

УДК 681.511.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Д.П. КУКИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 3 ноября 2008

Рассмотрены особенности цифровых устройств фазовой синхронизации. Приведен один из методов моделирования подобных автоматических систем в различных режимах работы. Предложены принципы описания основных составных блоков системы. Построены графики переходных процессов исследуемой системы.

Ключевые слова: цифровые устройства, фазовая синхронизация, имитационная модель.

Введение

В современной технике связи и управления широко применяются системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации, в том числе, в последнее время, цифровые устройства фазовой синхронизации ЦУФС [1]. Вследствие чего, важной задачей является исследование подобных систем, их статических и динамических характеристик. ЦУФС является системой автоматического управления (следающей системой), поэтому ее исследование предлагается проводить на основе теории автоматического управления.

В общем случае структурная схема ЦУФС имеет вид, приведенный на рис. 1.

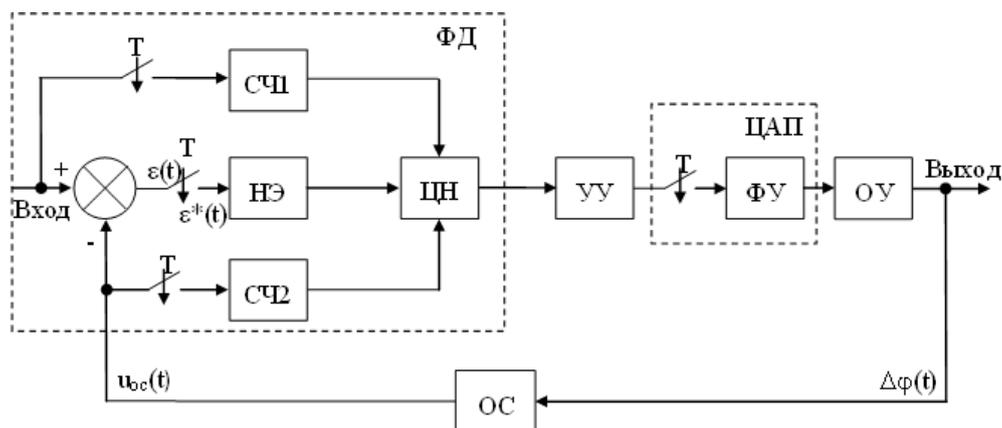


Рис. 1. Структурная схема ЦУФС: ФД — фазовый дискриминатор; НЭ — нелинейный элемент; ЦФ — цифровой фильтр; ЦНЭ — цифровой нелинейный элемент; УУ — устройство управления; ФУ — формирующее устройство; ОУ — объект управления; ОС — обратная связь; T — период дискретизации

Рассмотрим назначение отдельных элементов и физические процессы, происходящие в ЦУФС. На вход ЦУФС поступают синхроимпульсы СИ, например в виде последовательности коротких импульсов. На второй вход ФД с выхода контура управления по средствам ОС подаются колебания ОУ. ФД сравнивает фазы СИ и $U_{oc}(t)$, и на его выходе, в соответствии с дискриминационной характеристикой, формируемой взаимодействием НЭ и ЦНЭ, образуется последовательность импульсов, представляющих собой двоичный код, которому соответствует величина, пропорциональная разности фаз СИ и колебаний ОУ. В качестве ЦФ используется

пропорционально-интегрирующий фильтр первого или второго порядка. Он преобразует сигнал ошибки к форме, необходимой для работы ЦНЭ. В приведенной схеме канал α предназначен непосредственно для выявления фазового рассогласования сравниваемых сигналов, в то время как каналы β и γ используются в рамках определения частот упомянутых колебаний. Двоичный код с выхода ФД, содержащий информацию о выявленном фазовом рассогласовании, поступает на вход УУ, обеспечивающего требуемое качество работы ЦУФС (динамику работы). ФУ осуществляет восстановление непрерывного сигнала из цифрового кода сформированного УУ на основании выявленного фазового рассогласования в соответствии с заложенным алгоритмом управления.

ОУ должен отвечать совокупности требований:

- хорошей управляемости по частоте в зависимости от управляющего напряжения. Желательно, чтобы характеристика управления $\Delta\omega=f(\Delta u_{yy})$ была линейной;
- малой относительной нестабильности по частоте $\Delta f/f$.

Приведенные требования противоречивы, так как при улучшении управляемости увеличивается относительная нестабильность ОУ.

Имитационное моделирование

Наиболее простым и наглядным методом анализа ЦУФС является имитационное моделирование, при котором каждый блок системы моделируется по функциональному принципу.

В качестве средства реализации математической модели на современном этапе развития вычислительной техники удобно использовать любой из множества предназначенных для этого программных пакетов. Далее будет рассмотрена математическая модель, реализованная методами специализированного приложения MATLAB, чьи функциональные возможности и применяемые методы аппроксимации в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к точности разрабатываемой модели. Однако методика, которая будет описана далее, может быть успешно применена при моделировании исследуемого устройства любыми другими средствами.

В рамках используемого пакета программ структурная схема моделируемого ЦСФС будет иметь вид, приведенный на рис. 2.

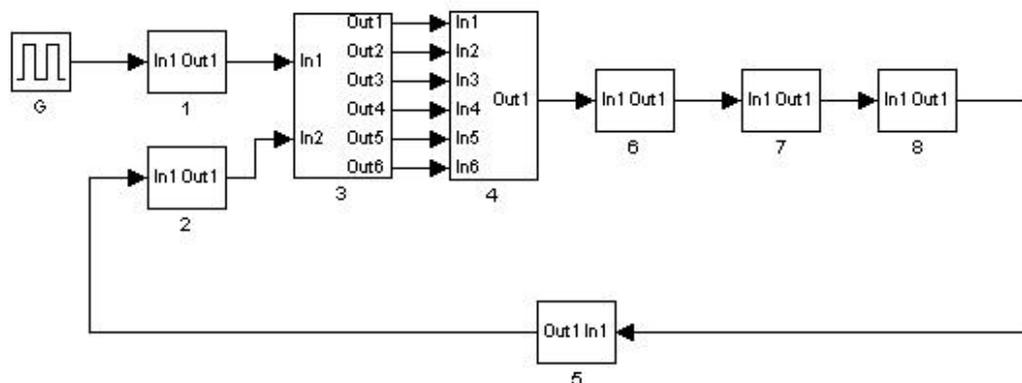


Рис. 2. Структурная схема модели ЦСФС

На рисунке введены следующие обозначения блоков ЦСФС:

1 и 2 — формирователи, предназначенные для преобразования импульсного сигнала, сформированного по релейному принципу из синусоидальных входного и опорного колебаний, в короткие импульсы, моменты, возникновения которых определяются одним из фронтов преобразуемого сигнала;

3 и 4 — последовательно подключенные блоки, при взаимодействии которых осуществляется моделирование ФД в сочетании с УУ;

5 — ОС;

6 и 7 — ОУ;

8 — блок, осуществляющий вычисление выходной переменной ОУ, имеющей синусоидальный характер;

G — генератор моделирующий входное колебание, преобразованное в последовательность прямоугольных импульсов.

ЦУФС моделируется согласно приведенному ниже описанию. Входной сигнал, поступает на цифровой ФД, осуществляющий сравнение его фазы и фазы колебания формируемого ОУ. В зависимости от результата сравнения в соответствии с заданной детекторной характеристикой осуществляется формирование выходного сигнала ФД. Наиболее применяемые дискриминаторы описаны в [2]. Предлагается моделировать ФД в целом и ЦНЭ в частности при помощи сочетания элементов и методов реализации дискретных пространств состояний ("discrete state-space system"), описанных в [3]. Предложенная методика предоставляет возможность выбора любого из ФД в качестве параметра модели с целью анализа его преимуществ и недостатков по сравнению с другими видами.

В рамках предложенной модели ФД разделен на аппаратный блок 3 и программный блок 4. Выходным сигналом составной части ФД 3 является следующая комбинация импульсов передающихся параллельно:

- кодовая последовательность, количество импульсов в одном пакете которой эквивалентно длительности выявленного фазового рассогласования между входным и опорным колебаниями;
- две последовательности, в которых количество импульсов эквивалентно периодам входного и опорного колебаний;
- для случая дальнейшего аналогового преобразования передаваемых кодовых последовательностей в двоичный код с помощью двоичных счетчиков также передаются импульсы, сформированные триггерами и являющиеся исходными при формировании других составляющих выходного сигнала.

Составные части кодовой последовательности, сформированные блоком 3, поступают на входы блока 4 математической модели рис. 2, представляющего собой программную часть ФД в сочетании с УУ. Такое объединение двух функциональных блоков основано на том, что функции обоих описываются программными методами и при схемотехнической реализации ЦУФС будут осуществлены при помощи единственного программируемого устройства. По функциональным особенностям блок 4 рис. 2 можно условно разделить на следующие составляющие:

- счетчики, осуществляющие преобразование входного сигнала рассматриваемого блока в двоичный код;
- решающее устройство (РУ), осуществляющее обработку кодовых последовательностей, содержащих информацию о выявленной разности фаз входного и подстраиваемого колебаний и непосредственно формирующее дискриминационную характеристику ФД, выполняющее также функции ЦФ и НЭ;
- УУ.

Сигнал, сформированный на выходе НЭ, и содержащий информацию о выявленном фазовом рассогласовании задающего и подстраиваемого колебаний, подается на вход ЦФ. В рамках исследуемой системы данный блок предлагается реализовывать программным способом. В случае астатизма второго порядка программируется следующий алгоритм цифрового фильтра:

$$z[k] = z[0] + k_1 \varepsilon^*[k] + k_2 \sum_{s=1}^k \varepsilon^*[s];$$

где $z[k]$ — цифровой выходной сигнал фильтра; $\varepsilon^*[k]$ — код ошибки на выходе ФД, являющийся цифровым эквивалентом комплексной огибающей сигнала; $z[0]$ — исходное состояние фильтра; k — порядковый номер; k_1 и k_2 — коэффициенты передачи.

Этот фильтр эквивалентен параллельному соединению пропорционального и дискретного интегрирующего звеньев с соответствующими коэффициентами передачи. Таким образом, наиболее простым методом моделирования данного блока является реализация его средствами дискретной передаточной функции. С выхода ЦФ сигнал поступает на вход ЦНЭ моделируемый, как и НЭ упомянутыми выше методами реализации дискретных пространств состояний.

С выхода ЦНЭ сигнал поступает на вход УУ. Данное устройство предлагается реализовывать по средствам дискретных передаточных функций, в соответствии с выбранным алго-

ритмом управления. Одним из важных вопросов является характер управляющего сигнала, поскольку он оказывает значительное влияние на быстродействие системы в целом. Предложенный метод моделирования позволяет изменять закон управления в широком диапазоне, что в свою очередь позволяет исследовать его влияние на быстродействие и характер переходного процесса в системе.

Наиболее рациональным методом реализации ФУ и ОУ является моделирование их передаточных функций. Моделированию ОУ, подобных применяемым в рамках рассматриваемых систем устройствам, посвящен довольно большой объем литературы, в частности [4, 5], вследствие чего реализация параметров данного блока значительно облегчается.

Выходным сигналом ОУ в рамках предложенного метода моделирования является периодическое колебание, которое преобразуется ОС к виду позволяющему производить сравнение его фазы с фазой управляющего сигнала. Функционирование ОС предлагается моделировать средствами непрерывных пропорционально-дифференцирующих звеньев.

Полученная в результате описанной выше методики модель позволяет в широком диапазоне изменять параметры составных блоков системы, в том числе и частоту дискретизации, что оказывает значительное влияние на точность подстройки фазы. Кроме этого, частота дискретизации является одним из важнейших факторов, определяющих диапазон частот, в котором функционирует ЦУФС. Модель предоставляет возможность наблюдать основные динамические характеристики системы, что в свою очередь позволяет оценивать преимущества и недостатки составных блоков ЦУФС.

Полученная модель позволяет производить построение фазового портрета системы и переходного процесса, в результате чего имеется возможность осуществить оценку устойчивости системы в целом и параметров, определяющих качественные характеристики. На рис. 3 приведены примеры графиков переходных процессов, полученных при моделировании ЦУФС описанным способом. При анализе приведенных графиков, очевидно, что моделируемые процессы эквивалентны их реальным аналогам.

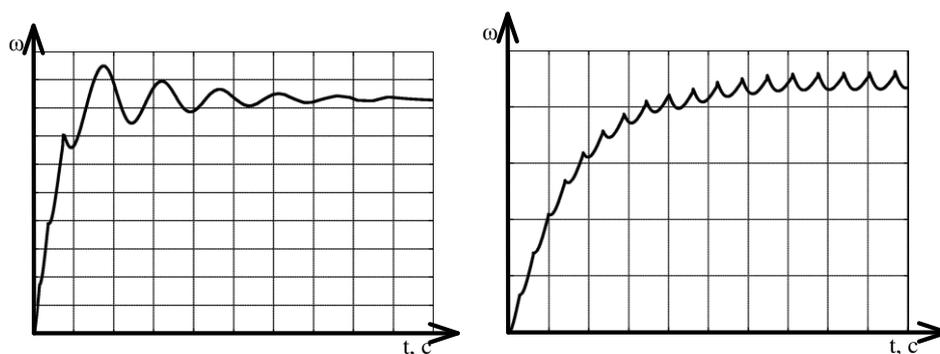


Рис. 3. Примеры графиков переходных процессов в ЦУФС

В результате разработанная модель позволяет производить анализ существующих ЦУФС с целью их модернизации. Кроме этого, модель позволяет разрабатывать ЦУФС исходя из предъявляемых требований и решаемых задач.

Заключение

Таким образом, в статье предложена методика имитационного моделирования существующих ЦУФС в различных режимах работы, позволяющая оценивать как статические, так и динамические характеристики. Также, она позволяет производить выбор параметров моделируемого устройства.

MODELLING OF DIGITAL PHASE LOCKED-LOOPS

D.P. KUKIN

Abstract

Features of digital phase locked-loops are considered. One of methods of modelling of similar automatic systems in various operating modes is resulted. Principles of the description of the basic compound blocks of system are offered. Schedules of transients of investigated system are constructed.

Литература

1. *Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А., Карякин В.Л.* и др. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / Под ред. *Шахгильдян В.В.* М., 1989.
2. Цифровые системы фазовой синхронизации / Под ред. *Жодзишского М.И.* М., 1980.
3. *Гультяев А.* MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows. 1999.
4. *Никаноров В.Б., Останин С.Ю., Шмелева Г.А.* // Электротехника. 2002. № 9. С. 5–11.
5. *Боровин Г.К., Гарипов В. К., Слепцов В.В.* Математическое моделирование электропривода с положительной обратной связью по скорости. Препринт ИПМ АН СССР, № 143. 1989.