

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических систем

**С. А. Ганкевич**

## ***ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ РАДИОАВТОМАТИКИ***

Методическое пособие  
к лабораторной работе по дисциплинам «Радиоавтоматика» для студентов  
специальности 1-39 01 01-01 «Радиотехника (устройства и системы)»,  
«Автоматическое управление в системах цифровой радиосвязи» для студентов  
специальности 1-39 01 01-02 «Радиотехника (техника цифровой радиосвязи)»  
и «Автоматика информационных систем» для студентов специальности  
1-39 01 04 «Радиоинформатика»  
всех форм обучения

Минск БГУИР 2011

УДК 681.51(076.5)

ББК 32.965я73

Г19

Рецензент:

доктор технических наук, профессор

В. К. Конопелько

**Ганкевич, С. А.**

Г19

Элементы цифровых систем радиоавтоматики : метод. пособие к лаб. работе по дисц. «Радиоавтоматика» для студ. спец. 1-39 01 01-01 «Радиотехника (устройства и системы)», «Автоматическое управление в системах цифровой радиосвязи» для студ. спец. 1-39 01 01-02 «Радиотехника (техника цифровой радиосвязи)» и «Автоматика информационных систем» для студ. спец. 1-39 01 04 «Радиоинформатика» всех форм обуч. / С. А. Ганкевич. – Минск : БГУИР, 2011. – 22 с.

ISBN 978-985-488-742-5.

Рассмотрены схемы функциональных узлов цифровых систем радиоавтоматики. Изложена методика экспериментальных исследований для аппаратной и программной реализаций. Приведены вопросы для самопроверки.

**УДК 681.51(076.5)**

**ББК 32.965я73**

**ISBN 978-985-488-742-5**

© Ганкевич С. А., 2011

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2011

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение основных функциональных узлов цифровых систем радиоавтоматики и их характеристик, исследование физических процессов, параметров и характеристик цифровой системы.

### 1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Цифровую систему радиоавтоматики можно представить в виде структуры, состоящей из трех функциональных узлов (рис. 1): цифрового дискриминатора (ЦД), цифрового фильтра (ЦФ) и цифрового генератора опорного сигнала (ЦГ) [1].

На один из входов ЦД подается входной (эталонный) сигнал, а на второй – опорный. ЦД вырабатывает сигнал ошибки  $z_d[r]$ , пропорциональный рассогласованию между входным и опорным сигналами по отслеживаемому параметру. В ЦФ сигнал рассогласования усредняется и преобразуется в сигнал управления ЦГ, который вырабатывает опорный сигнал.

Цифровые системы слежения за фазой, частотой и временным положением отличаются дискриминаторами и генераторами опорного сигнала.

Цифровые системы фазовой синхронизации (ЦФС) разделяют на два класса: ЦФС радиосигналов и ЦФС видеосигналов. ЦФС радиосигналов используются для выделения несущих и поднесущих в спектре модулированных колебаний, а также для демодуляции ЧМ- и ФМ-колебаний. К ЦФС видеосигналов относятся системы синхронизации по прямоугольным поднесущим, системы тактовой синхронизации, системы слежения за задержкой псевдослучайного видеосигнала.

Аналого-цифровое преобразование в ЦФС может производиться до петли (на входе) системы или внутри. В первом случае на вход дискриминатора поступают цифровые отсчеты входной смеси сигнала и шума и отсчеты опорного сигнала. При этом вся система является цифровой. Во втором случае на входы дискриминатора поступает аналоговая смесь сигнала и шума и аналоговый опорный сигнал. Аналого-цифровое и цифроаналоговое преобразования производятся внутри петли следящей системы – в дискриминаторе и цифровом синтезаторе (цифровом генераторе). Система при этом является аналого-цифровой.

Широкое применение находят системы с цифровыми фазовыми дискриминаторами, на входы которых подается бинарная квантованная смесь сигнала и шума и двухуровневый опорный сигнал или импульсы, соответствующие его тактовым точкам. Сигнал ошибки при этом пропорционален разности фаз входной смеси и опорного колебания.

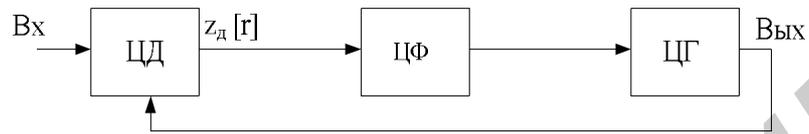


Рис. 1. Функциональная схема цифровой системы радиоавтоматики

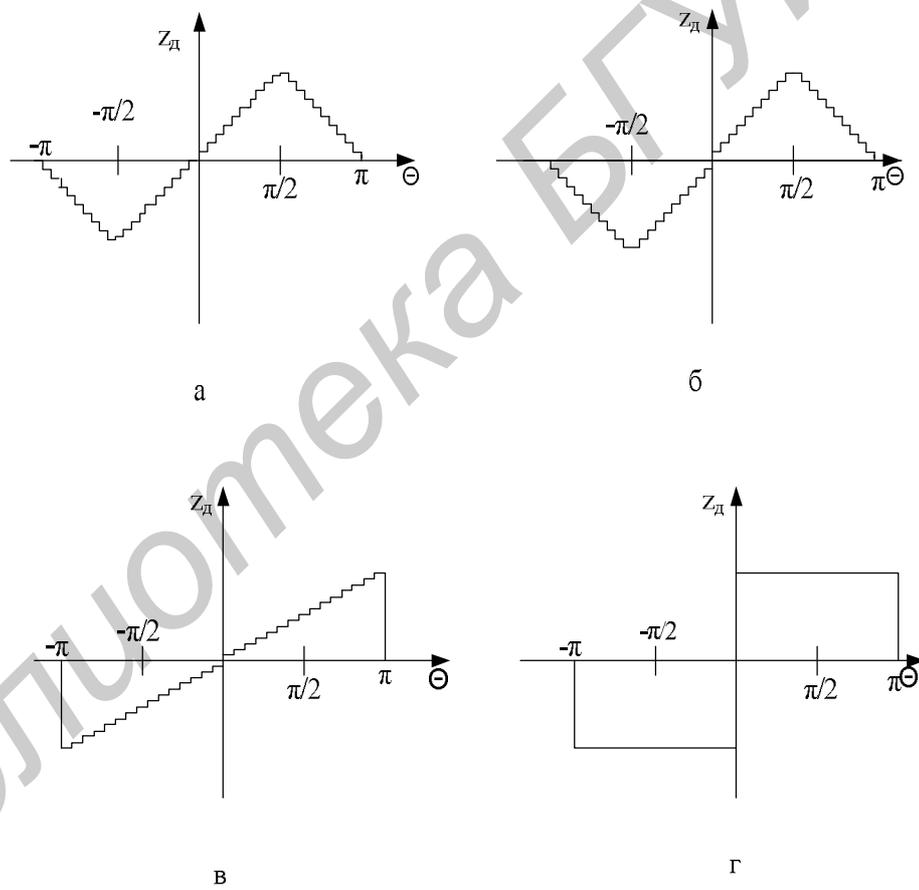


Рис. 2. Дискриминационные характеристики

Существуют два типа ЦФД. В первом типе разность фаз преобразуется в сигнал ошибки  $z_d[r]$  перемножением квантованной смеси сигнала и шума и опорного сигнала и квантованием результата перемножения. Во втором – считывают значение вспомогательного сигнала, имеющего тот же период, что и опорный, в момент равенства нулю входной смеси.

Основными характеристиками любого дискриминатора являются дискриминационная и флюктуационная. Дискриминационная характеристика – усредненная по времени зависимость сигнала на выходе дискриминатора  $\bar{z}_d[r]$  от ошибки по отслеживаемому параметру между эталонным и опорным сигналами. Флюктуационная характеристика – зависимость спектральной плотности случайной составляющей  $z_d(t)$  на нулевой частоте от ошибки по отслеживаемому параметру.

По виду дискриминационной характеристики различают дискриминаторы с синусоидальной, треугольной, пилообразной и релейной характеристиками (рис. 2, а, б, в, г).

ЦФД первого типа при прямоугольных периодических сигналах на входах может быть реализован на элементах И-НЕ (рис. 3). Сигнал ошибки преобразуется в унитарный (счетно-импульсный) код. С этой целью используются счетные импульсы  $U_{сч}(t)$ . Сигнал ошибки  $z_d[r]$  определяется разностью между числом счетных импульсов, совпавших по времени с одним уровнем сигнала на выходе перемножителя, и числом счетных импульсов, совпавших по времени с другим уровнем сигнала, на интервале, равном полупериоду опорного сигнала, соответствующему его высокому уровню. Условно эти импульсы можно считать положительными и отрицательными соответственно. Знак выходных импульсов ЦФД  $U_{фд}(t)$  определяется тем, на каком выходе присутствуют последние. Временные диаграммы работы ЦФД приведены на рис. 4. Рассмотренный ЦФД является однополупериодным. Двухполупериодный ЦФД может быть реализован с использованием сумматоров по модулю «2» (рис. 5). Характеристика рассмотренных дискриминаторов треугольная. Если частота счетных импульсов равна частоте опорного колебания, то характеристика ЦФД становится релейной, а схема ЦФД имеет вид, представленный на рис. 6.

В системах тактовой синхронизации при случайном чередовании знаков элементарных символов опорная последовательность может быть сформирована из регенерированных посылок входной последовательности (рис. 7). В этой схеме в качестве регенератора используется D-триггер, тактируемый импульсами опорного сигнала тактовой частоты. Задержанная копия входной последовательности

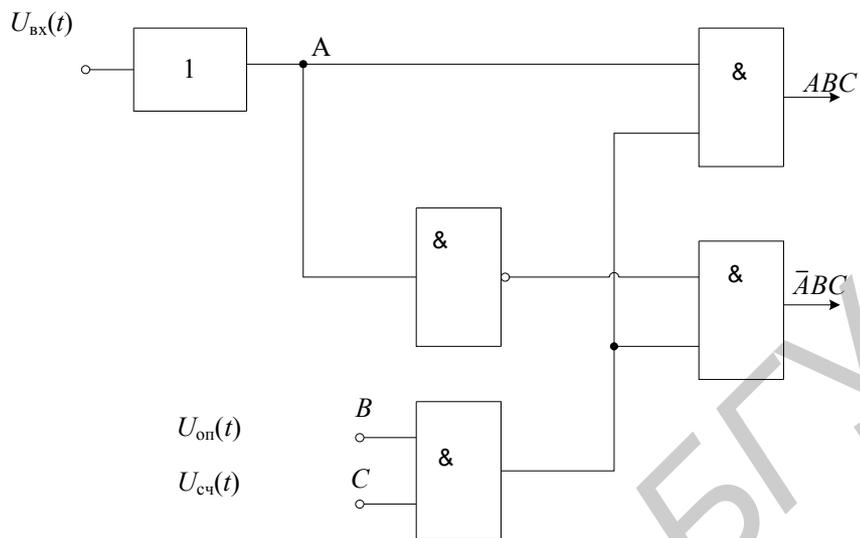


Рис. 3. Схема дискриминатора:  
1 – бинарный квантователь

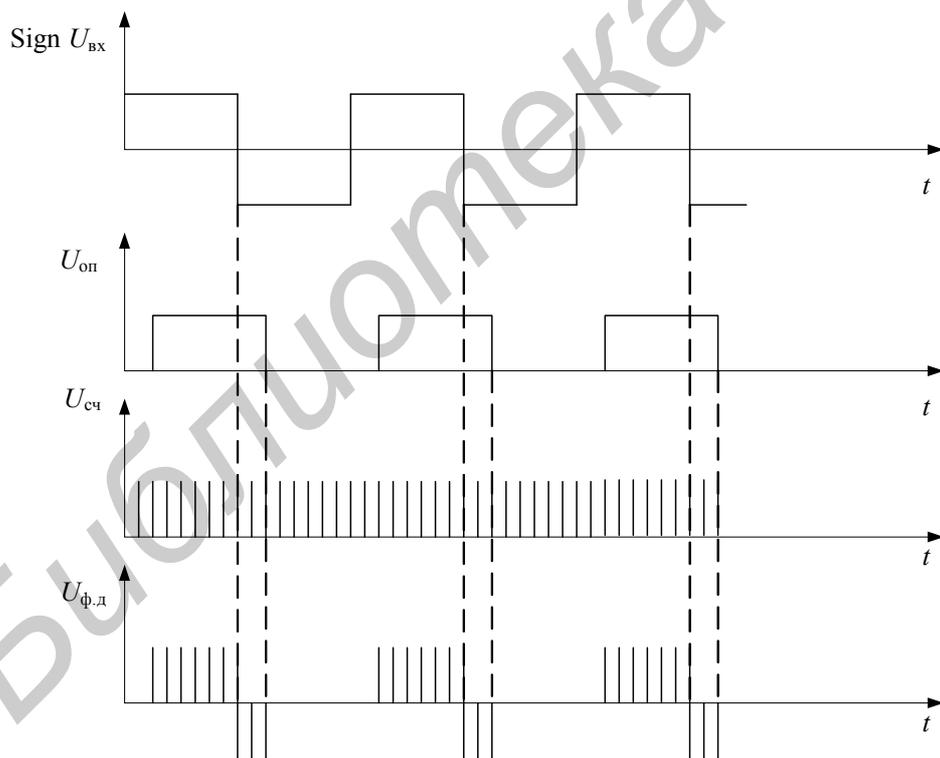


Рис. 4. Временные диаграммы

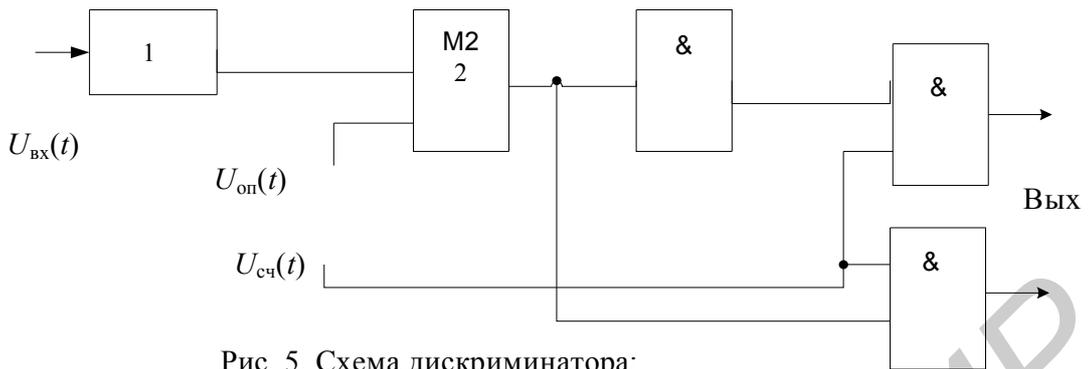


Рис. 5. Схема дискриминатора:  
1 – бинарный квантователь; 2 – сумматор по модулю 2

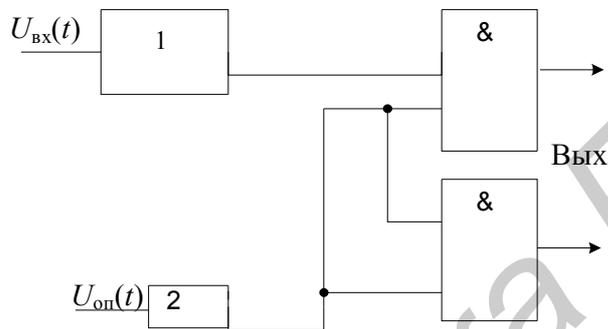


Рис. 6. Фазовый дискриминатор релейного типа:  
1 – бинарный квантователь; 2 – дифференцирующий элемент

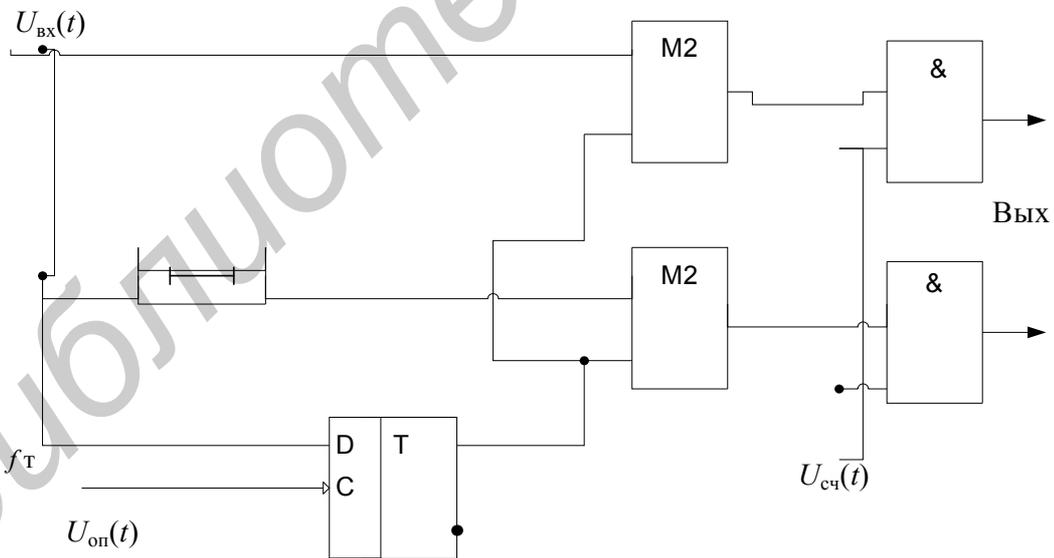


Рис. 7. Фазовый дискриминатор системы тактовой синхронизации

формируется с помощью элемента задержки (ЭЗ) на длительность элементарной посылки. Дискриминатор имеет пилообразную характеристику.

Цифровые фильтры реализуются аппаратным или программным способами. При выходном сигнале дискриминатора в виде унитарного кода в качестве цифровых фильтров используются дискретные усредняющие устройства (ДУУ), регулирующие коэффициент передачи петли. Наибольшее распространения получили ДУУ, выполненные на реверсивном счетчике. Реверсивный счетчик со считыванием накопленного результата и периодическим сбросом является цифровым интегратором с конечным временем памяти. Широко используется также реверсивный счетчик, выходным сигналом которого является импульс переполнения.

При построении ДУУ существуют два противоречивых требования: для уменьшения флюктуационной ошибки коэффициент усреднения должен быть большим, а для уменьшения времени вхождения в синхронизм и динамической ошибки его увеличение нежелательно. Для разрешения противоречия последовательно с реверсивным счетчиком может быть включен один или несколько двоичных элементов без сброса. Такие устройства при поочередном поступлении импульсов на их входы работают как реверсивный счетчик с коэффициентом пересчета одного разряда, а при поступлении импульсов только на один вход – как транслятор импульсов [2].

На рис. 8 представлена схема двоичного элемента без сброса и временные диаграммы, поясняющие его работу.

Последовательное включение реверсивного счетчика и одного или нескольких двоичных элементов без сброса позволяет создать ДУУ с переменным коэффициентом пересчета: при поступлении импульсов только на один вход ДУУ коэффициент пересчета равен коэффициенту пересчета только реверсивного счетчика, а при случайном поступлении импульсов на входы добавления и исключения коэффициент пересчета ДУУ равен сумме коэффициентов пересчета реверсивного счетчика и двоичных элементов без сброса.

В цифровом генераторе в зависимости от сигнала, поступающего с дискретного усредняющего устройства (цифрового фильтра), изменяется мгновенная или средняя частота последовательности импульсов.

В цифровой следящей системе (ЦСС) используется принцип дискретной коррекции фазы (или частоты) ЦГ. Основными модификациями ЦСС являются системы с устройством добавления – вычитания (УДВ) и с управляемым кодом синтезатором частот. На рис. 9 представлена структурная схема ЦСС с УДВ, а на рис. 10 – с управляемым кодом синтезатором частот. На рис. 11 изображена схема привязки, назначение и работа которой рассматривается ниже.

В ЦСС с УДВ к импульсной последовательности с частотой опорного генератора (ОГ) с помощью УДВ добавляется (вычитается) то или иное количество

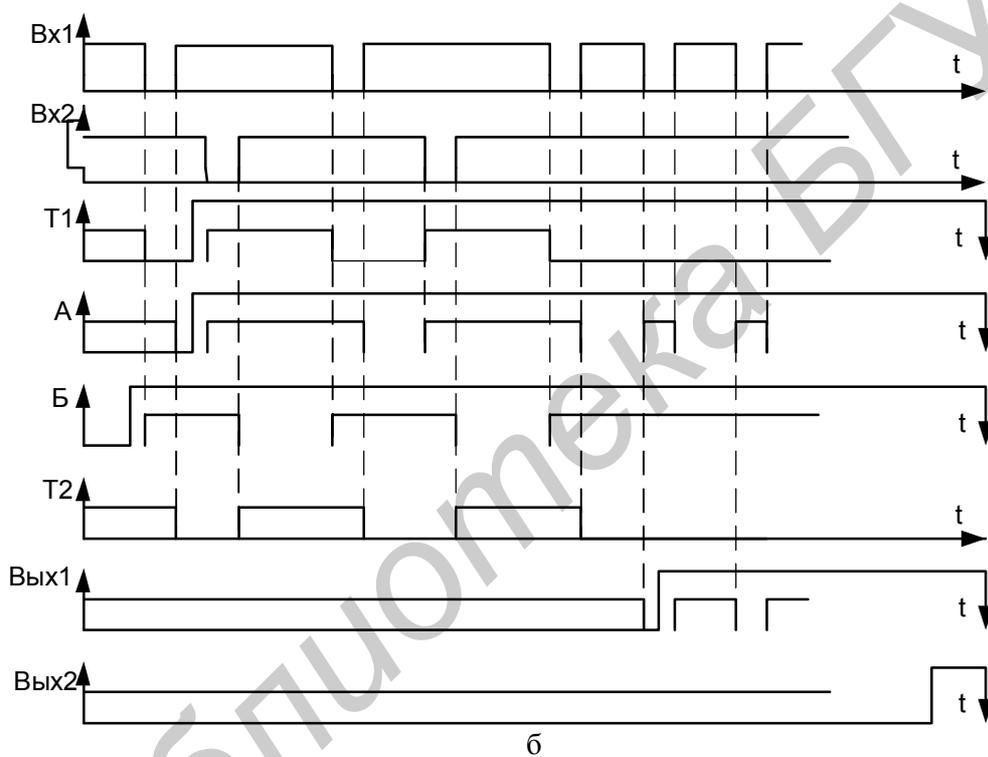
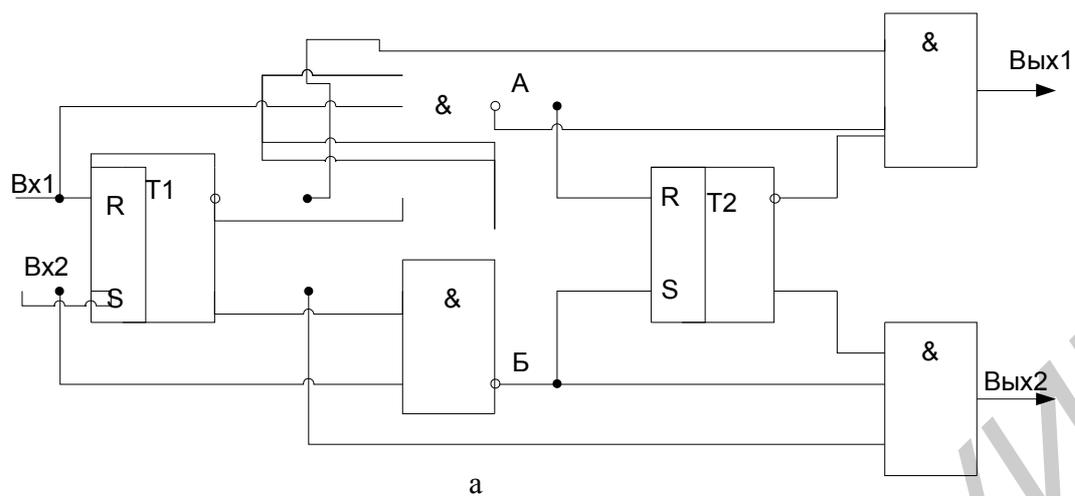


Рис. 8. Двоичный элемент без сброса:  
а – функциональная схема; б – временные диаграммы

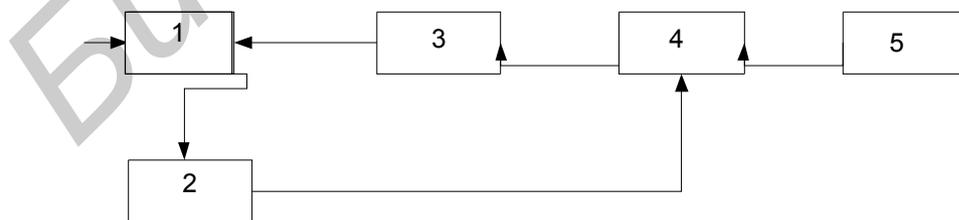


Рис. 9. Схема ЦСС с УДВ:  
1 – цифровой дискриминатор; 2 – цифровой фильтр; 3 – делитель;  
4 – УДВ; 5 – опорный генератор

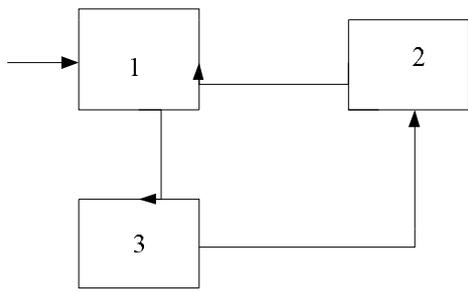


Рис.10 . Цифровая система с синтезатором частоты:

- 1 – цифровой дискриминатор;
- 2 – цифровой синтезатор частоты;
- 3 – цифровой фильтр

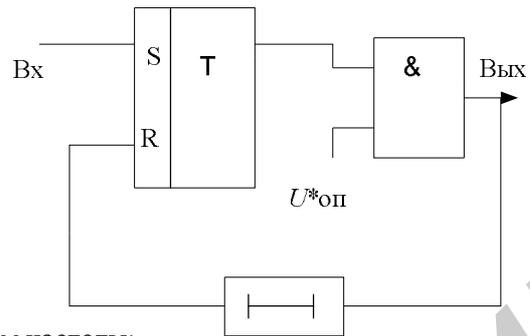


Рис. 11. Схема привязки

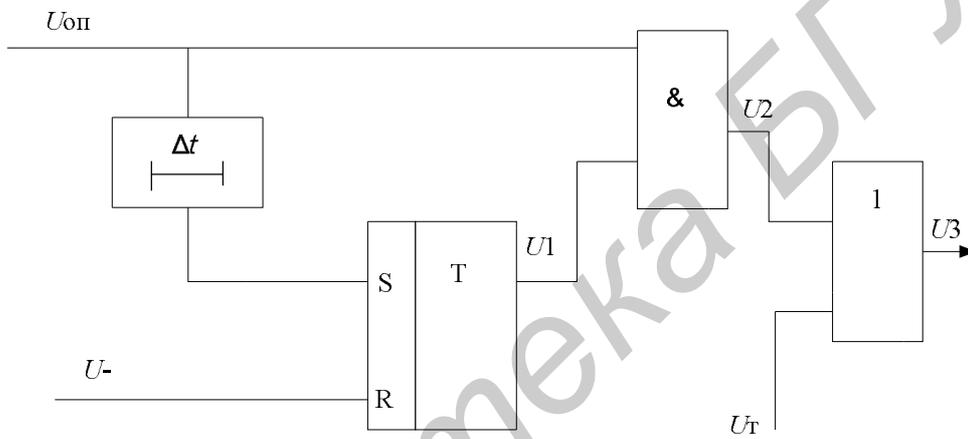


Рис. 12. Схема УДВ

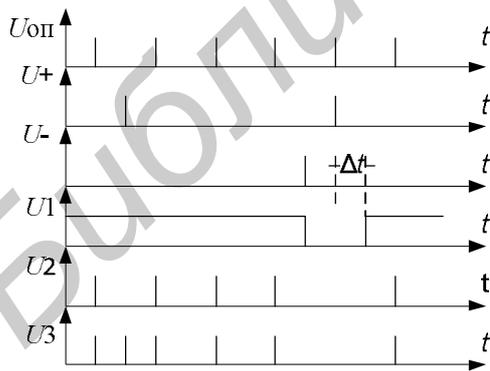


Рис. 13. Временные диаграммы работы УДВ

импульсов. При добавлении импульса фаза сигнала увеличивается на  $2\pi$ , а при вычитании уменьшается на  $2\pi$ . Делитель частоты (Д) уменьшает скачок фазы до величины  $2\pi/n_d$ , где  $n_d$  – коэффициент счета делителя. УДВ и делитель в совокупности составляют дискретный фазовращатель.

Следовательно, частота ОГ должна превышать частоту эталонного сигнала в  $n_d$  раз, а дискрет подстройки по фазе, определяющий точность подстройки, равен  $2\pi/n_d$ .

Схема УДВ приведена на рис. 12. На рис. 13 приведены временные диаграммы напряжений, поясняющие работу схемы. В схеме (см. рис. 12) вспомогательная последовательность импульсов для переброса RS-триггера в первоначальное состояние формируется задержкой импульсов опорного генератора. Величина задержки выбирается из условия

$$\tau_{\text{оп}} < \Delta t < \frac{0,5}{f_{\text{оп}}},$$

где  $\tau_{\text{оп}}$ ,  $f_{\text{оп}}$  – соответственно длительность импульсов и частота последовательности опорного генератора. При невысокой частоте входного сигнала ЦСС, как правило, с помощью ОГ формируется от двух до четырех импульсных последовательностей, сдвинутых одна относительно другой по фазе. Одна из них является исходной для формирования опорного сигнала ЦСС, а другие – вспомогательными последовательностями для обеспечения работы УДВ и фазового дискриминатора (последовательность счетных импульсов). Как видно из схемы (рис. 12), момент поступления импульсов управления не должен совпадать с импульсами опорного генератора. Для обеспечения необходимых временных соотношений между импульсами опорного генератора и импульсами управления, поступающими с ЦФ или ДУУ, используются схемы привязки. В схеме привязки формируются новые управляющие импульсы, жестко привязанные к последовательности  $U_{\text{оп}}(t)$ . В схеме привязки (см. рис. 11) для формирования новых управляющих импульсов используется вспомогательная последовательность  $U^*_{\text{оп}}(t)$ , сдвинутая относительно последовательности  $U_{\text{оп}}(t)$ , на полпериода. В исходном состоянии RS-триггер находится в состоянии «0», элемент И закрыт и импульсы последовательности  $U^*_{\text{оп}}(t)$  не проходят на выход схемы. Под воздействием входного управляющего импульса триггер перебрасывается в состояние «1», элемент И открывается и через него проходит импульс последовательности  $U^*_{\text{оп}}(t)$ . Задержанный элементом задержки (ЭЗ) импульс последовательности  $U^*_{\text{оп}}(t)$ , воздействуя на R-вход триггера, восстанавливает его исходное состояние.

Схема УДВ, представленная на рис. 12, используется при условии, что  $f_{ог} < f_{макс}$ . При частоте ОГ, близкой к предельной частоте функционирования элементной базы  $f_{макс}$ , УДВ может быть выполнен по схеме, представленной на рис. 14.

УДВ функционирует следующим образом. Импульс вычитания подается на S-вход триггера 4 и перебрасывает его в состояние «1». Низким уровнем напряжения с инверсного выхода триггера 4 закрывается элемент И 6, и очередной импульс опорного генератора 1 не проходит на вход счетного триггера 7, который является первым разрядом делителя. Элементы И 8, 9 в этот момент закрыты низкими уровнями напряжений, поступающих соответственно с выхода триггера 3 и инверсного выхода триггера 4. Восстановление первоначального состояния триггера 4 производится задержанным элементом задержки 5 импульсом опорного генератора 1. Формирователь 2 обеспечивает формирование коротких импульсов, привязанных к фронту (или срезу) импульсов опорного генератора 1. Импульс добавления подается на вход триггера 3 и перебрасывает его в состояние «1». При этом на вход элемента И-НЕ 8 подается высокий уровень напряжения, а на вход элемента И-НЕ 6 – низкий. Очередной импульс опорного генератора 1, минуя счетный триггер 7, поступает непосредственно на второй разряд делителя, что эквивалентно добавлению импульса в последовательность опорного генератора. Восстановление первоначального состояния триггера 3, как и триггера 4, производится импульсом опорного генератора, задержанным на элементе 5.

При отсутствии управляющих импульсов последовательность опорного генератора 1 через открытый элемент И-НЕ 6 подается на вход счетного триггера 7.

Таким образом, в основе построения рассмотренных выше цифровых систем лежит принцип дискретного изменения фазы (или частоты) опорного сигнала. При этом для обеспечения приемлемой для практики точности синхронизации, определяемой величиной дискрета подстройки фазы опорного сигнала, частота опорного генератора в системе должна быть существенно выше (примерно на два порядка) частоты формируемого опорного сигнала, а входного сигнала. При высокой частоте входного сигнала такое соотношение частот является или недостижимым вследствие ограниченности быстродействия элементной базы, или приводит к техническим и технологическим сложностям, так как ряд узлов должен работать на частотах, в десятки раз превышающих частоту входного сигнала. В конечном итоге следствием этого является ограничение сверху частотного диапазона функционирования цифровых следящих систем.

На рис. 15 представлена схема цифрового управляемого генератора, позволяющая значительно расширить диапазон рабочих частот цифровых следящих систем путем уменьшения различия частот опорного генератора и входного сигнала. Как видно из рис. 15, рассмотренный ранее цифровой опорный генератор дополнен формирователем, двумя управляемыми генераторами и переключателем. Частота опорного генератора и частота управляемого генератора связаны соотношением

$$f_{o.r} = m \cdot \frac{f_{y.r}}{(m \pm 1)}. \quad (1)$$

При этом  $f_{y.r} = f_{y.r_1} = f_{y.r_2}$ ;  $m \gg 1$  – целое число.

Для обеспечения выполнения соотношения (1) и подстройки фазы управляемого сигнала из высокостабильного сигнала опорного генератора с помощью делителя и формирователя формируется синхросигнал, которым периодически фазирован каждый из управляемых генераторов. В качестве управляемых генераторов использованы генераторы ударного возбуждения.

Период синхросигнала равен

$$T_c = m t_{o.r} = (m + 1) t_{y.r}, \quad (2)$$

где  $t_{o.r} = 1 / f_{o.r}$  – период сигнала опорного генератора;

$t_{y.r} = 1 / f_{y.r}$  – период сигнала управляемого генератора.

Таким образом, период синхросигнала равен целому числу ( $m$ ) периодов сигнала опорного генератора и целому числу ( $m+1$ ) периодов сигнала УГ. Поэтому периодическое фазирование управляемых генераторов и поочередное подключение их выходов к выходу схемы не приведет к изменению фазы выходного сигнала, поскольку синхросигнал, как следует из (2), синфазен с управляемым сигналом.

Зададим периоду синхросигнала приращение на величину  $\pm t_{o.r}$ . Как следует из соотношения (2), приращение в единицах  $t_{o.r}$  составит

$$\pm t_{o.r} = \pm \left( t_{y.r} + \frac{1}{m} t_{y.r} \right). \quad (3)$$

Следовательно, если фаза сигнала УГ жестко привязана к фронту синхросигнала, то изменение периода следования последнего на величину  $\pm t_{o.r}$  приведет к изменению временного положения фронта синхросигнала относительно фронта выходного управляемого сигнала в силу периодичности последнего, как следует из (3), на величину

$$\pm \Delta t = \pm \frac{t_{y.r}}{m}.$$

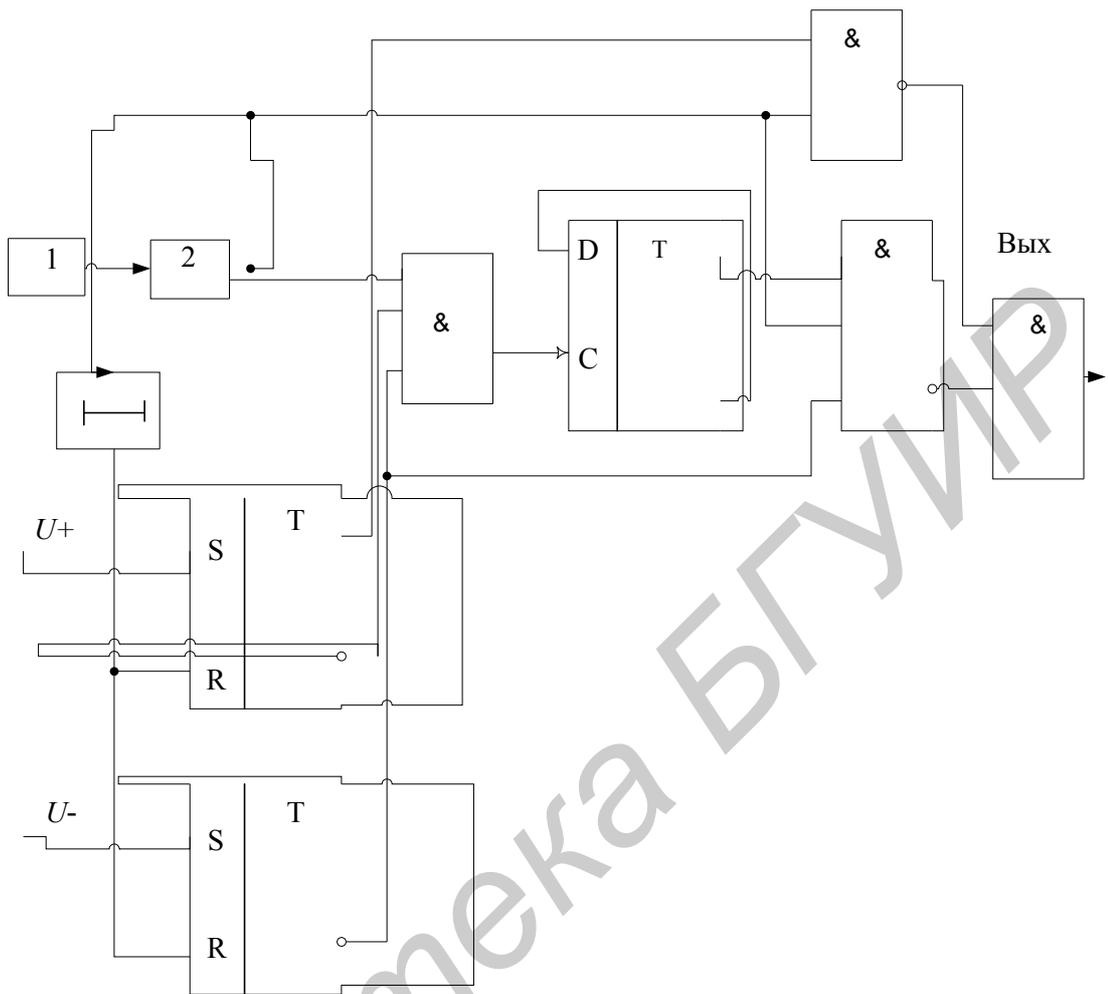


Рис. 14. Схема устройства добавления – вычитания импульсов:  
1 – опорный генератор; 2 – формирователь

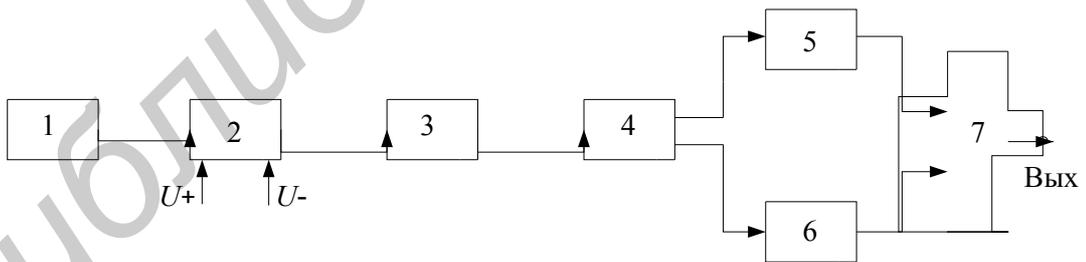


Рис. 15. Схема цифрового управляемого генератора:  
1 – опорный генератор; 2 – УДВ; 3 – делитель;  
4 – формирователь управляющих сигналов; 5, 6 – управляемый генератор;  
7 – переключатель (элемент ИЛИ)

Это соответствует коррекции фазы управляемого сигнала на дискрет, равный  $\pm \Delta\varphi$ ,

где 
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{m}.$$

Временное положение синхросигнала корректируется на интервал, кратный  $t_{0.г}$  известным методом добавления – исключения с помощью схемы, изображенной на рис. 14.

Схема цифрового синтезатора частоты (ЦСЧ) со сложением импульсной последовательности представлена на рис. 16. Управляющий код является двоичным и формируется (хранится) в реверсивном счетчике или регистре. Из исходной последовательности импульсов с частотой  $f_T$  с помощью делителей (триггеры Т1 – Т4) формируется набор последовательностей с номерами  $1, 2, \dots, l$  ( $l$  – число двоичных разрядов в коде  $Z_y$ ). Частоты последовательностей отличаются одна от другой в два раза. Для того, чтобы не происходило наложения импульсов при последующем суммировании последовательностей, на счетный вход каждого последующего разряда подается последовательность с прямого выхода триггера предыдущего разряда, а на элементы И – инверсного. Таким образом, каждая последующая импульсная последовательность сдвигается относительно предыдущей на половину периода. С инверсного выхода каждого из триггеров последовательности подаются на дифференцирующий элемент Д, который производит формирование коротких импульсов. Далее последовательности импульсов, совпадающие с номерами разрядов управляющего кода, в которых записаны единицы, проходят на выходы элементов И и суммируются. При числе разрядов двоичного представления кода, равном  $l$ , выражение для частоты сигнала на выходе элемента ИЛИ может быть записано в виде

$$f_{\text{вых}} = \delta_1 \cdot 2^{-1} f_T + \delta_2 \cdot 2^{-2} f_T + \delta_3 \cdot 2^{-3} f_T + \dots + \delta_l \cdot 2^{-l} f_T = Z_y \cdot 2^{-l} f_T,$$

где  $\delta_l$  – значение соответствующего разряда управляющего кода,  $\delta_l = 1$  или  $0$ .

При изменении кода  $Z_y$  от минимального значения  $Z_{y \text{ мин}}$  до максимального  $Z_{y \text{ макс}}$

$$Z_{y \text{ макс}} = \frac{2^l - 1}{2^l}.$$

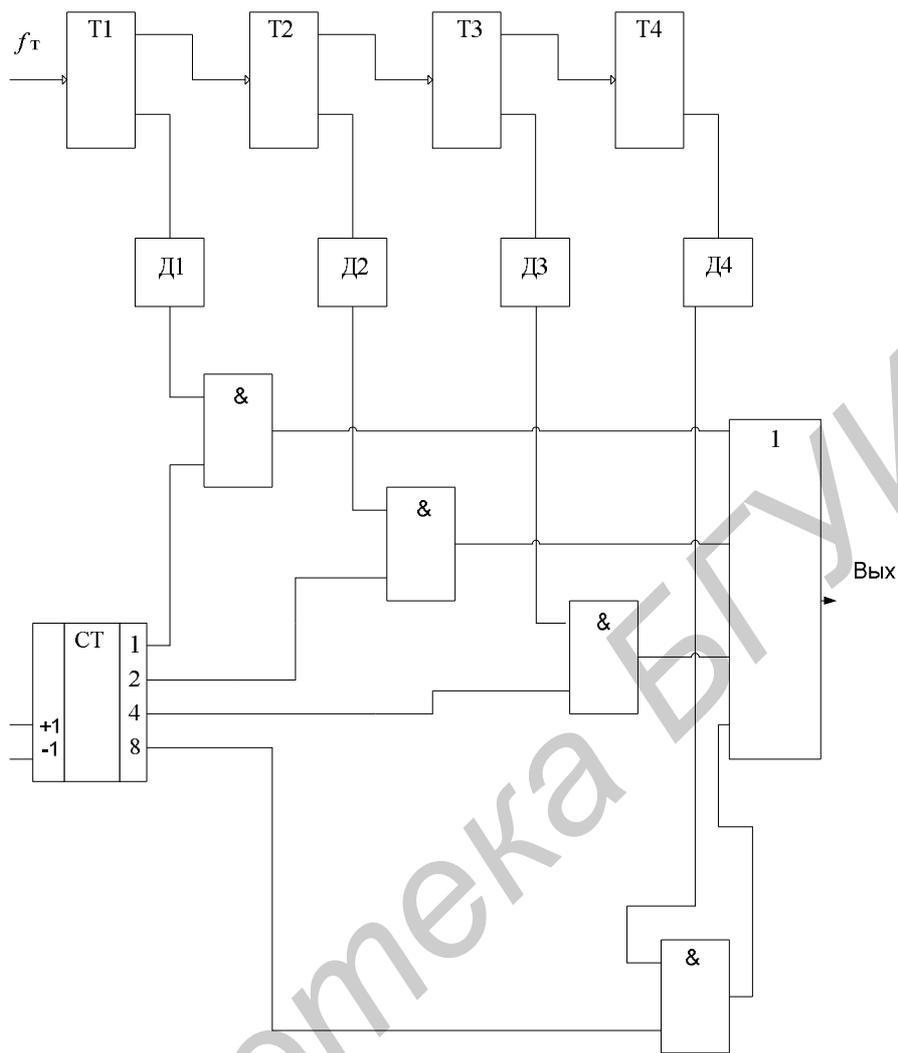


Рис. 16. Схема цифрового синтезатора частот с суммированием импульсных последовательностей

Частота  $f_{\text{ВЫХ}}$  будет изменяться с дискретом  $f_{\text{T}}/2^l$  от  $f_{\text{ВЫХ}} = 0$  до

$$f_{\text{ВЫХ}} = (2^l - 1) \cdot f_{\text{T}} / 2^l \approx f_{\text{T}}.$$

Для уменьшения скачков фазы используется делитель, что приводит к уменьшению диапазона синтезируемых частот и дискрета по частоте в число раз, равное коэффициенту деления делителя  $n_{\text{д}}$ . Выходная частота синтезатора с делителем на выходе равна

$$f_{\text{ВЫХ}} = Z_{\text{y}} \cdot f_{\text{T}} / 2^l \cdot n_{\text{д}}.$$

С другими типами синтезаторов можно ознакомиться в [1].

## 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает цифровую систему фазовой синхронизации, выполненную на основе УДВ, цифровой синтезатор частот, собранный по схеме рис. 14, и цифровой генератор опорного сигнала, собранный по схеме рис. 13. Структурная схема лабораторной установки представлена на передней панели.

ЦФС состоит из задающего (опорного) генератора (ЗГ), формирователя импульсов (ФТИ), формирователя импульсных последовательностей (ФП), устройства добавления – вычитания импульсов (УДВ), делителей, реверсивного счетчика и фазового дискриминатора (ФД).

Программная часть лабораторной работы содержит имитационные модели фазовых дискриминаторов (рис. 5, 6) с усредняющими устройствами на реверсивных счетчиках, цифрового синтезатора частот (рис. 14), устройства добавления – вычитания (рис. 11, а) с делителем частоты, схемы привязки. Программная часть выполнена в среде Simulink.

## 3. СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Изучить принципы построения цифровых следящих систем и схемы основных функциональных узлов.
2. Исследовать осциллограммы напряжений в контрольных точках.
3. Снять зависимость выходной частоты синтезатора от значения управляющего кода.
4. Определить величину дискрета подстройки фазы, обеспечиваемую схемой цифрового управляемого генератора.

5. Измерить частоты  $3\Gamma$ , выходного управляемого сигнала, разностную частоту и проверить выполнение соотношения (1,2), определить значение величины дискрета подстройки фазы  $\Delta\varphi$ .

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

1. Включить тумблер «Сеть». По свечению индикаторной лампы убедиться в наличии питающего напряжения. Подключить гнездо  $\perp$  к корпусу осциллографа, гнездо  $\Gamma 21$  – ко входу внешней синхронизации осциллографа.

2. Исследовать осциллограммы напряжений в контрольных точках цифровой следящей системы  $\Gamma 1 - \Gamma 10$  в режиме синхронизации, при максимальном рассогласовании по фазе опорного и эталонного сигнала и при отсутствии эталонного сигнала.

3. Исследовать осциллограммы в контрольных точках цифрового синтезатора частоты ( $\Gamma 11 - \Gamma 18$ ). С помощью осциллографа снять зависимость частоты от значения управляющего кода.

4. Исследовать осциллограммы напряжений в контрольных точках цифрового управляемого генератора ( $\Gamma 20 - \Gamma 28$ ). Исследовать процесс коррекции фазы управляемого сигнала, формируя импульсы управления с помощью кнопок 7 и 8, определить величину дискрета подстройки фазы.

5. Измерить частоту задающего генератора, частоту выходного управляемого сигнала и разностную частоту.

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

1. Изучить принципы построения цифровых систем радиоавтоматики и схемы основных функциональных узлов.

2. Исследовать осциллограммы напряжений в контрольных точках функциональных узлов.

3. Снять зависимость выходной частоты синтезатора от значения управляющего кода.

4. Из функциональных узлов собрать замкнутую цифровую систему фазовой синхронизации, выполнить настройку модели, исследовать осциллограммы в контрольных точках, оценить время вхождения в синхронизм, определить дискрет подстройки фазы.

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

1. Для запуска программы моделирования необходимо:
    - загрузить систему MATLAB (6.5 или более поздних версий);
    - запустить Simulink, нажав кнопку Simulink в панели инструментов или исполнив в командной строке команду «>> simulink»;
    - нажав кнопку обзора «Browse for folder», выбрать директорию, в которую были помещены файлы программы;
    - открыть папку с файлами исследуемых моделей, выбрать и открыть соответствующий файл, после чего исследуемая модель должна отобразиться графически.
  2. Для исследования функциональных узлов необходимо:
    - поочередно загрузить соответствующие модели;
    - установить параметры входных сигналов;
    - произвести моделирование нажатием клавиши «Start» или выбором из меню «Simulation» команды «Start»;
    - зафиксировать временные диаграммы в окнах осциллографов Scope.
- Примечание. Вариант и объем работы определяется преподавателем.

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Структурная схема лабораторной установки, схемы имитационных моделей.
3. Временные диаграммы в контрольных точках схемы.
4. Экспериментальный и теоретический графики зависимости частоты на выходе ЦСЧ от значения управляющего кода.
5. Результаты измерений параметров цифрового управляемого генератора.
6. Выводы и замечания по работе.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип и особенности построения цифровых систем радиоавтоматики.
2. Изобразите структурную схему ЦФС с УДВ, с ЦСЧ и поясните их особенности.
3. Изобразите схему ЦСЧ, временные диаграммы его работы и дайте необходимые пояснения.
4. Изобразите схемы основных элементов ЦСЧ (фазовый дискриминатор, УДВ, схема привязки, двоичный элемент без сброса) и временные диаграммы, поясняющие их работу.
5. Проанализируйте зависимость частоты на выходе ЦСЧ от значения управляющего кода. При каких значениях управляющего кода расстановка импульсов в выходной последовательности является равномерной?
6. Проанализируйте возможность и особенности построения схемы цифрового управляемого генератора при изменении знака разностной частоты сигналов ЗГ и выходного управляемого сигнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровые системы фазовой синхронизации / под ред. М. И. Жодзишского. – М. : Сов. радио, 1980. – 208 с.
2. Шляпоберский, В. И. Основы техники передачи дискретных сообщений / В. И. Шляпоберский. – М. : Связь, 1973. – 480 с.
3. Первачев, С. В. Радиоавтоматика : учебник для вузов / С. В. Первачев. – М. : Радио и связь, 1982. – 295 с.
4. Коновалов, Г. Ф. Радиоавтоматика : учебник для вузов по спец. «Радиотехника» / Г. Ф. Коновалов. – М. : ИПРЖР, 2003. – 288 с.
5. Дьяконов, В. П. MATLAB R2006/2007/2008+Simulink 5/6/7. Основы применения / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2008. – 799 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы.....	3
1. Краткие теоретические сведения.....	3
2. Описание лабораторной установки.....	17
3. Содержание лабораторной работы.....	17
4. Порядок выполнения.....	18
5. Содержание лабораторной работы при использовании программной реализации.....	18
6. Порядок выполнения.....	19
7. Содержание отчета.....	19
8. Контрольные вопросы.....	20
Литература.....	20

Библиотека БГУИР

*Учебное издание*

**Ганкевич Сергей Антонович**

## *ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ РАДИОАВТОМАТИКИ*

Методическое пособие  
к лабораторной работе по дисциплинам «Радиоавтоматика» для студентов  
специальности 1-39 01 01-01 «Радиотехника (устройства и системы)»,  
«Автоматическое управление в системах цифровой радиосвязи» для студентов  
специальности 1-39 01 01-02 «Радиотехника (техника цифровой радиосвязи)»  
и «Автоматика информационных систем» для студентов  
специальности 1-39 01 04 «Радиоинформатика»  
всех форм обучения

Редактор Е. Н. Батурчик  
Корректор А. В. Тюхай  
Компьютерная верстка Ю. Ч. Клочкевич

---

Подписано в печать 21.10.2011.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 1,5.

Формат 60x84 1/16.  
Отпечатано на ризографе.  
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 1,51.  
Заказ 246.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6