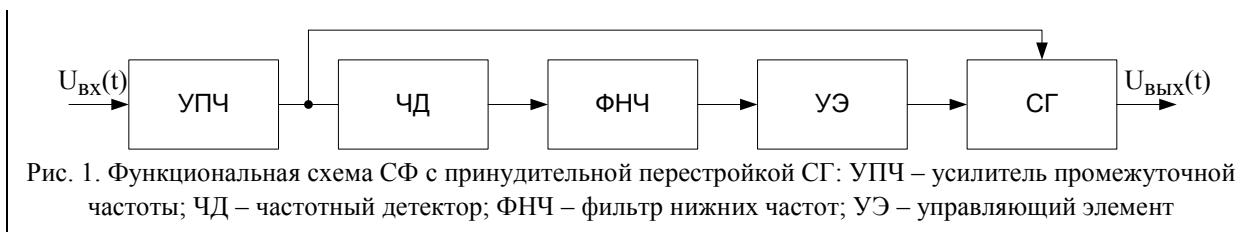


Рис. 1. Функциональная схема СФ с принудительной перестройкой СГ: УПЧ – усилитель промежуточной частоты; ЧД – частотный детектор; ФНЧ – фильтр нижних частот; УЭ – управляющий элемент

Из рис. 1 следует, что канал принудительной перестройки включает в себя элементы ФД, ФНЧ и УЭ, а синхронизация СГ осуществляется высокочастотным сигналом с выхода УПЧ ( $U_{упч} = kU_{вх}(t)$ ,  $k$  – коэффициент усиления).

Известно, что синхронизированный генератор в режиме «захвата» частоты входного сигнала, эквивалентен системе ФАП, в которой элементы петли обратной связи реально отсутствуют. Однако при составлении структурной схемы СФ (как системы ФАП) допустима их замена «виртуальными», с постоянными но неизвестными операторами  $W_1(p)$ ,  $p \cong \frac{d}{dt}$  – оператор Лапласа. Тогда структурную схему СФ с принудительной перестройкой можно представить в виде изображения на рис. 2. Функциональной схеме СФ, приведенной на рис. 1, соответствует структурная схема фильтра, приведенная на рис. 2. На схеме рис. 2 фазовый детектор (ФД) представлен виртуальным элементом сравнения ЭС, выполняющим функцию вычитания  $\theta(t) = \alpha(t) - \beta(t)$ , где  $\alpha(t)$  – фаза входного гармонического сигнала  $\omega_c$ ,  $\beta(t)$  – фаза выходного гармонического сигнала  $\omega_0$ .

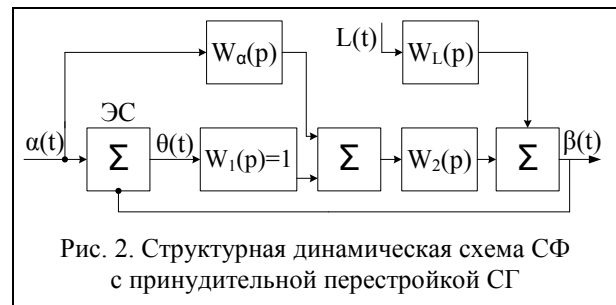


Рис. 2. Структурная динамическая схема СФ с принудительной перестройкой СГ

$$\alpha(t) = \int_0^t \omega_c(t)dt, \beta(t) = \int_0^t \omega_0(t)dt. \quad (1)$$

Интегратор в контуре обратной связи представлен в виде «виртуального» ФНЧ с передаточной функцией  $W_1(p) = 1$ , что соответствует отсутствию ФНЧ в реальной схеме ФАП;  $W_2(p)$  – передаточная функция СГ, включающая в себя ФНЧ (рис. 1) и УЭ;  $W_\alpha(p)$  – передаточная функция ЧД;  $W_L(p)$  – передаточная функция канала возмущения  $L(t)$ .

Уравнение для динамической ошибки  $\theta(t)$  системы рис. 2, к которой приложены задающее  $\alpha(t)$  и возмущающее  $L(t)$ , можно представить в виде [4]:

$$F(p)\theta(t) = M(p)\alpha(t) + B(p)L(t), \quad (2)$$

где  $F(p), M(p), B(p)$  – соответствующие операторные полиномы.

Переходная составляющая ошибки (решение однородного уравнения  $F(p) \cdot \theta(t) = 0$ ) зависит от параметров схемы и начальных условий, которые, в свою очередь, зависят от характера изменения воздействий  $\alpha(t)$  и  $L(t)$ . Вынужденная составляющая ошибки  $\theta_B(t)$  состоит из двух компонентов ( $\theta_B(t) = \theta_{B\alpha} + L(t) + \theta_{BL}(t)$ ), которые определяются как частные решения уравнений

$$F(p)\theta_{B\alpha}(t) = M(p)\alpha(t); \quad F(p)\theta_{BL}(t) = B(p)L(t).$$

Вынужденные составляющие ошибки соответствуют ошибкам СФ в установившемся режиме.

Если к СФ приложены задающее и возмущающее воздействие, то полную динамическую ошибку можно представить в виде суммы двух составляющих, вызываемых изменением задающего и возмущающего воздействий.

$$\theta(t) = [M(p)/F(p)]\alpha(t) + [B(p)/F(p)]L(t) = \theta_\alpha(t) + \theta_L(t). \quad (3)$$

Наиболее полное решение задачи повышения точности, быстродействия и устойчивости системы автоматического управления дает направление, основанное на теории инвариантности [6], определяющей пути достижения независимости управляемой выходной величины от возмущающих воздействий и условия точного воспроизведения на выходе системы величины, соответствующей заданному воздействию.

Уравнение динамики схемы СФ, представленной на рис. 2, можно записать в виде

$$[1 + W_2(p)]\theta(t) = W_\alpha(p) \cdot W_2(p)\alpha(t) + W_L(p)L(t). \quad (4)$$

Для обеспечения абсолютной инвариантности при воспроизведении задающего воздействия необходимо, чтобы  $W_\alpha(p) = 1/W_2(p)$ . На практике такая операторная связь недостижима, однако можно реализовать оператор  $W_\alpha^*(p)$ , достаточно близкий к оператору  $W_\alpha(p)$ . Методика синтеза такого оператора, обеспечивающего инвариантность, близкую к абсолютной, изложена в [7].

При этом возникает задача синтеза разомкнутого канала управления с ограниченным порядком астатизма.

Обычная система ФАП с принципом управления по отклонению является астатической с астатизмом первого порядка относительно задающего воздействия – фазы  $\alpha(t)$  напряжения  $U_{BX}(t)$ .

В ней возникает в установившемся режиме скоростная ошибка  $\theta_{уст}(t)$ .

Устранить скоростную составляющую ошибки можно, повысив порядок астатизма, что и составля-

ет суть задачи синтеза разомкнутого канала управления. Порядок астатизма можно повысить на  $v$  единиц при помощи физически реализуемой связи по задающему воздействию, если разомкнутый канал связи  $W_\alpha(p)$  представить в виде параллельно соединенных звеньев, реализующих производные не выше  $v+1$  порядка (на практике  $v=2$ ), каждое из которых описывает соответствующие слагаемые разложения оператора  $W_\alpha(p)$  на простейшие дроби.

Из анализа структурной схемы СФ, представленной на рис. 2, следует, что по сравнению с обычной системой ФАП она имеет второй порядок астатизма за счет введения канала прямого управления (оператор  $W_\alpha(p)$ ). В данном случае мы можем уменьшить составляющую ошибки  $\theta_{уст}(t)$  путем установки параметров  $W_\alpha(p)$  и  $W_2(p)$  так, чтобы при изменении частоты входного воздействия разность  $(\omega_c - \omega_0) \rightarrow \min$ , а  $K_p = \frac{U_{OC}}{U_{BX}} \rightarrow \max$ .

Убедимся в этом, проанализировав структурную схему СФ (рис. 2), где передаточные функции:  $W_\Phi(p) = K_1/(T_1p+1)$  – фазового детектора;  $W_2(p) = K_2/(T_2p+1)$  – синхронизированного генератора;  $W_\alpha(p) = K_\alpha p/(T_\alpha p+1)$  – частотного дискриминатора;  $k_1, k_2, k_\alpha$  – коэффициенты передачи соответствующих операторов (динамических звеньев);  $T_1, T_2, T_\alpha$  – постоянные времени.

Согласно структурной схеме  $\theta(t) = \alpha(t) - \beta(t)$ ;  
 $\beta(t) = W_\Phi(p)W_2(p)\theta(t) + W_\alpha(p)W_2(p)\alpha(t)$ .

Исключив из полученных уравнений (системы уравнений) переменную  $\beta(t)$ , получим уравнение динамической ошибки  $\theta(t)$ , откуда находим передаточную функцию  $W_\theta(t)$  по ошибке

$$W_\theta(p) = \frac{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2}{b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_4 + b_4}, \quad (5)$$

где  $a_0 = T_\Phi T_2 T_\alpha$ ;

$$a_1 = (T_\alpha + T_2)T_\Phi + T_2 T_\alpha;$$

$$a_2 = T_2 + T_\alpha + (1 - K_1 K_2)T_\Phi;$$

$$b_0 = T_2 T_\Phi; \quad b_1 = (T_\Phi + T_2)T_\alpha;$$

$$b_2 = T_\Phi + T_2 + T_\alpha;$$

$$b_3 = 1 + K_\Phi K_2 K_\alpha T_\alpha;$$

$$b_4 = K_\Phi K_2 K_\alpha.$$

Условие повышения порядка астатизма

$$a_3 = 1 - K_\Phi K_2 K_\alpha = 0$$

выполняется при коэффициенте связи по задающему воздействию

$$K_\alpha = 1/K_2 K_\Phi. \quad (6)$$

В системі СФ з принудительним управлінням СГ устараються помилки  $\theta(t)_{уст}$  при ступенчатом  $\alpha(t) = \alpha_0$  і лінійном ( $\alpha(t) = \alpha_1 t$ ) зміннях фази входного напруги. При лінійном законі змінення частоти  $\omega_c(t)$ , що відповідає квадратичному закону змінення фази  $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2$ ,  $\alpha(p) = \alpha_0/p + \alpha_1/p^2 + 2\alpha_2/p^3$  в устарається режимі виникає помилка по фазі

$$\theta_{уст}(t) = 2(T_2 + T_\alpha) \cdot \alpha_2 / k_1 k_2 k_3. \quad (7)$$

В цьому випадку ще забезпечується рівність частот  $\omega_c(t)$  і  $\omega_0(t)$ .

Тільки при квадратичному законі змінення частоти  $\omega_c(t) = \omega t^2$  помилка  $\theta(t)$  зростає з часом, що призводить до срыву слідування по фазі і частоті. Однак, в доплерівських системах такої крайньої ситуації змінення частоти реально не спостерігається.

Основна складова динамічної помилки  $\theta_{уст}(t)$  в таких системах визначається величиною відхилення частоти сигналу  $\Delta\omega_c(t)$ , а внесок складових від похідних цього відхилення неперервно зменшується [8].

## Висновки

1. На основі функціональної схеми СФ з принудительної перестройкою синхронізованого генератора складена його структурна динамічна модель, що враховує особливості представлення СГ, через віртуальні елементи фазового детектора і інтегратора, які відсутні в реальному схемі.

2. Отримані конкретні аналітичні вирази, придатні для аналізу динамічної точності і швидкодії СФ з принудительної перестройкою синхронізованого генератора.

3. В СФ з принудительним управлінням СГ устараються помилки фазових відхилень входного сигналу, обумовлені скачкообразним і лінійним законом змінення фази входного сигналу.

4. Отримано аналітичне вираження для устарається значення фазової помилки при лінійному зміненні частоти входного сигналу  $\omega_c(t)$ . При цьому схема СФ забезпечує рівність частот  $\omega_c(t)$  і  $\omega_0(t)$ .

## Список літератури

1. Фомин А.Ф. Аналоговые и цифровые синхронно-фазовые измерители и демодуляторы [Текст] / А.Ф. Фомин, А.И. Шелухин. – М.: Радио и связь, 1987. – 248 с.
2. Фомин А.Ф. Оптимальная и квазиоптимальная фильтрация негауссовского сигнала в негауссовской помехе [Текст] / А.Ф. Фомин, О.И. Новоселов // Тез. докл. 6-го международного симпозиума по теории информации. – М.: Ташкент, 1984. – №4.1. – С. 187-189.
3. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех [Текст] / Я.Д. Ширман. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
4. Зайцев Г.Ф. Радиотехнические системы автоматического управления высокой точности [Текст] / Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов. – К.: Техника, 1988. – 208 с.
5. Печенин В.В. Согласованная фильтрация сигнала в приемном канале фазометрической РТС [Текст] / В.В. Печенин, А.Р. Сарамолки // Проблемы информации та управління: збірник наукових праць. – 2010. – №1 (29). – С. 136-141.
6. Кривицкий Б.Х. Автоматические системы радиотехнических устройств [Текст] / Б.Х. Кривицкий. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 664 с.
7. Ивахненко А.Г. Самообучающиеся системы [Текст] / А.Г. Ивахненко. – К.: АН УССР, 1963. – 328 с.
8. Тузов Г.И. Выделение и обработка информации в доплеровских системах [Текст] / Г.И. Тузов. – М.: Сов. радио, 1967. – 255 с.

Поступила в редколлегию 22.11.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.В. Барышев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## АНАЛІЗ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ТА ШВИДКОДІЇ СЛІДКУЮЧОГО ФІЛЬТРА З ПРИМУСОВОЮ ПЕРЕБУДОВОЮ СИНХРОНІЗОВАНОГО АВТОГЕНЕРАТОРА

В.В. Печенін, К.О. Щербина, О.В. Войтенко

Приведена структурна динамічна модель слідкуючого фільтра з примусовою перебудовою синхронізованого автогенератора, що враховує особливості управляючих впливів і їх відхилення на відповідні входи керуваного генератора. Отримані конкретні аналітичні співвідношення, придатні для аналізу динамічної точності та швидкодії. Показано, що СФ з примусовим управлінням синхронізованого автогенератора усуває фазові помилки при стандартній зміні фази входного сигналу і утримує рівність частот входного сигналу і синхронізованого генератора при лінійному законі зміни фази входного сигналу.

**Ключові слова:** синтез, фільтр, частота, автогенератор, синхронізація, регулювання, точність, швидкодія, контур.

## ANALYSIS OF DYNAMIC ACCURACY AND SPEED TRACKING FILTER WITH FORCED RESTRUCTURING SYNCHRONIZED AUTOGENERATOR

V.V. Pechenin, K.A. Shcherbina, O.V. Voitenko

Shows the structural dynamic model of a tracking filter with a forced restructuring of the synchronized oscillator, sensitive control actions and their deviations to the corresponding inputs controlled oscillator. Received specific analytical expressions are suitable for the analysis of dynamic accuracy and speed. It is shown that the SF with positive steering synchronized oscillator eliminates phase errors in the phase of the standard input and holds the equality of the input signal and synchronized generator with a linear law of change of phase input.

**Keywords:** synthesis, filter, frequency oscillator, synchronization, control, precision, speed, circuit.