

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

В. А. Глазунов

Цифровые системы передачи информации

Электронное учебное пособие

САМАРА

2012

УДК 621.397.132
Г 525

Автор: Глазунов Владислав Александрович

Глазунов, В. А. Цифровые системы передачи информации [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. А. Глазунов; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (1,5 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В пособии рассматриваются особенности построения цифровых многоканальных систем передачи информации и методика расчета основных параметров на примере цифровых систем сотовой связи, радиотелеметрических систем и систем цифрового телевидения.

Учебное пособие предназначено магистрантам радиотехнического факультета направления подготовки 210400.68 «Радиотехника», изучающих дисциплину «Цифровые системы передачи информации» в 10 семестре.

Пособие разработано на кафедре радиотехнических устройств.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень сокращений.....	4
Введение.....	5
1. Многоканальные системы передачи информации с импульсными поднесущими..	7
1.1 Принципы временного уплотнения и разделения каналов.....	7
1.2 Импульсно-временное кодирование.....	9
1.3 Функциональная схема передающей части системы.....	10
1.4 Функциональная схема приемной части системы.....	12
1.5 Контрольные задания/тесты по первому разделу.....	14
1.6 Отчет по первому разделу.....	14
2. Методы оцифровки аналоговых сигналов. Многоканальные ЦСПИ с ВРК и ЧРК.	15
2.1 Методы оцифровки аналоговых сигналов.....	15
2.2 Цифровые многоканальные СПИ.....	20
2.2.1 Цифровые многоканальные СПИ с КИМ (ДИКМ) – ВРК.....	20
2.2.2 Цифровые многоканальные СПИ с ДМ – ЧРК.....	23
2.2.3 Цифровые многоканальные СПИ с ДМ – ВРК.....	24
2.2.4 Цифровые многоканальные СПИ с КИМ – ЧРК.....	24
2.3 Контрольные задания/тесты по второму разделу	26
2.4 Письменный отчет по второму разделу.....	26
3 Кодовые методы уплотнения и разделения каналов (КРК) в цифровых СПИ.....	27
3.1 Псевдощумовые сигналы (функции Уолша и М-последовательности).....	27
3.2 ЦСПИ с КРК на основе ПШС.....	29
3.3 ЦСПИ с частотно-временным кодированием (ЧВК).....	33
3.4 Контрольные задания/тесты по третьему разделу.....	36
3.5 Письменный отчет по третьему разделу.....	36
4 ЦСПИ с помехоустойчивым кодированием.....	38
4.1 Помехоустойчивое кодирование.....	38
4.2 Контрольное задание/тесты по четвертому разделу.....	46
4.3 Самостоятельная работа по четвертому разделу.....	47
Список использованных источников.....	48

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

РТС ПИ – радиотехническая система передачи информации;

ЦСПИ – цифровая система передачи информации;

СПР – схема принятия решения;

ИМС – интегральная микросхема;

Рг – регенератор импульсов;

КСИ – кадровый синхроимпульс;

ДИ – делитель импульсов;

ГТИ – генератор тактовых импульсов;

СПИ – система передачи информации;

АЦП – аналогово-цифровое преобразование;

ЦАП – цифро-аналоговое преобразование;

АМн – амплитудная манипуляция;

ЧМн – частотная манипуляция;

ФМн – фазовая манипуляция;

КИМ – кодово-импульсная модуляция;

ДМ – дельта-модуляция;

ДИКМ – дифференциальная кодово-импульсная модуляция;

С/П – отношение сигнала к помехе.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время бурно развивается цифровая техника в самых различных областях и сферах нашей жизни. Большая часть радиоэлектронной аппаратуры, реализованной ранее в аналоговом варианте, теперь имеет цифровое исполнение. Этап перехода от аналогового варианта к цифровому не происходит мгновенно, и поэтому существует масса устройств, сочетающих в себе элементы аналогового и цифрового методов схемотехники.

Такая ситуация легко просматривается в современной технике передачи информации, и в частности в системах сотовой связи, в телевидении, в радиотелеметрии. Если в передающей части сотовых станций уже давно произошел переход к цифровым методам кодирования и обработки информации, то при передаче информации используется частотное уплотнение, а на другом конце – в приемниках все еще остаются либо полностью аналоговыми, либо с частичной цифровой обработкой информации.

Цифровые методы обработки сигналов существенно расширяют возможности дальнейшего развития сетей связи, и обладают рядом технических и эксплуатационных преимуществ перед аналоговыми. Из основных можно указать следующие:

- малое влияние аппаратурных погрешностей на точность передачи сообщений,
- высокая помехоустойчивость. Сообщение будет искажено лишь при неправильном приеме символов цифровой последовательности, т. е. при достаточно большой мощности помехи;
- возможность регенерации сигналов (восстановления их формы) при ретрансляции.

Особое место при исследовании цифровых систем передачи информации занимают вопросы идентификации абонента и синхронизации при декодировании цифро-

вой информации, поэтому демонстрация и оценка показателей цифровых систем передачи информации в учебном процессе имеют важное значение. Вопросам изучения принципов построения цифровых систем передачи информации, и в частности ее приемо-передающих устройств, методам модуляции, синхронизации и уплотнения сигналов и посвящено данное учебное пособие.

1. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ИМПУЛЬСНЫМИ ПОДНЕСУЩИМИ

1.1 Принципы временного уплотнения и разделения каналов

При организации радиосвязи между подвижными объектами (автомобилями, самолетами, судами возникает необходимость передавать сигналы от всех источников сообщений в одном и том же диапазоне частот. Эта задача решается в системах с временным и кодово-адресным разделением, в которых в качестве переносчиков используются импульсные поднесущие или кодовые последовательности (группы) импульсов, различные для разных абонентов.

Временное уплотнение каналов основано на дискретизации непрерывных сообщений по времени. При таком уплотнении используется набор импульсных поднесущих, не перекрывающихся во времени. Каждая поднесущая модулируется своим непрерывным сообщением в соответствующем канальном модуляторе. Естественно, что частота повторения импульсов в этих поднесущих (период дискретизации) должна удовлетворять условию теоремы Котельникова:

$$T_{\Pi} \leq 1/2F_{\max i}, \text{ или } F_{\Pi}=1/T_{\Pi} \geq 2F_{\max i} \text{ для всех } N \text{ каналов } (i=1,2, \dots N).$$

Многоканальный групповой сигнал $U_{\Sigma}(t)$ образуется в результате линейного объединения (суммирования) модулированных импульсов поднесущих. Очевидно, что ширина спектра группового сигнала Π_{Σ} однозначно определяется длительностью импульсов поднесущих и приблизительно равна величине $\Pi_{\Sigma} \approx 1/\tau$.

Временное уплотнение осуществляется в синхронном режиме. Для этого в устройстве уплотнения формируется периодическая последовательность синхроимпульсов с периодом T_{Π} . В каждом цикле сначала передается синхроимпульс длительностью τ_c , а затем поочередно импульсы всех N каналов. В зависимости от вида импульсной модуляции каждому каналу в интервале T_n отводится определенное время τ_k , которое включает интервал, занимаемый каналом с учетом модуляции и временной защитный интервал, вводимый для уменьшения взаимного влияния соседних каналов и облегчения разделения каналов в приемной части системы связи. Итак,

$$T_{\Pi} = (N + \kappa) \tau_k, \text{ где } \kappa - \text{число канальных интервалов, затрачиваемых на синхронизацию.}$$

Число каналов, которое может быть получено при временном уплотнении N_{BPK} равно $N_{BPK} = (T_{II} - \tau_c) / \tau_k$. Увеличить число каналов можно лишь укорачивая длительность импульсов, т.е. расширяя полосу частот, занимаемую групповым сигналом.

В качестве импульсных поднесущих используются как аналоговые методы (АИМ, ШИМ, ВИМ), так и цифровые (кодово-импульсная модуляция КИМ, импульсно-временной код ИВК).

При АИМ длительность рабочего импульса составляет половину канального интервала, поэтому ширина спектра группового сигнала равна $\Pi_{АИМ} = 2/\tau_k$. При ШИМ минимальная длительность импульса и защитный интервал равны, поэтому $\tau_{min} = (1 - m_\tau) \tau_k / 2$, где m_τ - индекс ШИМ. Аналогично при ВИМ $\tau_{ВИМ} = (1 - m_t) \tau_k / 2$, где m_t - индекс ВИМ. Соответственно $\Pi_{ШИМ} = 1/\tau_{min}$ и $\Pi_{ВИМ} = 1/\tau_{ВИМ}$.

Полоса частот, занимаемая передаваемым результирующим $U_p(t)$ (модулированным высокочастотным) сигналом, находится по формулам:

$$P_p = 2/\tau_{АИМ} = 4/\tau_k \quad \text{для АИМ-АМ,}$$

$$P_p = 2/\tau_{ВИМ} \quad \text{для ВИМ-АМ,}$$

$$P_p = 2/\tau_{ШИМ min} \quad \text{для ШИМ-АМ.}$$

Центральная (несущая) частота передаваемого сигнала должна быть не менее $10/\tau_{min}$.

Для ЧМ-несущей учитывается увеличение полосы частот, занимаемой результирующим сигналом, на $2f_\delta$, где f_δ - девиация частоты несущей, рассчитываемая через индекс ЧМ $m_{чм}$:

$$m_{чм} = f_\delta / P_\Sigma, \text{ где } P_\Sigma = 1/\tau_{min} - \text{ширина спектра группового сигнала.}$$

Для построения спектра результирующего сигнала и расчета его полосы применяются известные формулы для нахождения ширины спектра [1], причем процесс расчета необходимо проводить с учетом того, что для каждого последующего спектра предыдущий сигнал играет роль модулирующего. Например, для сигнала ШИМ - ЧМ при заданном числе каналов N с максимальной частотой входных аналоговых сигналов F_{max} и индексах $m_{чм}$, m_τ последовательно вычисляем:

- период опроса $T_{II} = 1/2 F_{max}$,
- канальный интервал $\tau_k = (T_{II} - \tau_c) / N$, или $\tau_k = T_{II} / (N + \kappa)$

- минимальную длительность импульсов ШИМ $\tau_{\min} = \tau_k (1 - m_\tau) / 2$,
- полосу ШИМ $P_{\text{ШИМ}} = 1 / \tau_{\min}$,
- полосу ШИМ-ЧМ $P_{\text{ШИМ-ЧМ}} = 2 P_{\text{ШИМ}} (1 + m_{\text{ЧМ}}) = 2 (1 + m_{\text{ЧМ}}) / \tau_{\min}$.

1.2 Импульсно-временное кодирование

Для передачи выборок аналоговых сигналов можно использовать импульсно-временной код ИВК, представляющий собой группу из L импульсов, определенным образом расставленных во времени. Расстановка импульсов ИВК для всех каналов может быть одинаковой для всех каналов при временном разделении каналов, или различной, например при одновременной передачи канальных сигналов. В последнем случае каждая комбинация ИВК состоит из импульсов, расположенных на различных дискретных интервалах, и является адресом данного канала.

Число элементов ИВК L выбирается исходя из требуемой помехоустойчивости СПИ: при малом числе импульсов возрастает вероятность возникновения ложных сигналов под действием помех, а с увеличением L повышается вероятность подавления кода. Практически число L выбирается в пределах от 3-х до 10-ти импульсов [2] в пределах временной базы, равной $T_{\text{ИВК}} = S \tau_0$, где s - максимальное число временных дискретов, $T_{\text{ИВК}}$ - длительность ИВК-посылки.

Информация, передаваемая ИВК-кодом, пропорциональна временному отрезку между началом кода и тактовой точкой, как это происходит при использовании ВИМ. Ширина спектра ИВК находится аналогично ВИМ и составляет $P_{\text{ИВК}} = 1/\tau_0 = s/T_{\text{ИВК}}$.

Упражнения по пройденному материалу.

1. Для передачи сообщений с $F_m = 10,0$ кГц методом временного уплотнения используется ШИМ - ЧМ с частотами манипуляций 2 и 5 МГц и индексами $m_\tau = 0,6$, $m_{\text{ЧМ}} = 3$. Затраты на синхронизацию составляют два канальных интервала. Найти 1) полосу частот, занимаемую результирующим сигналом и 2) рассчитать максимально возможное число сообщений, которое может быть передано по СПИ.

Возможные ответы на первую часть примера:

1) 3 МГц; 2) 3,020 МГц; 3) 4,0 МГц; 4) 5,0 МГц.

Возможные ответы на вторую часть примера: 1) 3; 2) 10; 3) 150; 4) 300.

2. Для передачи 8 сообщений методом ШИМ-АМ выделена полоса в 200 кГц. Затраты на синхронизацию составляют 2 канальных интервала. Определить максимально возможную частоту передаваемых сообщений, если значение индекса ШИМ составляет 0,8. Возможные ответы 1) 0,5кГц ; 2) 1,0 кГц ; 3) 5.0кГц; 4) 20кГц.

3. Спектр сигнала ВИМ-АМ, предназначенного для передачи 10 сообщений, имеющих максимальную частоту $F_m = 4\text{кГц}$, занимает полосу частот от 2,5 до 3 МГц. Затраты на синхронизацию составляют один канальный интервал. Найти индекс ВИМ.

4. Для передачи 5 сообщений методом ВИМ-ЧМ с индексом $m_{\text{чм}} = 3$ выделена полоса в 8 МГц. Затраты на синхронизацию составляют 2 канальных интервала. Найти максимально-возможную частоту передаваемых сообщений при индексе ВИМ $m_t = 0,9$.

1.3 Функциональная схема передающей части системы

Пример функциональной схемы передающей части СПИ для $N=3$ и $k=3$ (при $\tau_c = 2\tau_{\kappa}$) представлен на рисунке 1.1. С принципиальной схемой СПИ с ВРК можно ознакомиться в методических указаниях к лабораторной работе № 1 “РТС ПИ с ВРК” [3].

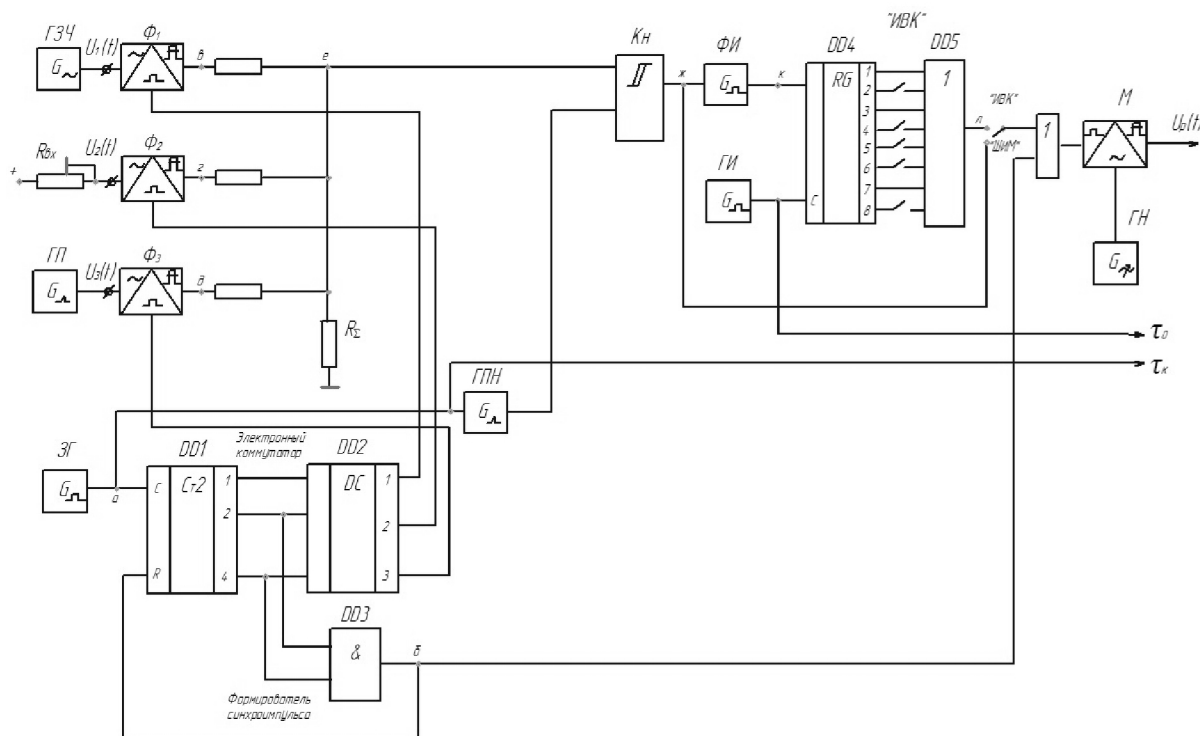


Рисунок 1.1 - Функциональная схема передающей части СПИ

В передающей части многоканальной СПИ формирование АИМ осуществляется с помощью ключевых элементов – канальных модуляторов АИМ $\Phi_1 - \Phi_3$. В качестве примера на рисунке 1.1 на информационные входы ключей поданы синусоидальный сигнал $U_1(t)$ от стандартного генератора звуковой частоты (ГЗЧ), постоянное напряжение $U_2(t)$, задаваемое с помощью резистора $R_{вх}$ и пилообразный сигнал $U_3(t)$ от генератора пилы ГП. На управляющие входы ключей подаются временные интервалы τ_k с выхода электронного коммутатора ЭК, представляющего собой либо сдвиговый регистр [3], либо двоичный счетчик СТ2 (DD1) с двоично-десятичным преобразователем (дешифратором DD2). Работа ЭК определяется канальными импульсами, вырабатываемыми задающим генератором ЗГ, частота которого определяется максимальной частотой спектра передаваемых сообщений F_{max} : $F_{ЗГ} \geq 2F_{max}$. Для получения синхроимпульса заданной длительности сигналы с выхода второго и третьего триггеров двоичного счетчика СТ2 поступают на схему совпадения DD3, и с приходом каждого шестого канального импульса триггеры счетчика возвращаются в исходное состояние. В результате обеспечивается необходимая длительность (два канальных интервала) и период следования (шесть интервалов) синхроимпульсов: $T_{II} = 6 \tau_k$.

Для преобразования АИМ в ШИМ использован компаратор напряжения Кн и генератор пилообразного напряжения ГПН с периодом τ_k . Линейно-пилообразное напряжение ГПН сравнивается с амплитудой АИМ. Если передний фронт импульсов на выходе компаратора соответствует началу тактовых импульсов (началу пилы), то задний фронт по времени совпадает с моментом равенства амплитуды АИМ и ГПН. В результате формируется импульс ШИМ. При этом канальный защитный интервал обеспечивается выбором крутизны пилы.

По заднему фронту ШИМ с помощью формирователя ФИ образуется импульс ВИМ. Длительность $\tau_{ВИМ}$ приблизительно равняется длительности $\tau_{ВИМmin}$, а его положение относительно тактовой точки содержит информационную составляющую.

С выхода ФИ импульс ВИМ поступает в кодирующее устройство - шифратор ИВК, который в соответствии с принятой структурой ИВК формирует последовательность импульсов общей длительностью $T_{ИВК} = 8 \tau_{ВИМ} = 16\tau_0$.

Формирование ИВК происходит в регистре сдвига RG, собранном на ИМС DD4. Сдвиг импульса ВИМ по регистру осуществляется с 8-кратной канальной частотой, задаваемой генератором импульсов ГИ. На выходе логической схемы ИЛИ DD5 образуется ИВК-код. Микропереключатель “ИВК” задает структуру кода (в нашем примере на рисунке 1.1 образован 5-ти позиционный код вида 2-4-5-6-8). После добавления синхроимпульса СИ на выходе сумматора DD6 образуется групповой сигнал U_{Σ} . В модуляторе М происходит амплитудная или частотная модуляция высокочастотным колебанием, вырабатываемым генератором несущей ГН. Полученный результирующий сигнал $u_p(t)$ с модуляцией ШИМ-АМ/ИВК-АМ или ШИМ-ЧМ/ЧВК-АМ (метод модуляции задается переключателем “ИВК-ШИМ”) усиливается и подается в антенну.

1.4 Функциональная схема приемной части системы

Функциональная схема приемной части СПИ приведена на рисунке 1.2.

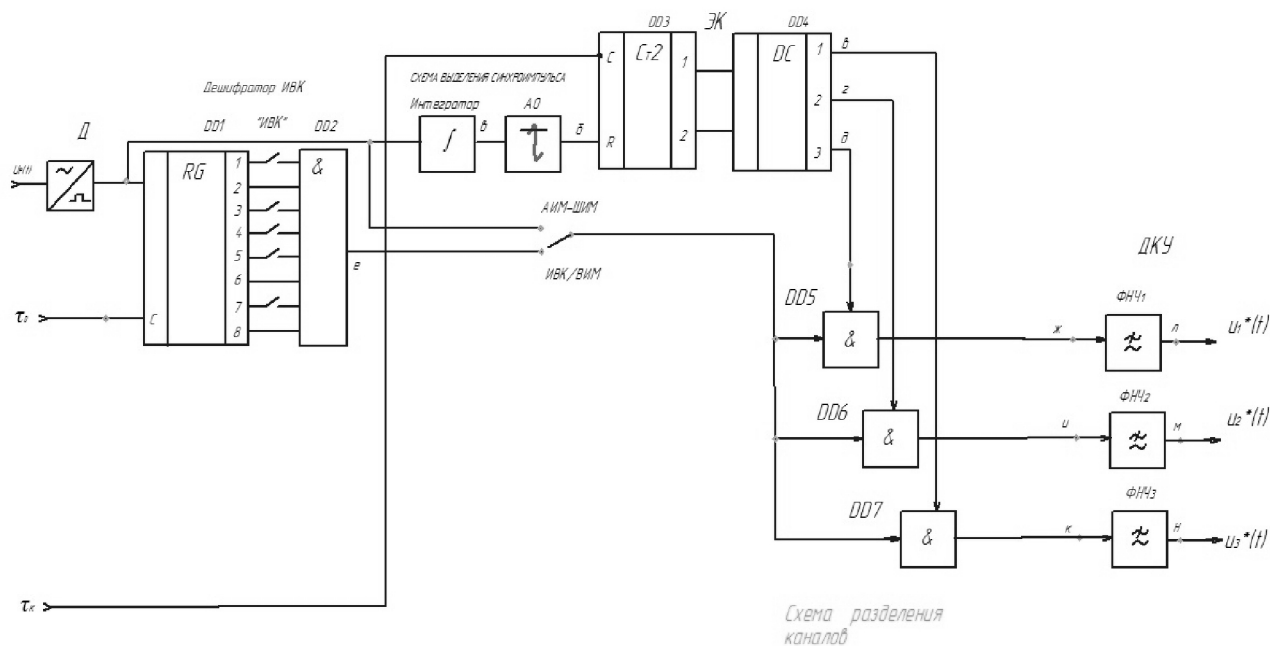


Рисунок 1.2 - Функциональная схема приемной части СПИ

В состав приемной части СПИ входят радиоприемное устройство, схема выделения синхроимпульса СВСИ, электронный коммутатор ЭК, дешифратор ИВК, схема разделения канальных сигналов и каналные декодирующие устройства ДКУ₁ – ДКУ₃.

После усиления и детектирования (Д – амплитудный или частотный детектор) групповой сигнал поступает на дешифратор ИВК и схему СВСИ. Дешифратор преобразует ИВК-код в ВИМ и представляет собой регистр сдвига RG (микросхема DD1) и восьмивходовую схему совпадения (DD2): при записи всех импульсов ИВК в регистр

на выходе микросхемы DD2 образуется импульс ВИМ. Схема СВСИ выделяет моменты времени, соответствующие началу первого канала, т. е. реагирует на импульс наибольшей длительности: при достижении напряжения интегрирования определенного уровня срабатывает амплитудный ограничитель АО – контрольные точки “а” и “б”, устанавливая ЭК в исходное – нулевое состояние.

Электронный коммутатор ЭК построен аналогично ЭК передатчика, на микросхемах DD3 (двухразрядный двоичный счетчик Ст2) и DD4 (дешифратор ДС). Канальные импульсы поочередно запускают ЭК, образуя на выходе канальные интервалы для 1-го, 2-го и 3-го каналов, которые в схеме разделения каналов (схемы совпадения DD5, DD6 и DD7) распределяют информационные сигналы по соответствующим декодирующим устройствам ДКУ. На выходе канальных декодеров (ФНЧ-фильтров) образуются аналоговые сообщения $U_1^*(t)$, $U_2^*(t)$ и $U_3^*(t)$, соответствующие исходным.

Упражнения по пройденному материалу.

1. Рассчитайте 1) полосу результирующего сигнала на выходе передающей части СПИ (рисунок 1.1) при использовании метода ВИМ-ЧМ, если $F_m = 1$ кГц, частоты манипуляций равны 1 и 2 МГц, а индекс ВИМ равен 0,8. 2) Определите индекс ЧМ.

Ответы: 1) 1,0 МГц 2) 1,06 МГц 3) 1,12 МГц 4) 1,24 МГц

Ответы: 1) 2.33 2) 4.17 3) 8.33 4) 16.67

2. Записать условие, которому должна удовлетворять частота ЗГ (рисунок 1.1) при $F_m = 3$ кГц.

1) не менее 6 кГц 2) не менее 12 кГц 3) не менее 18 кГц 4) не менее 36 кГц

3. Для СПИ с АИМ-ШИМ-ВИМ-ИВК (рисунок 1.1) найдите ширину спектра группового сигнала при условии, что $F_m = 1$ кГц, а длительность (база из “s”=8 дискретов) ИВК-кода укладывается в минимальную длительность импульсов ШИМ при индексе ШИМ, равном 0,6.

4. По РТС ПИ с ВРК методом АИМ-ЧМ передается 3 сообщения с максимальной частотой 1,0 кГц. На передачу результирующего сигнала выделена полоса частот 100 кГц. Затраты на синхронизацию равны одному канальному интервалу. Найти индекс ЧМ.

1.5 Контрольные задания/тесты по первому разделу

1. Для передачи 8 сообщений методом ШИМ-ЧМ с индексом $m_{\text{ЧМ}} = 2$ выделена полоса в 3 МГц. Затраты на синхронизацию составляют два канальных интервала. Максимально-возможная частота передаваемых сообщений равна 5 кГц. Найти индекс ШИМ.

2. Определить максимальную частоту (в кГц) каждого из 12 аналоговых сигналов, которые передаются по СПИ методом ВИМ-ЧМ в полосе частот, равной 9 МГц, если $m_{\text{т}}=0,8$, $m_{\text{ЧМ}}=2$, затраты на синхронизацию равны трем канальным интервалам.

1.6 Отчет по первому разделу

Изучить принципиальную схему лабораторного макета (рисунки 3 и 4 в методических указаниях к лабораторной работе № 1 “РТС ПИ с ВРК” [3]) и заготовить отчет, нарисовав по принципиальным схемам функциональные схемы передатчика и приемника РТС ПИ, а также результирующие сигналы ШИМ-АМ и ШИМ-ЧМ. Ответить на следующие вопросы:

- построить сигналы на входе и выходе макетов передатчика и приемника в контрольных точках. Временные диаграммы должны иметь единое начало отсчета и единый масштаб времени;
- спектры сигналов $U_{\text{ВХ}}$, АИМ, ШИМ, ШИМ-АМ и ШИМ-ЧМ. Найти полосу частот построенных спектров при $m_{\text{ЧМ}}=N/2$, $F_{\text{м}}= N$ кГц, где N – номер студента по списку группы $m_{\text{ЧМ}}=2$;
- запишите условие, которому должна удовлетворять частота сигнала звукового генератора, подключенного ко входу “Вх1”, если период следования импульсов задающего генератора передатчика (точка “а” макета) равен N мкс.

Отчет с ответами оформить в соответствии с требованиями стандарта [15] и сдать преподавателю для собеседования с последующей итоговой оценкой по первому разделу.

2. МЕТОДЫ ОЦИФРОВКИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ. ЦСПИ с ВРК и ЧРК

2.1 Методы оцифровки аналоговых сигналов

Для оцифровки аналоговых сигналов применяются методы: кодово-импульсной модуляции (КИМ), дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ), дельта-модуляции (ДМ), кодирования с преобразованием (КП) и другие специальные методы.

Кодово-импульсная модуляция (КИМ) основана на замене непрерывной шкалы уровней сообщения шкалой дискретных значений.

Диапазон возможных значений сообщения разбивается на конечное число дискретных уровней. Через интервалы времени T_{Π} , выбираемый по теореме Котельникова, передается тот дискретный уровень, к которому ближе всего расположено в момент отсчета значение передаваемого сообщения. Такой процесс замены плавной кривой ближайшим дискретным уровнем называется квантованием. Разность значений сообщения в двух смежных уровнях называется шагом квантования Δ :

$$\Delta = (U_{\max} - U_{\min}) / 2^n,$$

где: $2^n = L_{\max}$ – максимальное число квантованных уровней при использовании n -разрядного двоичного кода;

$U_{\max}, U_{\min}$ – наибольшее и наименьшее значение, которое может принять сообщение в процессе передачи, обычно $U_{\min} = 0$.

При таком способе построения квантованного сигнала абсолютная погрешность не будет превышать половины шага квантования, а относительная погрешность определяется разрядностью КИМ: $\delta_{\text{кв}} = 1 / L_{\max} = 2^{-n}$. Ширина спектра КИМ определяется длительностью одного разряда (символа) КИМ: $\Pi_{\Sigma} = 1 / \tau_0$. Спектр результирующего сигнала расширяется в 2 раза для КИМ-АМ, и в $2(1+m_{\text{ЧМ}})$ раз при КИМ-ЧМ, где $m_{\text{ЧМ}}$ – индекс ЧМ, равный отношению девиации частоты несущей к ширине спектра КИМ: $m_{\text{ЧМ}} = (f_1 - f_0) \tau_0 / 2$, где f_1 и f_0 – частота несущей при передаче символов “1” и “0”.

Возможная структура группового и результирующего сигналов 3-х канальной ЦСПИ с КИМ-ВРК представлена на рисунке 2.1.

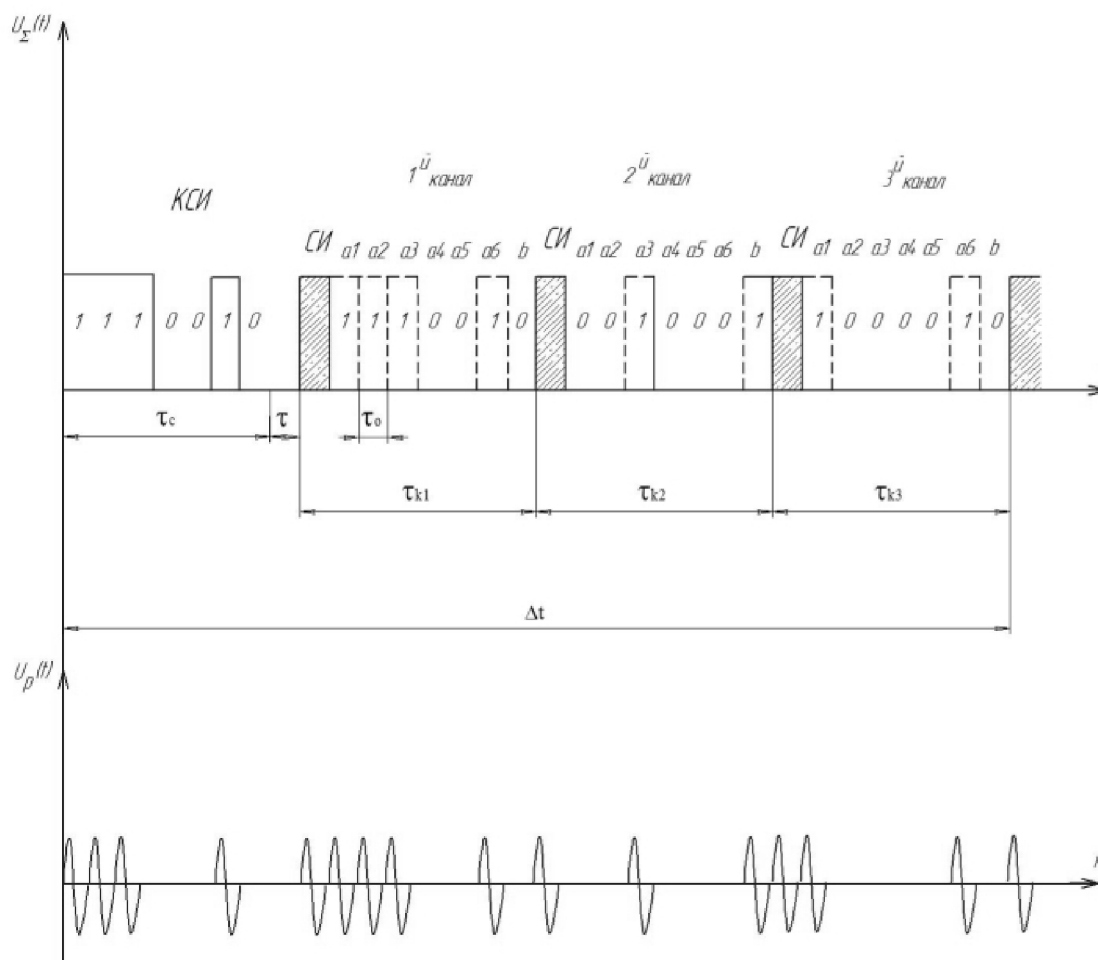


Рисунок 2.1 – Структура группового сигнала КИМ и вид результирующего сигнала КИМ-АМ в 3-х канальной ЦСПИ

Квантованный уровень напряжения датчика представляется в виде двоичной кодовой группы, называемой словом τ_k . Информационные символы обозначены как $a_1 \dots a_6$. В слово могут входить дополнительные символы, которые используются в приемнике для синхронизации, в частности, - импульсы первой позиции СИ, а также могут добавляться избыточные символы для повышения достоверности принимаемой информации, например, для проверки на четность – символ “b”. Все слова составляют кадр T_{Π} . В кадр кроме слов, несущих информацию об измеряемых параметрах, включается одно или несколько слов, длительностью τ_c , необходимых для синхронизации приёмного устройства: $T_{\Pi} = \tau_c + N \cdot \tau_k = 4 \tau_k = 32 \tau_0$. В качестве кадрового слова синхронизации применяется специальная кодовая группа, которая не используется для передачи измеряемой информации, например, 7-ми разрядный код Баркера 1110010.

Схема формирования КИМ реализуется с помощью устройства выборки-хранения УВХ, АЦП, задающего генератора ЗГ и делителя импульсов ДИ (рисунок 2.2).

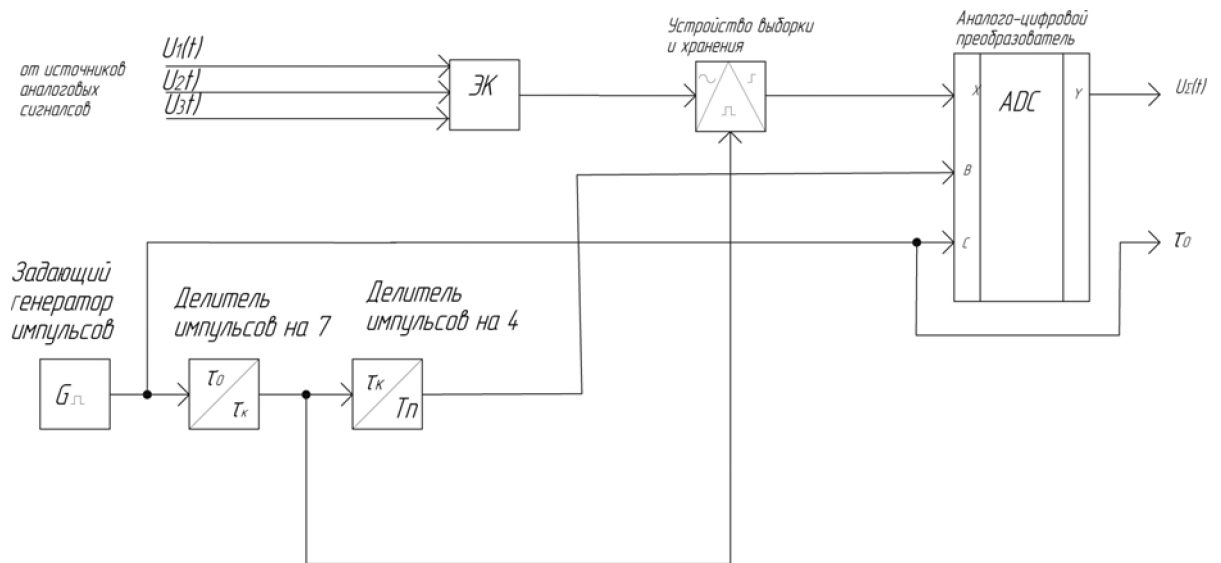


Рисунок 2.2 – Функциональная схема включения АЦП для формирования КИМ

Задающий генератор ЗГ формирует последовательность тактовых импульсов с частотой $1/\tau_0$. Коэффициент деления делителей импульсов ДИ зависит от числа каналов и способа синхронизации. Например, если в каждом слове КИМ используется синхроимпульс первой позиции, а на синхронизацию ЦСПИ в целом затрачивается кодовая комбинация из K слов, то коэффициенты деления равны $K_{\text{ди1}} = 7$, $K_{\text{ди2}} = T_{\text{п}} / (N+K) \cdot \tau_k = 4$, $K_{\text{ди}} = K_{\text{ди1}} \cdot K_{\text{ди2}} = 7 \cdot 4 = 28$.

Демодуляция КИМ осуществляется с помощью ЦАП.

Дельта-модуляция (ДМ) осуществляет кодирование знака разности между входной аналоговой величиной и ее ожидаемым значением. Причем в случае положительного значения разности отсчет кодируется логической единицей, а в случае отрицательного значения отсчет кодируется логическим нулем.

Функциональные схемы модема, т. е. модулятора и демодулятора, линейной ДМ показаны на рисунке 2.3.

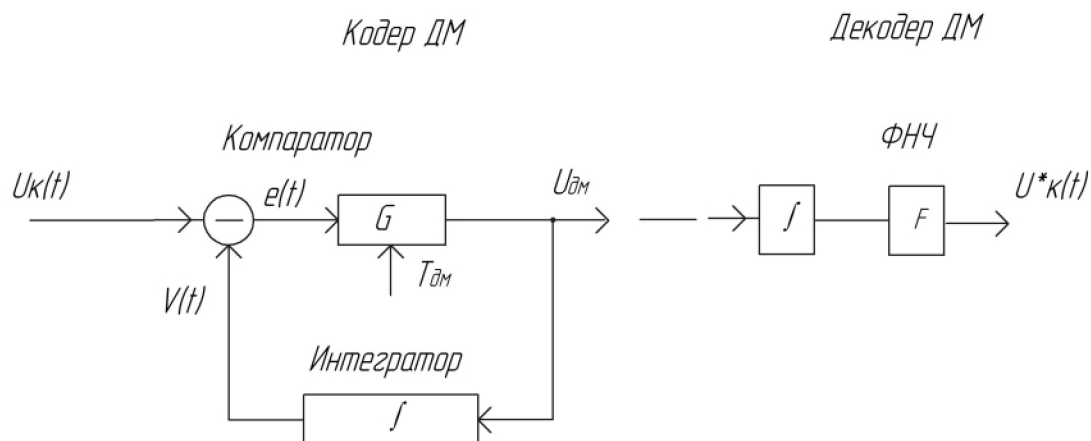


Рисунок 2.3 – Функциональная схема линейной ДМ

На вход дельта-модулятора подается исходный сигнал $U_k(t)$. Информационная последовательность $U_{\Delta M}(t)$ на выходе дельта-модулятора содержит положительные или отрицательные импульсы с периодом $T_{\Delta M}$, в зависимости от знака разности между текущим $U_k(t)$ и предсказанным (предыдущим) $V(t)$ значениями. Частота следования импульсов (период $T_{\Delta M}$) значительно больше, чем этого требует теорема отсчетов и зависит от заданной погрешности квантования: $T_{\Delta M} = \delta_{\text{кв}} / 2 F_{\text{max}}$, что существенно меньше, чем при КИМ. Дельта-модулятор функционирует как аналого-цифровой преобразователь, на входе которого имеется аналоговый сигнал, а на выходе — двоичная последовательность положительных или отрицательных импульсов, в зависимости от того, - возрастает или убывает входной сигнал.

Дельта-демодулятор реализован в виде двойного интегратора: на выходе первого образуется ступенчатая функция, на выходе второго – искомый аналоговый сигнал.

Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (ДИКМ) сочетает в себе достоинства КИМ и ДМ. Как и в случае ДМ кодируется не само значение отсчета, а разность с его ожидаемым значением, но для повышения точности, а, следовательно, и качества передачи эта разность кодируется не одним битом, а несколькими, но их количество меньше, чем в случае КИМ, за счет этого снижаются требования к аппаратуре кодирования и декодирования. Количество разрядов при ДИКМ можно выбрать равным $n = 3 - 4$, тем самым тактовая частота результирующего импульсного потока по сравнению с КИМ снижается в 2 – 3 раза.

Функциональная схема кодера – декодера с ДИКМ приведена на рисунке 2.4.

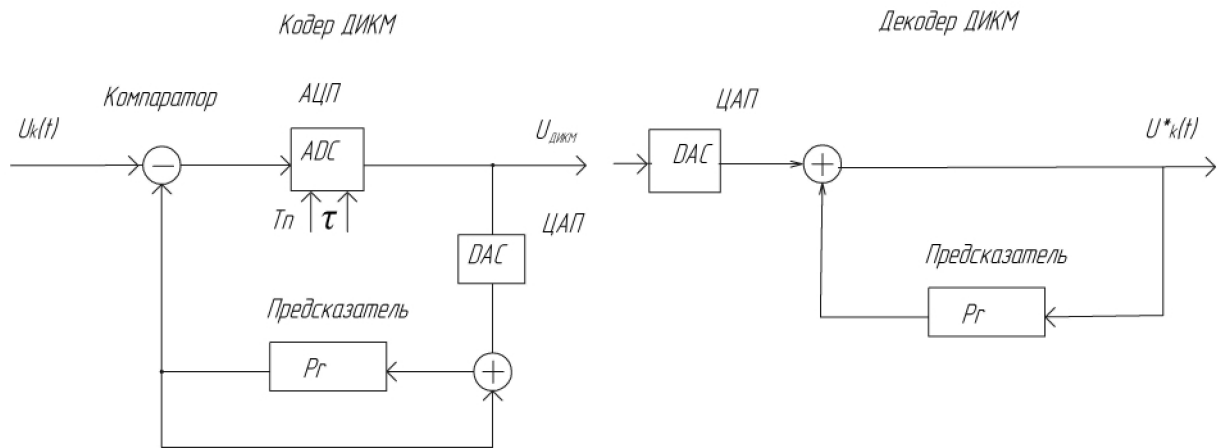


Рисунок 2.4 - Функциональная схема кодера - декодера ДИКМ

На вход кодера поступает последовательность отсчетов входного сигнала $U_k(t)$. В предсказателе Pr (predictor) формируются предсказанные значения сигнала $V(t)$. В вычитающем устройстве определяется разность действительного и предсказанного значений сигнала, называемая ошибкой предсказания $e(t)$. Далее разностный сигнал поступает в квантователь (АЦП). Уменьшение скорости передачи двоичных символов достигается за счет уменьшения в квантователе количества двоичных разрядов. Синхронизация реализуется также как при КИМ.

Упражнения по пройденному материалу.

1. На входе передающей части ЦСПИ установлен 8-разрядный АЦП, причем первый разряд используется для канальной синхронизации. Питание схемы производится от стабилизированного источника + 5В. Записать код КИМ на выходе АЦП при подаче на вход аналогового напряжения + 3,5В.

Ответы: 1) 10110011 2) 10110101 3) 1011001 4) 1011010

2. Найти погрешность АЦП при формировании сигнала КИМ из аналогового, частота которого изменяется в пределах от 2-х до 10 кГц, Для передачи сообщений используется метод КИМ-АМ, ширина спектра которого не должна превышать 0,2 МГц.

Ответы: 1) 0,0979%, 2) 1,56%, 3) 3,125% 4) 6,25%.

3. Для передачи аналоговых сигналов с $F_m = 1,0$ кГц используются КИМ или ДМ. Рассчитайте требуемую для передачи полосу сигналов 1) для ДМ-АМ, 2) для КИМ-АМ, 3) для ДМ-ЧМ с индексом $m_{чм}=3$ и 4) для КИМ-ЧМ с частотами манипуляций 100 и 200 кГц.

Ответы 1) 40 кГц, 2) 16 кГц, 3) 160 кГц и 4) 116 кГц.

4. Для передачи аналогового сообщения частотой не выше 10 кГц используется метод ДМ-ЧМ с индексом $m_{чм}=4$. 1) Определить, с какой погрешностью может быть передано это сообщение, если полоса частот, занимаемая результирующим сигналом, ограничена значением в 1 МГц, 2) рассчитать максимально возможное число сообщений, которое может быть передано по СПИ.

Возможные ответы на первую часть примера: 1) 3 МГц; 2) 3,020 МГц; 3) 4,0 МГц; 4) 5,0 МГц.

Возможные ответы на вторую часть примера: 1) 3; 2) 10; 3) 150; 4) 300.

2.2 Цифровые многоканальные СПИ

В силу особенностей оцифровки в системах с временным уплотнением сигналов используется КИМ, или ДИКМ, так как оба метода, также как и временной способ уплотнения, требует синхронизации приемно-передающих трактов. Частотное уплотнение каналов относится к асинхронным способам, и в качестве метода оцифровки целесообразно использовать дельта-модуляцию ДМ, которая не требует синхронизации.

2.2.1 Цифровые многоканальные СПИ с КИМ (ДИКМ) – ВРК

Для расчета основных параметров системы с КИМ-ВРК строится временная диаграмма группового сигнала для заданного числа каналов N при принятых методах синхронизации: на кадровую синхронизацию отводится от 1 до 3 - 5 канальных интервалов ($K_1 = 1 - 5$), на канальную – от 1 до 3 разрядов КИМ ($K_2 = 1-3$). Число контрольных разрядов, затрачиваемых на повышение достоверности, задается Заказчиком $K_3=(1 - 5)$. Из временной диаграммы находится интервал опроса:

$T_{\Pi} = (N+K_1) (n+K_1+K_2) \tau_0 = 1/2F_{\max}$. На рисунке 2.1 $T_{\Pi} = (3+1) (6+1+1) \tau_0 = 32 \tau_0$

Далее рассчитывается [4-8]

1) число разрядов КИМ и погрешность квантования: $n \geq \lceil \log_2 \delta_{\text{кв}} \rceil$, $\delta_{\text{кв}} = 2^{-n}$.

В случае использования ДИКМ число разрядов сокращается в 2-3 раза и выбирается равным трем – четырем;

2) длительность разряда (символа) $\tau_0 = \frac{Tn}{(N + k1)(n + \kappa1 + \kappa2)}$,

3) полоса группового и результирующего сигналов

$$P_{\Sigma} = 1/\tau_0, \quad P_p = 2/\tau_0 \quad \text{для АМн, ФМн и} \quad P_p = 2(1+m_{\text{чм}})/\tau_0 \quad \text{для ЧМн},$$

4) несущая частота f_0 (или $f_{\min}$) = $(10 - 20) / \tau_0$ ($\lambda_0 = C / f_0$, C – скорость света),

5) мощность шума на входе приемника

$$P_{\text{ш вх}} = k \cdot T_{\text{э}} \cdot P_p,$$

где $k = 1.358 \cdot 10^{-23} \frac{Bm}{Гц * Град}$ - постоянная Больцмана,

$T_{\text{э}}$ - эквивалентная шумовая температура на входе приемника (Град К),

6) вероятность ошибочного приема символа

$$P_{\text{ош вх}} = 0,5 \exp(-l^2/4) \quad \text{для АМн и} \quad P_{\text{ош вх}} = 0,5 \exp(-l^2/2) \quad \text{для ЧМн, где}$$

$$l^2 = P_{\text{свх}} / P_{\text{швх}} - \text{отношение мощности сигнала к мощности шума на входе приемника,}$$

7) мощность передатчика

$$P_{\text{прд}} = P_{\text{с вх}} \cdot 4\pi R^2 / G \cdot S_{\text{э}}, \quad \text{где} \quad G_{\text{прд}} = \eta \cdot (\pi D_{\text{прд}} / \lambda_0)^2 - \text{к.н.д. передающей антенны,}$$

$$S_{\text{э}} = \eta \cdot \pi D_{\text{пр}}^2 / 4 - \text{эффективная площадь приемной антенны, } R - \text{дальность связи.}$$

8) результирующая погрешность на выходе ЦСПИ:

$$\delta_{\text{вых}} = \sqrt{\delta_{\text{кв}}^2 + n * P_{\text{ош}}}$$

Схемотехника приемно-передающих частей ЦСПИ аналогична рассмотренной выше системе СПИ с импульсными поднесущими, однако после суммирования канальных сигналов необходимо добавить кодер КИМ, как показано на рисунке 2.2. С выхода АЦП снимается параллельный n - разрядный двоичный код $U_{\text{КИМ}}$. В приемное устройство добавляются ЦАПы в каждый канал.

Кодер ДИКМ содержит вычитающее устройство, формирующее сигнал разности исходного и предсказанного значений, схему АЦП, схему ЦАП, сумматор и

предсказатель. В кодере ДИКМ в цифровой код преобразуется сигнал ошибки, который образуется на выходе вычитающего устройства как разность между аналоговым сигналом источника сообщений и его предсказанным значением. Полученный код $U_{\text{ДИКМ}}$ поступает на вход электронного коммутатора, и одновременно через ЦАП - на вход сумматора в цепи обратной связи кодера ДИКМ.

Упражнения по пройденному материалу.

1. Определить ширину спектра результирующего сигнала КИМ-ВРК-ЧМн для 4-х канальной ЦСПИ при заданной погрешности АЦП равной 8%, приняв $k_1 = k_2 = 1$, $k_3 = 0$, $F_m = 1 \text{ кГц}$, индекс $m_{\text{чм}} = 3$.

Ответы: 1) 50 кГц, 2) 150 кГц, 3) 200 кГц, 4) 400 кГц

2. Найти максимальную частоту аналоговых сигналов, которую можно передать по ЦСПИ методом КИМ-ВРК-ФМн при заданной полосе результирующего сигнала, равной 1 МГц. Принять $k_1 = k_2 = 1$, $N = 3$, погрешность АЦП = 1%.

Ответы: 1) 3,9 кГц, 2) 7,8 кГц, 3) 15,6 кГц, 4) 31,25 кГц.

3. Методом КИМ-ВРК-ЧМ с полосой в 1 МГц и индексом $m_{\text{чм}} = 3$ передаются аналоговые сообщения с $F_m = 2 \text{ кГц}$. Погрешность квантования = 5%. Определить максимальное число сигналов, которое может быть передано по ЦСПИ. Затратами на синхронизацию при расчете пренебречь.

4. Найти погрешность АЦП (в %), который используется для передачи 3-х аналоговых сигналов с максимальной частотой 5 кГц, если для передачи используется метод КИМ-ВРК-ЧМ с результирующей полосой частот, равной 1 МГц. Частоты модуляции равны 400 и 1000 кГц, $k_1 = k_2 = 1$.

2.2.5 Цифровые многоканальные СПИ с ДМ – ЧРК

В основе построения систем передачи информации с частотным уплотнением и разделением каналов (ЧРК) лежит принцип разнесения канальных сигналов по спектру [9].

Функциональная схема цифровой многоканальной СПИ с ДМ – ЧРК содержит задающий генератор тактовых импульсов (частота дискретизации $T_{\text{дм}} = \delta_{\text{кв}} / 2F_{\text{max}}$) и параллельно включенных N канальных модуляторов. В качестве примера на рисунке 2.5 представлена схема 2-х канальной цифровой СПИ с модуляцией ДМ-ЧРК-АМ. Генератор ГТИ формирует импульсы с периодом $T_{\text{дм}}$, если входной сигнал $U_{\text{вх}}(t)$ увеличивается. При снижении амплитуды входного сигнала импульсы ДМ отсутствуют. Аналогично и в остальных каналах, одновременно с 1-м, производится дискретизация соответствующих аналоговых сигналов.

Дельта-импульсы вида “1” и “0” в первом канале поступают на частотные модуляторы (манипуляторы) 1, на выходе которых образуется напряжение поднесущей частоты F_{11} для “1”, и частоты F_{12} для “0”. Одновременно аналогичная частотная манипуляция производится и во втором канале, но другими частотами - F_{21} для “1”, и F_{22} для “0”.

Сформированные сигналы ДМ-ЧМн обоих каналов суммируются, образуя групповой сигнал U_{Σ} , который модулирует по амплитуде в АМ колебания несущей частоты передатчика f_0 . Результирующий сигнал $U_p(t)$ ДМ-ЧМн-АМ излучается передающей антенной WA1. АМ-модуляция часто необязательна, если частоты манипуляций выбраны из разрешенной для излучения сетки частот.

Радиосигнал ДМ-ЧМн-АМ принимается приемной антенной WA2, выделяется входной цепью приемника, усиливается и детектируется амплитудным детектором АД. Выделенный таким образом сигнал ДМ-ЧМн поступает на разделительные фильтры РФ, резонансные частоты которых соответствуют генераторам поднесущих частот обоих каналов. Сигналы с фильтров выпрямляются канальными амплитудными детекторами АД и после операции вычитания образуются искомые дельта-импульсы в виде некоторых ступенчатых функций. Демодуляция ДМ-функций осуществляется интеграторами.

Для построения спектра результирующего сигнала и расчета его полосы применяются известные формулы для нахождения ширины спектра [3,9-10], причем процесс расчета необходимо проводить с учетом того, что для каждого последующего спектра предыдущий сигнал играет роль модулирующего.

Для нахождения основных показателей СПИ с модуляцией ДМ-ЧМн-АМ при заданной погрешности квантования $\delta_{\text{кв}}$, числе каналов N с максимальной частотой F_{max} и индексе $m_{\text{чм}}$, последовательно вычисляем:

1) период дискретизации (длительность единичного дельта-импульса)

$$T_{\text{дм}} = \tau_{\text{дм}} = \delta_{\text{кв}} / 2 F_{\text{max}},$$

2) полоса ДМ-сигнала, группового и результирующего сигналов

$$P_{\text{дм}} = 1/\tau_0, \quad P_{\Sigma} = 2N(1 + m_{\text{чм}}) / \tau_0, \quad P_{\text{р}} = 2P_{\Sigma} = 4N(1 + m_{\text{чм}}) / \tau_0$$

3) мощность шума на входе приемника

$$P_{\text{швх}} = k * T_{\text{э}} * P_{\text{пр}}$$

$$\text{где } k = 1.358 * 10^{-23} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц} * \text{Град}} - \text{постоянная Больцмана}$$

$T_{\text{э}}$ - эквивалентная шумовая температура (Град К)

4-5) вероятность ошибочного приема символа и мощность передатчика – по тем же формулам, что и в разделе 2.2.1

6) результирующая погрешность на выходе ЦСПИ: $\delta_{\text{вых}} = \sqrt{\delta_{\text{кв}}^2 + P_{\text{ош}}}$

2.2.3 Цифровые многоканальные СПИ с ДМ – ВРК

В отличие от систем с ДМ-ЧРК в ЦСПИ с ДМ – ВРК используется кадровая синхронизация: $T_{\Pi} = (N+K_1) \tau_{\text{дм}} = \delta_{\text{кв}}/2F_{\text{max}}$. Ширина спектра группового и результирующего сигналов равны $P_{\Sigma} = 1/\tau_{\text{дм}}$, $P_{\text{р АМ}} = 2/\tau_{\text{дм}}$ и $P_{\text{р ЧМ}} = 2(1+m_{\text{чм}})/\tau_{\text{дм}}$.

2.2.4 Цифровые многоканальные СПИ с КИМ – ЧРК

Аналогично рассмотренным СПИ с ДМ строятся цифровые СПИ с КИМ – ЧРК, с той лишь разницей, что вместо ДМ-модуляторов используются АЦП, и следовательно необходима передача синхросигналов. Кадровый интервал определяется по формуле

$T_{\Pi} = (n+k_2+k_3) \tau_0 = 1/2F_{\text{max}}$. Для нашего примера на рисунке 2.5 (АЦП вместо ДМ) при $k_2=1$ и $k_3=0$ генераторное оборудование состоит из ГТИ частотой $1/\tau_0$ и делителя импульсов на “ $n+1$ ”.

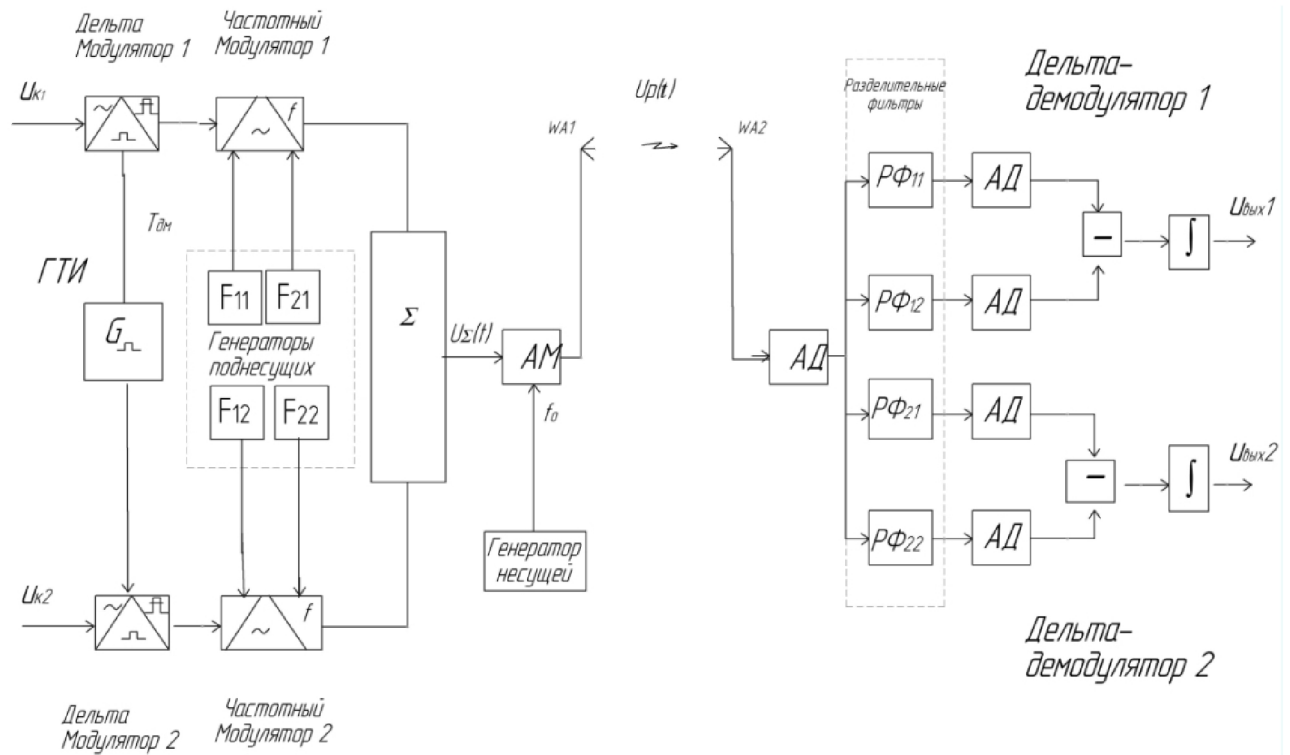


Рисунок 2.5 - Функциональная схема ЦСПИ с ДМ-ЧРК

Упражнения по пройденному материалу.

1. Рассчитать тактовую частоту генератора импульсов ДМ, используемого в схеме оцифровки аналоговых сигналов, частота которых не превышает 2-х кГц. Допустимая погрешность квантования – 10%.

Ответы: 1) не менее 20 кГц, 2) не более 20 кГц, 3) не менее 40 кГц, 4) не более 40 кГц

2. Определить ширину спектра результирующего сигнала ДМ-ЧРК для 2-х канальной ЦСПИ при заданной погрешности АЦП равной 5%, приняв $F_m = 1$ кГц, индекс $m_{чм} = 1.5$.

Ответы: 1) 100 кГц, 2) 200 кГц, 3) 300 кГц, 4) 400 кГц

3. Найти погрешность оцифровки аналоговых сигналов канальным ДМ-модулятором (в %), который используется в СПИ с для передачи 3-х аналоговых сигналов с максимальной полосой в 1 МГц и индексом $m_{чм} = 3$ частотой 5 кГц, если для передачи используется метод ДМ-ВРК-ЧМ с результирующей полосой частот, равной 1 МГц. Частоты манипуляции равны 400 и 1000 кГц. Затраты на синхронизацию принять равными одному канальному интервалу.

4. Методом КИМ-ЧРК передаются 3 аналоговых сообщения с $F_m = 2\text{кГц}$. Погрешность квантования = 5%. Определить полосу частот, занимаемую результирующим сигналом (в кГц), приняв $k_2=3$, $k_3=0$, $m_{\text{чм}} = 4$.

2.3 Контрольные задания/тесты по второму разделу

1. Найти погрешность оцифровки аналоговых сигналов в ЦСПИ с ДМ-ЧРК, если на передачу 2-х аналоговых сигналов с максимальной частотой 1 кГц затрачивается полоса в 1 МГц при индексе $m_{\text{чм}} = 3$.

Ответы: 1) 0,8% 2) 1,6% 3) 3,2% 4) 8%.

2. Рассчитать погрешность квантования (в %) в ЦСПИ с КИМ-ЧРК при передаче 2-х аналоговых сигналов с максимальной частотой 5 кГц, если полоса спектра группового (результатирующего) сигнала составляет 2 МГц при $m_{\text{чм}} = 4$, $k_2 = 2$, $k_3 = 0$.

2.4 Письменный отчет по второму разделу

Для студентов, номер которых по списку группы четный, построить функциональную схему 2-х - канальной ЦСПИ с КИМ-ЧРК. Зарисовать сигналы в контрольных точках, а также групповой (результатирующий) сигнал, приняв $U_{\text{вх1}} = N \text{ В}$, $U_{\text{вх2}} = 2N \text{ В}$, $U_{\text{вхmax}} = 3N \text{ В}$. N – номер студента по списку группы.

Для студентов, номер которых по списку группы нечетный, построить функциональную схему 2-х - канальной ЦСПИ с ДМ-ВРК. Зарисовать сигналы в контрольных точках, а также групповой (результатирующий) сигнал, приняв $N=2$, $U_{\text{вх1}} = N \text{ В}$, $U_{\text{вх2}} = 2N \text{ В}$, $U_{\text{вхmax}} = 3N \text{ В}$.

Задание по теме 2 оформить по правилам ЕСКД [15] в виде отчета к лабораторной работе и сдать преподавателю.

3 КОДОВЫЕ МЕТОДЫ УПЛОТНЕНИЯ И РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ (КРК) В ЦИФРОВЫХ СПИ

В ЦСПИ с КРК для уплотнения канальных сигналов используются широкополосные канальные сигналы, полностью или частично перекрывающиеся между собой как по времени, так и по спектру. Примером таких сигналов являются М-последовательности, сигналы вида функций Уолша и частотно-временные коды.

3.1 Псевдошумовые сигналы (функции Уолша и М-последовательности).

Подобные сигналы правильно называть псевдошумовыми или шумоподобными, т.к. их корреляционные свойства подобны свойствам белого шума: коэффициент взаимной корреляции равен или близок к нулю.

Основными параметрами функций Уолша являются:

- база $B=F \cdot T$, где F - полоса сигнала, $T = S \tau_0$ - длительность сигнала, состоящего из «S» временных дискретов τ_0 . Если $F=1/\tau_0$, то $B = S \gg 1$;
- коэффициент взаимной корреляции $R_{ij} = (\text{числу совпадающих символов (дискретов)} - \text{минус число несовпадающих символов, делённых на общее число символов}) = 0$.
- ансамбль функций Уолша $Q=B$. Очевидно, что Q должна быть $\geq N$ – числа каналов.

Функции Уолша достаточно просто получить с помощью двоичного счетчика и сумматоров по модулю 2 [2,10-12]. В качестве примера на рисунке 3.1 приведена функциональная схема генератора функций Уолша 1-го, 6-го и 7-го порядков. Число разрядов “m” двоичного счетчика St_2 равно 3-м, поэтому ансамбль функций Уолша $Q=2^m=8$. Порядок каждой из 8 функций легко определить по числу знакоперемен на период T , который содержит $S=8$ дискретов – импульсов генератора G : $T = 8 \tau_0$. Для wal 6 искомая последовательность имеет вид 10100101. Для закрепления материала самостоятельно нарисуйте вид функций Уолша с первого по седьмой порядок.

В многоканальных ЦСПИ с КРК, когда функции Уолша используется для уплотнения канальных сигналов, применяется система биортогональных кодов, в которых каждая кодовая комбинация ортогональна остальным, за исключением одной, ей противоположной. При этом для передачи информационного символа “0” используется выбранная для данного канала функция Уолша, а при передаче “1” – её инверсия.

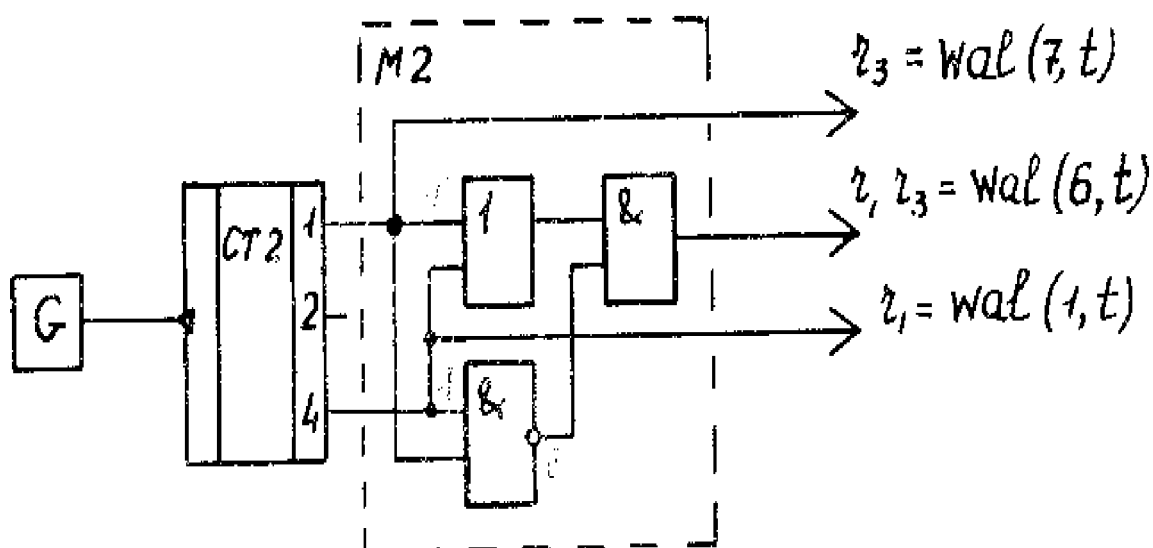


Рисунок 3.1 – Функциональная схема генератора функций Уолша

Наряду с функциями Уолша в технике цифровых СПИ с КРК широко используются так называемые М-последовательности, которые представляют собой последовательность дискретных элементов “1”, “-1” (или 1 и 0), сформированную по определенным правилам таким образом, что ее корреляционные свойства близки к соответствующим свойствам шума: $B=M=2^m - 1$, $R_{ii}=M$, $R_{ij} \leq -1/M$, где m – число разрядов регистра, охваченного обратными связями через сумматоры по модулю два. Одним генератором может быть получено M различных последовательностей с периодом $T=M\tau_0$, отличающихся только сдвигом по времени.

В качестве примера на рисунке 3.2 показан генератор М-последовательностей ($M=7$) для $m=3$: $M_1=1010011$, $M_2=1101001$, $M_3=1110100$, $M_4=0111010$ и т.д.

Оставшиеся последовательности $M_5 - M_7$ получите самостоятельно. Убедитесь в их квазиортогональности.

Частота импульсов сдвига, формируемых задающим генератором (на схеме не показан) и период М-последовательностей связаны соотношением $T = 7 \tau_0$.

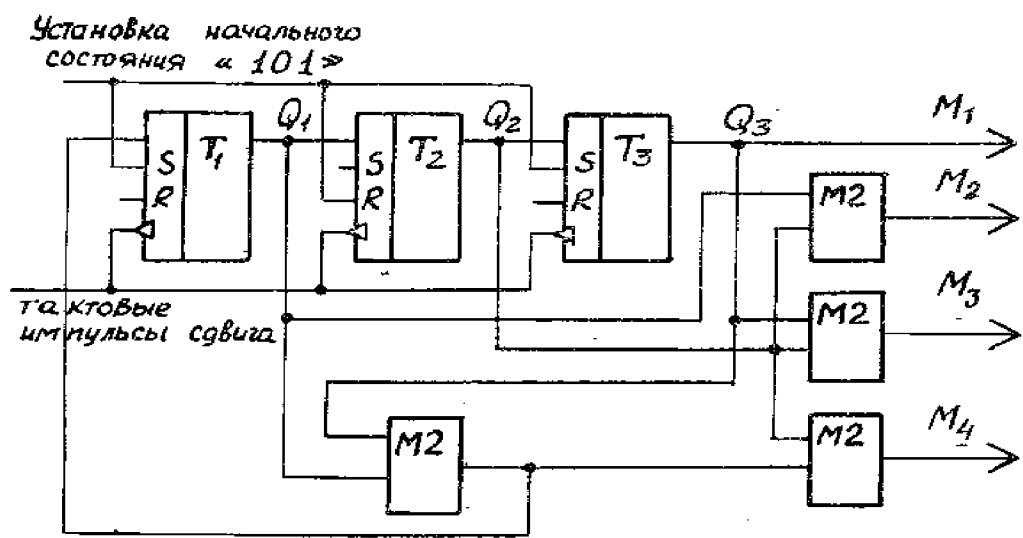


Рисунок 3.2 – Генератор М-последовательностей

3.2 ЦСПИ с КРК на основе ПШС

Функциональная схема передающей части ЦСПИ с КРК представлена на рисунке 3.3.

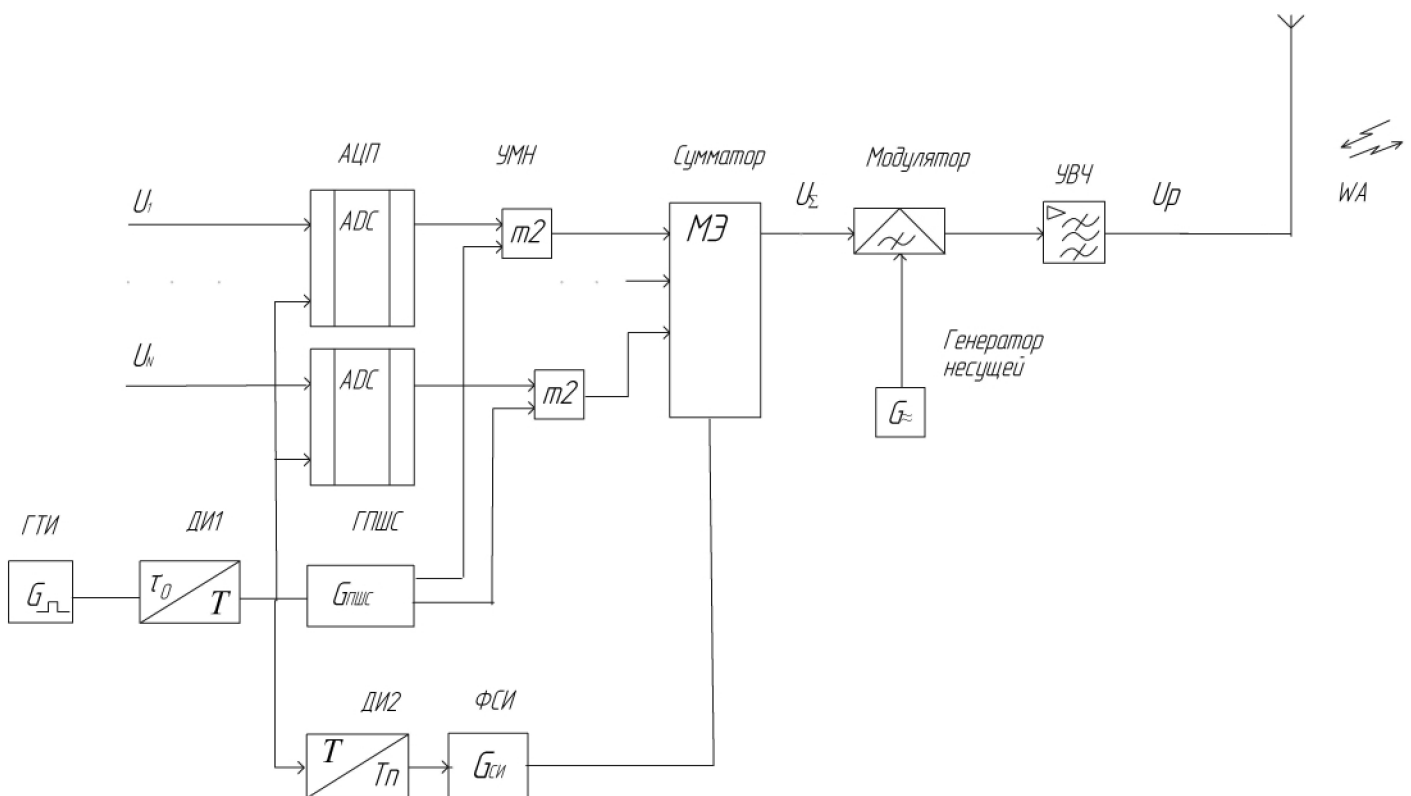


Рисунок 3.3 - Функциональная схема передающей части ЦСПИ с КРК

Исходные каналные сообщения преобразуются с помощью АЦП в импульсную последовательность КИМ, или ДМ, или ДИКМ. Длительность информационных

символов T равна периоду ПШС и задается делителем импульсов ДИ1 на “В”: $T = S \cdot \tau_0$ или $T = M \cdot \tau_0$.

Генератор тактовых импульсов *ГТИ* формирует дискреты с периодом τ_0 , необходимые для работы приемника, а также для запуска генератора поднесущих ГПШС (двоичного счетчика СТ2 для функций Уолша или регистра сдвига для M -последовательностей). Число генерируемых поднесущих не менее числа передаваемых канальных сигналов: $Q \geq N$. Умножение поднесущих на информационные символы длительностью T осуществляется с помощью сумматоров по модулю два $m2$. Если информационный символ $X1$ равен нулю, то на выходе умножителя $m2$ образуется ПШС, при $X1=1$ – его инверсия. Аналогично формируются канальные сигналы в других каналах.

Кодовое уплотнение осуществляется в синхронном режиме, так как и цифровая последовательность КИМ, и поднесущие (функции Уолша или M -последовательности) требуют для своего декодирования в приемнике фиксации времени начала. Для этого в устройстве уплотнения с помощью схемы формирования синхроимпульса ФСИ, например, регистра сдвига, формируется периодическая последовательность импульсов, определенным образом расставленных во времени – двоичного кода Баркера с периодом T_{Π} . В каждом цикле сначала передается синхроимпульс длительностью $\tau_{си}$, а затем – групповой сигнал. Период T_{Π} задается делителем ДИ2.

Сигналы с канальных умножителей $m2$ поступают на вход формирователя группового сигнала – мажоритарного элемента МЭ: сигнал “1” на его выходе образуется, если на большинстве канальных выходов присутствуют высокие уровни. Групповой сигнал $U_{\Sigma}(t)$ через модулятор и усилитель УВЧ (U_p – результирующий сигнал) поступает в приемник.

Функциональная схема приемной части для одного из каналов представлена на рисунке 3.4. В состав приемника входят входная цепь (полосовой фильтр ПФ с в/ч детектором Д), устройство синхронизации и цифровой коррелятор.

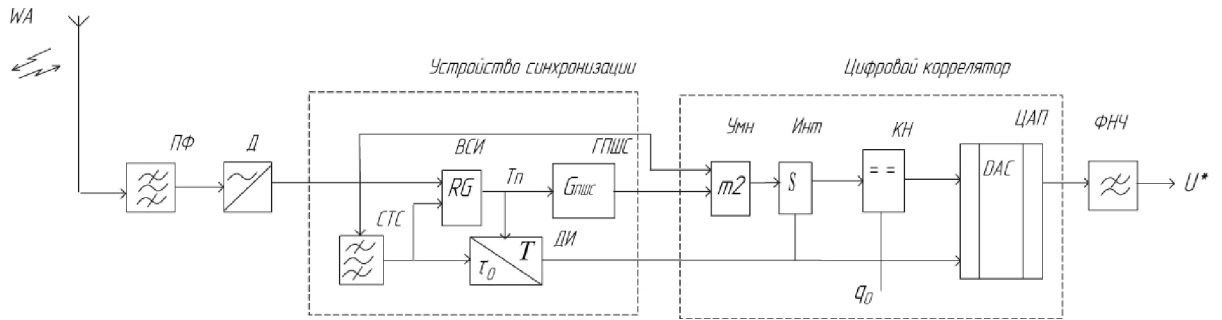


Рисунок 3.4 - Функциональная схема приемной части с КРК

Устройство синхронизации выделяет тактовую последовательность τ_0 (схема тактовой синхронизации СТС), кадровый синхроимпульс T_{Π} (схема выделения ВСИ), формирует период ПШС T с помощью делителя импульсов ДИ с принудительным моментом деления и содержит генератор ПШС, аналогичный генератору передатчика.

Цифровой коррелятор содержит умножитель УМН, интегратор ИНТ, пороговое устройство и цифро-аналоговый преобразователь ЦАП. Функцию умножения группового сигнала и кода адреса – соответствующего ПШС выполняет сумматор по модулю два $m2$. Результат умножения $U_{\Sigma}(t)$ на ПШС поступает в интегратор, роль которого выполняет счетчик импульсов. Момент достижения порогового уровня q_0 фиксируется пороговым устройством – компаратором напряжения КН. При мажоритарном уплотнении пороговый уровень $q_0 = B/2$ будет превышен при передаче информационного символа “1”.

Набор информационных символов КИМ за время T_{Π} поступает на ЦАП. При дельта-модуляции роль ЦАП выполняет интегратор. Ступенчатый сигнал ЦАП преобразуется в непрерывный аналоговый с помощью фильтра ФНЧ с частотой среза F_m .

При расчете ЦСПИ с КРК последовательно находим

1) погрешность квантования

$$\delta_{\text{кв}} = 2^{-n} \text{ для КИМ}$$

2) интервал опроса $T_{\Pi} \leq 1/2F_m$ для КИМ и $T_{\text{дм}} \leq \delta_{\text{кв}}/2 \cdot F_m$ для ДМ

3) База ПШС $B = S$ или M , $B \geq N$, период ПШС $T = B \cdot \tau_0 = S \cdot \tau_0$ или $M \cdot \tau_0$

4) Длительность дискрета с учетом затрат на синхронизацию $\tau_0 = T / S = (T_{\Pi} - \tau_{\text{си}}) / S$ (или M) для ДМ и $\tau_0 = (T_{\Pi} - \tau_{\text{си}}) / S \cdot n$ (или $(T_{\Pi} - \tau_{\text{си}}) / M \cdot n$) для КИМ

5) Полоса частот, занимаемая результирующим сигналом:

$$P_p = 2/\tau_0 \quad \text{для АМ} \quad \text{и} \quad P_p = 2(1+m_{\text{чм}}) \tau_0 \quad \text{для ЧМ},$$

6-8) Вероятность ошибочного приема символа, мощность передатчика и результирующая погрешность ЦСПИ рассчитываются по тем же формулам, что и для ЦСПИ с КИМ и ДМ, приведенным в разделах 2.2.1 и 2.2.2 темы 2.

Упражнения по пройденному материалу.

1. По ЦСПИ с модуляцией КИМ-У-АМн передается 12 сообщений. С помощью информационных символов “1” и “0” запишите один период функции Уолша, которая образуется на последнем выходе двоичного счетчика, являющегося основой генератора У-функций.

Ответы: 1) 101010101010, 2) 110011001100,
3) 1010101010101010, 4) 1111111100000000

2. По ЦСПИ с модуляцией ДМ-М-АМн передается 5 сообщений. С помощью информационных символов “1” и “0” запишите один период М-последовательности, которая образуется на первом выходе регистра сдвига, являющегося основой генератора М-последовательностей, если первоначально в регистр записаны все единицы.

Ответы: 1) 1110100, 2) 1101001, 3) 1010011, 4) 0100111.

3. Найти ширину спектра сигнала КИМ – У – ЧМн, если затраты на синхронизацию составляют один разряд КИМ, при $F_m=1,0$ кГц, $N = 3$, $m_{\text{чм}}=3$ и погрешности квантования = 10%.

4. Методом ДМ – У – ЧМн передаётся 5 аналоговых сигналов с максимальной частотой 3 кГц. Затраты на синхронизацию составляют половину интервала дискретизации. Высокочастотная модуляция – ЧМн с индексом $m_{\text{чм}}= 2$ и результирующей полосой частот, равной 5 МГц. Найти 1) погрешность АЦП и 2) результирующую погрешность ЦСПИ, если отношение сигнала к шуму на входе приемника составляет 10 дБ.

3.3 ЦСПИ с частотно-временным кодированием (ЧВК)

ЧВК представляет собой группу (набор) импульсов, определённым образом расставленных во времени и имеющих различные частоты заполнения [13]. Ансамбль ЧВК удобно представлять в виде частотно-временной матрицы ЧВМ размером $S \times m$ в плоскости «время t – частота f » (рисунок 3.5).

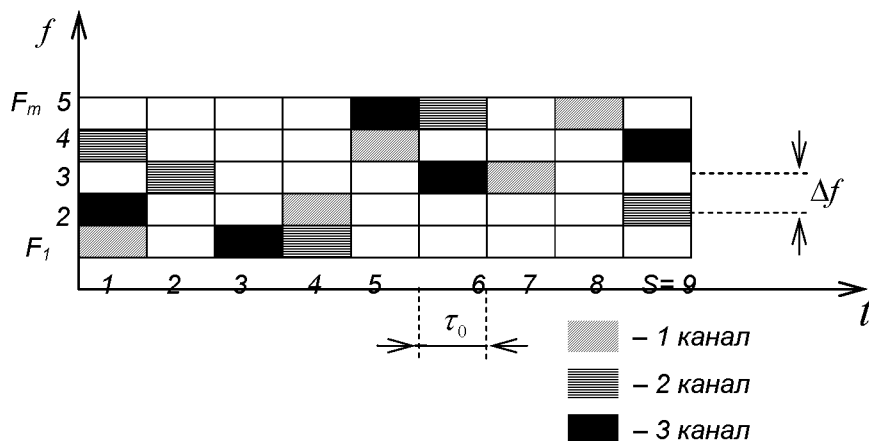


Рисунок 3.5 - Частотно-временная матрица (ЧВМ)

Каждый канал выделен соответствующей штриховкой, т.е. имеет свой код ЧВК, играющий роль адреса. При передаче «0» код ЧВК меняется, но для простоты может вовсе отсутствовать, следовательно общее число адресов (кодových комбинаций ЧВК) должно соответствовать числу каналов в СПИ.

Вид сигнала, возникающего на выходе первого канала, показан на рисунке 3.6.

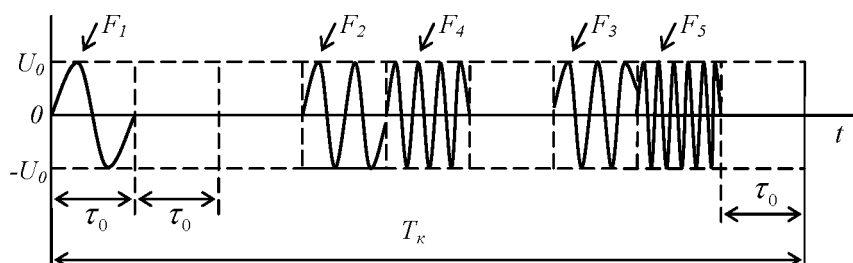


Рисунок 3.6 - Сигнал на выходе первого канала ЦСПИ с ЧВК

Основными характеристиками ЧВК является размер ЧВМ $I = S \times m$, число элементов ЧВК λ и число общих элементов r , определяющих корреляционные свойства ансамбля ЧВК: коэффициент взаимной корреляции $\rho_{ij} \leq \frac{r}{\lambda}$. Для ЧВМ на рисунке 3.5 $m = 5$ (число дискретов по частоте), $S = 9$ (число дискретов во времени), число элементов ЧВК $\lambda = 5$ и число общих элементов $r = 0$. Максимально-возможное число адресов (кодовых комбинаций) зависит от I , λ и r :

$$Q = \frac{c_I^{r+1}}{c_\lambda^{r+1}} \quad \text{при } r = 0, 1, \dots, I - 1.$$

Для ЧВК (рисунок 3.5), не имеющих общих элементов ($r = 0$), общее число ЧВК (ансамбль ЧВК) определится как $Q_0 = \frac{c_{45}^1}{c_5^1} = \frac{45}{5} = 9$. Если допустить один общий элемент $r = 1$, то $Q_1 = \frac{c_{45}^2}{c_5^2} = \frac{45 \cdot 44}{5 \cdot 4} = 99$. В каждом конкретном случае следует искать компромиссное решение между размером ансамбля и его ортогональными свойствами.

Функциональная схема передающей части ЦСПИ соответствует схеме передатчика, приведенной на рисунке 3.3, в которой в качестве генератора ПШС используется схема формирования ЧВК. Состав схемы формирования определяется видов ЧВМ, например, для ЧВМ, представленной на рисунке 3.5, схема формирования ЧВК должна содержать три регистра сдвига, по 9 разрядов в каждом, пять генераторов, схемы объединения и совпадения – электронные манипуляторы частот F_1 и F_5 и суммирующее устройство. В первую схему совпадения поступает сигнал частоты F_1 от генератора синусоидального напряжения и сигнал объединения со схемы ИЛИ. На входы схемы ИЛИ в свою очередь поступают сигналы регистров: с первого регистра снимается сигнал с первого выхода, со второго регистра – с четвертого выхода, с третьего – с третьего выхода. Аналогично строятся и другие каналы.

Особенностью передающей части ЦСПИ с ЧВК является необязательное применение в/ч-модулятора, если частоты манипуляций ЧВМ взяты из сетки разрешенных для излучения частот.

В состав приёмной части входят $m = 5$ полосовых фильтров, настроенных на соответствующие рабочие частоты F_1 К F_5 , амплитудные детекторы и линии задержки (регистры сдвига) с $S = 9$ отводами. В каждом регистре для каждого канала задействуется лишь по одному отводу. Сигналы с регистров поступают на схему совпадения, на выходе которой импульс сообщения появляется лишь в том случае, когда задержанные входные импульсы во всех ветвях регистров совпадают во времени.

Спектр группового (результатирующего) сигнала при условии, если минимальный дискрет по частоте равен $\Delta f = 1/\tau_0$, составит ширину $\Pi = \frac{m+1}{\tau_0}$, а база ЧВК равна

$$B = T \cdot F = \tau_0 \cdot S \cdot \Delta f \cdot m = S \cdot m = I.$$

Вероятность ошибочного приема символа, мощность передатчика и результирующая погрешность на выходе ЦСПИ определяются аналогично разделам 3.1 и 3.2, и рассчитываются для АМн манипуляции.

Упражнения по пройденному материалу [12-13].

1. Спектр ЧВК с матрицей $m \times s = 3 \times 8$ лежит в пределах от 30,0 до 40,0 МГц. Определите максимальную частоту аналогового сигнала, которую можно передать методом ДМ-ЧВК, если погрешность квантования задана величиной в 5%.

Ответы: 1) 3,9 кГц 2) 7,8 кГц 3) 15,625 4) 31,25 кГц

2. В асинхронной ЦСПИ методом ДМ - ЧВК с матрицей $m \times s = 4 \times 10$ передаются аналоговые сигналы с максимальной частотой $F_m = 1$ кГц. С какой погрешностью будут оцифрованы аналоговые сигналы, если на передачу всех каналов выделена полоса частот от 20 до 22,8 МГц.

Ответы: 1) 1,79% 2) 2,86% 3) 3,57% 4) 5%

3. Найти максимальную частоту передаваемых (аналоговых) сигналов F_m в ЦСПИ с модуляцией КИМ-ЧВК и с матрицей $m \times s = 3 \times 8$. Допустимая погрешность квантования равна 10%. Затраты на синхронизацию составляют 1 разряд КИМ. Самая низкая частота манипуляции $f_{\min} = 1,0$ МГц, самая высокая - $f_{\max} = 1,8$ МГц.

4. Найти максимальную частоту передаваемых (аналоговых) сигналов F_m в ЦСПИ с модуляцией ДМ-ЧВК и с кодо-образующей матрицей $m \times s = 5 \times 10$. Допус-

тимая погрешность квантования равна 10%. Самая низкая частота манипуляции $f_{\min} = 2$ МГц, самая высокая - $f_{\max} = 5$ МГц.

3.4 Контрольные задания/тесты по третьему разделу

1. По ЦСПИ методом КИМ – М – ЧМн передаются 10 аналоговых сигналов, частота которых не превышает 3 кГц. Затраты на синхронизацию составляют один разряд КИМ. Высокочастотная модуляция – ЧМн с результирующей полосой частот, равной 4 МГц. Точность преобразования аналоговой информации в цифровую составляет 4%. Найти индекс $m_{\text{чм}}$.

Ответы: 1) 1,85 2) 2,7 3) 3,7 4) 7,4.

2. В асинхронной ЦСПИ методом ДМ - ЧВК с матрицей $m \times s = 4 \times 10$ передаются аналоговые сигналы с максимальной частотой $F_m = 1$ кГц. С какой погрешностью будут оцифрованы аналоговые сигналы, если на передачу всех каналов выделена полоса частот от 20 до 22,0 МГц? Найти результирующую погрешность передачи информации на выходе ЦСПИ при заданном отношении сигнала к шуму в 12 дБ.

3.5 Письменный отчет по третьему разделу

Для студентов, номер которых по списку группы “N” – четный:

- 1) построить функциональную схему 3-х - канальной ЦСПИ с КИМ-У-ЧМн,
- 2) зарисовать сигналы в контрольных точках, а также групповой (результирующий) сигнал, приняв $U_{\text{вх1}} = 16/N$ В, $U_{\text{вх2}} = 16/N$ В + 1,5 В, $U_{\text{вх3}} = 16/N$ В + 3 В, $U_{\text{max}} = 20$ В,
- 3) построить спектр результирующего сигнала КИМ-У-ЧМн для $m_{\text{чмн}} = N$ и $f_{\text{гтн}} = 10N$ кГц,
- 4) построить эпюры напряжений на выходе цифрового интегратора, на входе и выходе ЦАП, и на выходе ФНЧ при приеме сигнала второго канала. Определить допущенную погрешность при передаче информации по второму каналу (в %), для заданного отношения сигнала к шуму = $2N$ дБ.
- 5) рассчитать максимальную частоту передаваемого – аналогового сигнала.

Для студентов, номер которых по списку группы “N” нечетный:

- 1) построить функциональную схему 2-х - канальной ЦСПИ с ДМ - ЧВК,
- 2) зарисовать сигналы в контрольных точках, а также групповой (результатирующий) сигнал, приняв $(-1)^N U_{вх1} \geq 0 \text{ В}$, $(-1)^N U_{вх2} \leq 0 \text{ В}$ и $m \times s = 4 \times 6$,
- 3) построить спектр результирующего сигнала ДМ - ЧВК для частотно-временной матрицы при $m \times s = 4 \times 6$ и $f_{ГТН} = 10N \text{ кГц}$,
- 4) построить эюры напряжений на выходе цифрового интегратора, на входе и выходе ЦАП, и на выходе ФНЧ при приеме сигнала второго канала. Определить допущенную погрешность при передаче информации по второму каналу (в %), для заданного отношения сигнала к шуму $= 2N \text{ дБ}$.
- 5) рассчитать максимальную частоту передаваемого – аналогового сигнала.

Задание по 3-му разделу оформить по правилам ЕСКД [15] в виде отчета к лабораторной работе и сдать преподавателю.

4 ЦСПИ С ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫМ КОДИРОВАНИЕМ

4.1 Помехоустойчивое кодирование

Помехоустойчивое кодирование основано на введении избыточности $k \ll m$ информационным разрядам КИМ $a_1, a_2, \dots, a_m$ добавляются по определенным правилам « k » контрольных, или поверочных $b_1, b_2, \dots, b_k$. Полученный код (n, m) содержит 2^n кодовых комбинаций, из которых лишь 2^m комбинаций разрешены, т.е. несут информацию. Такой код позволяет не только обнаружить ошибку, происшедшую при передаче информации, но в некоторых случаях и исправить её. Степень коррекции зависит от минимально – возможного кодового расстояния между кодовыми комбинациями $d_{\min}$. Для безизбыточного кода $d_{\min} = 1$. Если $d_{\min} > 1$, то появляется возможность обнаруживать ошибки кратности t_0 и исправлять ошибки кратности t_u :

$$t_0 = d_{\min} - 1 \quad t_u = (d_{\min} - 1)/2 \quad \text{или} \quad d_{\min} = t_u + t_0/2 + 1 \quad (4.1)$$

Так для кода Хемминга $d_{\min} = 3$, что позволяет обнаруживать двухкратные ошибки и исправлять однократные.

Число контрольных разрядов зависит от кратности ошибок t_u и может быть найдено исходя из неравенства:

$$2^k \geq \sum_{i=0}^{t_u} C_n^i = 1 + n + (n(n-1)/1 \cdot 2) + \dots \quad (4.2)$$

При введении избыточности существенно расширяется полоса частот, занимаемая цифровой последовательностью, что часто приводит к увеличению вероятности ошибочного приёма символа.

Пример. Во сколько раз увеличится полоса частот, занимаемая кодом Хемминга с $d_{\min} = 3$ по сравнению с полосой кода КИМ без избыточности, если погрешность квантования $\bar{b}_{\text{кв}} = 5\%$, а полоса частот, занимаемая аналоговым сигналом составляет $F_m = 1 \text{ кГц}$.

Решение.

- 1) Определим требуемое число информационных разрядов : $m \geq -\log_2 \bar{b}_{\text{кв}} = 5$
- 2) по формуле (4.1) кратность исправляемой ошибки $t_u \geq (d_{\min} - 1)/2 = (3 - 1)/2 = 1$
- 3) по формуле (4.2) число контрольных разрядов должно удовлетворять неравенству $2^k \geq 1 + m + k$ т.е. $2^k - k \geq 1 + m = 6$

Для $k=3$ $2^3-3=5$ – неравенство не выполняется,

Для $k=4$ $2^4-4=12$ – неравенство выполняется, и код Хэмминга может быть записан в виде (9,5),

4) Длительность импульса КИМ для безизбыточного кода $\tau_0 = T_{\Pi}/m = 1/2F_m \cdot m = 1/2 \cdot 1 \cdot 5 = 0,1 \text{ мс}$ и полоса частот $\Pi_{\text{КИМ}} = 1/\tau_0 = 1/0,1 = 10 \text{ кГц}$

5) Длительность импульса кода Хэмминга

$$\tau_0 = T_{\Pi}/(m+k) = 1/2F_m \cdot (m+k) = 1/2 \cdot 1 \cdot (5+4) = 0,055 \text{ мс}$$

и полоса частот $\Pi_{\text{ХЭМ}} = 1/\tau_0 = 1/0,055 = 18,2 \text{ кГц}$ т.е. увеличится в 1,8 раза

Для обнаружения наиболее часто встречающихся одиночных ошибок используется **код Вагнера**, или **код с проверкой на четность**. Кодирование по Вагнеру позволяет обнаруживать одиночные ошибки путем добавления одного контрольного разряда по следующему правилу: $b = a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_m$, т.е. число кодовых комбинаций увеличивается в два раза, причем только половина из них являются разрешенными. Заключение о том, произошла ли ошибка, делается по вычислению контрольной суммы: $S = b \oplus a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_m$. Если контрольная сумма не равна нулю, то принятая кодовая комбинация принадлежит запрещенному множеству, следовательно делается вывод о том, что при передаче кода произошла ошибка.

Функциональная схема кодера Вагнера представлена на рисунке 4.1.

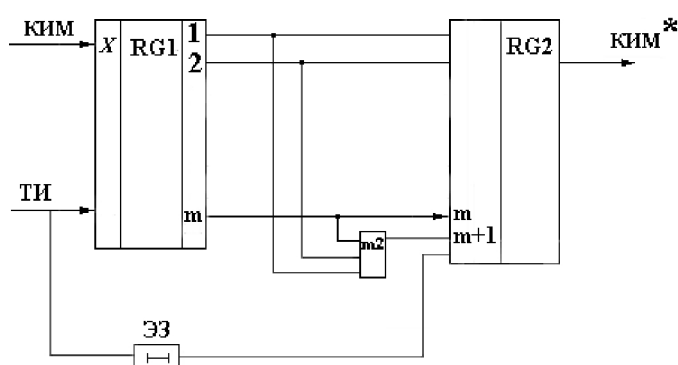


Рисунок 4.1 – Функциональная схема кодера Вагнера

Схема кодера содержит входной регистр RG1, служащий для преобразования последовательного кода КИМ в параллельный, сумматора по модулю 2 $m/2$ для формирования контрольного разряда и регистр RG2 для преобразования параллельного кода

в последовательный. Код КИМ на выходе кодера отличается от входного наличием контрольного (поверочного) разряда, поэтому на схеме код помечен как КИМ*.

Тактовые импульсы ТИ служат для осуществления процесса преобразования кодов в регистрах. Так как в схеме $m2$ на формирование контрольного разряда затрачивается какое-то время, сдвиг импульсов в выходном регистре должно происходить с некоторой задержкой, для чего используется элемент ЭЗ (для задержки достаточно дважды проинвертировать тактовые импульсы).

Функциональная схема декодера Вагнера представлена на рисунке 4.2.

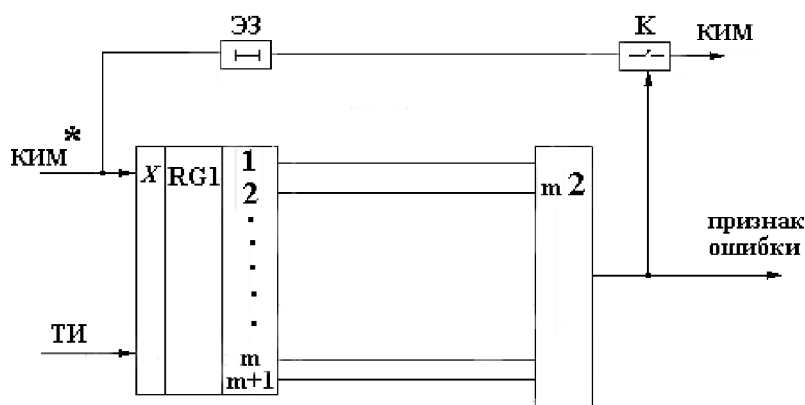


Рисунок 4.2 - Функциональная схема декодера Вагнера

В состав декодера входят регистр RG1, служащий для преобразования последовательного кода КИМ в параллельный, сумматор по модулю 2 $m2$, предназначенный для вычисления контрольного символа (признака ошибки), элемент задержки ЭЗ и ключ К. Если ошибки нет, то на выходе сумматора $m2$ – нулевой уровень, ключ К замкнут, и поступающая на вход декодера последовательность КИМ проходит на выход. В случае ошибки на выходе схемы $m2$ образуется высокий уровень, ключ размыкается и кодовая комбинация КИМ на выход декодера не проходит. Так как на принятие решения, произошла ошибка или нет, необходимо время, в схеме передачи кода поставлен элемент задержки. Признак ошибки (символ “1”) может быть использован для индикации одиночной ошибки.

Для исправления одиночных ошибок в технике передачи информации используется код Хэмминга с $d_{\min}=3$.

Структура кода Хэмминга с $d_{\min}=3$ задаётся таблицей, в которой за контрольными разрядами закрепляются позиции 1,2,4,8 и т. д., а на остальных – информационные. Знаком «X» отмечается, входит ли данный разряд в формулу для расчёта контрольных чисел [14]:

Таблица 4.1 – Структура кода Хэмминга

№№ поз./ разряда	1 b ₁	2 b ₂	3 a ₁	4 b ₃	5 a ₂	6 a ₃	7 a ₄	8 b ₄	9 a ₅	10 a ₆	11 a ₇	12 a ₈	13 a ₉	14 a ₁₀	15 a ₁₁
b ₁	X		X		X		X		X		X		X		X
b ₂		X	X			X	X			X	X			X	X
b ₃				X	X	X	X					X	X	X	X
b ₄								X	X	X	X	X	X	X	X

Таблица 4.1 указывает правило объединения сумматоров по mod2 для формирования контрольных разрядов.

Пример. Записать код Хэмминга для 3^x разрядного кода КИМ 110.

Решение. 1) по формуле (4.2) для $m=3$ находим $k=3$

2) В соответствии с таблицей для 1- 6 позиций

$$b_1 = a_1 \oplus a_2$$

$$b_2 = a_1 \oplus a_3$$

$$b_3 = a_2 \oplus a_3$$

Для примера $a_1=0$ $a_2 = a_3=1$, тогда $b_1=1$, $b_2=1$, $b_3=0$

3) записываем код Хэмминга:

$$b_1 \ b_2 \ a_1 \ b_3 \ a_2 \ a_3 = 110011$$

Для исправления одиночных ошибок производится «k» проверок на четность:

$$S_1 = b_1 \oplus a_1 \oplus \dots$$

$$S_k = b_k \oplus a_1 \oplus \dots$$

Контрольное число $S_k \dots S_1$ в двоичном коде (синдром ошибки) указывает на номер позиции, в которой произошла ошибка.

Пример. В принятой кодовой комбинации произошла ошибка в первом информационном разряде, т.е. принят код 111011. Определить синдром ошибки.

Решение. В соответствии с таблицей для 1 – 6 позиций

$$S_1 = b_1 \oplus a_1 \oplus a_2 = 1 \oplus 1 \oplus 1 = 1$$

$$S_2 = b_2 \oplus a_1 \oplus a_3 = 1 \oplus 1 \oplus 1 = 1$$

$$S_3 = b_3 \oplus a_2 \oplus a_3 = 0 \oplus 1 \oplus 1 = 0$$

Полученный код 011 указывает на 3^ю позицию. Изменив её на противоположную, получим исправленную кодовую комбинацию 110011.

Функциональная схема кодера Хэмминга для 11-разрядного кода КИМ представлена на рисунке 4.3.

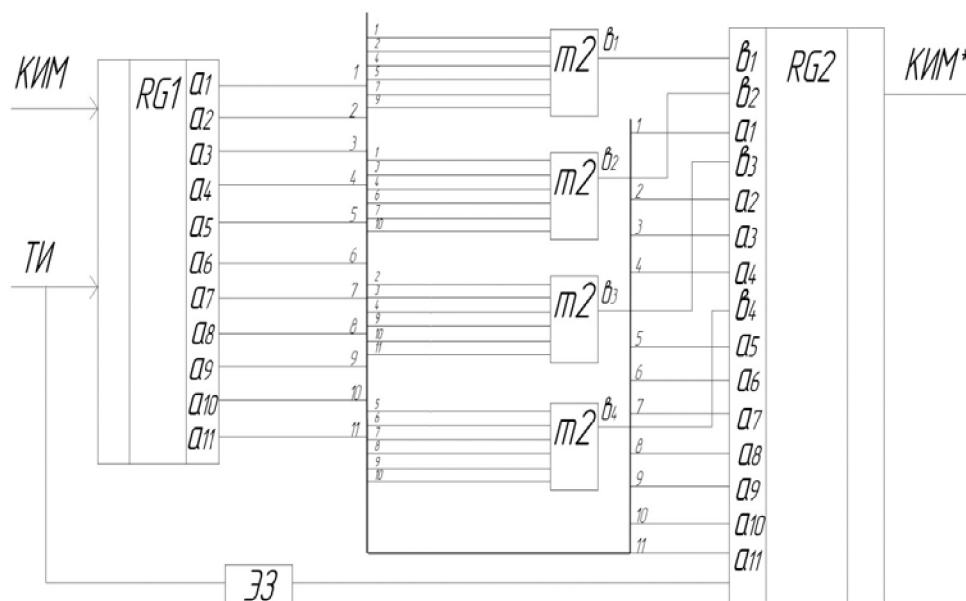


Рисунок 4.3 - Функциональная схема кодера Хэмминга

При кодировании по Хэммингу к 11 информационным разрядам добавляется 4 контрольных разряда, которые находятся из таблицы 4.1 по следующему правилу:

$$b_1 = a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_{11}$$

$$b_2 = a_1 \oplus a_3 \oplus \dots \oplus a_{11}$$

$$b_3 = a_2 \oplus a_3 \oplus \dots \oplus a_{11}$$

$$b_4 = a_5 \oplus a_6 \oplus \dots \oplus a_{11}$$

Формирование контрольных разрядов происходит в сумматорах по модулю 2 $m2$ после того, как входная кодовая комбинация будет записана в параллельном виде с помощью входного регистра RG1. Далее полученные 4 контрольных разряда вместе с 11 информационными подаются на регистр RG2, который преобразует параллельный код в последовательный. Код КИМ на выходе кодера отличается от входного наличием контрольных разрядов, поэтому на схеме выходной код помечен как КИМ*. Тактовые импульсы ТИ служат для осуществления процесса преобразования кодов в регистрах. Так как в схемах $m2$ на формирование контрольных разрядов затрачивается какое-то время, сдвиг импульсов в выходном регистре происходит с задержкой, для чего используется элемент ЭЗ.

Функциональная схема декодера Хэмминга представлена на рисунке 4.4.

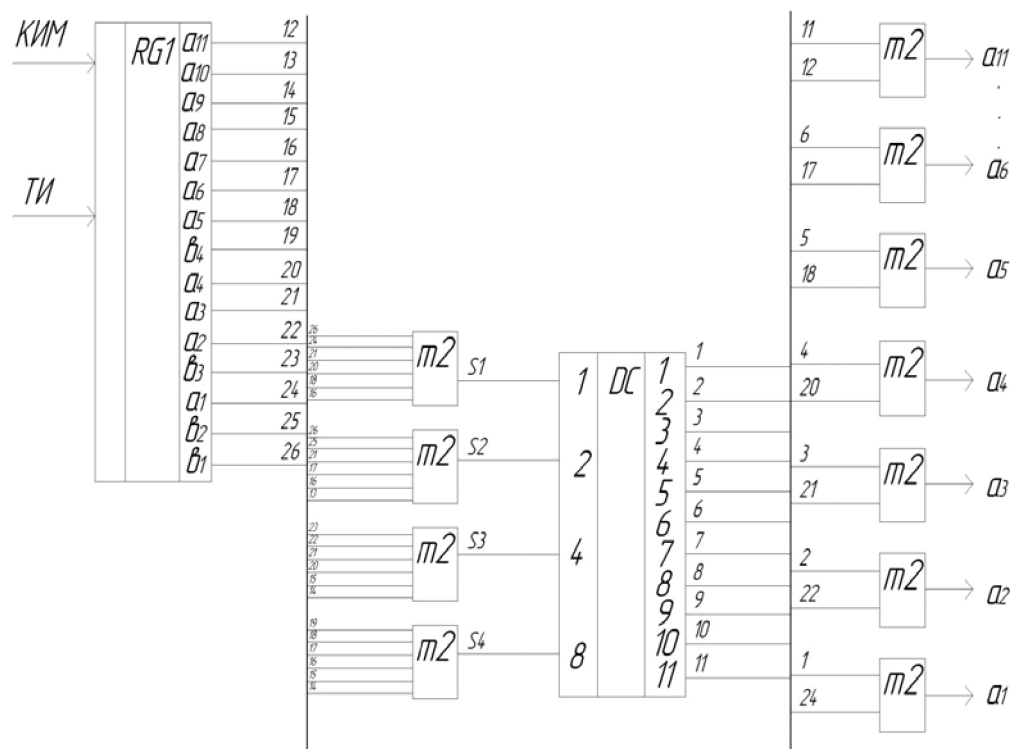


Рисунок 4.4 - Функциональная схема декодера Хэмминга

В состав декодера входят регистр RG1, служащий для преобразования последовательного кода КИМ в параллельный, четыре сумматора по модулю 2 $m2$, предназначенные для вычисления контрольного числа (4-х разрядного двоичного кода), дешифратор DC, служащий для преобразования двоичного кода в десятичный, и выходные сумматоры по модулю 2 $m2$, осуществляющие исправление ошибки.

Контрольное число $S_1 S_2 S_3 S_4$, формируемое сумматорами по модулю 2, определяется по правилу, отображающему систему уравнений:

$$S_1 = b_1 \oplus a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_{11}$$

$$S_2 = b_2 \oplus a_1 \oplus a_3 \oplus \dots \oplus a_{11}$$

$$S_3 = b_3 \oplus a_2 \oplus a_3 \oplus \dots \oplus a_{11}$$

$$S_4 = b_4 \oplus a_5 \oplus a_6 \oplus \dots \oplus a_{11}$$

Если при передаче кодовой комбинации произошла ошибка, то контрольная сумма не равна нулю, и представляет собой 4-х разрядный двоичный код $S_4 S_3 S_2 S_1$, указывающий номер позиции, в которой произошла ошибка. Для того чтобы использовать это число, производится преобразование двоичного кода в десятичный с помощью дешифратора DC. В зависимости от кода, на соответствующем выходе дешифратора образуется высокий уровень. Выходы дешифратора соединены с двухвходовыми сумматорами по модулю 2. Число сумматоров равно одиннадцати – по числу информационных разрядов. Исправление ошибки происходит путем замены символа на противоположный, т.е. при приеме “0” добавление единицы происходит исправление на “1”, а при приеме “1” последняя после добавления единицы изменяется на ноль.

Вычисление вероятности ошибки производится по формуле:

$$P_{\text{ош}} = N_{\text{ош}} / N_{\text{изм}} ,$$

где $P_{\text{ош}}$ - вероятность ошибочного приема символа,

$N_{\text{ош}}$ - число ошибочно принятых разрядов;

$N_{\text{изм}}$ - общее число разрядов, переданных за время измерения.

Сравнение переданной и принятой последовательностей производится сумматором по модулю 2 $m2$. В случае возникновения ошибки на выходе элемента $m2$ появляется “1”. Эти импульсы поступают на вход счетчика числа измерений Ст2. Счетчик через 10000 тактовых импульсов выдает накопленное число $N_{\text{ош}}$ в буферный регистр, откуда искомая информация выдается на 7-сегментный светодиодный индикатор через дешифратор 4-разрядного двоично-десятичного кода DC (схема управления светодиодной матрицей) [14].

Для обеспечения измерений с точностью 0,0001 примем $N_{\text{изм}} = 10000$.

Упражнения по пройденному материалу.

1. В ЦСПИ используется код Хемминга с минимальным расстоянием $d_{\min} = 4$.

Какие ошибки он будет обнаруживать и исправлять?

Ответы: 1) Обнаруживать и исправлять однократные ошибки,

2) Обнаруживать и исправлять двухкратные ошибки,

3) Обнаруживать двухкратные и исправлять однократные ошибки,

4) Обнаруживать трехкратные и исправлять однократные ошибки.

5) Обнаруживать трехкратные и исправлять двухкратные ошибки

2. По ЦСПИ с модуляцией КИМ - АМн передается 5-разрядный код КИМ вида 10011. Запишите код КИМ с кодом Хэмминга.

Ответы: 1) 111100111, 2) 100111011, 3) 101100111, 4) 001100111.

3. Во сколько раз увеличится полоса результирующего сигнала КИМ-АМн с корректирующим кодом Хэмминга (7,4)?

4. Методом КИМ – ВРК - ЧМ с частотами манипуляции 200 и 500 кГц передаются четыре сообщения с $F_m = 0,3$ кГц, и два сообщения с $F_m = 1,0$ кГц. Для повышения помехоустойчивости применен код Хэмминга. Затраты на синхронизацию составляют 2 канальных интервала. Погрешность АЦП должна быть не хуже - 10%. Найти индекс ЧМ.

4.2 Контрольное задание/тесты по четвертому разделу

1. Методом КИМ – ВРК - ЧМ с частотами манипуляции 2 и 6 МГц передаются два сообщения с $F_m = 4$ кГц, и четыре сообщения с $F_m = 1,8$ кГц. Для повышения помехоустойчивости применен код Вагнера. Затраты на синхронизацию составляют 3 канальных интервала. Найти а) погрешность АЦП - преобразования при индексе $m_{\text{ЧМ}} = 4$ и б) ширину спектра результирующего сигнала.

Ответы: а) 1- 0,78%, 2 - 1,56%, 3- 3,125%

б) 1 - 4 МГц, 2 – 4, 015 МГц, 3 - 5 МГц, 4 – 6 МГц.

2. Найти максимальную частоту для каждого из 3-х передаваемых (аналоговых) сигналов F_m в ЦСПИ с модуляцией КИМ – ВРК - ЧМн. Допустимая погрешность квантования равна 4%. Для повышения помехоустойчивости применен код Хэмминга. Затраты на синхронизацию составляют 2 разряда КИМ. Минимальная частота спектра результирующего сигнала - 1,3 МГц, максимальная - 2,1 МГц, индекс ЧМн принять равным 3-м.

4.3 Самостоятельная работа по четвертому разделу

1. Преобразовать входной (аналоговый) сигнал амплитудой N вольт с $F_{\max}=1$ кГц в 11-разрядный двоичный код, приняв $U_{\max} = 12$ В. N – порядковый номер студента в списке группы. Найти $\delta_{\text{кв}}$.
2. Записать корректирующие коды Вагнера и Хэмминга к найденной выше кодовой комбинации.
3. Рассчитать полосу частот, занимаемую результирующими сигналами АМн и ЧМн с корректирующими кодами и без них.
4. Используя полученные результаты, составить функциональную схему передающей и приемной частей ЦСПИ. Разработать схему подсчета ошибок и зарисовать её.
5. Построить осциллограммы напряжений в характерных точках схемы:
 - опорные частоты
 - набранное информационное слово
 - сигнал модулятора (три вида - АМн, ЧМн, ФМн)
 - смесь сигнала с шумом
 - выход умножителей каналов «1» и «0»
 - выход интеграторов каналов «1» и «0»
 - выход декодера.

На осциллограммах указать интервал опроса.

6. Рассчитать максимально-возможную частоту аналогового напряжения, которое может быть подано на вход ЦСПИ.
7. Рассчитать вероятность ошибочного приема символа для АМн и ЧМн при

заданном отношении сигнала к шуму в 1,5 Н дБ.

8. Рассчитать результирующую погрешность передачи информации на выходе ЦСПИ для АМн и ЧМн, используя данные, найденные в предыдущих пунктах.

Задание по 4-му разделу оформить по правилам ЕСКД [15] в виде отчета к лабораторной работе и сдать преподавателю.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Калмыков, В. В. Радиотехнические системы передачи информации [Текст] / под ред. В. В. Калмыкова. - М.: Радио и связь, 1990.- 304 с.
2. Тепляков, И. М. Радиолинии космических систем передачи информации [Текст]: учеб. пособие для ВУЗов/ И. М. Тепляков, И. Д. Калашников, Б. В. Рошин; под ред. И. М. Теплякова.- М.: Сов. Радио, 1978.- 400 с.
3. Глазунов, В. А. Радиотехническая система передачи информации с временным уплотнением сигналов (каналов – РТС ПИ с ВРК) [Текст]: метод. указания к лаб. работе/ В.А.Глазунов, Самара: СГАУ, 2011. – 32 с.
4. Пенин, П. И. Системы передачи цифровой информации [Текст]: учеб. пособие для ВУЗов / П. И. Пенин. - М.: Сов. радио, 1976.- 368 с.
5. Шляпоберский, В. И. Основы техники передачи дискретных сообщений [Текст] / В. И. Шляпоберский . – М.: Связь, 1979. – 480 с.
6. Калашников, Н. И. Системы радиосвязи [Текст] : учебник для вузов /под ред. Н. И. Калашникова. – М.: Радио и связь, 1988. – 352 с.
7. Глазунов, В. А. Оценка достоверности передачи информации в цифровых системах связи [Текст] : метод. указания к лаб. работе / В.А.Глазунов, Самара: СГАУ, 2012. – 36 с.
8. Стил, Р. Принципы дельта-модуляции [Текст] / под ред. В. В. Маркова. - М.: Связь, 1979. – 368 с.
9. Глазунов, В. А. Радиотехническая система передачи информации с частотным уплотнением сигналов (каналов – РТС ПИ с ЧРК) [Текст] : метод. указания к лаб. работе/В.А.Глазунов, Самара: СГАУ, 2011. – 24 с.
10. Нефедов, В.И. Основы радиоэлектроники и связи [Текст] : учебник для вузов/ В. И. Нефедов, - М.: Высшая школа, 2005. – 510 с.
11. Радиосистемы передачи информации / под ред. И. М. Теплякова. – М. : Радио и связь, 1982.- с. 114-152.

12. Глазунов, В. А. Цифровая система передачи информации на функциях Уолша [Текст] : метод. указания к лаб. работе/В.А.Глазунов, Самара: СГАУ.- 2011. – 16 с.
13. Глазунов, В. А. Цифровая многоканальная система передачи информации с частотно-временным кодированием [Текст] : метод. указания к лаб. работе / В. А. Глазунов.- Самара: СГАУ, 2011. – 20 с.
14. Глазунов, В. А. Цифровая система передачи информации с помехоустойчивым кодированием [Текст]: метод. указания к лаб. работе / В. А. Глазунов, Самара: СГАУ, 2011. – 16 с.
15. Стандарт организации. СТО СГАУ 02068410-004-2007.Общие требования к учебным текстовым документам. – Самара, 2007.