УДК 621.396.668:681.3.06

В.П.Максаков, Е.А.Штыкунова

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

(г. Горький)

Цифровые системы фазовой синхронизации (ЦСФС) находят широкое применение в современных системах связи и управления /1/. Отличительной особенностью таких систем является сложное динамическое поведение в стационарном режиме. Динамическими (при отсутствии внешних шумов) моделями таких систем являются /2/ точечные отображения T дискретно-непрерывных фазовых пространств G в себя. Стационарным режимам в них соответствуют континуальные множества либо периодических, либо квазипериодических ω -предельных траекторий $\{T^j x\}_{j=0}^{\infty}$ отображений T, где x - вектор, определяющий состояние системы, компонентами которого являются фазовая ошибка φ и вектор целочисленных координат z, определяющий коды в цифровых фильтрах ЦСФС. Эти траектории заполняют в фазовых пространствах G области G^*. Распределение ω -предельных точек на G^* характеризует так называемые "шумы квантования" ЦСФС. Исследование динамических свойств ЦСФС с учетом шумов квантования является трудной задачей, допускающей решение лишь в некоторых частных случаях (см. например /3/). Для расчета динамических свойств ЦСФС с учетом шумов квантования разработан программный комплекс "Автоматизация" /4/. Основным элементом этого комплекса является определение характеристик шумов квантования (среднего значения $M\varphi$ и дисперсии σ^2_{φ} фазовой ошибки φ) по распределению координаты φ у ω -предельных точек отображения T на множестве G^*.

Дальнейшим развитием программных средств для исследований и расчетов ЦСФС является описываемый ниже программный комплекс для расчета статистических характеристик ЦСФС первого порядка с управлением по фазе /1/.

ЦСФС состоит из цифрового фазового детектора (ЦФД), цифрового фильтра (ЦФ) и цифрового подстраиваемого генератора (ЦПГ). На вход системы через фильтр с полосой пропускания Δf поступает гармонический сигнал и аддитивный гауссовский шум со спектральной плотностью N_0. ЦФД в моменты времени $t_{i+1} = t_i + f_g^{-1}$ (f_g – частота дискретизации) вырабатывает сигнал фазового рассогласования $g(\varphi_i, \xi_i) - sign(A\mathcal{F}_j(\varphi_i) + \xi_i)$, где A – амплитуда, $\mathcal{F}_j$ – форма (j = I – синусоидальная, j = 2 – прямоугольная, j = 3 – треугольная) сигнала на выходе дискриминатора, ξ_i – белая гауссовская последовательность с нулевым средним и дисперсией $\sigma^2 = \Delta f N_0$. Последовательность $\{g(\varphi_i, \xi_i), i=1,2...\}$ обрабатывается в ЦФ. Рассматривается пять типов цифровых фильтров ЦФ$_K$ /I,2/: K = I – фильтр отсутствует; K = 2 – реверсивный счетчик; K = 3 – два счетчика с независимым сбросом; K = 4 – два счетчика с перекрестным сбросом; K = 5 – N –перед- M фильтр. Если коды в ЦФ$_K$ достигают фиксированных граничных значений, то на выходе ЦФ$_K$ вырабатывается сигнал коррекции r = ±I, а коды в ЦФ$_K$ устанавливаются в некоторые начальные состояния (как правило нулевые). Каждый сигнал коррекции r – ±I вызывает смещение фазы выходного сигнала (на выходе ЦПГ) на дискрет подстройки α, осуществляя тем самым регулирование в системе.

При воздействии внешних шумов на ЦСФС ее состоянием, допускающим однозначное описание системы в момент времени t_i, $i=1,2,\dots$, будет плотность вероятностей $w_K(i, x_i)$ нахождения изображающей точки x_i в момент времени t_i в пространствах состояний G_K. Используя уравнение Чепмена-Колмогорова для плотностей $w_K(i, x_i)$, можно записать /2/ системы функционально-разностных уравнений, определяющих статистические модели ЦСФС$_K$, K = $\overline{I,\ 5}$. Например, для K = 3 эти уравнения имеют вид /5/

$$w_3(i+1, \varphi, z^+, z^-) = w_3(i, \varphi-\beta, z^+-1, z^-)\cdot P_1(\varphi-\beta) + w_3(i, \varphi-\beta, z^+, z^--1)\cdot P_{-1}(\varphi-\beta),\ z^+, z^- \neq 0,$$

$$w_3(i+1, \varphi, z^+, 0) = w_3(i, \varphi-\beta, z^+-1, 0)\cdot P_1(\varphi-\beta) + w_3(i, \varphi-\beta-\alpha, z^+, N-1)\cdot P_{-1}(\varphi-\beta-\alpha), \tag{I}$$

$$w_3(i+1, \varphi, 0, z^-) = w_3(i, \varphi-\beta, 0, z^--1)\cdot P_{-1}(\varphi-\beta) + w_3(i, \varphi-\beta+\alpha, N-1, z^{-1})\cdot P_1(\varphi-\beta+\alpha),$$

$$w_3(i+1, \varphi, 0, 0) = w_3(i, \varphi-\beta-\alpha, 0, N-1) P_{-1}(\varphi-\beta-\alpha) + w_3(i, \varphi-\beta+\alpha, N-1, 0)\cdot P_1(\varphi-\beta+\alpha),$$

где $z^+(z^-)$ – код в счетчике положительных (отрицательных) выходов с ЦФД в ЦФ_3, β – сдвиг фазовой ошибки φ за время f_g^{-1}, происходящий за счет начального рассогласования между частотами входного и выходного сигналов, N – максимальное значение кодов z^+, z^-, при достижении которых вырабатывается сигнал коррекции $r=\pm 1$, $P_1(\varphi)$ $(P_{-1}(\varphi))$ – вероятность выработки на выходе ЦФД положительного (отрицательного) сигнала фазового рассогласования при фиксированном значении φ $(P_{-1}(\varphi)=1-P_1(\varphi)$, $P_1(\varphi)=\Phi(SF_j(\varphi))$, Φ – интеграл ошибки, $S=A/\sigma$ – отношение сигнал-шум. В силу 2π-периодичности $P_\pm(\varphi)$ по φ в качестве граничных условий для (I) будем использовать условие 2π-периодичности плотности $w_K(i,x_i)$ по координате φ. В качестве начальных условий используем равномерное распределение координат x_0 либо на всем пространстве G, либо на одной окружности $\varphi\in[-\pi,0)$ в G, соответствующей нулевым значениям кодов в ЦФ_K (для (I) на окружности с $z^+=z^-=0$).

Уравнения для плотностей $w_K(i,x_i)$ обладают следующими свойствами.

Свойство I. Приводимость к дискретной марковской цепи (ДМЦ).

При рациональных значениях отношения β/α уравнения для $w_K(i,x_i)$ (типа (I) для $K=3$) порождают континуумы ДМЦ с $M_K=m_K m_0$ состояниями, где m_K – число окружностей в G_K $(m_3=N^2)$, $m_0=2\pi\delta^{-1}$; $\delta=HOD(2\pi,\alpha,\beta)$. Действительно, в уравнениях для $w_K(i,x_i)$ мы можем при каждом фиксированном значении S перейти к целочисленным параметрам и переменным с помощью замены $(2\pi,\alpha,\beta,\varphi)$ на $(KL=2\pi/\delta, K=\alpha/\delta, MG=\beta/\delta, J=[\frac{\varphi+\pi}{\delta}])$, где $[\cdot]$ – целая часть, а KL, K, MG, J – целые положительные числа. Тогда эти уравнения будут действовать на конечных множествах $m_K(\varphi')\in G_K\,|\,\varphi'\in[0,\delta)$ $(m_3(\varphi')=\{\varphi,z^+,z^-\,|\,\varphi=\varphi'+(J-1)\delta-\pi,\ \varphi'\in[0,\delta),\ J=\overline{1,KL},$ $z^\pm\in\{0,1,2,\ldots N-1\}\})$ независимо, порождая на каждом из них ДМЦ с M_K состояниями, где роль абсолютных вероятностей состояний играют значения $w_K(i,x_i)$ в точках множества $m_K(\varphi')$. Далее континуальные множества ДМЦ на $m_K(\varphi')$ аппроксимируем конечным числом n ДМЦ на множествах $m_K(j)=\bigcup_{\varphi\in[(j-1)\delta/n,\ j\delta/n)} m_K(\varphi)$, $j=\overline{1,n}$, где роль абсолютных вероятностей играют вероятности нахождения точки x_i на соответствующих отрезках ширины δ/n в

θ , а вероятности переходов определяются как вероятности переходов из середин этих отрезков.

Свойство 2. Зависимость от начальных условий.

При рациональных значениях отношения β/α устанавливается в общем случае периодическая последовательность плотностей $w_K(i, x_i)$ периода d , зависящего как от параметров ЦФС, так и от начальных условий $w_0(0, x_0)$.

С учетом свойств I,2 разработан итерационный алгоритм определения предельных периодических последовательностей плотностей $w_K(i_K^*+j, x_i), j=\overline{1,d}$, устанавливающихся из начальных плотностей $w_K(0, x_0)$ за время i_K^*. Реализация этого алгоритма лежит в основе программного комплекса. Программный комплекс реализован с использованием стандартного языка программирования ФОРТРАН-IУ на базе типового математического обеспечения. Он состоит из трех модулей: модуля управления и двух прикладных модулей, решающих следующие задачи:

определение основных статистических характеристик ЦФС $(\mu\varphi, D\varphi, \sigma\varphi, i_K^*)$ соответственно: среднее значение, дисперсия, среднее квадратическое отклонение и время установления предельного распределения при фиксированных значениях параметров (задача I);

определение основных статистических характеристик ЦФС в заданном диапазоне изменения отношения сигнал-шум $(S=A/\sigma)$ (задача 2).

Входными данными для задач являются значения параметров математических моделей исследуемых ЦФС$_K$, $K=\overline{1,5}$ и параметры алгоритмов. Вывод результатов осуществляется через дисплей, АЦПУ и графопостроитель в виде стандартных таблиц и графиков, готовых для их включения в отчетную документацию.

Для использования программного комплекса в учебном процессе предусмотрен вывод промежуточных результатов счета: абсолютных вероятностей состояний ДМЦ на заданном отрезке дискретного времени, векторов вероятностей переходов, суммарных по дискретным координатам z плотностей $w_K(i,\varphi)$, зависимостей неувязок

$$\varepsilon_i = \sup_{\varphi\in m(\delta/2)} |w_K(i,\varphi)-w_K(i-1,\varphi)|$$

и их усредненных по периоду d значений от дискретного времени.

Библиографический список

1. Цифровые системы фазовой синхронизации /Под ред. М.И.Жодзишского. М.: Сов. радио, 1980.

2. Белых В.Н. О моделях цифровых систем фазовой синхронизации //Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 11. С. 2244-2253.

3. Белых В.Н., Максаков В.П. Шумы квантования в цифровых системах управления фазой колебаний //Динамика систем: Межвуз.сб.: Горький. Горьковский ун-т. 1986. С. 20-30.

4. Максаков В.П., Лебедев Л.В., Панченко И.О., Фрайман Л.А., Штыкунова Е.А. Программный комплекс для расчетов динамических характеристик цифровых систем фазовой синхронизации //Автоматизация научных исследований: Межвуз.сб. Куйбыш. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989.

5. Максаков В.П. Динамические и статистические свойства цифровой системы фазовой синхронизации с фильтром в виде двух независимых счетчиков. М., 1979. 28 с. - Деп. в ГОСИНТИ, 84-79.

УДК 62.533:621.384.614

Г.В.Абрамова, С.М.Неелов

УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ СИНХРОТРОНА "СИРИУС" НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

(г. Томск)

Система контроля и управления синхротрона "Сириус", созданная как система реального времени /1/, характеризуется следующими признаками.

1. Сбор информации осуществляется в реальном времени с требуемой точностью и синхронизирован с циклом ускорения.

2. Необходимая предварительная обработка данных выполняется также в масштабе реального времени до начала следующего цикла ускорения.

3. Структура технического обеспечения отвечает следующим требованиям: система является распределенной, так как отдельные элементы системы, особенно управления, разнесены друг от друга тер-