

УДК 681.511.4

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ**

Л.Ю. ШИЛИН, Д.С. ОЛИФЕРОВИЧ, Д.Л. ШИЛИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 4 июня 2007*

Рассмотрены вопросы математического описания, анализа и моделирования цифровых систем фазовой синхронизации, позволяющие учитывать их дискретные, нелинейные и статические характеристики.

*Ключевые слова:* цифровые системы, фазовая синхронизация.

**Введение**

В связи с бурным развитием цифровой вычислительной техники и микроэлектроники, созданием надежных и недорогих стандартных элементов широкое распространение получили цифровые системы фазовой синхронизации (СФС). Они нашли широкое распространение в теории и практике применения автоматизированного электропривода, в частности для реализации векторного управления электроприводом, что позволяет значительно снизить энергопотребление. До некоторого времени наиболее распространенными были непрерывные аналоговые системы ФС, хотя для решения отдельных задач, например в системах передачи данных, применялись и цифровые (дискретные) системы. При этом непрерывность или дискретность систем, как правило, определялась ее назначением. Однако в последние годы в связи с повышением требований к качественным показателям радиоаппаратуры и с успехами в развитии микроэлектроники цифровые методы обработки сигналов стали широко применяться и в тех областях, где ранее применялись аналоговые методы обработки. Характерным примером такого применения может служить цифровая система ФС для выделения гармонической несущей из спектра, принимаемого на фоне шума сигнала.

Цифровые методы обработки сигналов позволили резко увеличить стабильность параметров аппаратуры и динамический диапазон работы, обеспечить идеальное запоминание и накопление сигналов, удобство изменения параметров и сопряжения с цифровой вычислительной машиной. В системах ФС цифровые методы, в частности, позволили существенно уменьшить эквивалентную шумовую полосу при одновременном расширении полосы синхронизма, осуществить нормальную работу при очень низком отношении сигнал — шум во входной полосе и решить ряд других задач, вызывавших большие, а иногда практически непреодолимые трудности при использовании аналоговой техники.

**Математическое описание элементов модели цифровой системы фазовой синхронизации**

Системы ФС осуществляют слежение за фазой  $\varphi_c(t)$  входящего сигнала  $u_c(t)$ , обрабатывая входную смесь сигнала и шума, которую будем считать аддитивной:

$$u_{\text{вх}}(t) = u_c[t, \varphi_c(t)] + u_m(t). \quad (1)$$

Отслеженное значение фазы  $\varphi_{\text{вых}}(t)$  отличается от фазы входного сигнала на значение фазовой ошибки слежения:

$$\varphi(t) = \varphi_c(t) - \varphi_{\text{вых}}(t). \quad (2)$$

Системами ЦФС называют такие системы ФС, в которых обрабатываются сигналы, дискретизированные по времени и квантованные по уровню (цифровые сигналы). Наряду с цифровыми в системах ЦФС могут быть и аналоговые сигналы.

При изучении системы ЦФС ее удобно представить состоящей из трех функциональных блоков: цифрового детектора, цифрового фильтра и цифрового синтезатора [2]. На вход системы ЦФС (на первый вход детектора) поступает либо аналоговая входная смесь  $u_{\text{вх}}(t)$ , либо образованная из этой смеси цифровая выборка отсчетов. На другой вход детектора поступает опорный (выходной) сигнал, который также может быть либо аналоговым, либо цифровым. Детектор вырабатывает цифровой сигнал ошибки  $z_d[r]$ , зависящий от фазовой ошибки  $\varphi(t)$ . Цифровой фильтр преобразует сигнал  $z_d[r]$  в соответствии с требуемым законом управления. Цифровой синтезатор вырабатывает выходной сигнал системы ЦФС.

Приведенное разбиение на функциональные блоки иногда оказывается условным, так как не всегда можно указать, где в реальной аппаратуре проходит граница между этими блоками. Прототипами функциональных блоков в аналоговых системах ФС являются соответственно аналоговый детектор, фильтр нижних частот и управляемый генератор.

В простейшем случае на вход ЦФС (рис. 1) поступает периодический сигнал, форма которого с помощью формирующего устройства (ФУ) преобразуется к виду, удобному для работы цифрового фазового детектора (ЦФД). В ЦФД сравниваются фазы сигналов с выхода ФУ и цифрового генератора (ЦГ) и вырабатывается кодовая комбинация (число), соответствующая разности фаз этих сигналов в момент сравнения (дискретизация по времени), который можно определить сигналом либо эталонного, либо подстраиваемого генератора. Дискретизация по уровню достигается, поскольку выходной сигнал фазового детектора может принимать только дискретные значения, число которых конечно, он должен подвергаться обработке по определенному алгоритму (фильтрации) в цифровом фильтре (ЦФ).

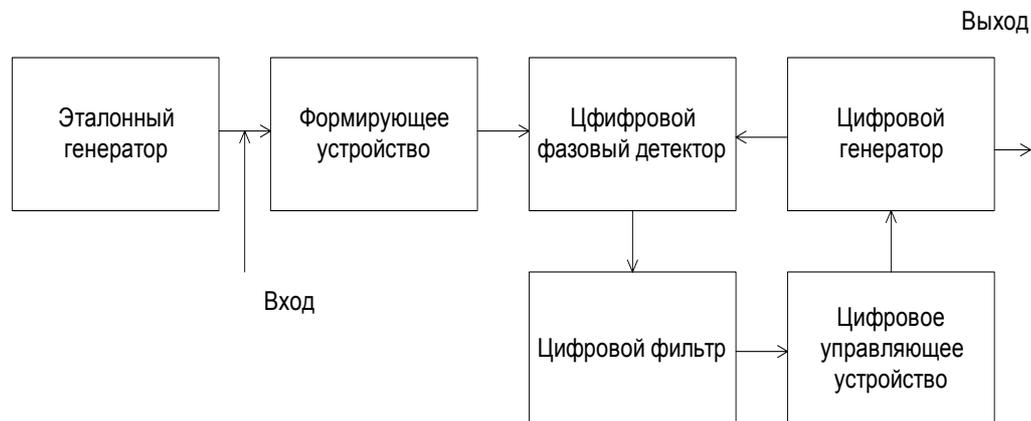


Рис. 1. Обобщенная структурная схема ЦФС

Цифровой генератор — это устройство, на выходе которого средняя частота сигнала (число импульсов за период следования) принимает одно из дискретных значений, зависящее от кода сигнала, действующего на цифровое управляющее устройство ЦУУ. Выходным сигналом ЦГ служит последовательность импульсов с постоянной амплитудой. Цифровые СФС являются разновидностью систем, построенных по принципу дискретной коррекции фазы (частоты) цифрового генератора. Существуют различные модификации ЦФС, среди которых выделяются две, отличающиеся наличием синтезатора частот и устройства добавления-вычитания (УДВ). Цифровая СФС первой модификации работает по принципу дискретного регулирования частоты цифрового генератора, второй — с использованием коррекции его фазы.

ЦФД является основным звеном любой ЦСФС. Он представляет собой устройство, которое в зависимости от фазового рассогласования  $\varphi[n]$  в моменты  $t_n = nT_p$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) выдает сигнал ошибки в виде кодовой комбинации.

Специфика цифрового фазового детектора такова, что для его работы необходимо наличие четырех входов и двух выходов (рис. 2). На один из входов А поступает периодическая последовательность коротких импульсов с частотой  $f_p = 1/T_p$  (рис. 2), на два других входа Б, В — две сдвинутые на  $180^\circ$  относительно друг друга импульсные последовательности типа меандр с той же частотой  $f_p$ .

В процессе работы детектора возможны две ситуации: когда короткие импульсы по времени совпадают с импульсами последовательности на входе Б или В (рис. 2). При любом совпадении вырабатывается строб ошибки длительностью  $T_{стр}$ , начало которого определяется фронтом короткого импульса, а окончание — фронтом соответствующего импульса последовательности (рис. 2). Этот строб ошибки представляет собой импульс, заполненный вспомогательной импульсной последовательностью частоты  $f_e$ .

Число импульсов в стробе соответствует фазовому рассогласованию. При этом на втором выходе Б фазового детектора сигнал отсутствует. При совпадении временного положения короткого импульса на входе А с положительной полуволной меандра на входе Б сигнал рассогласования появляется на выходе Б, на выходе А он отсутствует.

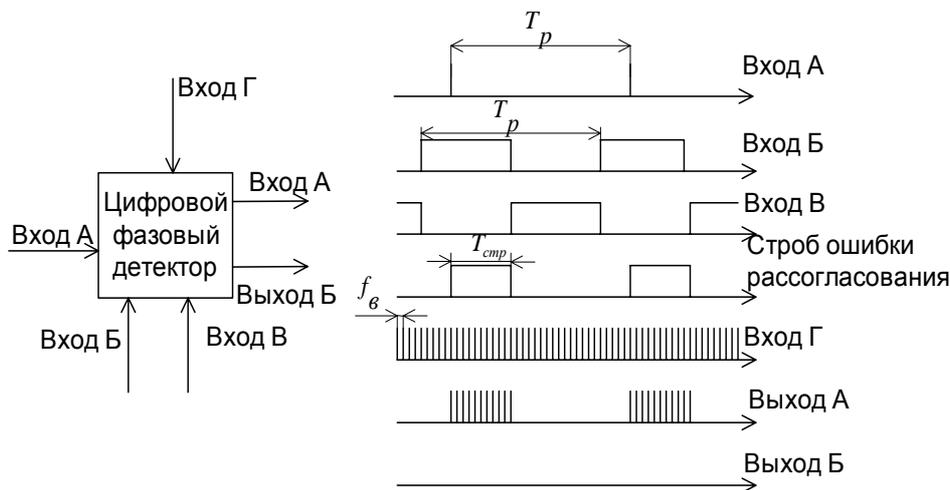


Рис. 2. Структурная схема и временные диаграммы ЦФД

В зависимости от соотношения между частотами  $f_p$  и  $f_e$  и фазового рассогласования сравниваемых сигналов число импульсов на выходах ЦФД за период  $T_p$  может быть равным, а его характеристика — соответственно либо двухуровневой релейной при  $f_p = f_e$  либо многоуровневой при  $f_p > f_e$ .

С течением времени в ЦСФС устанавливается режим, при котором средняя частота выходных колебаний равна частоте эталонного сигнала, а их мгновенные частоты могут отличаться. В этом проявляется одно из отличительных свойств такой системы по сравнению с непрерывной ЦСФС.

В ЦСФС с управляемым кодом процессы несколько проще. В такой системе, как и в системе с УДВ, в ЦФД вырабатывается код (например, число импульсов в стробе), который передает разность фаз поступающих на него сигналов эталонного и подстраиваемого генераторов. После фильтрации (обработки по определенному алгоритму) сигнал с выхода ЦФ управляет устройством, переключающим частоту синтезатора скачком на значение, соответствующее этому сигналу.

В установившемся состоянии в такой системе возникает режим синхронизации в среднем с колебаниями частот входного и подстраиваемого генератора. Если частоты синтезатора коммутируются без разрыва фазы, то спектр выходного сигнала существенно уменьшается.

Цифровой фильтр (ЦФ) подобно обычному фильтру в соответствии с заданным алгоритмом осуществляет обработку сигналов, поступающих с выхода ЦФД. Цифровой фильтр можно реализовать на микропроцессоре. Это дает возможность изменить как структуру фильтра, так и его параметры в процессе работы СФС [4].

### **Реализация модели цифровой системы фазовой синхронизации в пакете автоматизации математических вычислений Matlab**

Для разработки и анализа работы проектируемой системы воспользуемся приложением Matlab и спроектируем систему в среде Simulink.

Частоту эталонного и подстраиваемого генераторов задается численно и хранится в элементах памяти. Частота эталонного генератора будет постоянной, а частота подстраиваемого в процессе работы ЦСФС будет перестраиваться с начального значения до частоты эталонного генератора. За эталонный генератор будет отвечать один элемент памяти, а за подстраиваемый — другой. Для преобразования численного значения частоты в последовательность импульсов вначале сигнал пропускается через интегратор и синусоиду, а затем выделяются моменты пересечения синусоиды нулевого уровня снизу вверх. Для преобразования частоты в радианы (необходимо для корректного формирования синусоиды) после элемента памяти располагается усилитель со значением 6,28.

Для организации делителя и выделения двух полупериодов с выхода подстраиваемого генератора воспользуемся RS-триггером. После пропускания частоты подстраиваемого генератора через интегратор и преобразования его к синусоидальному виду выделяются отдельно моменты пересечения синусоиды нуля сверху и снизу. Первый сигнал подается на S вход триггера (установить значение триггера), а второй — на R вход триггера (сбросить значение).

Строб фазового рассогласования оцифровывается при помощи триггера, причем попадание импульса в различные полупериоды подстраиваемого генератора реализуется при помощи двух различных триггеров. На выходе первого триггера получается строб рассогласования, если импульс попадает в первый полупериод, а если во второй — то на выходе второго триггера

Полученный строб рассогласования требуется оцифровать — преобразовать в числовое значение. Для этого строб рассогласования заполняется тактовыми импульсами, частота которых выше, чем частота подстраиваемого и эталонного генераторов, и подается на счетчик. Заполнение тактовыми импульсами реализуется при помощи ключа, на управляющий вход которого подается строб рассогласования, на первый — тактовые импульсы, а на второй нулевой уровень. Счетчик сбрасывается поступлением очередного фронта строга рассогласования.

Для сохранения значения рассогласования применим на выходе запоминающее устройство (для первого полупериода — А, для второго полупериода — В).

Уровень нового рассогласования передается в элемент памяти только после того, как счетчик посчитает все импульсы в стробе рассогласования.

Для этого между счетчиком и элементом памяти располагается ключ, на управляющий вход которого подается момент окончания счета (начало первого или второго полупериода подстраиваемого генератора). На второй вход заводится значение из элемента памяти. Это необходимо для того, чтобы до определения очередного рассогласования уровень был постоянным и чтобы за один шаг подстройки не происходило большого скачка (если частота тактовых импульсов сильно превосходит частоту эталонного и подстраиваемого генераторов, то счетчик может насчитывать большие значения, что приведет к большим скачкам при подстройке генератора, при этом может возникать значительное перерегулирование).

Частота подстраиваемого генератора изменится, когда подается на сумматор значения выборки запоминания из А (первый полупериод), инверсного значения В (второй полупериод)

и предыдущей частоты подстраиваемого генератора. Так как значения из схемы "выборка-запоминание" должны приходить только один раз, то между ними и сумматором ставится разрешающий ключ, второй вход которого запитывается на землю (нулевой уровень). На управляющие входы первого ключа (с выхода выборки запоминания А) подаются импульсы, если требуется повышать частоту (частота эталонного генератора больше частоты подстраиваемого генератора), а если требуется понижать, то открывается второй ключ (выход выборки запоминания В). Результат суммирования сигналов перезаписывается в элемент памяти С — изменяется частота подстраиваемого генератора. Как уже отмечалось выше, изменение частоты подстраиваемого генератора ограничивается за одну итерацию до определенного уровня (10Гц).

На рис. 3 приведен пример работы системы ЦФС в виде перестройки частоты с 10 Гц на 20 Гц и реакция объекта управления. Частота тактовых импульсов задается 1000 Гц, нелинейный элемент будет входить в насыщение при 10 Гц.

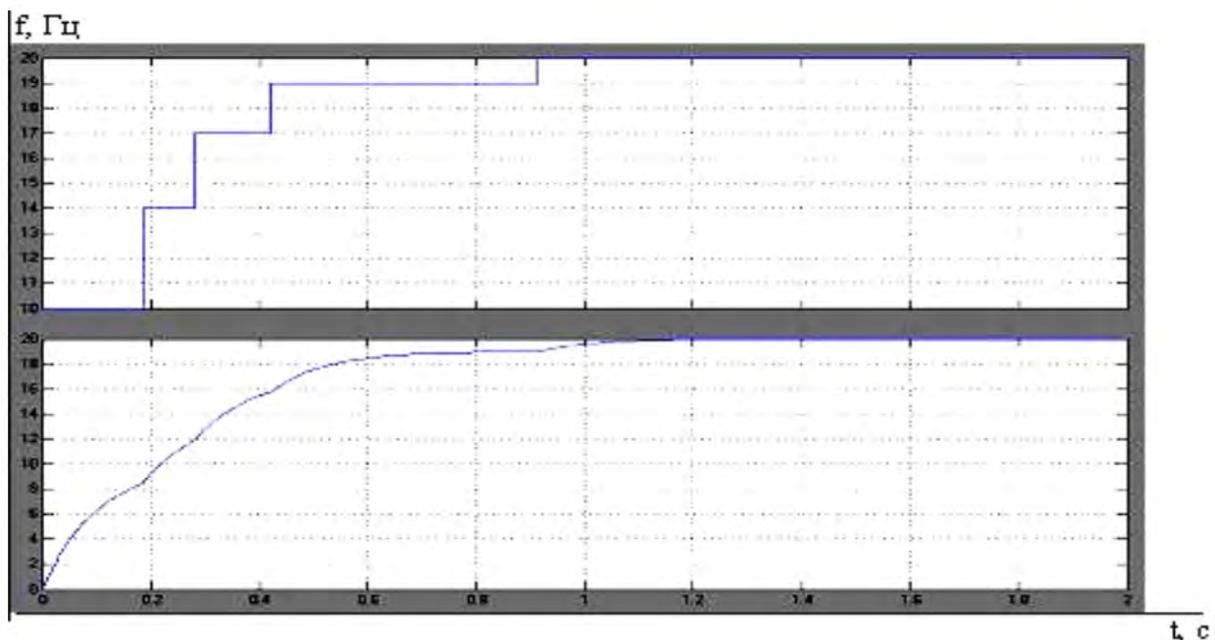


Рис. 3. Перестройка подстраиваемого генератора с частоты 10 Гц на частоту эталонного генератора 20 Гц

### Заключение

Разработаны математические модели, применение которых позволило решить задачу моделирования и проанализировать работу систем цифровой фазовой синхронизации и оценить качество работы на новом, адекватном сегодняшнему дню уровне. Сделан особый акцент на применение в ходе решения задачи моделирования цифровых систем фазовой синхронизации мощностей современной вычислительной техники и специализированного программного обеспечения. Это позволило задействовать подходы, рассмотрение ранее которых было невозможно в силу малых производительных мощностей вычислительной техники предыдущего поколения. Разработано программное обеспечение, которое позволило максимально автоматизировать решение поставленного спектра задач, тем самым значительно упрощено дальнейшее изучение рассматриваемого класса систем.

Проанализировав результаты моделирования, можно сделать вывод, что с увеличением частоты тактовых импульсов увеличивается скорость перестройки, но при достижении определенного значения (2000 Гц) время подстройки не сокращается, а лишь начинают возникать колебания вокруг частоты эталонного генератора. Можно отметить, что спроектированная модель цифровой системы фазовой синхронизации имеет высокую точность подстройки частоты подстраиваемого генератора к эталонному.

# DESIGNING OF DIGITAL SYSTEMS OF PHASE SYNCHRONIZATION

L.Yu. SHILIN, D.S. OLIFEROVICH, D.L. SHILIN

## Abstract

Questions of the mathematical description, the analysis and modeling of digital systems of the phase synchronization are considered, allowing taking into account their discrete, nonlinear and static characteristics.

## Литература

1. Кузнецов А.П., Батура М.П., Шилин Л.Ю. // Анализ и параметрический синтез импульсных систем с фазовым управлением. Минск, 1993.
2. Жодзишский М.И., Сила-Новицкий С.Ю., Праслов С.Ю. и др. Цифровые системы фазовой синхронизации / Под ред. М.И. Жодзишского. М., 1986.
3. Линдсей У.Ч., Цзе Цзамин // ТИИЭР. 1981. Т. 69, № 4. С. 12–33.
4. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А., Карякин В.Л. и др. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / Под ред. В.В. Шахгильдяна. М., 1989.