

В.Л.Максаков, Л.В.Лебедева, И.О.Панченко,  
Л.А.Фрайман, Е.А.Штыкунова

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТОВ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ  
ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

(г. Горький)

Описываемый программный комплекс (АСНИ "Автоматизация") предназначен для решения на ЭВМ комплекса задач расчета динамических характеристик класса цифровых систем фазовой синхронизации (ПСФС) при проведении научных исследований и учебного процесса. Работа многих современных радиолиний различного назначения (телеметрических, связанных и т.д.) основана на применении систем фазовой синхронизации (СФС), которые формируют на приемном конце радиосвязи опорное колебание  $[I]$ . СФС проектируются, как правило, как замкнутые системы автоматического управления и так, чтобы минимизировать флюктуационные отклонения фазы вырабатываемого колебания.

В последние годы стали активно внедряться цифровые методы обработки сигналов и, как следствие, проектироваться цифровые СФС. В АСНИ "Автоматизация" реализован расчет динамических характеристик ЦФС, предназначенной для выделения гармонической несущей из спектра принимаемого сигнала. Кольцо ЦФС состоит из цифрового фазового детектора (ЦФД), цифрового фильтра (ЦФ) и цифрового подстраиваемого генератора (ЦПГ). ЦФД в моменты времени  $t_{i+1} = t_i + T$  ( $f$  - частота дискретизации) вырабатывает сигнал фазового рассогласования  $g(y_i) = \text{sign} \sin y_i$ , где  $y_i = \varphi_{0x}(t_i) - \varphi_{01x}(t_i)$  - фазовая ошибка в системе. Последовательность  $\{g(y_i), i = 1, 2, \dots\}$  обрабатывается в ЦФ по различным алгоритмам, определяющимся типом используемого фильтра. Как правило, ЦФ вырабатывает пропорциональную и интегрирующую составляющую закона регулирования. Используют два типа ЦФД  $[I]$ : с управлением по фазе и с управлением по частоте. В первом сигналы коррекции сдвигают фазу выходного сигнала на фиксированную величину, во втором - изменяют частоту выходного сигнала. ЦФС с первым типом ЦФД будем обозначать ЦФСФ, со вторым - ЦФСЧ.

Для решения вопроса о целесообразности применения конкретной

ЦСФС необходимо располагать сведениями об основных динамических характеристиках системы с целью выбора области значений параметров ЦСФС (области захвата), при которых обеспечиваются ограничения на точность работы системы и ее быстродействие. Исследование и расчет цифровых систем значительно затрудняется сложным характером стационарных режимов, характеризующихся так называемые "шумы квантования" цифровой системы. Такой расчет возможен на основе исследования строгой математической модели, позволяющей анализировать шумы квантования ЦСФС.

Математическая модель ЦСФС представляется в виде разрывного точечного отображения  $T$  фазового пространства  $G$  в себя с областью параметров  $D$ . Для ЦСФС тройка  $(T, G, D)$ ,  $K = I$  имеет вид [1-4]

$$T_1: \begin{cases} \bar{y} = y + \beta - \alpha r - \alpha_2 z_u, \\ \bar{z}_u = z + r, \quad r = r(y, z_1, \dots, z_m), \\ \bar{z}_j = f_j(z_1, \dots, z_m, y), \quad j = \overline{1, m}, \quad f_j(\cdot) \in Z, \end{cases} \quad (1)$$

$$G_1 = \{y \in S' = [-\pi, \pi); |z_j| < N_j, j = \overline{1, m}; z_u \in Z = \{0, \pm 1, \dots\}\},$$

$$D_1 = \{\beta > 0, \pi/2 > \alpha, \alpha_2 > 0; N_j = 1, 2, \dots\},$$

где  $z_u$  - код в реверсивном счетчике интегрирующей петли управления;  $z_j$  - код в  $j$ -м счетчике пропорциональной петли управления;

$r$  - сигнал коррекции, вырабатываемой пропорциональной петлей управления;  $\beta$  - сдвиг фазовой ошибки за время  $f^{-1}$  (за период дискретизации) за счет начального рассогласования между частотами входного и выходного сигналов;  $\alpha_2$  - сдвиг фазовой ошибки за время  $f^{-1}$  единицей кода в реверсивном счетчике интегрирующей петли;  $N_j$  - ограничения на значения кодов  $z_j$ ;  $x = x(t_i)$ ,  $\bar{x} = x(t_{i+1})$ ,  $x = (y, z)$ ,  $z = (z_u, z_1, \dots, z_m)$ .

Для ЦСФС! тройка  $(T_2, G_2, D_2)$  имеет вид

$$T_2: \begin{cases} \bar{y} = y + \beta - \alpha \left( z + g(y) + \left[ \frac{z_u + g(y)}{N_u} \right] \right), \\ \bar{z} = \sum_{\ell=1}^{N-1} g(y + \ell \frac{\bar{y} - y}{N}), \\ \bar{z}_u = z_u + \sum_{\ell=0}^{N-1} g(y + \ell \frac{\bar{y} - y}{N}), \end{cases} \quad (2)$$

$$G_2 = \{ \varphi \in S^1, z = -\overline{N}, N, z_u \in \mathbb{Z} \},$$

$$D_2 = \{ \beta \geq 0; \alpha > 0; N, N_u = 1, 2, \dots \},$$

где  $z(z_u)$  - код в реверсивном счетчике пропорциональной (интегрирующей) петли регулирования;  $x = x(t_n)$ ,  $\bar{x} = x(t_{n+1})$ ,  $x = (y, z, z_u)$ ,  $t_{n+1} = t_n + Nf^{-1}$ ;  $\beta$  - сдвиг фазовой ошибки за время  $Nf^{-1}$  за счет начального рассогласования между частотам входного и выходного сигналов;  $\alpha$  - сдвиг фазы выходного сигнала за время  $Nf^{-1}$  каждой единицей сигнала коррекции на выходе ЦФ;  $[\cdot]$  - целая часть числа.

Расчет ЦФЭС основан на итерационных алгоритмах численного исследования отображений  $T_K$ . Центральным звеном исследования является выделение множества  $\Omega_K^0$  ограниченных  $\omega$  - предельных траекторий отображений  $T_K$ , устанавливающихся из области допустимых начальных условий  $G_K^0 \subseteq G_K$ . Здесь используются результаты качественного исследования отображений  $T_K$  [1-3] (выделение глобальных секущих областей, локальных секущих отрезков, построение на них отображений и их исследование). По значениям координат у траекторий из  $\Omega_K^0$  определяются среднее значение  $M_K \varphi$ , дисперсия  $D_K \varphi$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma_K \varphi$ , фазовой ошибки  $\varphi$  - характеристики шумов квантования. Время достижения траекторий из  $\Omega_K^0$  из области  $G_K^0$  фиксируется как время переходных процессов  $\tau_K$ . Значения параметров из  $D_K$ , при которых для любых  $x_0 \in G_K^0$  предельная траектория ограничена и  $M_K \varphi < (M \varphi)_{доп}$ ,  $\sigma_K \varphi < (\sigma \varphi)_{доп}$ ,  $\tau_K < \tau_{доп}$ ,  $K=1, 2$ ,

определяют область захвата ЦФЭС. Ограничения  $(M \varphi)_{доп}$ ,  $(\sigma \varphi)_{доп}$ ,  $\tau_{доп}$  задаются пользователем.

Программный комплекс "Автоматизация" позволяет получать количественные зависимости динамических характеристик ЦФЭС и ЦФЭСЧ как от физических параметров систем, так и от математических параметров их моделей (1), (2), по которым можно оценить устойчивость, точность и быстродействие ЦФЭС, проанализировать влияние типов цифровых фильтров и параметров на динамические свойства систем и выяснить направления изменений значений параметров для достижения лучших динамических свойств ЦФЭС. Применение модульной технологии допускает развитие и совершенствование комплекса "Автоматизация" в направлении расширения класса исследуемых ЦФЭС и решаемых задач.

Комплекс состоит из следующих функциональных подсистем:

"ЦФСФ1", обеспечивающей расчет динамических характеристик ЦФС первого порядка с управлением по фазе;  
"ЦФСФ2", обеспечивающей расчет динамических характеристик ЦФС второго порядка с управлением по фазе;  
/ЦФСЧ", обеспечивающей расчет динамических характеристик ЦФС первого и второго порядков с управлением по частоте;  
"Управление", обеспечивающей ввод и вывод информации и управление работой функциональных подсистем.

Система реализована с использованием стандартного языка программирования Фортран-IV на базе типового математического обеспечения (с использованием операционной системы ОС ЕС ЭВМ), стандартных технических средств ЕС ЭВМ и работает в системе *PRIMUS*.

Каждая функциональная подсистема реализуется в виде комплекса пяти прикладных модулей, решающих следующие задачи:

- определение характеристик переходного и установившегося процессов в системе при фиксированном начальном условии (задача 1);
- определение границы области захвата для заданных диапазонов изменения двух активных параметров (задача 2);
- определение характеристик шумов квантования для заданного диапазона изменения активного параметра (задача 3);
- определение времени переходных процессов для заданного диапазона изменения активного параметра (задача 4);
- определение основных динамических характеристик (области захвата, характеристик шумов квантования, времени переходных процессов) для заданных диапазонов изменения двух активных параметров (задача 5).

Входными данными для каждой функциональной подсистемы являются значения параметров исследуемой ЦФС (либо физических параметров системы, либо математических параметров ее математической модели (соответствующего точечного отображения) и параметры алгоритмов.

Решение всех задач осуществляется в двух режимах: быстром и основном, отличающихся временем счета на 1-2 порядка. Быстрый режим в основном предназначен для использования при выполнении лабораторных работ студентов. С этой же целью предусмотрен режим контроля, в котором осуществляется вывод промежуточных результатов счета, позволяющих проанализировать ход решения задачи. Для удобства пользователя все входные параметры заданы фиксированным образом, и пользователю необходимо лишь внести желательную для него коррекцию с дисплея. Вывод результатов осуществляется через дисплей, АЦПУ и

графопостроитель в виде стандартных таблиц и графиков, готовых для их включения в отчетную документацию.

### Библиографический список

1. Системы фазовой синхронизации /Под ред. М.И.Жодзинского. М.:Сов.радио, 1980. 200 с.
2. Белых В.Н., Максаков В.П. Динамика цифровых систем фазовой синхронизации первого и второго порядка //Динамика систем:Междуз. сб. Горький, 1976. Вып. II. С.130-143.
3. Белых В.Н., Максаков В.П. Динамика простейшей дискретной системы фазовой синхронизации //Радиотехника и электроника, 1976. Т.21. № 1. С.2155-2163.
4. Белых В.Н., Максаков В.П. Шумы квантования в цифровых системах управления фазой колебаний //Динамика систем:Междуз.сб. Горький, 1986. С.120-130.
5. Белых В.Н., Максаков В.П. Качественное исследование разрывного отображения цилиндра из теории фазовой синхронизации// Методы качественной теории дифференциальных уравнений:Междуз.сб. Горький, 1982. С.135-149.
6. Максаков В.П., Панченко И.О. Качественное исследование разрывного отображения из теории ЦФС//Методы качественной теории дифференциальных уравнений: Междуз.сб. Горький, 1986. С.81-94.

УДК 62-506.1

В.П.Пономаренко, И.А.Заулин, В.В.Матросов

О РАЗРАБОТКЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ  
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ ПО ЗАДЕРЖКЕ

(г. Горький)

Система синхронизации по задержке (ССЗ) является оптимальным устройством следящей оценки задержки во времени двух коррелированных сигналов. Происходящее и применение ССЗ связано с широким использованием в системах связи, управления и обработки информации широкополосных шумоподобных сигналов [1]. Вопросы исследования режимов, устойчивости и помехоустойчивости ССЗ представляют зна-