

Воронежский институт МВД России  
Кафедра инфокоммуникационных систем и технологий

Лукьянов А.С.

СИСТЕМЫ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СВЯЗИ

*Методические рекомендации*

Воронеж 2018

ББК 32.884

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры инфокоммуникационных систем и технологий. Протокол № 3 от 16 октября 2018 г.

Рассмотрены и одобрены на заседании методического совета института. Протокол № 2 от 22 октября 2018 г.

Рецензенты:

Домнин И.А. – начальник ЦИТСиЗИ ГУ МВД России по Воронежской области, подполковник внутренней службы;

Дунин В.С. – доцент кафедры информационного и технического обеспечения ОВД Дальневосточного юридического института МВД России, к.т.н., доцент, полковник полиции.

**Лукьянов, Александр Сергеевич.** Системы многоканальной связи: методические рекомендации [Электронный ресурс] / А.С. Лукьянов – Электр. дан. и прогр. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2018. – 1 электр. опт. диск (CD-ROM): 12 см. – Систем. требования: процессор Intel с частотой не менее 1,3 ГГц; ОЗУ 512 Мб; операц. система семейства Windows; CD-ROM дисковод.

Методические рекомендации «Системы многоканальной связи» содержат теоретические сведения о вопросах, связанных с видами модуляции, структуре оборудования цифровых систем передачи и общими принципами построения, формирования, и кодирования в системах многоканальной связи и изучение которых поможет также развить практические навыки эксплуатации отдельных элементов систем связи, что способствует успешному выполнению выпускниками своих профессиональных обязанностей. Предназначено для курсантов, слушателей очной и заочной формы обучения радиотехнических специальностей Воронежского института МВД России.

ISBN 978-5-88591-680-6

© Воронежский институт МВД России, 2018

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение.....	4
<i>1. Сигналы электросвязи.....</i>	<i>6</i>
1.1. Основные понятия и определения электросвязи.....	6
1.2. Физические характеристики сигналов электросвязи .....	9
1.3. Основные виды первичных сигналов.....	12
1.3.1. Телефонные (речевые) и факсимильные сигналы.....	12
1.3.2. Телевизионные сигналы.....	17
1.3.3. Телеграфные сигналы и сигналы передачи данных.....	19
<i>2. Лабораторные работы.....</i>	<i>25</i>
2.1. Лабораторная работа № 1.....	25
2.2. Лабораторная работа № 2.....	34
2.3. Лабораторная работа № 3.....	43
2.4. Лабораторная работа № 4.....	48
2.5. Лабораторная работа № 5.....	52
2.6. Лабораторная работа № 6.....	57
2.7. Лабораторная работа № 7.....	63
2.8. Лабораторная работа № 8.....	68
2.9. Лабораторная работа № 9.....	75
2.10. Лабораторная работа № 10.....	80
2.11. Лабораторная работа № 11.....	89
Список используемой литературы.....	99

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важнейшей задачей совершенствования существующей системы связи МВД России является интеграция различных видов связи (телефонии, телеграфии, передачи данных и т.д.). Выполнение этой задачи подразумевает построение инфокоммуникационной сети на основе цифровых технологий, стандартов, протоколов, технических средств. На уровне регионов ставится задача построения информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС), обеспечивающих услугами качественной связи все подразделения ОВД.

Научно-технический прогресс во многом определяется скоростью передачи информации и ее объемом. Возможность резкого увеличения объемов передаваемой информации наиболее полно реализуется в результате применения волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), которые по сравнению с такими широко распространенными средствами, как спутниковая связь и радиорелейные линии, имеют значительно более широкую полосу пропускания. Применение оптических кабелей целесообразно и экономически эффективно на всех участках сети связи в ведомственных подразделениях, что не только значительно повышает технико-экономические показатели систем передачи, но и обеспечивает возможность поэтапного перехода к цифровым сетям интегрального обслуживания.

В нашей стране широко используются ВОЛС на межстанционных соединительных линиях ГТС, магистральных и внутризоновых линиях, на локальных компьютерных сетях и сетях кабельного телевидения.

Волоконно-оптические линии связи выполняет такие основные виды работ по строительству, как разбивка трассы линии на местности в соответствии с проектом на строительство, доставка кабеля, оборудования и других материалов на кабельную трассу, испытание, прокладка и монтаж кабеля и окончных устройств, проведение приемосдаточных испытаний.

Основной задачей технической эксплуатации ВОЛС в подразделениях ОВД является обеспечение качественной и бесперебойной их работы. Бесперебойная работа ВОЛС достигается постоянным техническим надзором за их состоянием, систематическим выполнением профилактических мероприятий по предупреждению повреждений и аварий, своевременным устранением возникающих неисправностей и проведением необходимых дополнительных работ. Передача и распределение информационных сообщений между миллионами и сотнями миллионов источников и потребителей информации (условно абонентами) возможны на основе сетей связи. Сети связи, построенные на основе средств электросвязи, называются

телекоммуникационными сетями.

*Сеть связи* представляет собой технологическая система, включающая в себя средства и линии связи и предназначенная для электросвязи или почтовой связи.

*Электросвязь* - любое излучение, передача или прием знаков, сигналов, голосовой информации, письменного текста, изображений, звуков или сообщений любого рода по радиосистеме, проводной, оптической и другим электромагнитным системам.

Основными компонентами сети электросвязи являются:

- сетевые узлы и сетевые станции, в которых устанавливается каналообразующая аппаратура и осуществляется переключение каналов или групп каналов и сетевых трактов;

- линии передачи, соединяющие между собой сетевые станции или сетевые узлы и оконечные устройства;

- узлы (центры) коммутации (УК), распределяющие сообщения в соответствии с адресом; УК могут быть транзитными, оконечными (если к ним подключаются ОП) и смешанного типа;

- оконечные пункты (ОП), обеспечивающие ввод/вывод сообщений абонента. ОП, расположенный непосредственно у абонента, называется абонентским пунктом (АП). АП может быть индивидуального пользования, часто называемый терминалом, или коллективного пользования;

- концентраторы и мультиплексоры, обеспечивающие улучшение использования пропускной способности каналов связи путем их уплотнения. Каналы могут быть магистральными (между УК) и абонентскими (между ОП и УК);

- многоуровневая система управления, обеспечивающая эффективное использование сетевых ресурсов.

*Услуга связи* - деятельность по приему, обработке, хранению, передаче, доставке сообщений электросвязи или почтовых отправлений;

*Трафик* - нагрузка, создаваемая потоком вызовов, сообщений и сигналов, поступающих на средства связи.

# 1. СИГНАЛЫ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

## 1.1. Основные понятия и определения электросвязи

Развитие человеческой цивилизации - непрерывное и динамичное развитие средств общения от личного до общественного, от примитивных с помощью жестов, мимики, наскальных рисунков, звуков и света (дыма), «ямской гоньбы» и оптических семафоров до создания глобальных *телекоммуникационных систем и сетей*, обеспечивающих передачу, прием, обработку, распределение и хранение различной информации. Под *информацией* понимается совокупность сведений о событиях, явлениях, процессах, понятиях и фактах, предметах и лицах независимо от формы представления.

Под *связью (communication)* понимается обмен информацией или пересылка информации с помощью средств, функционирующих в соответствии с согласованными правилами (называемыми в конкретных условиях протоколами).

Международная Конвенция по электросвязи (Найроби, 1982 год) определила «электросвязь» как «...*передачу, получение и прием знаков, сигналов, письменного текста, изображения и звуков или сообщений любого рода по проводной, радио и оптической или другим электромагнитным системам...*». В «Основных положениях развития ЕСЭ РФ» электросвязи дается такое определение: *электросвязь (telecommunication) — передача или прием знаков, сигналов, текстов, изображений, звуков по проводной, оптической или другим электромагнитным системам. Это определение может быть выражено в такой форме: электросвязь — это передача и прием сообщений с помощью сигналов электросвязи по проводной, радио-, оптической или другим средам распространения.*

Из вышеприведенных определений выходит следующее:

*Сообщение* – форма представления информации для передачи ее от источника информации к потребителю. Применительно к сфере телекоммуникаций *сообщение* – это информация, передаваемая с помощью электромагнитных сигналов средствами электросвязи. Примеры сообщений: текст телеграммы, речь, музыка, фототелеграмма-факс, телевизионное изображение, данные с выхода вычислительных машин, команды в системах телеуправления и телеконтроля и др.

*Сигнал* — материальный носитель или физический процесс, отражающий (несущий) передаваемое сообщение.

Классификация сигналов может быть самой разнообразной, но особый интерес вызывают электрические сигналы, называемые *сигналами электросвязи* и представляющие *электрические напряжения или токи, изменение параметров которых во времени отражает передаваемое сообщение*. К электрическим сигналам относятся: телефонные, телеграфные, факсимильные сигналы, сигналы передачи данных, сигналы телевизионного и звукового вещания, сигналы телеконтроля и телеуправления.

С понятием телекоммуникационных систем тесно связано понятие «*телекоммуникационные сети, представляющие совокупность пунктов, узлов и линий (каналов, трактов), их соединяющих*».

Телекоммуникационные системы и телекоммуникационные сети, взаимодействуя друг с другом, образуют *систему электросвязи* — комплекс технических средств, обеспечивающих электросвязь определенного вида.

Классификация систем электросвязи весьма разнообразна, но в основном определяется видами передаваемых сообщений, средой распространения электрических сигналов (представлено на рисунке 1.1.) и способами распределения информации: коммутируемые или некоммутируемые сети передачи сообщений.



Рис.1.1. Классификация систем электросвязи по видам передаваемых сообщений и среды распространения

Телекоммуникационные системы и сети представляют совокупность технических средств, осуществляющих следующие операции при передаче сообщения от источника к получателю:

- преобразование сообщения, поступающего от источника сообщения (ИС) в сигнал электросвязи;
- преобразование сигналов электросвязи в форму, удобную для передачи и получателя сообщения (ПС);
- сопряжения сигналов электросвязи с каналами передачи и станциями коммутации (СК), установленных в конечных пунктах (ОП) или узлах связи (УС). Обобщенная структурная схема взаимодействия телекоммуникационных систем и сетей представлено на рисунке 1.2.

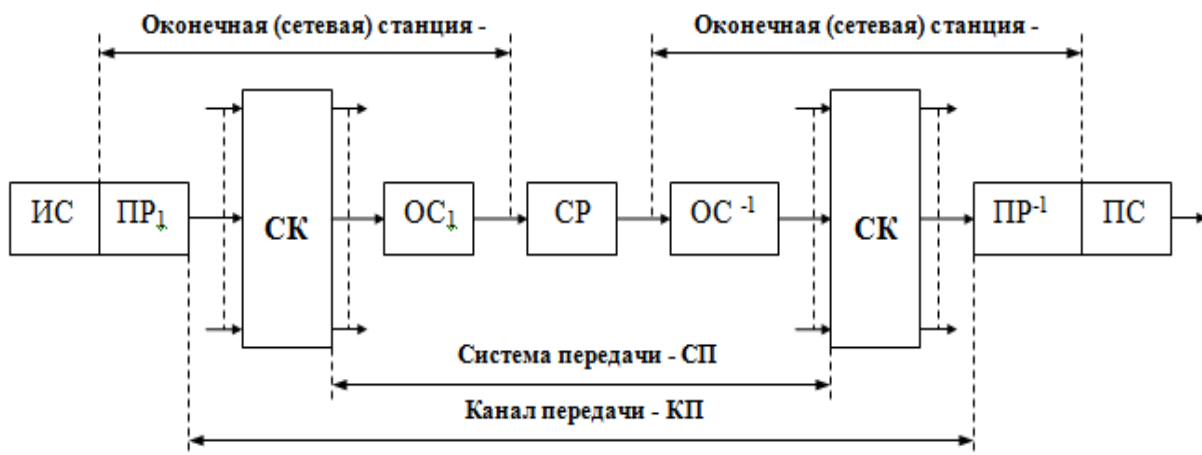


Рис.1.2. Взаимодействие телекоммуникационных систем и сетей

где ИС — источник сообщения (информации);

ПР<sub>1</sub> — преобразователь сообщения в электрический сигнал, называемый *первичным электрическим сигналом* (в дальнейшем просто «первичный сигнал»);

СК — станция коммутации, представляющая совокупность коммутационной и управляющей аппаратуры, обеспечивающей установление различного вида соединений (местные, междугородные, международные, входящие, исходящие и транзитные) и реализующей определенный метод коммутации (коммутация каналов, коммутация сообщений или коммутации пакетов);

ОС<sub>1</sub> — оборудование сопряжения, осуществляющее преобразование первичных сигналов в линейные электрические сигналы, физические характеристики которых согласуются с параметрами передачи среды распространения — СР;

ОС<sup>-1</sup> — оборудование сопряжения, осуществляющее преобразование линейных электрических сигналов в исходные первичные сигналы;

ПР<sup>-1</sup> — преобразователь первичного сигнала в сообщение;

ПС — получатель сообщения.

Комплекс технических средств и среды распространения, обеспечивающий передачу первичного сигнала в определенной полосе частот или с определенной скоростью передачи между сетевыми станциями или сетевыми узлами, называется *каналом передачи*.

Линейные сигналы при прохождении по среде распространения испытывают ослабление (затухание), подвергаются различным *искажениям* и *помехам*. Для устранения влияния этих факторов на качество передачи сигналов через определенные расстояния в зависимости от вида системы передачи устанавливаются *усилители*, *регенераторы* или *ретрансляторы*, которые вместе со средой распространения образуют *линейный тракт* системы передачи.

## 1.2. Физические характеристики сигналов электросвязи

Электрический сигнал, получаемый на выходе преобразователя сообщения или соответствующего ему сигнала неэлектрической природы, называется *первичным сигналом электросвязи*.

Параметр первичного сигнала  $x(t)$ , изменение величины которого однозначно отображает передаваемое сообщение, называется *представляющим* или *информационным параметром*. Таким параметром, например, может быть амплитуда, частота или фаза гармонического электрического сигнала; амплитуда, длительность или фаза импульсов периодической последовательности; структура и разрядность кодовых комбинаций и др.

Первичный сигнал в структуре телекоммуникационных систем и сетей (ТКСС) есть объект *транспортировки*, так как он должен быть передан по каналу от передатчика к приемнику. ТКСС представляет технику *транспортирования* сигнала, а телекоммуникационные сети — специфическую *транспортную сеть*. Поэтому для установления соотношений между параметрами и характеристиками первичных сигналов и свойствами каналов передачи вводят такие параметры и характеристики первичных сигналов, которые просто измерить и по которым можно определить условия их передачи с минимальными искажениями и максимальной защищенностью.

Первым таким параметром является *длительность первичного сигнала*  $T_c$ , определяющая интервал времени, в пределах которого сигнал существует.

Следующим параметром первичного сигнала является его *средняя мощность*, определяемая выражением

$$W_{cp} = \frac{1}{TR} \int_0^T U^2(t) dt, \quad (1)$$

где  $T$  — период усреднения; если  $T = 1$  мин, то такая средняя мощность называется *среднеминутной*, если  $T = 1$  ч, то речь идет о *среднечасовой мощности* и при  $T \gg 1$  ч означает о *долговременной средней мощности* сигнала;

$R$  — сопротивление нагрузки, на которой определяется средняя мощность сигнала;

$U(t)$  — напряжение первичного сигнала.

Первичный сигнал характеризуется *максимальной мощностью*  $W_{max}$ , под которой понимается мощность эквивалентного синусоидального сигнала с амплитудой  $U_m$ , которая превышает мгновенными значениями переменной составляющей сигнала  $U(t)$  с определенной малой вероятностью  $\varepsilon$ . Для различных видов сигналов значение  $\varepsilon$  принимается равным  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$  и даже  $10^{-5}$ .

Средняя и максимальная мощности сигнала должны быть такими, чтобы при прохождении сигнала по каналу передачи не превышались допустимые значения, обеспечивающие неискаженную передачу сигналов для правильного воспроизведения передаваемого сообщения на приеме.

минимальная мощность ( $W_{мин}$ ) — мощность эквивалентного синусоидального сигнала с амплитудой  $u_{мин}$ , которая превышает мгновенным значением переменной составляющей сигнала  $u(t)$  с определенной вероятностью, обычно равной  $1 - \varepsilon \cong 0,98$ .

Возможный разброс мощностей первичного сигнала в конкретной точке канала характеризуется *динамическим диапазоном*  $D_c$ , под которым понимается отношение вида

$$D_c = 10 \lg \frac{W_{max}}{W_{мин}}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где  $W_{max}$  — максимальная (пиковая) мощность и  $W_{мин}$  — минимальная мощность сигнала в одной и той же точке канала.

Превышение максимальной мощности сигнала средней мощности называется *пик-фактором*  $Q_c$ , определяемым по формуле

$$Q_c = 10 \lg \frac{W_{max}}{W_{cp}}, \text{ дБ}. \quad (3)$$

Превышение средней мощности первичного сигнала  $W_{cp}$  средней мощности помехи  $W_n$  называется *защищенностью*, которая равна

$$A_s = 10 \lg \frac{W_{cp}}{W_n}. \quad (4)$$

Первичные сигналы электросвязи (непрерывные и дискретные) являются непериодическими функциями времени. Таким сигналам соответствует сплошной спектр, содержащий бесконечное число частотных составляющих. Однако всегда можно указать диапазон частот, в пределах которого сосредоточена основная энергия сигнала (не менее 90%) шириной

$$\Delta F_c = F_{\max} - F_{\min}, \quad (5)$$

где  $F_{\min}$  — минимальная частота первичного сигнала,  $F_{\max}$  — максимальная частота первичного сигнала. Этот диапазон еще называют *эффективно передаваемой полосой частот* сигнала, устанавливаемой экспериментально, исходя из требований качества передачи для конкретного вида первичных сигналов.

Произведение трех физических параметров первичного сигнала: длительности  $T_c$ , динамического диапазона  $D_c$  и эффективно передаваемой полосы частот  $\Delta F_c$ , т.е.

$$V_c = T_c \cdot D_c \cdot \Delta F_c, \quad (6)$$

называется *объемом первичного сигнала*.

Важным параметром первичного сигнала является его потенциальный информационный объем, или *количество информации*  $I_c$ , переносимое им в единицу времени:

$$I_c = 3,32 \eta \Delta F_c \lg \left( 1 + \frac{W_{cp}}{W_n} \right), \text{ бит/с}, \quad (7)$$

где  $\eta$  — коэффициент активности источника первичного сигнала (для телефонных сигналов берется равным 0,25–0,35, а для остальных — 1);  $\Delta F_c$  — эффективно передаваемая полоса частот, Гц;  $W_{cp}$  — средняя мощность первичного сигнала и  $W_n$  — средняя допустимая мощность помехи.

Классификация первичных сигналов разнообразна, но наибольшее применение нашла классификация по виду передаваемых сигналов и по виду передаваемых сообщений. Классификация по виду сигналов охватывает аналоговые, дискретные и цифровые сигналы, узкополосные и широкополосные.

*Аналоговым (непрерывным) сигналом* называется сигнал электросвязи, у которого величина представляющих (информационных) параметров может принимать непрерывное множество состояний. Аналоговым сигналом может быть и импульсный сигнал, если один из его параметров (амплитуда, длительность, частота следования, фаза) принимает бесчисленное множество состояний.

*Дискретным* называется сигнал электросвязи, у которого величина одного из представляющих параметров *квантуется*, т.е. имеет счетное множество состояний.

*Цифровым* называется сигнал электросвязи, у которого счетное множество величин одного из представляющих параметров описывается ограниченным набором *кодовых комбинаций*. Примерами таких сигналов являются сигналы передачи данных и телеграфии, телеконтроля и телеуправления, телемеханики и др.

Если отношение граничных частот эффективно передаваемой полосы частот первичного сигнала  $F_{\max} / F_{\min} \leq 2$ , то такие сигналы называются *узкополосными*, а если  $F_{\max} / F_{\min} \gg 2$ , то такие сигналы называются *широкополосными*.

Классификация первичных сигналов по виду передаваемых сообщений охватывает *телефонные (речевые)* сигналы и сигналы *звукового вещания*, сигналы *передачи данных и телеграфии*, *телевизионные сигналы* и *факсимильные сигналы*, сигналы телемеханики, телеуправления и телеконтроля, являющиеся частным случаем сигналов передачи данных.

### **1.3. Основные виды первичных сигналов**

#### **1.3.1. Телефонные (речевые) и факсимильные сигналы**

Для понимания сущности физических параметров речевых, а потом и телефонных сигналов, рассмотрим процесс речеобразования.

В образовании звуков речи принимают участие легкие, гортань с голосовыми связками, образующими *голосовую щель*, область носоглотки, язык, зубы и губы. В процессе произнесения речи человек вдыхает воздух и наполняет им легкие, которые через бронхи продувают воздух в гортань и далее через вибрирующие голосовые связки в полость рта и носа.

Голосовые связки, то сжимая, то открывая голосовую щель, пропускают воздух *импульсами*, частота следования которых называется *основным тоном*. Частота основного тона лежит в пределах от 50–80 Гц (очень низкий голос — бас) до 200–250 Гц (женские и детские голоса).

Импульсы основного тона содержат большое число гармоник (до 40), амплитуда которых убывает с увеличением частоты со скоростью приблизительно 12 дБ на октаву. Например, амплитуда составляющей импульсов основного тона с частотой 100 Гц на 12 дБ больше амплитуды ее второй гармоники — 200 Гц, которая в свою очередь, на 12 дБ больше соответствующей ей второй гармоники, т.е. 400 Гц, а вторая гармоника частоты 400 Гц будет на 12 дБ больше составляющей с частотой 800 Гц и т.д.

Импульсы воздуха встречают на своем пути систему резонаторов, образуемых объемами полости рта и носоглотки, положением языка, зубов и губ и изменяющихся в процессе произнесения различных звуков. Проходя через эту систему резонаторов, одни гармонические составляющие *импульсной последовательности основного тона* получают усиление, а другие — ослабление. Картина спектра звука (гласного), излучаемого ртом, принимает вид, изображенный на рисунке 1.3.

Отметим, что частота основного тона меняется в значительных пределах при переходе от гласных звуков к согласным и наоборот.

На рис. 3 ясно видны усиленные области частот, характерные для спектра конкретного звука. Эти усиленные области частот называются *формантными областями*, или просто *формантами*. Звуки речи различаются друг от друга числом формант и их расположением в частотной области. Поскольку форманты значительно мощнее других составляющих, то они главным образом и воздействуют на ухо слушающего, формируя звучание того или иного звука.

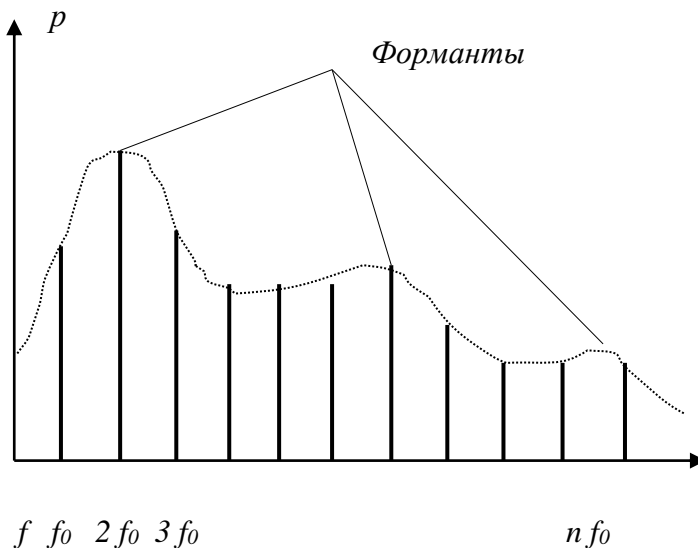


Рис. 1.3. Спектр сформированного звука

где  $p$  — уровни спектральных составляющих частоты основного тона;  $f_0$  — частота основного тона;  $1, 2, 3, \dots, n$  — гармоники частоты основного тона.

Разборчивость передаваемой речи зависит от того, какая часть формант доходит до уха слушающего без искажений, и какая исказилась или по тем или иным причинам не была услышана. Представленный на рис.4 вид спектра соответствует произнесению гласных звуков, обладающих заметной периодичностью. Многие согласные звуки не периодичны, и их частотные

спектры являются либо полностью сплошными, либо содержат в своем составе участки сплошного спектра (штриховая линия рис.3).

Максимально в отдельных звуках замечено до 6 усиленных частотных областей. Некоторые из них никакого значения для распознавания звуков не имеют, хотя и несут в себе довольно значительную энергию. Спектральные исследования отдельных звуков русского языка отмечают наличие максимально четырех формант с условными максимумами на частотах 500 Гц (первая форманта), 1500 Гц (вторая форманта), 3500 Гц (третья форманта). Важными являются первые одна-две форманты (на оси частот), и исключение из передачи любой из них вызывает искажение передаваемого звука, превращая его в другой звук, либо вообще потерю им признаков человеческой речи. Первые три форманты звуков речи лежат в полосе частот от 300 до 3400 Гц, что и позволяет считать эту полосу частот вполне достаточной для обеспечения хорошей разборчивости передаваемой речи, сохранения естественности звучания и тембра голоса, узнаваемости говорящего.

Следовательно, эффективно передаваемая полоса частот телефонного сигнала может быть принятой равной  $\Delta F_T = 0,3 \dots 3,4$  кГц.

Исследования по определению минимальной, максимальной и средней мощности телефонного сигнала с учетом характеристик микрофонов телефонных аппаратов, типов и характеристик абонентских и соединительных линий телефонных сетей, особенностей, говорящих позволяют сделать следующие выводы:

– при средней активности источника телефонного сигнала  $\eta_T = 0,25 \dots 0,35$  минимальная мощность телефонного сигнала в точке нулевого относительного уровня равна  $W_{минТ} = 0,1$  мкВт; средняя мощность телефонного сигнала в этой же точке на интервалах активности источника равна  $W_{срТ} = 88$  мкВт;

– максимальная мощность телефонного сигнала с вероятностью превышения  $\varepsilon = 10^{-5}$  в точке нулевого относительного уровня равна  $W_{максТ} = 2220$  мкВт.

Разговорный сигнал состоит из распределенных случайным образом «разговорных импульсов» средней длительностью  $\sim 1$  с, разделенных промежутками времени  $\sim 1$  с, то есть является нестационарным случайным процессом. Для оценки действующего значения напряжения речевого сигнала используется специальный вольтметр (волюметр) с квадратичным законом суммирования уровней различных частот и временем интегрирования 200 мс. Прибор не позволяет определить активность говорящего, а только показывает, насколько громко он говорит. Он практически является измерителем динамического диапазона – волюма сигнала, определяемого величиной

$$Y = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{действ}}}{U_0} \quad (8)$$

где  $U_0 = 0,775 \text{ В}$ . Говорящий, делающий много пауз, может говорить с более высоким волюмом, чем говорящий непрерывно.

Для оценки средней мощности телефонного сигнала вводится коэффициент активности  $\eta$ , равный отношению времени, в течение которого мощность сигнала превышает заданное пороговое значение – 40 дБм. На практике средняя величина  $\eta$  близка к 0,25 – 0,35. Средняя мощность телефонного сигнала на интервалах активности составляет 88 мкВт, при  $Y_0 = -10,6 \text{ дБм}$ . Тогда при  $\eta = 0,25$  средняя мощность будет равна

$$P_{\text{cp}} = \eta \cdot 88 = 22 \text{ мкВт} \quad (9)$$

Динамический диапазон речевого сигнала  $D = 35 - 40 \text{ дБ}$ , пик-фактор  $Q \approx 14 \text{ дБ}$ . Амплитудно-частотные искажения изменяют тембр речи и являются причиной потери натуральности звучания, нелинейные искажения приводят к появлению гармоник и комбинационных частот и воспринимаются как характерные хрипы. Важная особенность слуха состоит в его малой чувствительности к фазочастотным искажениям. Оценить количество информации, содержащейся в речевом сигнале, можно по формуле

$$I = \eta \Delta F \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\text{cp}}}{P_{\text{ш}}} \right) \quad (10)$$

При  $\eta = 0,25$ ,  $\Delta F = 3100 \text{ Гц}$ ,  $P_{\text{cp}} = 22 \text{ мкВт}$ ,  $P_{\text{ш}} = 17,8 \text{ нВт}$ ,  $I \approx 8000 \text{ бит / с}$ .

Под *факсимильной связью* понимается — вид электросвязи, обеспечивающий передачу неподвижных изображений: фотографий, чертежей, текстов (в том числе и рукописных) газетных полос и др. *Первичные факсимильные сигналы* получают при помощи процесса электрооптической развертки неподвижного изображения, заключающейся в преобразовании светового потока, отражаемого элементами изображения, в электрические.

Частотный спектр факсимильного сигнала определяется характером передаваемого изображения, скоростью развертки (вращения барабана) и размером *анализирующего светового пятна*. Максимальная частота факсимильного сигнала получается при чередовании черных и белых полей изображения, ширина которых равна диаметру светового пятна. В этом случае частота сигнала равна

$$f_{\phi} = \frac{\pi DN}{120d} \text{ Гц}, \quad (11)$$

где  $D$  — диаметр барабана, мм;  $N$  — число оборотов барабана в минуту, об/мин;  $d$  — диаметр светового анализирующего пятна, мм.

Международным союзом электросвязи – МСЭ рекомендованы следующие параметры факсимильных аппаратов:  $N = 120, 90$  и  $60$  об/мин; диаметр барабана  $D = 70$  мм и диаметр светового пятна  $d = 0,15$  мм. Соответственно из (22) получаем  $f_\phi = 1465$  Гц для  $N = 120$  об/мин,  $f_\phi = 1100$  Гц для  $N = 90$  об/мин и  $f_\phi = 732$  Гц для  $N = 60$  об/мин. При передаче газетных полос частота сигнала достигает  $180\text{--}250$  кГц.

При передаче реальных изображений получается первичный сигнал сложной формы, энергетический спектр которого содержит частоты от  $0$  до  $f_\phi$ . В зависимости от характера изображений они подразделяются на *штриховые*, содержащие две градации яркости, и *полутоновые*, число градаций которых определяется требованиями качества передачи факсимильного сообщения.

Динамический диапазон сигнала, соответствующего передаче полутоновых изображений, составляет приблизительно  $D_\phi \cong 25$  дБ.

Пик-фактор факсимильного сигнала  $Q_\phi$  определяется из соотношения

$$Q_\phi = 20 \lg (U_{\text{макс.}\phi} / U_{\text{ср.}\phi}) \quad (12)$$

где  $U_{\text{макс.}\phi}$  и  $U_{\text{ср.}\phi}$  — максимальное и среднеквадратичное значение напряжения факсимильного сигнала соответственно.

Для определения пик-фактора факсимильного сигнала, предположим, что все градации яркости полутонного изображения равновероятны, т.е. появление  $i$ -й градации  $p_i = 1/k$ , где  $k$  — количество градаций яркости, обеспечивающих заданное качество передачи. Перенумеруем в порядке возрастания уровни сигнала, соответствующие различным градациям яркости, т.о. что напряжение  $i$ -го уровня будет равно  $U_i = U_{\text{макс.}\phi} / k$ , а среднеквадратичное значение сигнала

$$U_{\text{ср.}\phi}^2 = \sum_1^k U_i^2 p_i = \frac{U_{\text{макс.}\phi}^2}{k^3} \sum_1^k i^2 \quad (13)$$

Известно, что  $\sum_1^k i^2 = \frac{k(k+1)(2k+1)}{6}$ , и поэтому  $U_{\text{ср.}\phi} = \frac{U_{\text{макс.}\phi}}{k} \sqrt{\frac{(k+1)(2k+1)}{6}}$

Следовательно,  $Q_\phi = 7,78 + 20 \lg k - 10 \lg [(k+1)(2k+1)]$ . (14)

При  $k = 16$  пик-фактор факсимильного сигнала будет равен  $Q_\phi \cong 4,4$  дБ. Заметим, что увеличение числа градаций яркости мало влияет на рост пик-фактора. Несложно показать, что при  $k \rightarrow \infty$  пик-фактор стремится к величине  $Q_{\text{макс.}\phi} = 4,8$  дБ.

Динамический диапазон факсимильных сигналов, согласно вышеприведенным рассуждениям, будет равен

$$D_\phi = 20 \lg(k+1) \quad (15)$$

Необходимая защищенность полутоновых сигналов, как и штриховых, равна  $A_{зф} = 35 \text{ дБ}$ . При этом потенциальная информационная емкость факсимильных сигналов будет равна

$$I_{\phi} = 6,64 f_{\phi} \lg k, \quad (16)$$

где число градаций для штриховых изображений равно  $k = 2$ .

Одним из важнейших видов факсимильной связи является передача газет в пункты их печатания. Для этого используются специальные высокоскоростные факсимильные аппараты, обеспечивающие высокое качество копий за счет существенного увеличения четкости — уменьшения диаметра анализирующего пятна до 0,04–0,06 мм. Для типовой аппаратуры передачи газетных полос наивысшая частота сигнала достигает 180 кГц, а время передачи газетной полосы 2,3 – 2,5 мин. Изображение газетной полосы является штриховым, т.е.  $k = 2$ . Информационная емкость такого сигнала, согласно (27), равна 360 кбит/с.

Для передачи газет используются специальные высокоскоростные факсимильные аппараты, обеспечивающие высокое качество передачи изображений за счет увеличения четкости. При этом сигнал имеет информационную емкость 360 кбит/с.

### ***1.3.2. Телевизионные сигналы***

Первичный телевизионный сигнал формируется методом электронной развертки с помощью развертывающего луча телевизионной передающей трубки, преобразующей оптическое изображение в *видеосигнал*, или *сигнал яркости*.

Согласно телевизионному стандарту, принятому в России, число строк развертки равно  $Z_c = 625$ . Передача движущихся изображений сводится к последовательной передаче мгновенных фотографий – кадров. В секунду передается  $Z_k = 25$  кадров. Каждый кадр разлагается на *строки*, число которых определяется установленными стандартами. Чтобы избежать мерцания изображения на экране приемной трубки (кинескопа) стандарт предусматривает чересстрочную развертку, при которой указанные 625 строк последовательно передаются в виде двух полукадров (каждый за 1/50 с). А это требует увеличения скорости развертки, что усложняет оборудование формирования и передачи телевизионных сигналов. Поэтому для устранения возможного мерцания каждый кадр передается в два этапа: сначала передаются только нечетные строки, а затем — четные. В результате на экране кинескопа создается кадр из двух изображений, называемых *полями*, или *полукадрами*. Число последних в секунду составляет 50, и смена изображений становится

незаметной и благодаря этому формируется немерцающее изображение. Вследствие инерционности зрения передача 50 полукадров в секунду воспринимается как слитное движущееся изображение. Сначала передаются нечетные строки (первый полукадр), а затем четные. Количество строк развертки в секунду  $625 \times 25 = 15625$ , время передачи одной строки 64 мс.

Кроме сигнала изображения необходимо передавать вспомогательные управляющие импульсы (гасящие и синхронизирующие). Электрический сигнал, включающий в себя сигнал изображения и управляющие импульсы, называется полным телевизионным сигналом. Спектр телевизионного сигнала (видеосигнала) концентрируется около гармоник частоты строк 15625 Гц.

Для черно-белых изображений почти вся мощность видеосигналов сосредоточена в области частот от 0 до 1,5 МГц, причем основная доля мощности находится в полосе до 200 – 300 кГц. Наивысшая частоты спектра видеосигнала составляет 6 МГц.

В системах цветного телевидения (ЦТ) передаваемое изображение расчленяется с помощью специальных светофильтров на три одноцветных изображения – красное ( $R$ ), зеленое ( $G$ ) и синее ( $B$ ), которым соответствуют сигналы цветности  $E_R$ ,  $E_G$ , и  $E_B$ . В приемном устройстве путем сложения трех одноцветных изображений воспроизводится передаваемое цветное изображение.

Цветное телевидение должно быть совместимо с черно-белым, то есть цветные передачи должны приниматься черно-белыми телевизорами, а черно-белые – цветными. Ширина спектров сигналов должна быть одинаковой.

Эти условия выполняются при помощи специальной обработки первичных сигналов  $E_R$ ,  $E_G$ , и  $E_B$ . Из них формируется сигнал яркости  $E_Y = 0,3 E_R + 0,59 E_G + 0,11 E_B$ . Он передается в полной полосе частот от 0 до 6 МГц и обеспечивает совместимость цветного и черно-белого телевидения.

Для передачи цветов создаются два цветоразностных сигнала  $E_{R-Y}$  и  $E_{B-Y}$ , для передачи каждого из которых необходима полоса частот 1,5 МГц. В системе SEKAM формируются цветоразностные сигналы  $DR = 1,9 E_{R-Y}$  и  $DB = 1,5 E_{B-Y}$ , которые передаются последовательно, чередуясь через строку, модулируя по частоте вспомогательное несущее колебание с частотой 4,43 МГц. При этом спектр цветоразностных сигналов «вписывается» в высокочастотную область сигнала яркости.

Чтобы глаз различал на экране кинескопа около 100 градаций яркости, отношение сигнал/помеха должно быть не меньше 48 дБ.

Динамический диапазон телевизионного сигнала равен  $D \sim 40$  дБ, а пик-фактор  $Q \sim 4,8$  дБ, информационная емкость  $I \sim 80 \cdot 10^6$  бит/с.

### 1.3.3. Телеграфные сигналы и сигналы передачи данных

Как телеграфные, так и системы передачи данных являются системами передачи дискретных сообщений. Однако исторически телеграфные системы появились гораздо раньше, сигналы в них формировались телеграфным ключом, и поэтому они были и остаются низкоскоростными. Системы передачи данных в настоящее время являются в основном высокоскоростными цифровыми системами связи.

Первичные телеграфные сигналы, как правило, являются бинарными с активной (рис. 1.4 а) или пассивной паузой (рис. 1.4 б).

Длительность импульса определяется скоростью модуляции  $F_M = 1/\tau_{и}$ , измеряемой в бодах (импульсах в секунду). При равных вероятностях появления положительных и отрицательных (пауз) импульсов энергетический спектр такого сигнала имеет вид:

$$G(\omega) = A^2 \frac{\tau_{и}}{\pi} \left( \frac{\sin \frac{\omega \tau_{и}}{2}}{\frac{\omega \tau_{и}}{2}} \right)^2 \quad (17)$$

Минимальная полоса частот, необходимая для передачи телеграфного сигнала, равна  $\frac{\omega \tau_{и}}{2} = 0,5 F_M$ . Однако на практике, из-за искажений, часто используют  $\Delta F = F_M$ . В системах передачи данных на сигналы могут налагаться дополнительные требования.

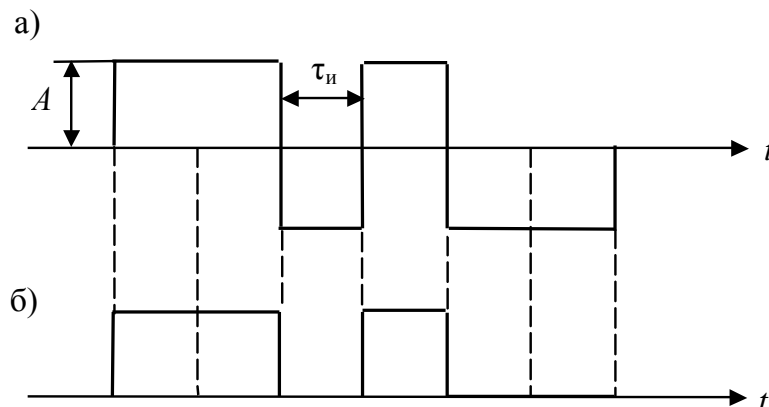


Рис. 1.4. Бинарные сигналы с активной (а) и пассивной (б) паузой

Так, сведение к нулю составляющих спектра в области  $f = 0$  желательно для уменьшения дрейфа постоянной составляющей, возникающего при

передаче длинных последовательностей символов 1 или 0. Это необходимо в кабельных регенераторах и радиорелейных линиях с частотной модуляцией, которые обычно не имеют связи по постоянному току.

Чтобы удовлетворить этому требованию, а также для поддержания тактовой синхронизации при передаче одинаковых символов используются специальные виды кодирования.

Некоторые виды двоичных сигналов для систем передачи данных приведены на рисунке 1.5, где

а) – Потенциальный двоичный сигнал с активной паузой. Символы 1 и 0 отображаются двумя уровнями напряжения (УН).

б) – Биимпульсный сигнал (манчестерский код). Символы 1 и 0 отображаются парами импульсов длительностью  $\tau_{и}/2$  + - и - +.

в) – Кодирование символов переходами УН. В начале каждого такта происходит изменение УН. Символ 1 отображается возвратом к предыдущему УН через  $\tau_{и}/2$ , при символе 0 возврата нет.

г) – Код Миллера. Символ 0 отображается переходом УН с задержкой  $\tau_{и}/2$ . Одиночный символ 1 отображается сохранением УН, а последовательность символов 1 - изменениями УН в начале второго и последующего тактов.

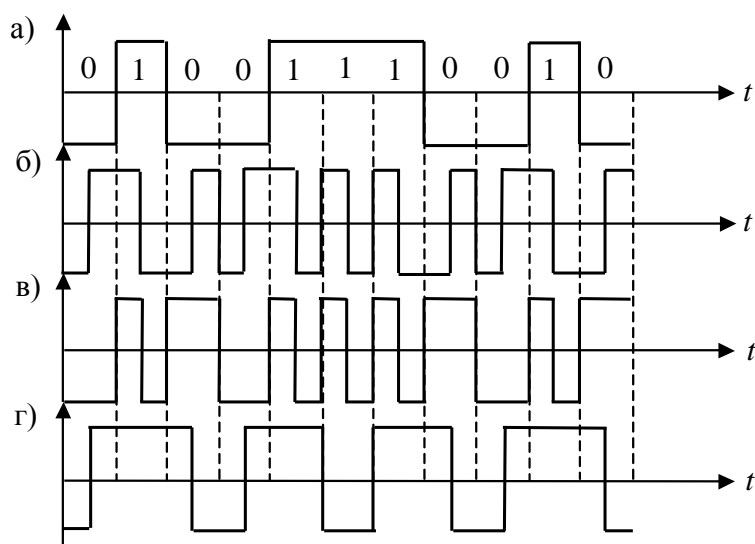


Рис. 1.5. Некоторые виды двоичных сигналов в системах передачи данных

#### ***1.4. Основные характеристики каналов передачи***

Ключевыми понятиями техники телекоммуникационных систем и сетей являются «канал передачи» или «канал электросвязи».

*Каналом передачи* называется совокупность технических средств и среды распространения, обеспечивающая передачу сигналов электросвязи в определенной полосе частот или с определенной скоростью передачи между конечными или промежуточными пунктами телекоммуникационных сетей.

Каналы передачи (далее просто «каналы») классифицируются:

- по методам передачи сигналов электросвязи различают *аналоговые* и *цифровые* каналы. Аналоговые каналы, в свою очередь, подразделяются на *непрерывные* и *дискретные* в зависимости от изменения представляющего или информационного параметра сигнала. Цифровые каналы делятся на каналы с использованием *импульсно-кодовой модуляции (ИКМ)*, каналы с использованием *дифференциальной ИКМ* и каналы на основе *дельта-модуляции*. Каналы, в которых на одних участках используются аналоговые, а на других цифровые методы передачи сигналов, называются *смешанными каналами передачи*.

- в зависимости от ширины полосы пропускания, в которой передаются сигналы электросвязи, и соответствия параметров каналов установленным нормам, различают аналоговые  *типовые каналы тональной частоты, типовые первичный, вторичный, третичный и четверичный широкополосные каналы; типовые каналы передачи сигналов звукового вещания, сигналов изображения и звукового сопровождения телевидения;*

- в зависимости от скорости передачи и соответствия параметров каналов установленным нормам различают *основной цифровой канал, первичный, вторичный, третичный, четверичный цифровые каналы;*

- по виду среды распространения сигналов электросвязи различают: *проводные каналы*, организованные по кабельным и, реже, воздушным линиям связи, и *каналы радиосвязи*, организованные по радио, радиорелейным и спутниковым линиям связи.

*Каналом электросвязи* называется комплекс технических средств и среды распространения, обеспечивающий передачу первичных сигналов электросвязи от преобразователя сообщения в первичный сигнал до преобразователя первичного сигнала в сообщении.

Помимо приведенной классификации каналы электросвязи подразделяются:

- по виду передаваемых первичных сигналов (или сообщений): *телефонные каналы, каналы звукового вещания, телевизионные каналы, телеграфные каналы* и *каналы передачи данных;*

- по способам организации двусторонней связи: *двухпроводный однополосный канал, двухпроводный двухполосный канал* и *четырёхпроводный однополосный канал;*

- по территориальному признаку: *международные, междугородные, магистральные, зонавые и местные.*

Рассмотренная классификация каналов передачи и электросвязи соответствует сложившейся практике их организации и разработки требований к их основным параметрам и характеристикам, которые принято увязывать с соответствующими параметрами и характеристиками первичных сигналов. Канал может характеризоваться тремя параметрами:

- 1) эффективно передаваемой полосой частот  $\Delta F_k$ , которую канал способен пропустить с выполнением требований к качеству передачи сигналов;
- 2) временем  $T_k$ , в течение которого канал предоставлен для передачи сигналов или сообщений;
- 3) динамическим диапазоном  $D_k$ , под которым понимается отношение вида

$$D_k = 10 \lg \frac{W_{\text{макс}}}{W_{\text{мин}}}, \quad (18)$$

где  $W_{\text{макс}}$  — максимальная неискаженная мощность, которая может быть передана по каналу;  $W_{\text{мин}}$  — минимальная мощность сигнала, при которой обеспечивается необходимая защищенность от помех.

Очевидно, что передача сигнала с параметрами  $\Delta F_c$ ,  $T_c$  и  $D_c$  по каналу с параметрами  $\Delta F_k$ ,  $T_k$  и  $D_k$  возможна при условии

$$\Delta F_k \geq \Delta F_c; \quad T_k \geq T_c; \quad D_k \geq D_c. \quad (19)$$

Произведение трех параметров канала  $V_k = D_k F_k T_k$  называется его *емкостью*. Сигнал может быть передан по каналу, если его емкость не менее объема сигнала. Если система неравенств (31) не выполняется, то возможна *деформация* одного из параметров сигнала, позволяющих согласовать его объем с емкостью канала. Следовательно, условие возможности передачи сигнала по каналу можно представить в более общем виде

$$V_k \geq V_c. \quad (20)$$

Канал характеризуется защищенностью

$$A_{\text{зк}} = 10 \lg \frac{W_{\text{мин}}}{W_n}, \quad (21)$$

где  $W_n$  — мощность помех в канале.

Пропускная способность канала описывается следующим выражением:

$$I_k = 3,32 \Delta F_k \lg \left( 1 + \frac{W_{\text{cp}}}{W_n} \right), \quad (22)$$

где  $W_{\text{cp}}$  — средняя мощность передаваемого по каналу сигнала.

Коммутация каналов в основном происходит не в аналоговом, а в цифровом виде, а цифро-аналоговое (и аналого-цифровое) преобразование

происходит лишь <на выходе> АТС. Естественно, за счет цифровой передачи сигнала существенно снижается уровень посторонних шумов и, как следствие, повышается качество связи.

Оцифровка аналогового сигнала складывается из трех операций:

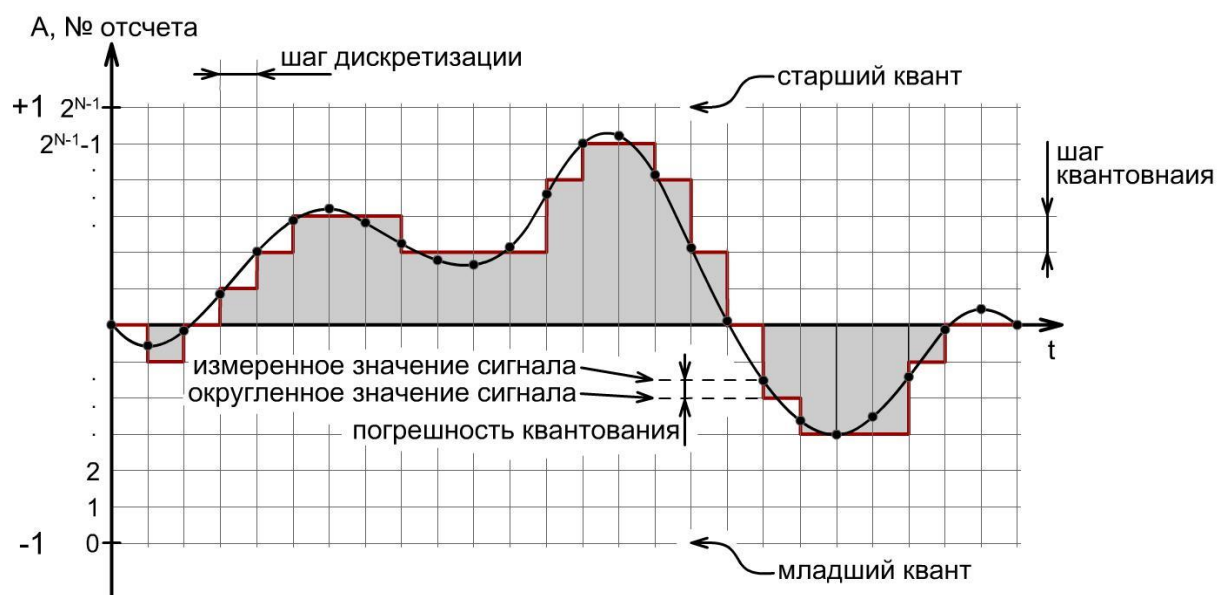
- *дискретизация* сигналов по времени (получение сигнала АИМ);
- *квантование* - процесс сопоставления значений амплитуды взятого дискрета (сигнала АИМ) ближайшему выделенному уровню, т.е. одному из 256 так называемых *уровней квантования*.
- *кодирование* основано на замене значения квантованного дискрета восьмиразрядным словом (представление его в виде «00101111»). Квантование и кодирование осуществляются с помощью кодера



Процесс *дискретизации по времени* - процесс получения мгновенных значений преобразуемого аналогового сигнала с определенным временным шагом, называемым *шагом дискретизации*.

Количество осуществляемых в одну секунду замеров величины сигнала называют *частотой дискретизации* (для достоверной передачи речи частота дискретизации  $f=8000$  импс/с)

## Линейное (однородное) квантование



Требуемая скорость (ширина) канала для передачи голоса в цифровом виде:  $8 \cdot 8000 = 64$  Кбит/с. Число разрядов (бит) в канальном интервале – 8. Частота дискретизации, имп/с – 8000.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**  
**«ОСНОВЫ РАБОТЫ С ПАКЕТОМ ИМИТАЦИОННОГО**  
**МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ SIMULINK**  
**СИСТЕМЫ MATLAB»**

**Учебные вопросы:**

1. Основные приемы создания динамических моделей.
2. Приемы настройки моделей.
3. Визуализация и анализ результатов.

*Краткий теоретический материал*

Современная компьютерная математика предлагает целый набор интегрированных программных систем и пакетов программ для автоматизации математических расчетов: Eureka, Gauss, TK Solver, Derive, Mathcad, Mathematica, Maple V и др.

MATLAB — одна из старейших, тщательно проработанных и проверенных временем систем автоматизации математических расчетов, построенная на расширенном представлении и применении матричных операций. Это нашло отражение в названии системы — MATrix LABoratory — матричная лаборатория. Однако синтаксис языка программирования системы продуман настолько тщательно, что эта ориентация почти не ощущается теми пользователями, которых не интересуют непосредственно матричные вычисления.

Однако в настоящее время MATLAB далеко вышла за пределы специализированной матричной системы и стала одной из наиболее мощных универсальных интегрированных систем компьютерного моделирования (СКМ). Слово «интегрированная» указывает на то, что в этой системе объединены удобная оболочка, редактор выражений и текстовых комментариев, вычислитель и графический программный процессор. В новой версии используются такие мощные типы данных, как многомерные массивы, массивы ячеек, массивы структур, массивы Java и разреженные матрицы, что открывает возможности применения системы при создании и отладке новых алгоритмов матричных и основанных на них параллельных вычислений и крупных баз данных.

В целом MATLAB — это уникальная коллекция реализаций современных численных методов компьютерной математики, созданных за последние три десятка лет. Она вобрала в себя и опыт, правила и методы математических вычислений, накопленные за тысячи лет развития математики. Это сочетается с мощными средствами графической визуализации и даже анимационной

графики. Систему с прилагаемой к ней обширной документацией вполне можно рассматривать как фундаментальный многотомный электронный справочник по математическому обеспечению ЭВМ — от массовых персональных компьютеров до супер-ЭВМ.

Система MATLAB была разработана Молером (С. В. Moler) и с конца 70-х гг. широко использовалась на больших ЭВМ. В начале 80-х гг. Джон Литл (John Little) из фирмы MathWorks, Inc. разработал версии системы PC MATLAB для компьютеров класса IBM PC, VAX и Macintosh. В дальнейшем были созданы версии для рабочих станций Sun, компьютеров с операционной системой UNIX и многих других типов больших и малых ЭВМ.

Одной из основных задач системы является предоставление пользователям мощного языка программирования, ориентированного на математические расчеты и способного превзойти возможности традиционных языков программирования, которые многие годы использовались для реализации численных методов. При этом особое внимание уделялось как повышению скорости вычислений, так и адаптации системы к решению самых разнообразных задач пользователей.

Возможности MATLAB весьма обширны, а по скорости выполнения задач система нередко превосходит своих конкурентов. Она применима для расчетов практически в любой области науки и техники. Например, очень широко используется при математическом моделировании механических устройств и систем, в частности в динамике, гидродинамике, аэродинамике, акустике, энергетике и т.д. Этому способствует не только расширенный набор матричных и иных операций и функций, но и наличие пакета расширения (toolbox) Simulink, специально предназначенного для решения задач блочного моделирования динамических систем и устройств, а также десятков других пакетов расширений.

В обширном и постоянно пополняемом комплексе команд, функций и прикладных программ системы MATLAB содержатся специальные средства для электротехнических и радиотехнических расчетов (операции с комплексными числами, матрицами, векторами и полиномами, обработка данных, анализ сигналов и цифровая фильтрация), обработки изображений, реализации нейронных сетей, а также средства, относящиеся к другим новым направлениям науки и техники. Они иллюстрируются множеством практически полезных примеров. К разработкам расширений для системы MATLAB привлечены многие научные школы мира и руководящие ими крупные ученые, и педагоги университетов.

Важными достоинствами системы являются ее открытость и расширяемость. Большинство команд и функций системы реализованы в виде

текстовых m-файлов (с расширением \*.m) и файлов на языке Си, причем все файлы доступны для модификации. Пользователю дана возможность создавать не только отдельные файлы, но и библиотеки файлов для реализации специфических задач.

Легкость модификации системы и возможность ее адаптации к решению специфических задач науки и техники привели к созданию десятков пакетов прикладных программ (toolbox), намного расширивших сферы применения системы. Некоторые из них, например, Notebook (интеграция с текстовым процессором Word и подготовка «живых» электронных книг), Symbolic Math и Extended Symbolic Math (символьные вычисления с применением ядра системы Maple VR5) и Simulink (моделирование динамических систем и устройств, заданных в виде системы блоков), настолько органично интегрировались с системой MATLAB, что стали ее составными частями.

Как уже было отмечено, в состав системы MATLAB входит пакет моделирования динамических систем — *Simulink*. Пакет *Simulink* является ядром интерактивного программного комплекса, предназначенного для математического моделирования линейных и нелинейных динамических систем, и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой, именуемой S-моделью, или просто моделью. При этом возможны различные варианты моделирования: во временной области, в частотной области, с событийным управлением, на основе спектральных преобразований Фурье, с использованием метода Монте-Карло (реакция на воздействия случайного характера) и т.д.

Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств *Simulink* имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем. Он основан на графическом интерфейсе пользователя и по существу является типичным средством визуально-ориентированного программирования. Используя палитры компонентов (наборы), пользователь с помощью мыши переносит нужные блоки с палитр на рабочий стол пакета *Simulink* и соединяет линиями входы и выходы блоков. Таким образом создается блок-схема системы или устройства, то есть модель.

*Simulink* автоматизирует следующий, наиболее трудоемкий этап моделирования: он составляет и решает сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль за поведением созданного пользователем виртуального устройства. Пользователю достаточно уточнить (если нужно) вид анализа и запустить *Simulink* в режиме симуляции (откуда и название пакета — *Simulink*) созданной модели системы или устройства. В дальнейшем мы будем использовать термин

«моделирование».

Средства визуализации результатов моделирования в пакете Simulink настолько наглядны, что порой создается ощущение, что созданная в виде блок-схемы модель работает «как живая». Более того, Simulink практически мгновенно меняет математическое описание модели по мере ввода ее новых блоков, даже в том случае, когда этот процесс сопровождается сменой порядка системы уравнений и ведет к существенному качественному изменению поведения системы.

Ценность Simulink заключается и в обширной, открытой для изучения и модификации библиотеке компонентов (блоков). Она включает источники сигналов с практически любыми временными зависимостями, масштабирующие, линейные и нелинейные преобразователи с разнообразными формами передаточных характеристик, квантующее устройство, интегрирующие и дифференцирующие блоки и т.д.

В библиотеке имеется целый набор виртуальных регистрирующих устройств — от простых измерителей типа вольтметра или амперметра до универсальных осциллографов, позволяющих просматривать временные зависимости выходных параметров моделируемых систем — например, токов и напряжений, перемещений, давлений и т. п. Имеется даже графопостроитель для создания фигур в полярной системе координат, например, фигур Лиссажу и фазовых портретов колебаний. Simulink имеет средства анимации и звукового сопровождения. В дополнительных библиотеках можно отыскать и такие «дорогие приборы», как анализаторы спектра сложных сигналов, многоканальные самописцы и средства анимации графиков.

Программные средства моделирования динамических систем известны давно, к ним относятся, например, программы Tutsim и LabVIEW for Industrial Automation. Однако для эффективного применения таких средств необходимы высокоскоростные решающие устройства. Интеграция одной из самых быстрых матричных математических систем — MATLAB — с пакетом Simulink открывает новые возможности использования самых современных математических методов для решения задач динамического и ситуационного моделирования сложных систем и устройств.

Средства графической анимации Simulink позволяют строить виртуальные физические лаборатории с наглядным представлением результатов моделирования. Возможности Simulink охватывают задачи математического моделирования сложных динамических систем в физике, электро- и радиотехнике, в биологии и химии — словом, во всех областях науки и техники. Этим объясняется популярность данного пакета как в университетах и институтах, так и в научных лабораториях.

И наконец, важным достоинством пакета является возможность задания в блоках произвольных математических выражений, что позволяет решать типовые задачи, пользуясь примерами пакета Simulink или же просто задавая новые выражения, описывающие работу моделируемых пользователем систем и устройств. Важным свойством пакета является и возможность задания системных функций (S-функций) с включением их в состав библиотек Simulink. Необходимо отметить также возможность моделирования устройств и систем в реальном масштабе времени.

Как программное средство Simulink — типичный представитель визуально-ориентированного языка программирования. На всех этапах работы, особенно при подготовке моделей систем, пользователь практически не имеет дела с обычным программированием. Программа автоматически генерируется в процессе ввода выбранных блоков компонентов, их соединений и задания параметров компонентов.

Важное достоинство Simulink — интеграция не только с системой MATLAB, но и с рядом других пакетов расширения, что обеспечивает, по существу, неограниченные возможности применения Simulink для решения практически любых задач имитационного и событийного моделирования.

#### *Особенности интерфейса Simulink 4.0*

Интерфейс версии Simulink 4.0 полностью соответствует стилю интерфейса типичных приложений Windows, в том числе интерфейсу системы MATLAB. В то же время он концептуально строг, чтобы не досаждал пользователю многочисленными «излишествами» стандартного интерфейса Windows. Меню системы содержит следующие пункты:

File — работа с файлами моделей и библиотек (их создание, сохранение, считывание и печать).

Edit — операции редактирования, работа с буфером обмена и создание подсистем.

View — управление отображением панели инструментов и строки состояния.

Simulation — управление процессом моделирования (старт, пауза, вывод окна настройки параметров моделирования).

Format — операции форматирования модели (смена шрифтов, редактирование надписей, повороты блоков, использование тени от блоков, операции с цветами линий блоков, их фоном и общим фоном).

Tools — управление видом анализа (в линейной области и в режиме реального времени RTW).

Первые три пункта главного меню содержат общепринятые для Windows-

приложений команды и операции, поэтому мы не будем их обсуждать. Остальные будут рассмотрены по мере знакомства с системой Simulink.

Как уже отмечалось, вместе с рабочим окном Simulink выводится окно с перечнем разделов основной библиотеки компонентов. Это окно — важная часть интерфейса Simulink. Оно открывает доступ к другим пакетам компонентов (Blocksets&Toolboxes) и примерам их применения (Demos). Это дает пользователю возможность постепенно знакомиться с новыми областями применения Simulink.

## 2. Приемы настройки моделей

2.1. Создайте модель устройства, выполняющую функцию вычисления значения  $y = ax^2 + b$  ( $a$  и  $b$  — константы) используя пакет моделирования динамических систем Simulink системы Matlab.

Для этого запустите систему Matlab с использованием кнопки «Пуск» панели задач (Пуск\Программы\Matlab6.5\Matlab6.5), либо нажав одноименную кнопку на панели задач. Загрузка системы считается завершенной после появления в поле окна Matlab символа «>>» и мигающего курсора. В панели инструментов Matlab нажмите кнопку «Simulink» (рис. 1.1.).

При этом на экран выводится окно обозревателя библиотек «Simulink Library Browser».

Необходимо обратить внимание на то, что пакет Simulink имеет ряд собственных встроенных библиотек блоков (Continuous, Discontinuous, ..., User-Defined Functions) и многочисленные пакеты приложений, применяемые для создания динамических моделей в различных предметных областях. Все библиотеки (как встроенные в Simulink, так и принадлежащие пакетам приложений) имеют наборы блоков, объединенные своим функциональным назначением. Например, встроенная библиотека «Sources» содержит блоки всевозможных источников сигналов.

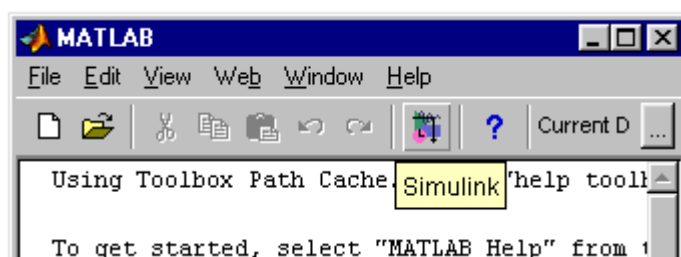


Рис. 1.1. Запуск пакета Simulink

2.2. В появившемся окне Simulink Library Browser создайте новую модель командой *Create a new model*, используя строку меню или кнопку на панели инструментов. Новая модель откроется в виде пустого окна, в заголовке которого будет присутствовать надпись «untitled». Это означает, что новая модель еще не озаглавлена.

2.3. Создайте в окне модели устройство, выполняющее указанную выше функцию. Примерный внешний вид модели показан на (рис. 1.2.).

Для этого переключитесь в Simulink Library Browser.

В качестве источника сообщения первоначально выберите источник дискретных импульсов (Simulink\\Sources\\Sine Wave). Выбрав значок синусоидальных колебаний, перетащите его в окно модели. Аналогичным образом вставьте в модель оставшиеся блоки (табл. 1.1.).

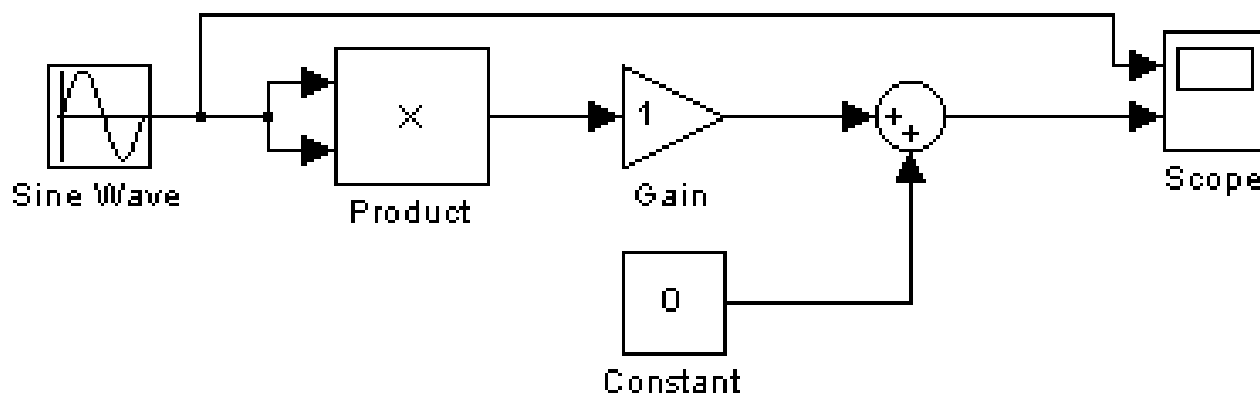


Рис. 1.2. Внешний вид модели, выполняющей функцию  $y = ax^2 + b$

Выстроив блоки аналогично схеме (рис. 1.2.), соедините их стрелками, используя левую или правую кнопку «мыши». Быстрое соединение блоков можно производить, используя кнопку «Ctrl». Для этого щелкните левой кнопкой мыши на блоке «Sine Wave» и удерживая кнопку «Ctrl», укажите на блок «Product». Произойдет соединение. Разветвление на нижний вход блока «Product» можно осуществить двумя способами:

- укажите правой кнопкой мыши место разветвления и перетащите стрелку ко второму входу;
- удерживая кнопку «Ctrl», сделайте то же действие левой кнопкой.

Таблица 1.1. Соответствие и расположение блоков

№ п/п	Блок	Соответствие	Путь
1.	Умножитель	Product	Simulink\\Math Operations
2.	Усилитель	Gain	Simulink\\Math Operations

3.	Сумматор	Sum	Simulink\\Math Operations
4.	Константа	Constant	Simulink\\Sources
5.	Осциллограф	Scope	Simulink\\Sinks

Если соединение произошло, то стрелка имеет вид сплошной черной линии, если нет – прерывистой красной. Удаление неудачных соединений производится кнопкой «Delete». Сложная трассировка (в обход различных блоков) осуществляется кусочным способом (т.е. каждый следующий отрезок проводится от окончания предыдущего. Блок «Scope» пока с остальными блоками не соединять.

2.4. Сохраните собранную модель в папке C:\MATLAB6p5\work\  
\№ группы\lr1\_№ по списку.

### 3. Визуализация и анализ результатов

3.1. Для настройки модели двойным щелчком мыши откройте окно параметров блока «Sine Wave» и установите следующие параметры: Amplitude (амплитуда) – 2; Bias (смещение) – 0; Frequency (частота) – 2 Гц (частота указывается в рад/с); Phase (начальная фаза) – 0. Нажмите «Apply».

3.2. Откройте блок «Scope» (рис. 1.3.) и через панель инструментов зайдите в параметры блока.

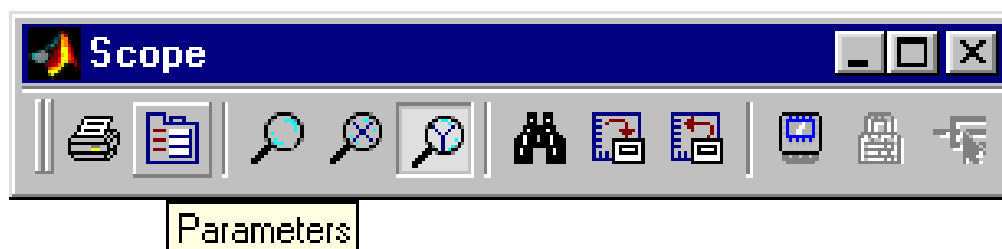


Рис. 1.3. Панель инструментов блока «Scope»

На вкладке параметров «General» установите число входов (Number of axes) – 2. Перейдите на вкладку «Data history» и снимите флажок на пункте «Limit data points to last» и нажмите «Apply». Соедините осциллограф со схемой.

2.3. Откройте пункт меню «Simulation\\Simulation parameters» и установите следующие параметры моделирования: начальное время моделирования Start time - 0.0; конечное время моделирования Stop time - 10.0; максимальный шаг интегрирования системы однородных дифференциальных уравнений Max step size – 1e-2.

2.4. Запустите полученную модель, используя меню (Simulation/Start) или кнопку Start simulation панели инструментов. Результаты моделирования наблюдайте на осциллографе (Scope). Для этого наведите на блок осциллографа указатель мыши и дважды щелкните левой кнопкой. При растягивании окна осциллографа масштаб визуализации по осям меняется. Для увеличения масштаба визуализации результатов одновременно по X и по Y, по X или по Y, выберите в панели инструментов осциллографа одну из кнопок Zoom (увеличение одновременно по X и по Y), Zoom X-axis, Zoom Y-axis соответственно. После этого подведите указатель мыши к участку, подлежащему увеличению и нажмите левую кнопку. Отмена действия производится с использованием пункта «Zoom out» контекстного меню (нажатие правой кнопки мыши).

2.5. Установите названия осциллограмм («Исходный сигнал», «Выходной сигнал») с использованием контекстного меню, открытого на соответствующей осциллограмме. (Axis properties\\Title). Сохраните изменения.

Все операции по оформлению получаемых моделей (настройка цветовой палитры, положение боков, шрифт и т.п.) возможно производить с использованием контекстного меню, открытом на конкретном элементе модели.

#### *Вопросы и задание для самостоятельной работы*

Вопросы:

1. Поясните алгоритм формирования и настройки динамических моделей с использованием пакета «Simulink».
2. Особенности пакета «Simulink» системы MATLAB.

Задание:

1. Изучить подробнее пакеты визуального моделирования динамических систем Simulink системы MATLAB.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ИКМ»

### Учебные вопросы:

1. Создание модели устройства формирования ИКМ сигнала.
2. Исследование полученной модели при различных частотах дискретизации и различном количестве уровней квантования.

### *Краткий теоретический материал*

Наиболее широкое распространение получили в настоящее время многоканальные ЦСП, в которых используется метод импульсно-кодовой модуляции (ИКМ). При ИКМ отсчеты аналогового амплитудно-импульсного (АИМ) сигнала преобразуются в последовательность кодовых групп, состоящих из двоичных символов. Для осуществления ИКМ необходимо произвести три операции:

- дискретизацию сигналов по времени (получение сигнала ДИМ) (рис. 2.1.);
- квантование полученных импульсов по амплитуде (получение АИМ сигнала) (рис. 2.2.);
- кодирование квантованных по амплитуде импульсов (рис. 2.3.).

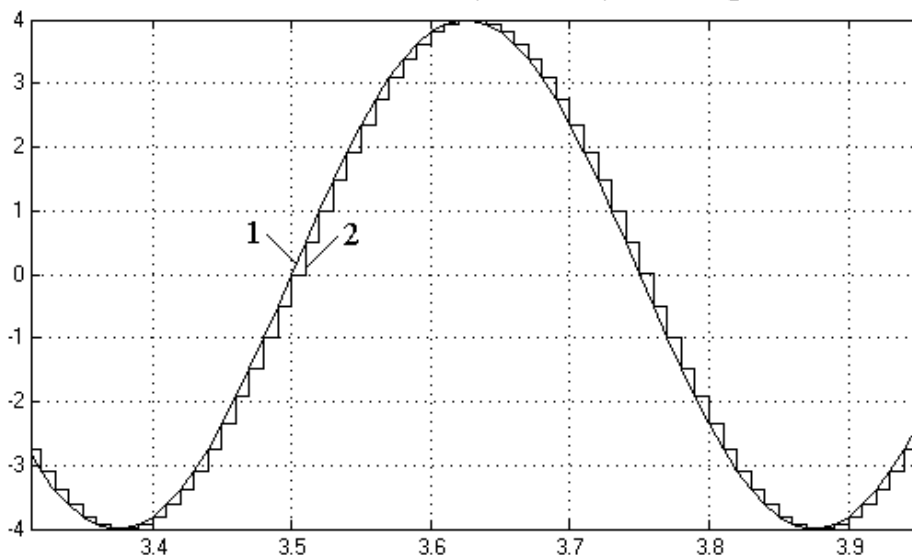


Рис. 2.1. Преобразование исходного аналогового сигнала (1) в ДИМ сигнал (2)

Квантование называется равномерным в том случае, если шаг квантования в допустимых пределах возможных амплитудных значений сигнала остается постоянным  $\Delta = \text{const}$ .

Амплитудная характеристика имеет два характерных участка: зону квантования и зону ограничения (рис. 2.4.). Для первого участка характерно

само квантование входных сигналов, и их величина  $U_{\text{вх}}$  определяется пределом –  $U_0 \leq U_{\text{вх}} \leq U_0$ .

В некоторые моменты времени входной сигнал может превысить значение  $U_0$ , т.е.  $|U_{\text{вх}}| > |U_0|$ . В этом случае произойдет ограничение максимальных мгновенных значений сигнала. В соответствии с этим кроме шумов квантования различают еще и шумы ограничения, которые вызываются ограничением максимальных мгновенных значений сигнала.

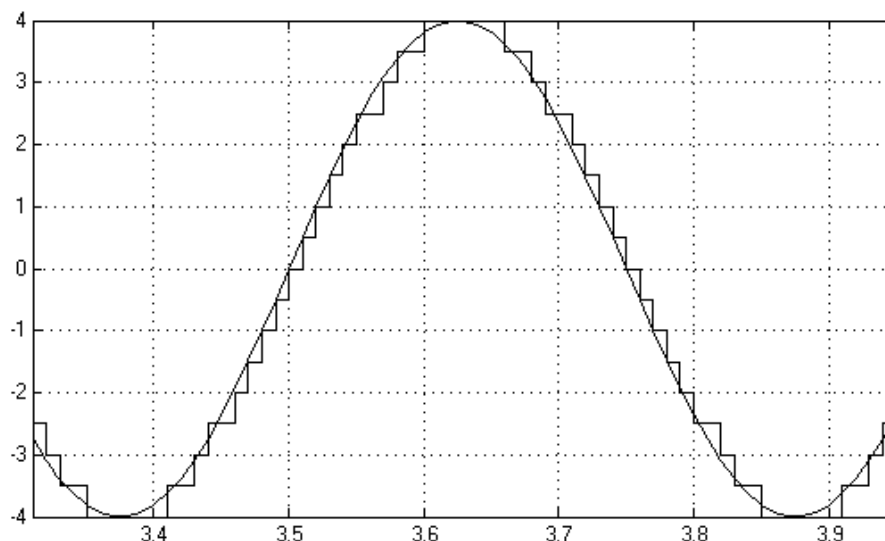


Рис. 2.2. Получение АИМ сигнала

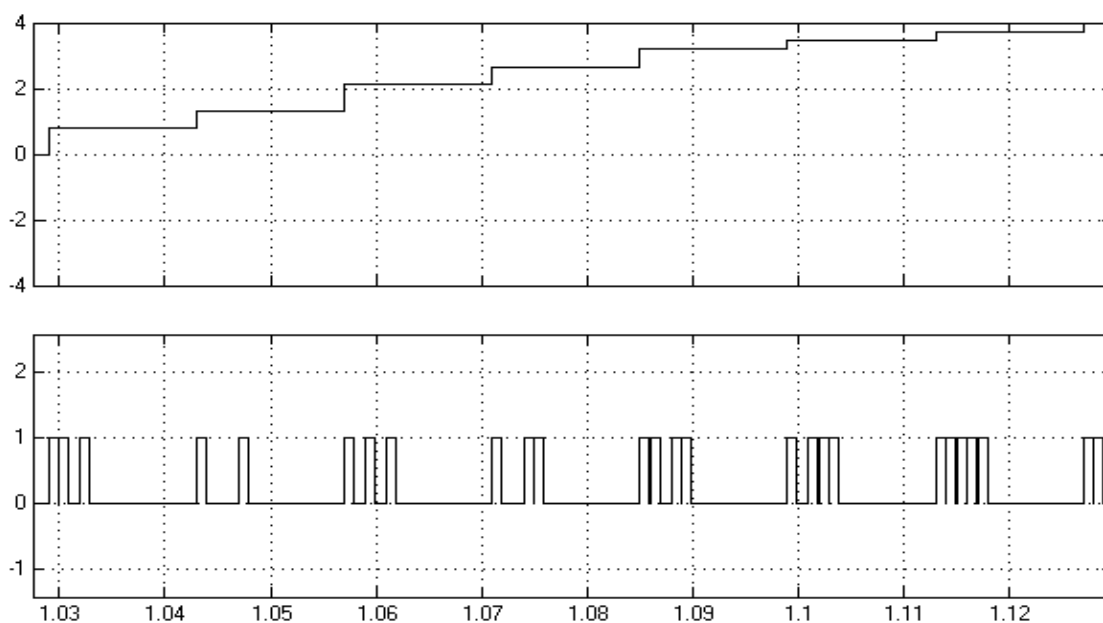


Рис. 2.3. Кодирование АИМ сигнала

Обычно уровень сигнала на входе каналов систем ИКМ выбирается так, чтобы с учетом статистических характеристик сигнала вероятность превышения  $|U_{\text{max}}| > |U_0|$  была достаточно малой, поэтому определяющими в системах ИКМ являются шумы квантования, а не шумы ограничения.

Средняя мощность шумов квантования при равномерном шаге  $P_{ш.кв} = \Delta^2/12$ , где  $\Delta$  - шаг квантования. Максимальное число условных уровней (шагов) квантования при равномерном квантовании  $M_{кв} = 2|U_{max}|/\Delta + 1 = 2|U_{огр}|/\Delta + 1$ .

При определении числа уровней квантования нужно ориентироваться на допустимую ошибку квантования для наиболее удаленных абонентов, телефонные сигналы которых имеют наименьшую среднюю мощность. Обычно считают, что для выполнения принятой нормы по отношению сигнал-шум квантования для 99,7% всех абонентов необходимое число уровней при равномерном квантовании должно быть  $M_{кв} = 512 \dots 2048$ , что требует девяностидесяти разрядов кодовой группы.

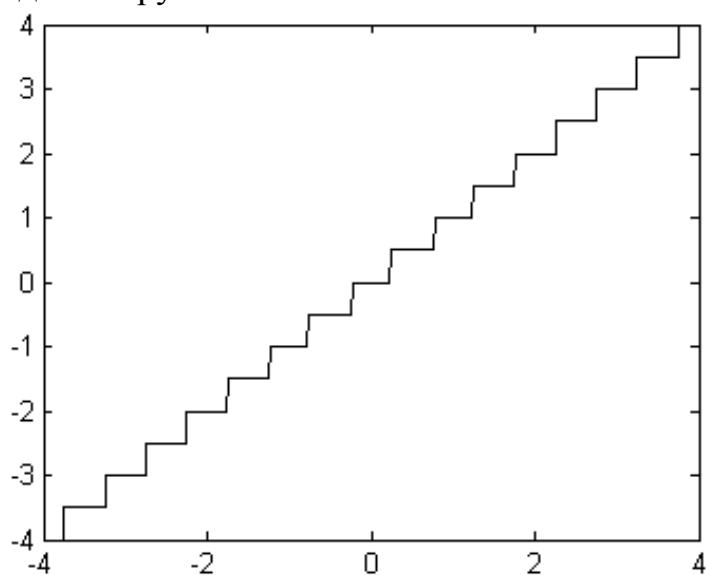


Рис. 2.4. Амплитудная характеристика квантующего устройства

Таким образом, разброс средних мощностей абонентских сигналов приводит к существенному увеличению числа уровней равномерного квантования, что существенно усложняет аппаратуру и, как будет показано в дальнейшем, приводит к значительному увеличению скорости цифрового потока группового цифрового сигнала. Для выравнивания относительной ошибки квантования при изменении средней мощности абонентского сигнала в широких пределах и соответственно уменьшения числа шагов квантования применяют неравномерное (нелинейное) квантование (рис. 2.5).

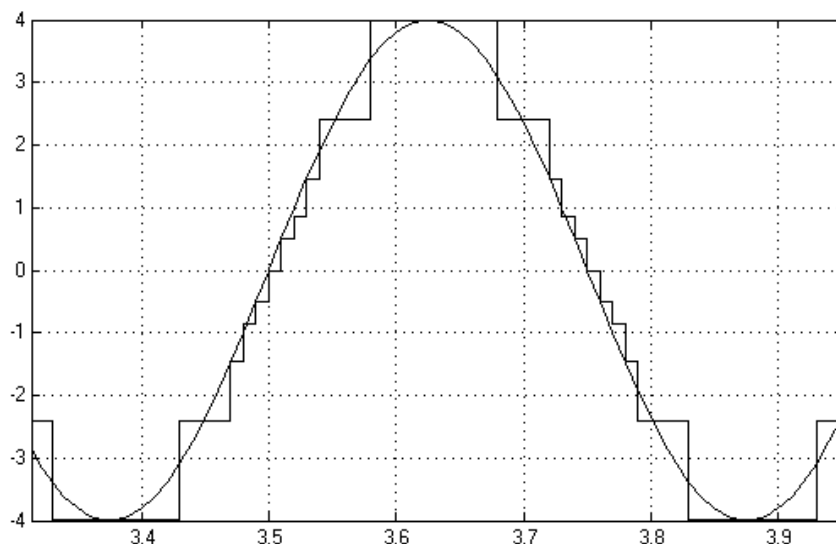


Рис. 2.5. Получение АИМ сигнала при неравномерном квантовании

При неравномерном квантовании шаг квантования изменяется в допустимых пределах амплитудных значений квантуемых сигналов, возрастая с увеличением уровня сигнала. Абсолютная ошибка квантования возрастает с увеличением уровня сигнала, но ее относительное значение, т. е. отношение сигнал-ошибка квантования, не изменяется.

Использование неравномерного квантования позволяет выровнять отношение сигнал-ошибка квантования во всем диапазоне средних мощностей входных абонентских сигналов, а следовательно, сократить число шагов квантования в 2...4 раза по сравнению с равномерным квантованием до  $M_{\text{кв}} = 128...256$ , что требует семи-восьми разрядов кодовой группы.

Здесь будет рассмотрено только аналоговое компандирование, при котором используются устройства с нелинейными амплитудными характеристиками. На выходе компрессора амплитудные соотношения сигналов изменяются (уменьшается динамический диапазон  $D = U_{\text{max}}/U_{\text{min}}$ ). Значительно увеличивается амплитуда малых сигналов и мало меняется амплитуда больших сигналов.

Применение компрессора перед кодерами с равномерными квантующими характеристиками позволяет получить неравномерное квантование. Для восстановления исходного динамического диапазона сигнала на приемном конце используется экспандер, амплитудная характеристика которого обратна характеристике компрессора. Суммарная амплитудная характеристика цепи компрессор - экспандер должна быть линейной (рис. 2.6.).

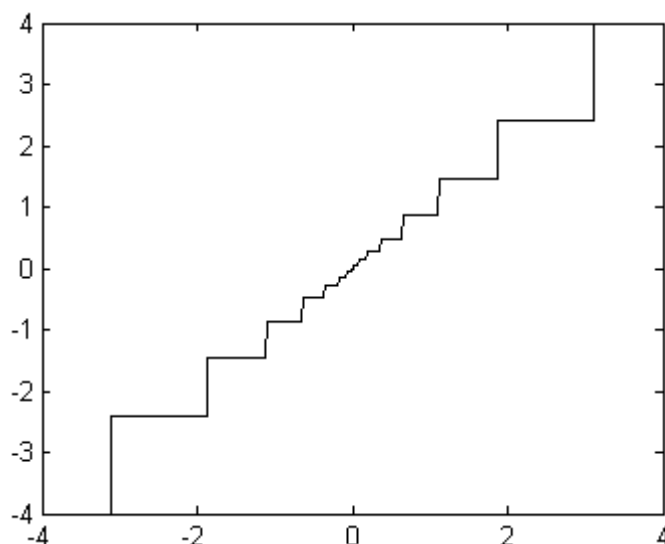


Рис. 2.6. Амплитудная характеристика квантующего устройства.

Недостатком аналогового компандирования является то, что очень сложно получить с большой точностью взаимнообратные амплитудные характеристики компрессора и экспандера, вследствие чего нелинейность суммарной амплитудной характеристики приводит к нелинейным искажениям передаваемых сигналов.

Структурная схема включения компрессора и экспандера в групповой тракт системы ИКМ-ВРК. показана на рис. 2.7.

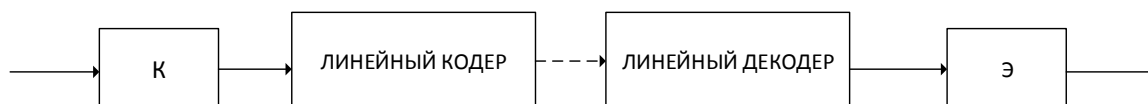


Рис. 2.7. Структурная схема включения компрессора.

1.2. Создайте модель устройства формирования ИКМ сигнала используя пакет моделирования динамических систем Simulink системы Matlab. Примерный вид модели показан на рис. 2.8.

Для этого переключитесь в Simulink Library Browser и создайте новую модель. Соответствие и расположение блоков модели показано в табл.1. Здесь блок «Zero-Order Hold» предназначен для дискретизации исходного сигнала по времени, а блок «Quantizer» – для квантования по уровню. Блок «Mux» используется для объединения сигналов в одну шину.

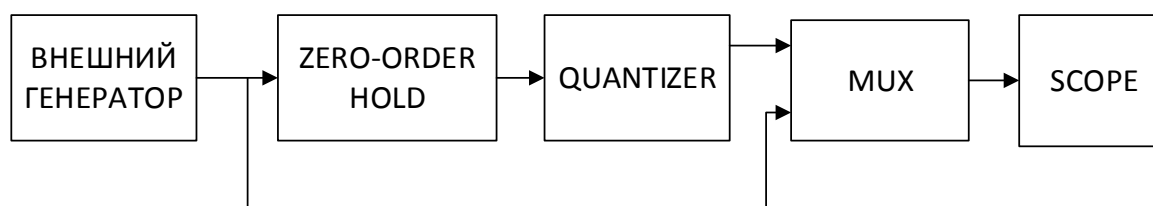


Рис. 2.8. Общий вид модели устройства формирования ИКМ сигнала.

Таблица 2.1. Соответствие и расположение блоков.

№ п/п	Блок	Соответствие	Путь
1.	Генератор синусоидального сигнала	Внешний ген.	C:\MATLAB6p5\Work\Sine_Wave
2.	Дискретизатор по времени	Zero-Order Hold	Simulink\\Discrete
3.	Квантователь по уровню	Quantizer	Simulink\\Discontinuities
4.	Мультиплексор	Mux	Simulink\\Signal Routing

1.3. Собрав модель, снимите флажок «Limit data points to last» в осциллографе. Для этого откройте блок «Scope» (рис. 2.9.) и через панель инструментов зайдите в свойства блока (рис. 2.10.).



Рис. 2.9. Панель инструментов блока «Scope».

1.4. Установите время моделирования – 2 с. Изменения произведите с использованием пункта меню «Simulation//Simulation parameters» модели.

1.5. Проверьте работоспособность полученной модели, установив следующие параметры блоков. Для блока «Внешний ген.»:

- частота сигнала – 4 Гц;
- амплитуда – 4.5 В;
- смещение – 0 В;
- начальная фаза – 0 рад.

Для блока «Zero-Order Hold»: интервал дискретизации – 0.01 с. Для блока «Quantizer»: интервал квантования – 0.5 В.

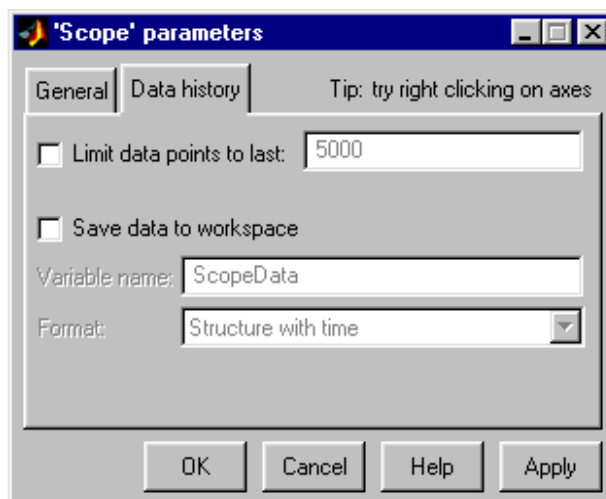


Рис. 2.10. Вкладка свойств блока «Scope».

1.5. Полученные осциллограммы зафиксируйте в рабочих тетрадах.

*2. Исследование полученной модели при: различных частотах дискретизации; различном количестве уровней квантования*

2.1. Проведите исследование модели, установив следующие параметры блока «Внешний ген.»:

- частота сигнала – 4 Гц;
- амплитуда – 4 В;
- смещение – 0 В;
- начальная фаза – 0 рад;
- период дискретизации  $T_d = 0.01$ .

Изменяйте шаг квантования в диапазоне  $1 \div 0.05$  В с дискретностью 0.05 В. Осциллограммы для двух значений шага квантования (в зависимости от варианта) зафиксировать в рабочей тетради. Относительно полученных результатов сделать выводы в рабочей тетради.

2.2. Для шага квантования 0.05 В изменяйте период дискретизации в диапазоне  $0.01 \div 0.0001$  с. В с дискретностью 0.005 с. Осциллограммы для двух значений  $T_d$  (в зависимости от варианта) зафиксировать в рабочей тетради. Относительно полученных результатов сделать обстоятельные выводы в рабочей тетради.

*3. Создание модели компрессора*

3.1. Добавьте в модель блок «A-law Compressor» (Communication Blokset\\Source Coding). Разместите его между блоками «Внешний ген.» и «Zero-Order Hold» (рис. 2.11). Параметр блока «A value» установить равным 0.6,

параметр «Peak signal magnitude» установить равным 4. Время моделирования – 10 с. Частота синусоидального сигнала должна составлять 0.1 Гц. Полученный результат зафиксируйте в рабочей тетради.

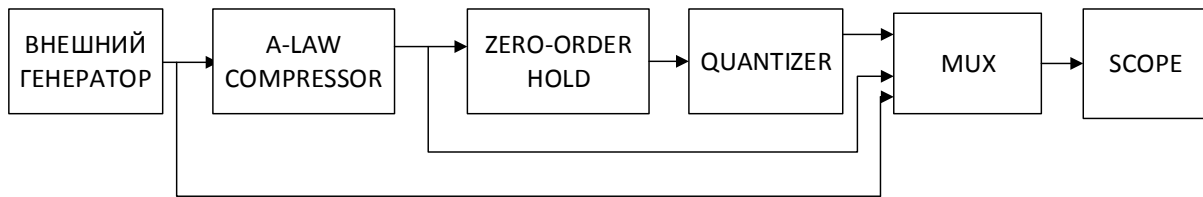


Рис. 2.11. Общий вид модели формирования ИКМ с использованием компрессора

3.2. Добавьте в модель блок «A-law Expander» (Communication Blokset\\Source Coding). Разместите его аналогичным образом между блоками «Quantizer» и «Mux». Параметр блока «A value» установить равным 0.6, параметр «Peak signal magnitude» установить равным 4. Полученный результат зафиксируйте в рабочей тетради.

3.3. Аналогичные действия произведите с блоками «mu-law Compressor» и «mu-law Expander». Результаты также зафиксируйте в рабочих тетрадях.

#### 4. Исследование модели ИКМ для различных амплитудными характеристикам компрессоров и экспандеров

4.1. Снова установите блоки «A-law Compressor» и «A-law Expander». Изменяйте параметр «A value» блоков следующим образом:

- в интервале  $0.6 \div 1.5$  с дискретностью 0.1;
- в интервале  $2 \div 10$  с дискретностью 1;
- в интервале  $10 \div 100$  с дискретностью 10.

Осциллограммы для одного из значений параметра «A value» в каждом диапазоне (в зависимости от варианта) зафиксировать в рабочей тетради. Относительно полученных результатов сделать выводы в рабочей тетради.

4.2. Аналогичные действия произведите с блоками «mu-law Compressor» и «mu-law Expander». Относительно полученных результатов сделать выводы в рабочей тетради.

#### Вопросы и задания для самостоятельной работы

Вопросы:

1. Создание модели компандера.
2. Особенности пакета «Simulink» системы MATLAB.
3. Изучить принципы дифференциальной и дельта модуляции.

4. Поясните основные принципы формирования ИКМ сигналов.

5. Поясните назначение устройств компандирования. Структурная схема компандирования.

6. Поясните характер осциллограмм в различных точках устройств компандирования.

7. Поясните принцип формирования симметричного двоичного кода.

Задание:

1. Изучить модели ИКМ с различными амплитудными характеристиками компрессоров и экспандеров.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 «ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ФОРМИРОВАНИЯ ИКМ И ДИКМ СИГНАЛОВ»

### Учебные вопросы:

1. Создание модели устройства формирования ИКМ сигнала.
2. Исследование полученной модели в различных режимах.
3. Создание модели ДИКМ модуляции.
4. Исследование полученной модели в различных режимах.

### *Краткий теоретический материал*

Как известно, для речевого сигнала более вероятны низкочастотные составляющие спектра. Это означает, что мгновенные значения дискретных отсчетов сигнала в соседних точках дискретизации с большой вероятностью мало отличаются друг от друга. Поэтому можно вместо кодирования и дальнейшей передачи отсчетов передавать по тракту связи кодированные значения разности соседних отсчетов, по которым на приемной стороне восстанавливаются значения отсчетов сигнала. Такой метод передачи называется дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией (ДИКМ).

В настоящее время известно много вариантов технической реализации ДИКМ. Наиболее широкое распространение получила схема кодера ДИКМ с обратной связью (см. лекции).

В этой схеме оценивается не разность между двумя соседними отсчетами передаваемого сигнала, а разность между значением данного отсчета и квантованным значением предыдущего отсчета, что позволяет уменьшить ошибку квантования.

Итак, при ДИКМ кодируется не значение отсчетов сигнала, а разность соседних отсчетов. Квантование и кодирование разности позволяет уменьшить число уровней квантования разностей отсчетов по сравнению с необходимым числом уровней при квантовании самих отсчетов. Таким образом, уменьшается разрядность кода и, следовательно, число информационных символов, передаваемых по каналу передачи в единицу времени.

### *1. Создание модели устройства формирования ИКМ сигнала*

1.1. Создайте модель устройства формирования ИКМ сигнала используя пакет моделирования динамических систем Simulink системы Matlab. Примерный вид модели показан на рис. 3.1.

Для этого создайте новую модель. Скопируйте в модель новые блоки. Соответствие и расположение блоков модели показано в табл.1.

1.2. Собрав модель, снимите флажок «Limit data points to last» в осциллографе. Для этого откройте блок «Scope» и через панель инструментов зайдите в свойства блока (аналогично предыдущей работе).

1.3. Установите время моделирования – 10 с. Изменения произведите с использованием пункта меню «Simulation//Simulation parameters» модели.

1.4. Проверьте работоспособность полученной модели, установив следующие параметры блоков. Для блока «Внешний ген.»:

- частота сигнала – 4 Гц;
- амплитуда – 4.5 В;
- смещение – 0 В;
- начальная фаза – 0 рад.

Откройте блок «АЦП, CD». Двойным щелчком мыши откройте окно параметров блока «АЦП (+)» и установите нужное значение максимальной амплитуды входного сигнала. Аналогичное действие произведите с блоком «АЦП (-)». Откройте блок «ЦАП, DC» и в его соответствующих подблоках произведите установку максимальной амплитуды.

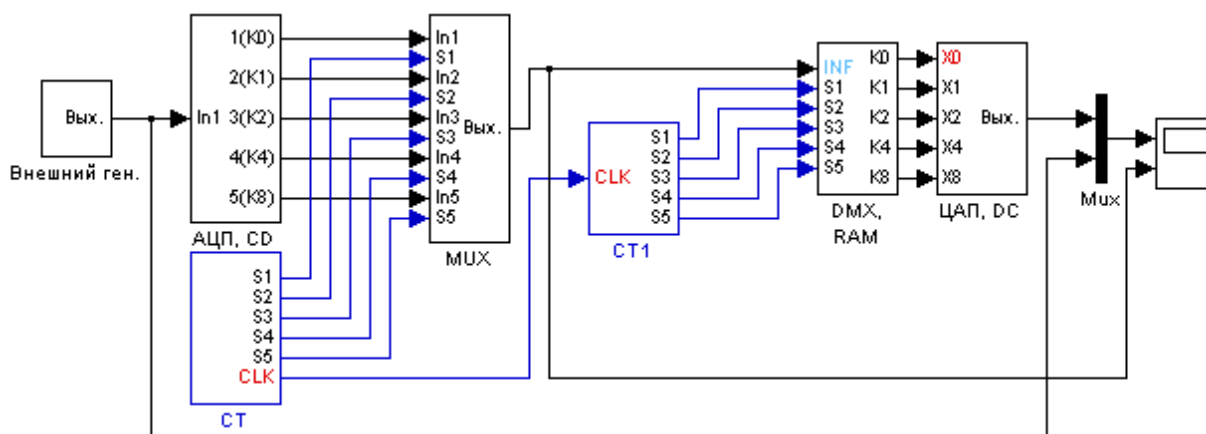


Рис. 3.1. Модель ИКМ с реализацией процесса кодирования

Таблица 3.1. Соответствие и расположение блоков.

№ п/п	Блок	Соответствие	Путь
1.	Генератор синусоидального сигнала	Внешний ген.	C:\MATLAB6p5\Work\I1
2.	Аналогово-цифровой преобразователь	АЦП, CD	C:\MATLAB6p5\Work\ I2
3.	Счетчик	СТ (СТ1)	C:\MATLAB6p5\Work\ I3
4.	Мультиплексор	MUX	C:\MATLAB6p5\Work\ I4
5.	Демультимплексор	DMX, RAM	C:\MATLAB6p5\Work\ I5

6.	Цифроаналоговый преобразователь	ЦАП, DC	C:\MATLAB6p5\Work\ I6
----	---------------------------------	---------	-----------------------

1.5. Полученные осциллограммы зафиксируйте в рабочих тетрадах.

### *2. Исследование полученной модели в различных режимах*

2.1. Проанализируйте структуру каждого из блоков собранной модели. Поясните в рабочей тетради назначение и принцип функционирования каждого из блоков.

2.2. Откройте окно свойств осциллографа и установите количество входов равное 6. На первые 5 входов подключите выходы АЦП. На последний вход – выход блока «MUX». Запустите модель и зафиксируйте полученные осциллограммы. В рабочей тетради сделайте выводы относительно принципов работы блока «MUX».

2.3. Отключите от осциллографа выход блока «MUX» и на его место подключите выход блока «Внешний ген.». Поясните связь первых 5 осциллограмм с последней.

2.4. Подключите к осциллографу вход и выходы блока «DMX, RAM». Зафиксируйте полученные осциллограммы. Поясните в тетрадах принцип работы блока.

2.5. Подключите к осциллографу входы блоков «Внешний ген.» и «ЦАП, DC». Зафиксируйте полученные осциллограммы. Объясните разность фаз исходного сигнала и сигнала с блока «ЦАП, DC».

2.6. По проделанным измерениям сделайте выводы, пояснив в рабочей тетради назначение и принцип функционирования каждого из блоков.

### *3. Создание модели ДИКМ модуляции*

3.1. Создайте модель устройства формирования ДИКМ сигнала используя пакет моделирования динамических систем Simulink системы Matlab. Примерный вид модели показан на рис. 3.2.

Для этого создайте новую модель. Скопируйте в модель новые блоки. Соответствие и расположение блоков модели показано в табл. 3.2.

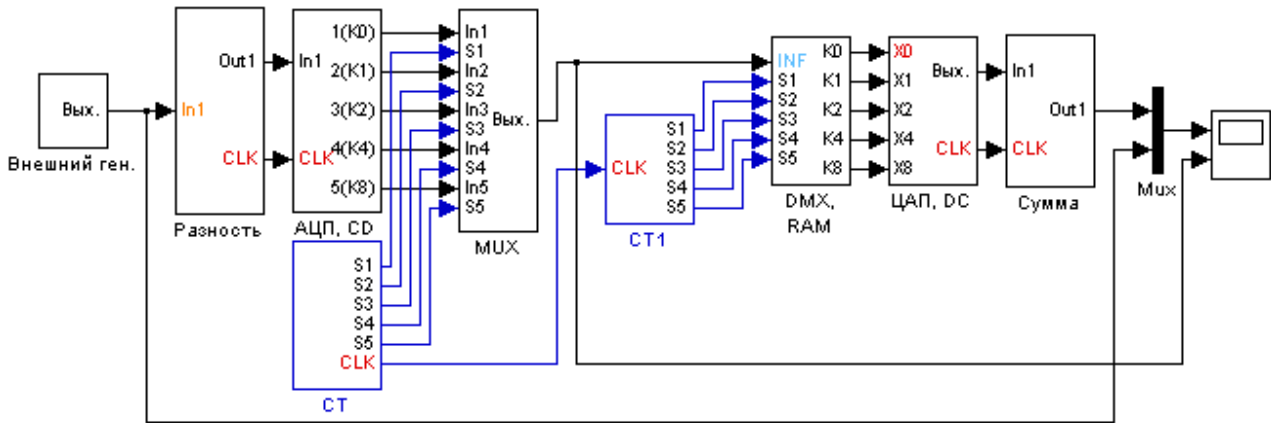


Рис. 3.2. Модель ДИКМ с реализацией процесса кодирования.

Таблица 3.2. Соответствие и расположение блоков

№ п/п	Блок	Соответствие	Путь
1.	Разность соседних амплитудных значений исх. сигнала	Разность	C:\MATLAB6p5\Work\ I7
2.	Восстановление сигнала из разностных значений	Сумма	C:\MATLAB6p5\Work\ I8

3.2. Установив следующие параметры блока «Внешний ген.» аналогично п.1. Подключите осциллограф на выход блока «Разность» и запустив модель, измерьте максимальную амплитуду разностного сигнала.

Полученное значение занесите в блоки «АЦП, CD» и «ЦАП, DC». Проверьте работоспособность полученной модели.

3.3. Полученные осциллограммы зафиксируйте в рабочих тетрадах.

#### 4. Исследование полученной модели

4.1. Проанализируйте структуру блоков «Разность» и «Сумма» собранной модели. Поясните в рабочей тетради назначение и принцип функционирования каждого из блоков.

4.2. Подключите к осциллографу входы блоков «Внешний ген.», «Сумма», «MUX». Последовательно увеличивайте амплитуду исходного сигнала с дискретностью 1 в диапазоне  $4 \div 15$  В. Полученные данные зафиксировать в рабочей тетради.

4.3. Установите исходную амплитуду сигнала. Последовательно увеличивайте частоту исходного сигнала с дискретностью 10 в диапазоне  $2 \div 122$  Гц. Полученные данные зафиксировать в рабочей тетради.

*Вопросы и задания для самостоятельной работы:*

Вопросы:

1. Поясните алгоритм формирования и настройки динамических моделей с использованием пакета «Simulink».
2. Изучить принципы тактовой синхронизации.
3. Поясните назначение и принцип действия основных блоков устройства формирования ИКМ сигналов.
4. Поясните назначение и принцип действия основных блоков устройства формирования ДИКМ сигналов.

Задания:

1. Создание модели ДИКМ модуляции.
2. Изучить принципы тактовой синхронизации.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ДЕЛЬТА МОДУЛЯЦИИ С ИНЕРЦИОННОЙ КОМПРЕССИЕЙ ПО СТРУКТУРЕ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА»

#### *Учебные вопросы:*

1. Создание модели устройства формирования ДМ сигналов с инерционной компрессией по структуре цифрового сигнала.
2. Исследование ДМ сигналов с компандированием.

#### *Краткий теоретический материал*

Тактовая частота в системах передачи с ДМ может быть существенно уменьшена, если для устранения перегрузки по крутизне шаг квантования менять в зависимости от характеристик передаваемых сигналов. По инерционности методы компандирования делятся на два типа. При мгновенном компандировании управляемый параметр ДМ может быстро изменяться от такта к такту, а при инерционном компандировании время регулирования соизмеримо с длительностью слогов речевого сообщения. Компандирование позволяет не только уменьшить тактовую частоту, но и поддерживать постоянным отношение сигнал-шум квантования при изменении мощности сигнала в достаточно широких пределах и тем самым расширять динамический диапазон канала. В зависимости от характеристик передаваемых сигналов может использоваться тот или иной вид компандирования. Обычно считают, что мгновенное компандирование целесообразно использовать при передаче сообщений с резкими изменениями значения (например, сигналов телевидения), тогда как инерционное компандирование более эффективно при передаче речевых сообщений. В некоторых случаях используют одновременно и мгновенное, и инерционное компандирование.

Упрощенная структурная схема дельта-кодека с инерционной компрессией по структуре цифрового сигнала на выходе модулятора показана на рис. 4.1, а.

Основу структурной схемы составляет обычный классический дельта-модулятор с одинарным интегратором. Основной принцип работы схемы заключается в том, что амплитуда импульсов на входе интегратора изменяется в соответствии со структурой цифрового потока, получающейся на выходе дельта-модулятора.

Инерционная компрессия в модуляторе осуществляется с помощью формирователя сигнала управления ФУ и амплитудно-импульсного модулятора М, включенного на входе интегратора. Формирователь сигнала управления

состоит из дополнительного интегратора ДИ, ограничивающего спектр частот импульсной последовательности в области высоких частот, сглаживающего фильтра СФ, детектора огибающей ДО и схемы сложения, огибающей с некоторым постоянным напряжением  $U_0$ , определяющим заданное минимальное значение амплитуды импульсов на входе интегратора.

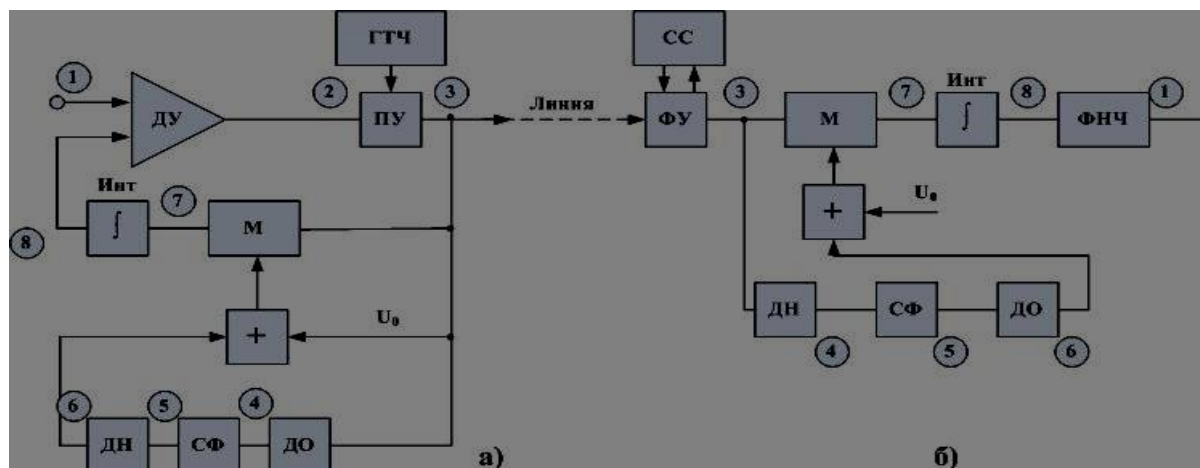


Рис. 4.1. Структурная схема дельта-кодека с инерционной компрессией по структуре цифрового потока: а - кодер; б - декодер

Работа схемы поясняется с помощью временных диаграмм (рис. 4.2.).

Непрерывный сигнал (1) поступает на вход ДУ и на выходе ПУ при нарастании входного сигнала начинает формироваться последовательность положительных единичных импульсов (3). Формируемая импульсная последовательность поступает на дополнительную интегрирующую цепь, на выходе которой из-за ограничения спектра верхних частот и расширения длительности импульсов возникают межсимвольные искажения (искажения первого рода), что приводит к появлению сигнала огибающей импульсной последовательности (4). Сглаживающий фильтр выделяет сигнал огибающей (5), амплитуда которого зависит от плотности единицы импульсной последовательности. Детектор огибающей осуществляет двухполупериодное выпрямление этого сигнала (6).

К напряжению огибающей подмешивается некоторое постоянное напряжение  $U_0$ , которое обеспечивает постоянную амплитуду импульсов на выходе модулятора при равномерной плотности положительных и отрицательных единиц на его входе, т. е. при отсутствии напряжения огибающей. При увеличении плотности единиц амплитуда импульсов, поступающих на интегратор по цепи обратной связи, будет изменяться (7) под действием напряжения огибающей, и аппроксимирующая ступенчатая функция

(8) в зависимости от крутизны нарастания непрерывного сигнала будет иметь переменный шаг квантования.

Структурная схема декодера изображена на рис. 4.1, б. Включенный последовательно с интегратором модулятор и ФУ позволяют восстановить аппроксимирующий сигнал, как это было описано выше, и получить на выходе ФНЧ исходный непрерывный сигнал.

1.1. Создайте модель устройства формирования ДМ сигнала используя пакет моделирования динамических систем Simulink системы Matlab.

Примерный вид модели показан на рис. 4.3.

Для этого создайте новую модель. Скопируйте в модель блоки, расположение которых в табл. 4.1.

1.2. Собрав модель, снимите флажок «Limit data points to last» в осциллографе. Для этого откройте блок «Scope» и через панель инструментов зайдите в свойства блока.

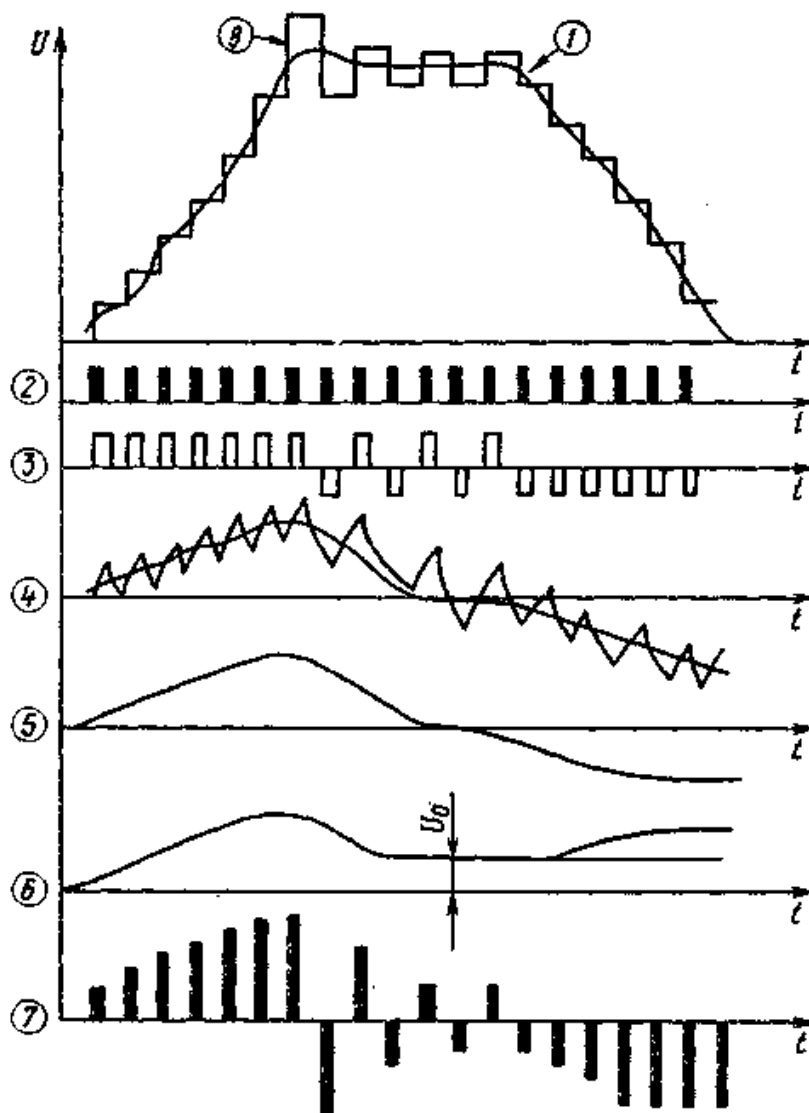


Рис. 4.2. Временные диаграммы работы кодека с инерционной компрессией

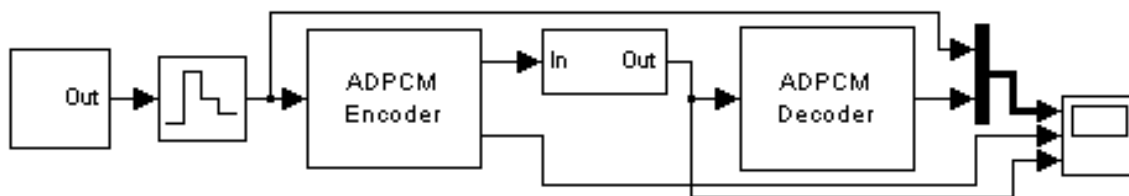


Рис. 4.3. Модель формирования дельта-кода

Таблица 4.1. Расположение блоков

№ п/п	Блок	Путь
1.	Генератор аналогового сигнала	C:\MATLAB6p5\Work\Agen
2.	Дискретизатор по времени	Simulink\Discrete
3.	Формирователь дельта-кода	C:\MATLAB6p5\Work\Eadm
4.	Канал связи	C:\MATLAB6p5\Work\Ks
5.	Дельта-декодер	C:\MATLAB6p5\Work\Dadm

1.3. Установите следующие параметры моделирования:

- время – 0.02 с.;
- опции вычислителя – Fixed-step;
- величина фиксированного шага FSS (Fixed step size) – 1/64000;
- режим (Mode) – Single Tasking.

Изменения произведите с использованием пункта меню «Simulation//Simulation parameters» модели.

1.4. Проверьте работоспособность полученной модели.

## 2. Исследование полученной модели

2.1. Выполните действия согласно пунктам 2.2 - 2.3 предыдущей работы. Выбор параметров  $f_0$  и FSS произвести из таблиц 2 и 3.

2.2. Полученные данные зафиксировать в рабочей тетради и сделайте соответствующие выводы.

### Контрольные вопросы:

1. Поясните назначение и принцип действия основных блоков устройства формирования сигналов ДМ с инерционной компрессией.
2. Поясните характер сигналов на втором выходе формирователя дельта-кода.

### Задание на самоподготовку:

1. Подготовить отчет по выполненной работе.
2. Подготовиться к выполнению следующей работы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ДЕЛЬТА МОДУЛЯЦИИ С МГНОВЕННОЙ КОМПРЕССИЕЙ ПО СТРУКТУРЕ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ»

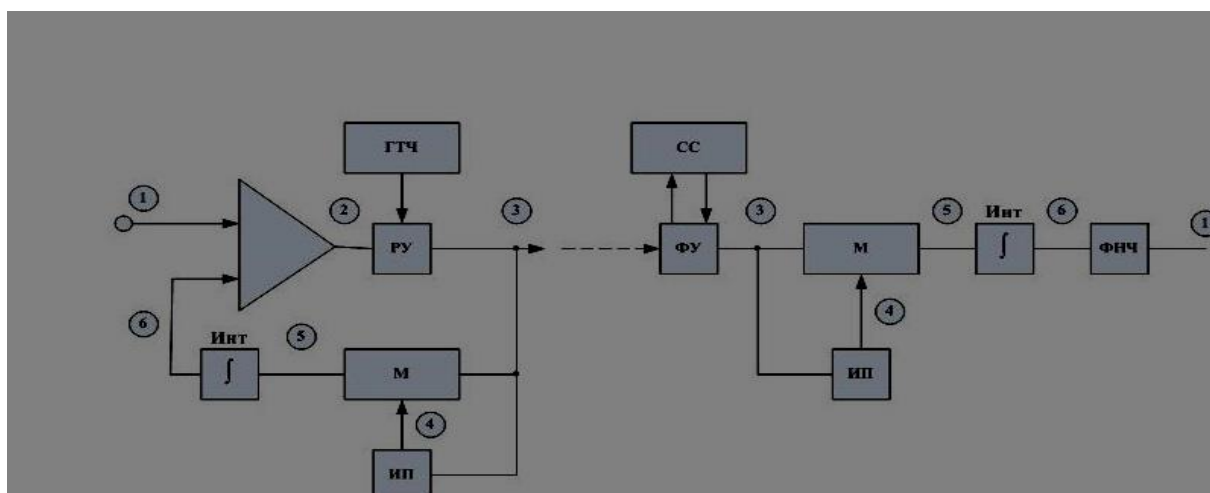
#### *Учебные вопросы:*

1. Создание модели устройства формирования ДМ сигналов с мгновенной компрессией по структуре цифрового сигнала.
2. Исследование ДМ сигналов с компандированием.
3. Сравнение различных методов дельта-модуляции.

#### *Краткий теоретический материал*

Упрощенная структурная схема кодека с мгновенным компандированием по структуре цифрового потока показана на рис. 5.1.

Схема содержит классический дельта-модулятор, к которому дополнительно подключены амплитудно-импульсный модулятор и импульсный



преобразователь (ИП).

Рис. 5.1. Структурная схема кодека с мгновенной компрессией по структуре цифрового потока

Импульсный преобразователь в зависимости от характеристик двоичной последовательности изменяет величину приращений аппроксимирующего напряжения, для чего используется модулятор. Главным достоинством данного типа мгновенного компандирования является возможность реализации аппаратуры на современных элементах счетной техники, что обеспечивает точное соответствие характеристик компрессии на стороне передачи и экспандирования на стороне приема.

Принцип работы такой схемы можно пояснить с помощью временных

диаграмм (рис. 5.2.).

Импульсный преобразователь анализирует плотность единиц и при комбинациях вида 111 или — 1 — 1 — 1 на его выходе возникает импульс, который увеличивает амплитуду импульса на выходе модулятора в 2 раза, при этом шаг квантования на выходе интегратора возрастает также в 2 раза.

Дельта-декодер работает точно таким же образом, но дополнительно включает в себя схему синхронизации СС и формирователь импульсов ФИ. Использование компандирования позволяет снизить тактовую частоту цифрового потока по сравнению с классической ДМ почти в 4 раза и довести ее до 48 кГц для одного канала ТЧ.

Основным преимуществом ДМ в сравнении с ИКМ является ее большая помехоустойчивость, связанная с тем, что она менее чувствительна к ошибкам в цифровом сигнале, чем ИКМ. Величина ошибки при ИКМ зависит от разряда неправильно принятого символа кодовой группы. При 7-разрядной группе ошибка в старшем разряде кодовой группы приводит к ошибочному восстановлению амплитуды отсчета, величина которой  $\Delta U_{\text{ош}} = 2^6 \Delta = 64 \Delta$ , т. е. половине максимального отсчета сигнала. При ДМ ошибочный прием символов цифрового потока всегда приводит к ошибке в один шаг квантования.

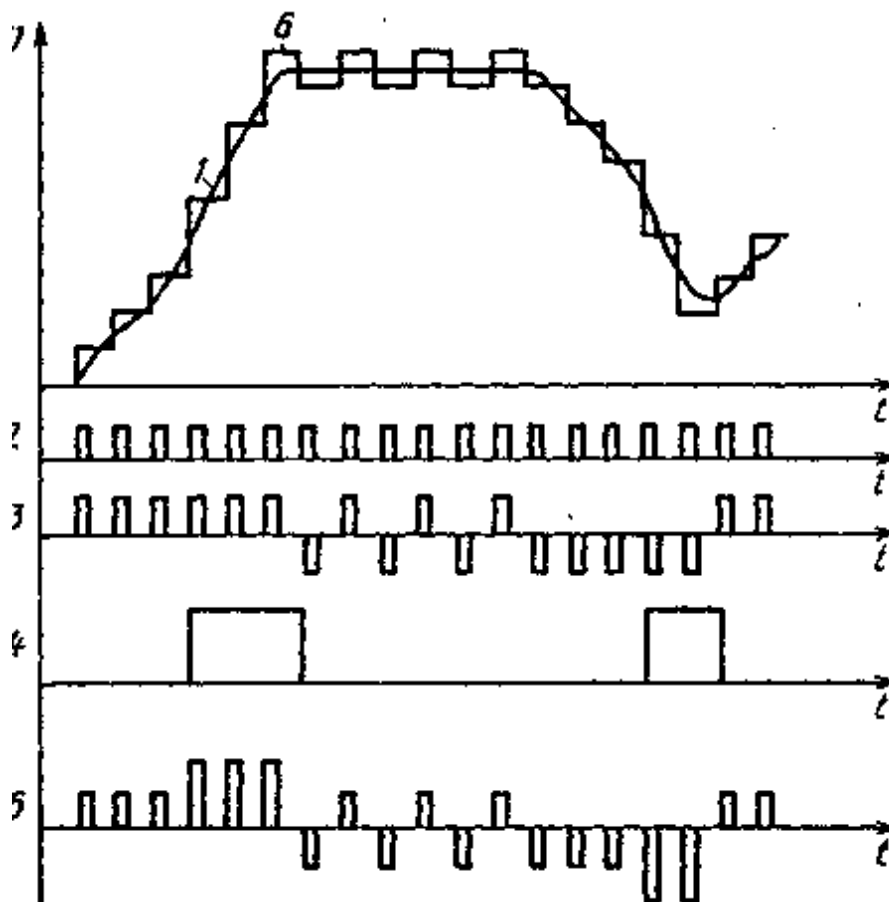


Рис. 5.2. Временные диаграммы работы кодека

1.2. Создайте модель устройства формирования ДМ сигнала используя пакет моделирования динамических систем Simulink системы Matlab. Примерный вид модели показан на рис. 5.3.

Для этого создайте новую модель. Скопируйте в модель блоки, расположение которых представлено в табл. 5.1.

1.2. Собрав модель, снимите флажок «Limit data points to last» в осциллографе. Для этого откройте блок «Scope» и через панель инструментов зайдите в свойства блока.

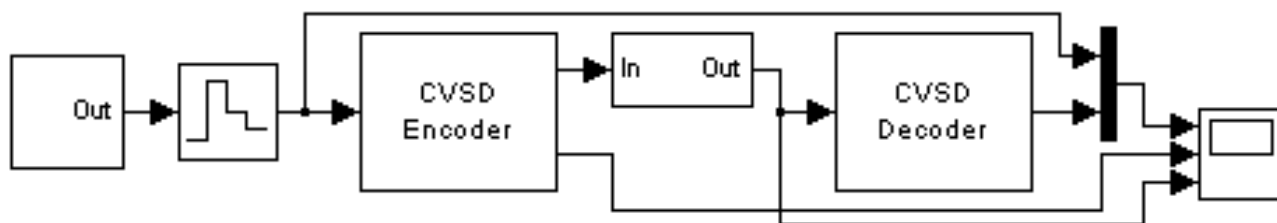


Рис. 5.3. Модель формирования дельта-кода

Таблица 5.1. Расположение блоков

№ п/п	Блок	Путь
1.	Генератор аналогового сигнала	C:\MATLAB6p5\Work\Agen
2.	Дискретизатор по времени	Simulink\Discrete
3.	Формирователь дельта-кода	C:\MATLAB6p5\Work\Ecdm
4.	Канал связи	C:\MATLAB6p5\Work\Agen
5.	Дельта-декодер	C:\MATLAB6p5\Work\Dcdm

1.3. Установите следующие параметры моделирования:

- время – 0.02 с.;
- опции вычислителя – Fixed-step;
- величина фиксированного шага FSS (Fixed step size) – 1/64000;
- режим (Mode) – Single Tasking.

Изменения произведите с использованием пункта меню «Simulation//Simulation parameters» модели.

1.4. Проверьте работоспособность полученной модели.

## 2. Исследование полученной модели

2.1. Выполните действия согласно пунктам 2.2 - 2.3 лр № 3. Выбор параметров  $f_d$  и FSS произвести из таблиц 2 и 3.

2.2. Полученные данные зафиксировать в рабочей тетради и сделайте соответствующие выводы.

### 3. Сравнение различных методов дельта-модуляции

3.1. Создайте модель параллельного формирования трех изученных типов дельта кода. Примерный вид модели представлен на рис. 5.4. Для этого создайте новую модель. Скопируйте в модель блоки, расположение которых представлено в табл. 5.2.

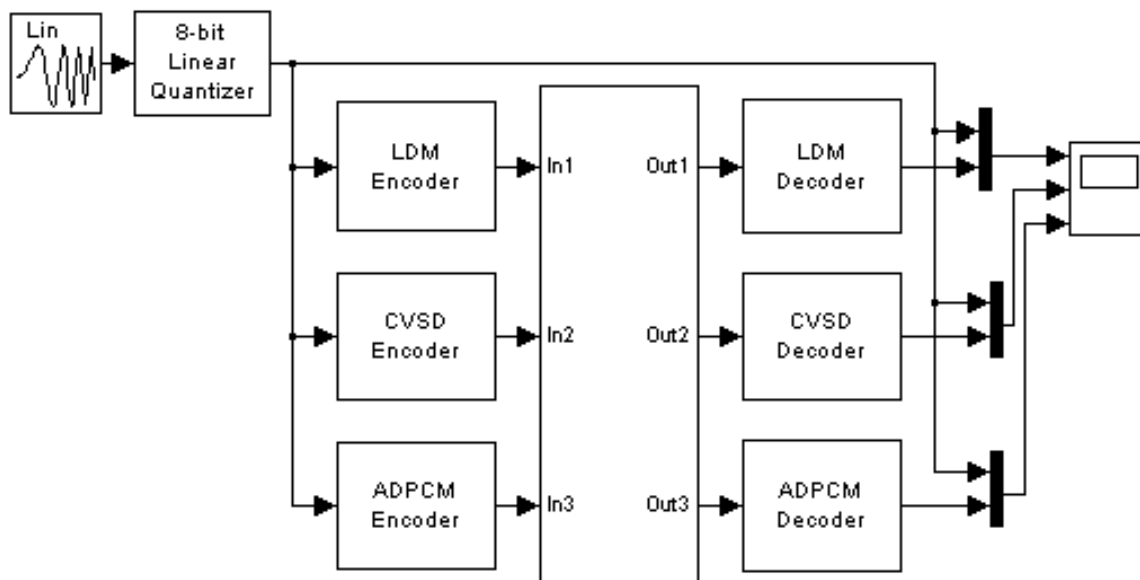


Рис. 5.4. Модель параллельного формирования трех типов дельта кода

Таблица 5.2. Расположение блоков

№ п/п	Блок	Путь
1.	Генератор аналогового сигнала	C:\MATLAB6p5\Work\Acgen
2.	Дискретизатор по времени	C:\MATLAB6p5\Work\Acgen
3.	Канал связи	C:\MATLAB6p5\Work\Ksc

3.2. Установите следующие параметры моделирования:

– время – 1 с.;

3. опции вычислителя – Fixed-step, метод вычисления (discrete (no continuous states));

4. величина фиксированного шага FSS (Fixed step size) – auto;

5. режим (Mode) – Single Tasking.

Изменения произведите с использованием пункта меню «Simulation//Simulation parameters» модели.

3.3. Проведите качественный анализ полученных осциллограмм на всей временной оси. Результаты качественного анализа отразите в выводах

*Контрольные вопросы:*

1. Поясните принцип работы устройства формирования дельта кода с мгновенной компрессией по структуре цифрового потока.
2. Объясните причины различий при формировании дельта кода тремя вышеуказанными способами.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ДЕЛЬТА МОДУЛЯЦИИ»

### *Учебные вопросы:*

1. Создание модели устройства формирования ДМ сигналов.
2. Исследование полученной модели.

### *Краткий теоретический материал*

При рассмотрении принципов ИКМ и ДИКМ предполагалось, что период дискретизации выбран в соответствии с теоремой Котельникова:  $T_d = 1/2F_v$ . Было выяснено, что некоторые преимущества, которые дает применение ДИКМ, основаны на том, что соседние отсчеты дискретизированного сигнала с большой вероятностью мало отличаются друг от друга. Последнее и дает возможность уменьшить разрядность кодовых групп, отображающих передаваемые разности отсчетов. Следовательно, если взять период дискретизации  $T_d \ll 1/2F_v$ , то различие между соседними отсчетами аналогового сигнала будет еще меньше, а применительно к ДИКМ меньше и разрядность кода. Поэтому при достаточно малом периоде дискретизации разность между соседними отсчетами может быть сделана достаточно малой, а именно такой, когда за каждый период дискретизации в тракт передачи можно будет передавать либо - 1, если разность двух отсчетов  $\Delta U < \Delta$ , где  $\Delta$  - выбранный шаг квантования, либо + 1, если  $\Delta U > \Delta$ . Таким образом, при выбранном приращении передаются сведения только о его знаке и для этого достаточно передавать один двоичный символ в каждый момент отсчета. Такой способ формирования цифрового сигнала называется классической дельта-модуляцией (ДМ) в отличие от других, более поздних ее разновидностей.

Рассмотрим подробнее процесс преобразования аналогового сигнала в импульсную последовательность, а также процесс обратного преобразования при дельта-модуляции. Для этого воспользуемся структурной схемой модема дельта-модуляции - модулятора и демодулятора, изображенной на рис. 6.1.

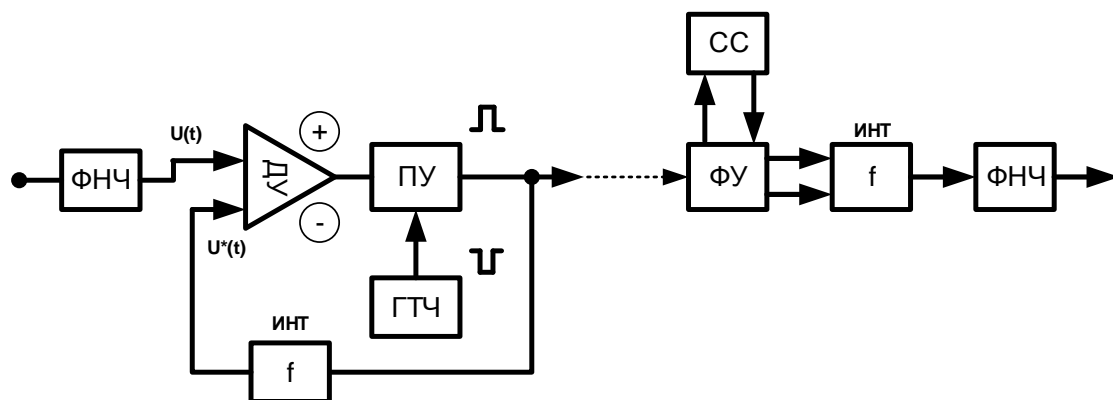


Рис. 6.1. Структурная схема дельта-модулятора.

В схему входит ФНЧ, ограничивающий спектр частот входного сигнала, дифференциальный (разностный) усилитель ДУ, усиливающий разность двух поступающих на его входы сигналов  $U(t) - U^*(t)$ , генератор тактовой частоты ГТЧ, импульсы с которого поступают на пороговое устройство ПУ. На выходе ПУ возникают импульсы положительной полярности, если на выходе  $U(t) - U^*(t) > 0$ , и импульсы отрицательной полярности, если  $U(t) - U^*(t) < 0$ .

В цепь обратной связи включается идеальный интегратор (рис. 6.2, а).

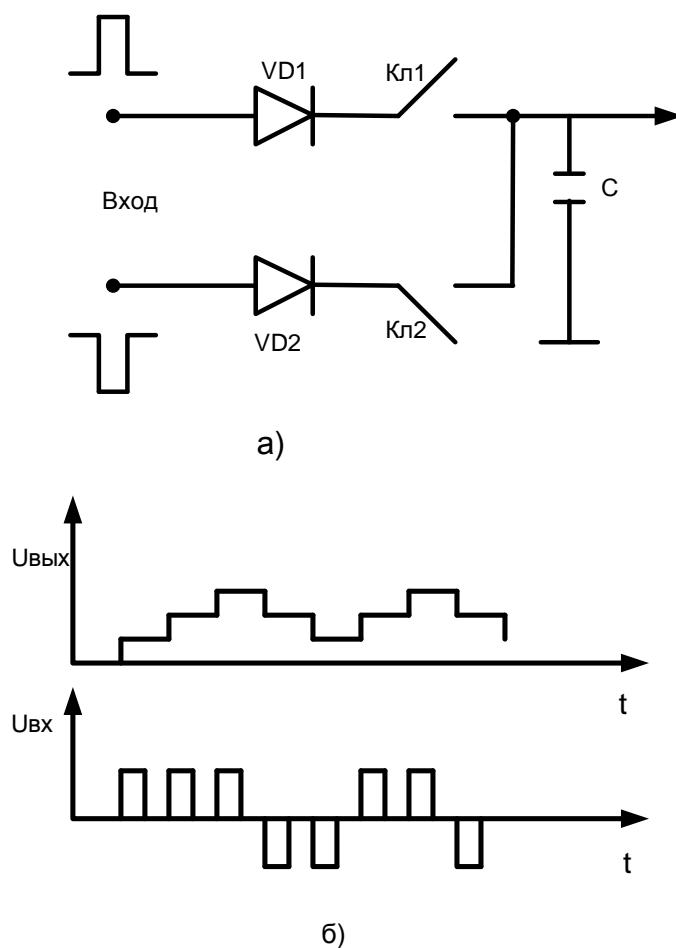


Рис. 6.2. Формирование сигнала на выходе интегратора

Если длительность управляющих импульсов много меньше тактового периода и схема интегратора содержит запоминающий элемент с бесконечной памятью, формируется аппроксимирующее напряжение с прямоугольной формой ступенек (рис. 6.2, б).

Импульсы положительной полярности через диод VD1 и Кл1 поступают на конденсатор и постепенно заряжают его, так что напряжение на конденсаторе имеет вид положительно нарастающих ступенек. Если приходят отрицательные импульсы через диод VD2 и Кл2, напряжение на конденсаторе ступенчато уменьшается.

Кодер работает следующим образом (рис.6. 3).

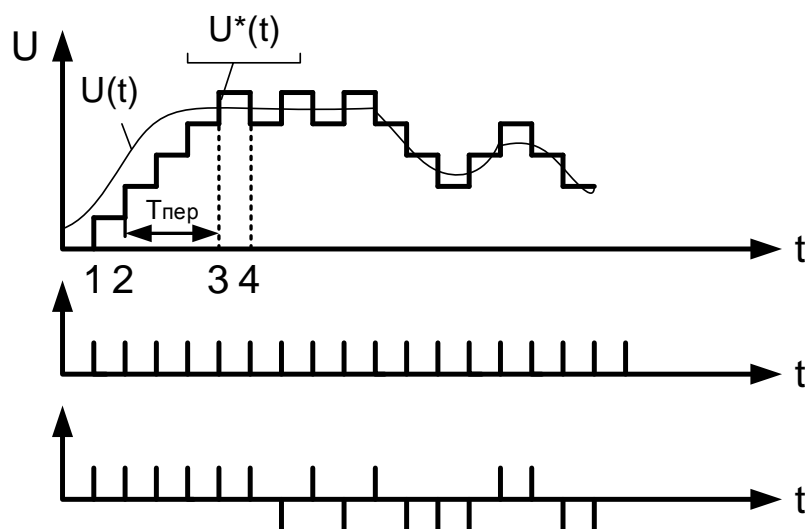


Рис. 6.3. Временные диаграммы получения дельта-кода

В тактовый момент 1 напряжение сигнала  $U(t) > 0$ , так как тактовый импульс еще не появился на входе интегратора и, следовательно,  $U^*(t) = 0$ . На выходе ПУ появляется положительный импульс, который на выходе интегратора дает ступенчатое напряжение, постоянное до следующего тактового момента. В тактовый момент 2 напряжение  $U_2(t) > U^*_2(t)$ , на выходе ПУ опять появляется положительный импульс, который на выходе интегратора дает ступенчатое напряжение, сохраняющееся до следующего тактового импульса. Возрастание ступенчатого напряжения будет происходить до тех пор, пока  $U(t) > U^*(t)$ . В тактовый момент 3 напряжение входного сигнала  $U(t) < U^*(t)$ . Следовательно, разность на выходе ДУ становится отрицательной и ПУ дает отрицательный импульс. В результате на выходе интегратора появляется отрицательный скачок напряжения. В тактовый момент 4  $U(t) > U^*(t)$  и, следовательно, на выходе интегратора опять возникает положительный скачок напряжения. Таким образом, на выходе интегратора формируется аппроксимирующее ступенчатое напряжение  $U^*(t)$ , а на выходе ПУ

формируется дельта-код, который можно посылать в линию передачи.

Дельта-декодер состоит из формирующего устройства ФУ, системы синхронизации (СС), интегратора и ФНЧ. Формирующее устройство восстанавливает искаженную форму импульсного сигнала, который затем поступает на интегратор декодера. Последний работает точно так же, как и интегратор, включенный в цепь обратной связи кодера. На выходе интегратора получается ступенчатое аппроксимирующее напряжение  $U^*(t)$ , которое после ФНЧ преобразуется в непрерывный сигнал  $U(t)$ .

Различие форм передаваемого сигнала и аппроксимирующего напряжения, формируемого на приеме, определяет сигнал ошибки  $U(t)-U^*(t)$  (рис. 13). Составляющие спектра сигнала ошибки, попадающие в полосу частот передаваемого сигнала так же, как и при ИКМ, приводят к появлению шума квантования. Квантование сигналов при ИКМ сопровождается еще и ошибкой ограничения, возникающей в том случае, когда максимальные значения входных сигналов превышают пределы максимальных значений квантующих устройств.

Как видно из рис. 3, в дельта-модуляции при рассмотренной аппроксимации сигнала на участках резкого изменения крутизны сигнала  $T_{пер}$  ступенчатое напряжение  $U^*(t)$  с одинаковым шагом приращения не «успевает следовать» за изменением сигнала  $U(t)$ . На этих участках возникают специфические, свойственные способу ДМ искажения передаваемых сигналов - перегрузка по крутизне.

1.2. Создайте модель устройства формирования ДМ сигнала используя пакет моделирования динамических систем Simulink системы Matlab. Примерный вид модели показан на рис. 6.4.

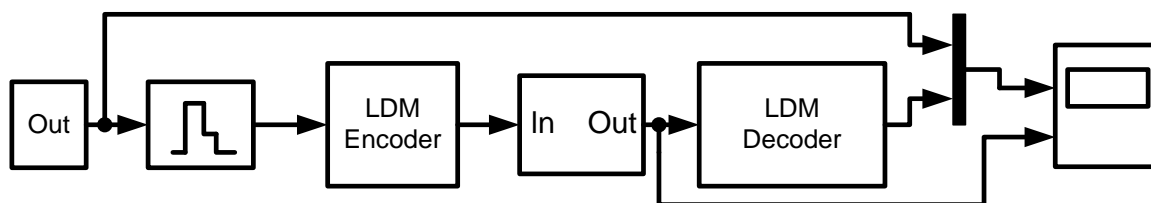


Рис. 6.4. Модель формирования дельта-кода

Для этого создайте новую модель. Скопируйте в модель блоки, расположение которых представлено в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Расположение блоков

№ п/п	Блок	Путь
1.	Генератор аналогового сигнала	C:\MATLAB6p5\Work\Agen
2.	Дискретизатор по времени	Simulink\Discrete
3.	Формирователь дельта-кода	C:\MATLAB6p5\Work\Eldm
4.	Канал связи	C:\MATLAB6p5\Work\Ks
5.	Дельта-декодер	C:\MATLAB6p5\Work\Dldm

1.2. Собрав модель, снимите флажок «Limit data points to last» в осциллографе. Для этого откройте блок «Scope» и через панель инструментов зайдите в свойства блока.

1.3. Установите следующие параметры моделирования:

- время – 0.02 с.;
- опции вычислителя – Fixed-step;
- величина фиксированного шага FSS (Fixed step size) – 1/64000;
- режим (Mode) – Single Tasking.

Изменения произведите с использованием пункта меню «Simulation//Simulation parameters» модели.

1.4. Проверьте работоспособность полученной модели.

## 2. Исследование полученной модели

2.1. Определите, на какой из параметров модели влияет величина Fixed step size = 1/64000?

2.2. Изменяя величину шага вычислений, добейтесь максимальной точности аппроксимации исходного сигнала ( $FSS = 1/80000$  с.). Выбор частоты дискретизации осуществляйте в соответствии с табл.2.

Таблица 6.2. Выбор частоты дискретизации

№ вар.	$f_{\partial}$ , кГц	№ вар.	$f_{\partial}$ , кГц	№ вар.	$f_{\partial}$ , кГц	№ вар.	$f_{\partial}$ , кГц
1.	3.7	5.	5.5	9.	3.8	13.	5.9
2.	4.1	6.	7.2	10.	7.7	14.	7.3
3.	3.9	7.	9.4	11.	6.5	15.	9
4.	5.2	8.	8.3	12.	8.8	16.	11

2.2. Изменяя величину шага дискретизации, добейтесь максимальной точности аппроксимации исходного сигнала ( $f_{\partial} = 5$  кГц). Выбор величины шага вычислений осуществляйте в соответствии с табл. 6.3.

Таблица 6.3. Выбор величины шага вычислений

№ вар.	FSS, с	№ вар.	FSS, с	№ вар.	FSS, с	№ вар.	FSS, с
1.	1/78000	5.	1/123800	9.	1/778000	13.	1/278000
2.	1/100006	6.	1/70000	10.	1/738000	14.	1/548000
3.	1/730000	7.	1/59000	11.	1/568000	15.	1/398000
4.	1/128000	8.	1/638000	12.	1/789000	16.	1/100000

2.3. Для полученного значения шага дискретизации определите полосу частот, которую будет занимать данный канал.

2.4. Полученные данные зафиксировать в рабочей тетради и сделайте соответствующие выводы.

*Контрольные вопросы:*

1. Поясните назначение и принцип действия основных блоков устройства формирования сигналов ДМ.

2. Какие основные искажения сигналов свойственны дельта модуляции.

*Задание на самоподготовку:*

1. Подготовить отчет по выполненной работе.

2. Подготовиться к выполнению следующей работы.

\

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 «ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ»

### Учебные вопросы:

1. Установка общих параметров устройства тактовой синхронизации.
2. Исследование принципов работы модели устройства тактовой синхронизации.

### *Краткий теоретический материал.*

1. Установка общих параметров устройства тактовой синхронизации.

В устройствах синхронизации без непосредственного воздействия на генератор фаза подстраивается в промежуточном преобразователе ПП, через который проходит местное тактовое колебание (генерируемая последовательность тактовых импульсов). В качестве промежуточного преобразователя чаще всего используется делитель частоты следования импульсов. Устройства синхронизации с делителем частоты возможно реализовать целиком на дискретных элементах, что упрощает их изготовление, настройку и эксплуатацию. Часто такие устройства называют *устройствами с дискретным управлением* (или дискретными устройствами синхронизации). Принцип изменения фазы в процессе деления частоты можно пояснить, пользуясь рис. 7.1., рис. 7.2.

Генератор вырабатывает колебание высокой частоты, в  $m$  раз большее тактовой частоты:  $f_{\text{вч}} = mf_m$ , где  $m$  - коэффициент деления делителя. Формирователь превращает синусоидальное колебание в последовательность импульсов с частотой следования  $f_{\text{вч}}$ . Далее частота этой последовательности импульсов делится на определенное число  $m$ , например, делителем в виде цепочки из двоичных счетчиков. Процесс деления иллюстрируется временной диаграммой, представленной. На рисунке изображены исходная последовательность импульсов с частотой  $f_{\text{вч}}$  и получаемая на выходе тактовая последовательность с частотой  $f_m$ . Коэффициент деления  $m=8$ . В этом случае на выход выдается каждый восьмой импульс входной последовательности импульсов.

Если на вход делителя подать дополнительный импульс через схему добавления и исключения импульсов (СДИИ), то фаза выходных импульсов сместится в сторону опережения на величину, равную периоду колебаний генератора:  $\Delta t = 1/f_{\text{вч}}$

$$F_{вч} = m f_m$$

Дополнительные импульсы не должны совпадать во времени с импульсами высокочастотного генератора. Если один из импульсов, подаваемых на делитель, исключить, то фаза выходных импульсов сместится на ту же величину  $M$  в сторону отставания. Таким образом, добавлением и исключением импульсов легко изменять фазу тактовой последовательности в нужную сторону.

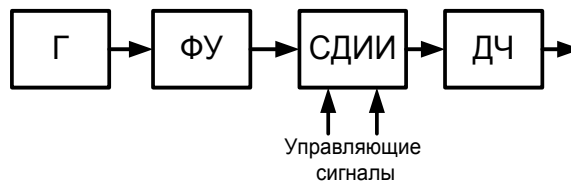


Рис. 7.1. Структурная схема деления частоты

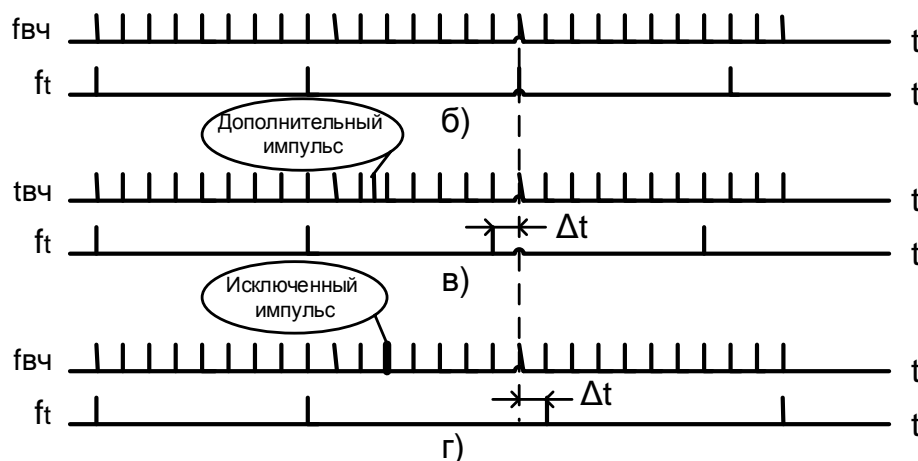


Рис. 7.2. К принципу изменения фазы в процессе деления частоты:  
 б - нормальный процесс деления на 8; в - добавление импульса;  
 г - исключение импульса

Устройство синхронизации с дискретным управлением показано на рис. 3. На выходе генератора с формирователем образуется последовательность импульсов с частотой  $f_{вч} = 2mf_m$ .

Затем делитель на 2 образует две последовательности импульсов  $f_{вч} = mf_m$ , сдвинутые относительно друг друга на полтакта. Одна из последовательностей подается через схему запрета в делитель частоты на  $m$ . Полученная тактовая частота подается на фазовый дискриминатор (на схемы  $I_1$  и  $I_2$  подаются тактовые последовательности, сдвинутые относительно друг друга на полтакта).

При синфазности принимаемых сигналов и местных тактовых колебаний

импульсы на выходах фазового дискриминатора отсутствуют. При расфазировке короткие импульсы появятся на выходе схемы  $I_1$  или  $I_2$  в зависимости от знака расхождения фазы (влияние реверсивного счетчика РС будет пояснено ниже; пока будем считать, что он отсутствует). Если импульс появится на выходе  $I_1$ , то он откроет схему  $I_3$ , которая пропустит один импульс с выхода делителя на 2 на выход делителя на  $m$ . Этот импульс будет расположен в середине между основными импульсами, проходящими через схему запрета. Под действием этого дополнительного импульса фаза тактовой последовательности сдвинется в сторону опережения на один шаг  $\Delta t$ . Если импульс появится на выходе схемы  $I_2$ , схема запрета закроется и таким образом исключится один импульс на входе делителя. В результате фаза тактовой последовательности сдвинется на один шаг  $\Delta t$  в сторону отставания.

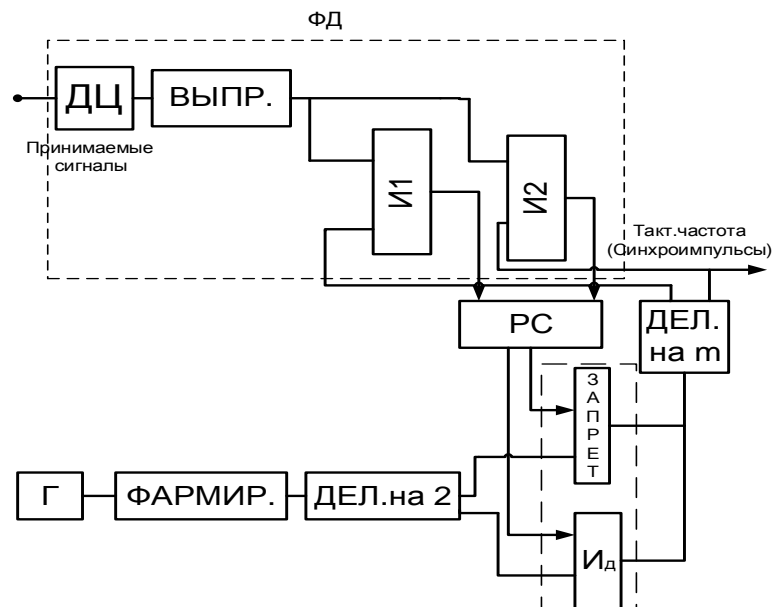


Рис. 7.3. Функциональная схема устройства синхронизации без непосредственного воздействия на генератор

1.2. Создайте модель устройства тактовой синхронизации. Примерный вид модели показан на рис. 4. При создании модели проведите четкие аналогии между функциональной схемой устройства (рис. 7.3.) и моделью устройства (рис. 7.4.).

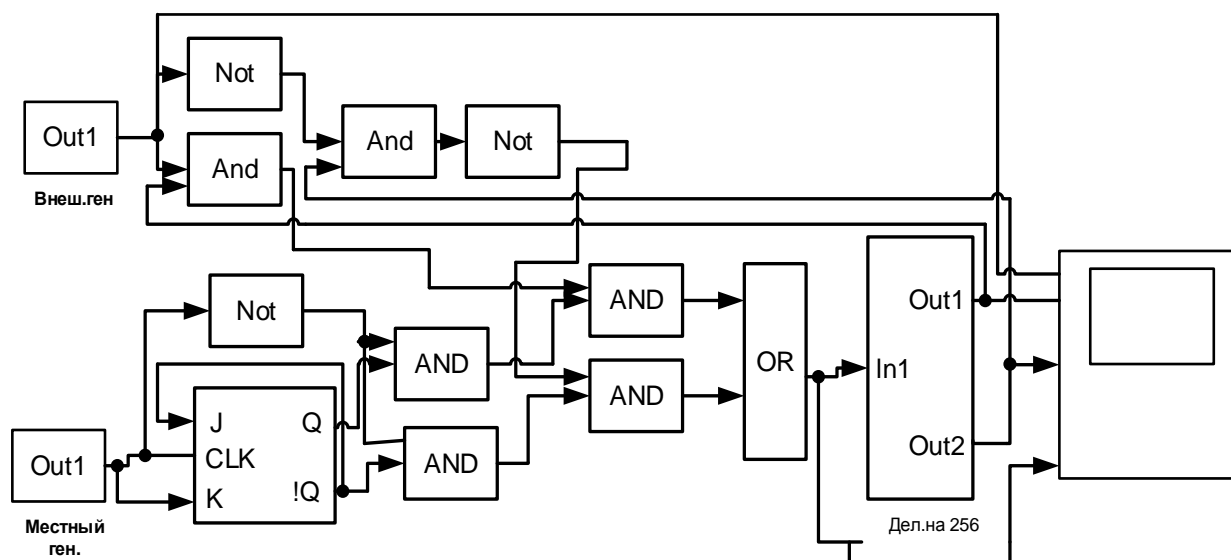


Рис. 7.4. Модель устройства тактовой синхронизации

Расположение блоков устройства представлено в табл. 7.1.

Таблица 7.1. Расположение блоков

№ п/п	Блок	Путь
1.	Внешний ген.	C:\MATLAB6p5\Work\Vgen
2.	Местный ген.	C:\MATLAB6p5\Work\Mgen
3.	Дел. на 256	C:\MATLAB6p5\Work\Del_256

1.3. Для установки общих параметров устройства тактовой синхронизации осуществите следующие действия:

- установите время моделирования – 1 с.;
- установите параметры внешнего генератора. Данные параметры в зависимости от варианта приведены в табл. 2;
- установите параметры местного генератора. Для этого необходимо произвести вычисление частоты местного генератора  $f_{м.г.}$ . При этом необходимо учесть разрядность делителя частоты, используемого в модели;
- проверьте работоспособность модели (при заданных параметрах устройство должно синхронизироваться с местным генератором за  $t < 1$  с.

Зафиксируйте в рабочих тетрадах схему построения устройства.

Таблица 7.2. Исходные данные

№ варианта	Частота внешнего генератора, Гц.	Начальная фаза, с.
1.	3	-0.0148
2.	4	-0.028
3.	5	-0.025
4.	6	-0.041
5.	7	-0.0139
6.	8	-0.0204

2. *Исследование принципов работы модели устройства тактовой синхронизации.*

2.1. Проведите анализ принципов работы устройства тактовой синхронизации.

При проведении анализа необходимо рассмотреть назначение каждого из блоков, а также пояснить процесс синхронизации в соответствии с осциллограммами работы устройства.

2.2. Постройте график зависимости времени вхождения устройства в синхронизм от начальной фазы внешнего генератора. Начальную фазу внешнего генератора изменять в диапазоне  $(-T \div 0)$ .

*Вопросы и задания для самостоятельной работы*

Вопросы:

3. Поясните назначение каждого из блоков устройства.

4. Рассмотреть принципы функционирования устройств цикловой синхронизации.

Задание:

2. Изучить принципы тактовой синхронизации.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8**  
**«ПРИМЕНЕНИЕ ПРОСТЕЙШИХ КОДОВ**  
**С ИСПРАВЛЕНИЕМ ОШИБОК»**

**Учебные вопросы:**

1. Применение простейших кодов с исправлением ошибок.
2. Инверсный код.

*Краткий теоретический материал.*

*1. Применение простейших кодов с исправлением ошибок*

1.1. Ознакомьтесь с приведенным ниже теоретическим материалом, кратко законспектируйте полученную информацию.

*Код с проверкой на четность.*

Такой код образуется путем добавления к передаваемой комбинации, состоящей из  $k$  информационных символов избыточного кода, одного контрольного символа  $m$  (0 или 1) так, чтобы общее число единиц в передаваемой комбинации было четным. Таким образом, общее число символов в передаваемой комбинации  $n=k+1$ , так как  $m=1$ . В общем случае  $n = k + m$ .

Примеры кодов с проверкой на четность приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Код с проверкой на четность

Информационные символы $k$	Контрольные символы $m$	Полная кодовая комбинация $n=k+m$
11011	0	110110
10101	1	101011
00010	1	000101
11000	0	110000
11110	0	111100
11111	1	111111

В первом столбце приведены примеры передачи отдельных комбинаций пятиразрядного двоичного кода на все сочетания ( $k$ -символы). Во втором столбце к этим комбинациям приписывается контрольный символ 1, если сумма единиц в кодовой комбинации нечетная, или 0, если сумма единиц четная.

В нашем примере длина исходной кодовой комбинации  $k=5$  позволяет при таком числе разрядов передать  $N=2^5=32$  кодовые комбинации. Хотя приписывание контрольного символа и увеличивает разрядность кода до  $n=6$ ,

число передаваемых комбинаций остается прежним. Поэтому общее число комбинаций  $N=2^{n-1}$ .

Таким образом, этот код обладает избыточностью, так как вместо  $N=2^6=64$  комбинаций может быть послано только  $N=2^{6-1}=32$  комбинации.

В кодировании избыточность определяется отношением контрольных символов  $m$  к длине слова:  $I = (n-k)/n = m/n$ .

Для пятиразрядного кода с проверкой на четность  $I=1/6$ . Очевидно, чем длиннее кодовая комбинация, тем меньше избыточность и больше экономичность кода. Добавление контрольного символа увеличивает кодовое расстояние в передаваемых комбинациях от  $d=1$  до  $d_{min}=2$ .

На приемной стороне производят так называемую проверку на четность. В принятых комбинациях подсчитывают количество единиц: если оно четное, считают, что искажений не было. Тогда последний контрольный символ отбрасывают и записывают первоначальную комбинацию. Очевидно, четное число искажений такой код обнаружить не может, так как число единиц при этом снова будет четным. В то же время этот код может обнаружить не только одиночные, но и тройные, пятерные и т. п. ошибки, т. е. любое возможное нечетное число ошибок, так как сумма единиц в принятой кодовой комбинации становится нечетной. Однако если велика вероятность появления многократных ошибок, такой код использовать нецелесообразно, так как, несмотря на то что можно обнаружить все слова с нечетным количеством ошибок, число кодовых комбинаций с четным числом ошибок окажется большим, и передача будет сопровождаться сильными искажениями.

*Код с числом единиц, кратным трем.*

Этот код образуется добавлением к  $k$  информационным символам двух дополнительных контрольных символов ( $t=2$ ), имеющих такие значения, чтобы сумма единиц, посылаемых в линию кодовых комбинаций, была кратной трем. Он позволяет обнаружить все одиночные ошибки и любое четное количество ошибок одного типа (например, только переход 0 в 1).

Не обнаруживаются двойные ошибки разных типов (смещения) и ошибки одного типа, кратные трем. На приемной стороне полученную комбинацию проверяют на кратность трем. При наличии такой кратности считают, что ошибок не было, два контрольных знака отбрасывают и записывают исходную комбинацию.

*Код с удвоением элементов (корреляционный код).*

Помехоустойчивость кода может быть повышена путем установления определенных зависимостей между элементами кодовых комбинаций. Примером такого кода является корреляционный код, который строится следующим образом.

Каждый элемент двоичного кода на все сочетания передается двумя символами, причем 1 преобразуется в 10, а 0 - в 01. Вместо 1010011 передается комбинация 10011001011010.

Таким образом, корреляционный код содержит вдвое больше элементов, чем исходный. На приеме ошибка обнаруживается в том случае, если в парных элементах содержатся одинаковые символы, т. е. 11 или 00 (вместо 10 и 01). При правильном приеме вторые (четные) элементы отбрасываются и остается первоначальная комбинация.

Код обладает высокой помехоустойчивостью, так как ошибка не обнаруживается лишь тогда, когда два рядом стоящих различных символа, соответствующих одному элементу исходной кодовой комбинации, будут искажены так, что 1 перейдет в 0, а 0 - в 1.

#### *Инверсный код.*

В таком коде для увеличения помехоустойчивости к исходной  $n$ -разрядной комбинации по определенному правилу добавляется еще  $n$  разрядов. В результате в линию посылается удвоенное число символов. Правило образования кода следующее: если в исходной комбинации содержится четное число единиц, то добавляемая комбинация повторяет исходную, если нечетное, то в добавляемых разрядах все 0 превращаются в 1, а 1 - в 0 (комбинация инвертируется по отношению к исходной). Примеры составления комбинаций инверсного кода из комбинаций обычного семиразрядного двоичного кода представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2. Инверсный код

Инф. симв. $k$	Контр. символы $m$	Инв. код $n=k+m$
1110001	1110001	11100011110001
1111101	1111101	11111011111101
1111111	0000000	11111110000000
1111100	0000011	11111000000011

Прием инверсного кода осуществляется в два этапа. На первом этапе суммируются единицы в первой (основной) группе символов  $k$ . Если принятое число информационных символов  $k$  четное, то контрольные символы  $m$  принимаются без изменений, если нечетное, то символы  $m$  инвертируются. На втором этапе контрольные символы  $m$  сравниваются с символами  $k$  и при наличии хотя бы одного несовпадения вся переданная комбинация  $n=k+m$  элементов бракуется. Это поэлементное сравнение эквивалентно суммированию по модулю 2. При отсутствии ошибок в обеих группах символов их сумма равна нулю.

Пусть передана первая комбинация из табл. 2. Ниже показано суммирование для трех вариантов приема переданной комбинации:

- 1)  $1110001 \oplus 1110001 = 0000000$ ;                      2)  $1100001 \oplus 0001110 = 1101111$ ;  
 3)  $1110001 \oplus 1111001 = 00001000$ .

В первом варианте искажений нет и число единиц в символах четное, поэтому производится суммирование по модулю 2 с неинвертируемыми символами  $m$ , что в результате дает нулевую сумму. Во втором варианте число единиц в символах  $k$  нечетное (единица в пятом разряде подавлена помехой, что отмечено точкой над символом), т. е. символы  $m$  инвертированы. В третьем варианте искажение возникло в четвертом разряде группы  $t$ . Таким образом, из трех вариантов лишь первый оказался без искажения, а второй и третий должны быть забракованы из-за наличия несовпадения в группах символов  $k$  и  $m$ .

Обнаруживающие возможности инверсного кода достаточно велики. Этому, в частности, способствует метод его построения. Добавление  $m$  символов приводит к увеличению минимального кодового расстояния.

После инвертирования обнаруживающие возможности кода изменяются в зависимости от числа разрядов исходного двоичного кода. Так, если передаются все комбинации обычного двоичного кода с  $k=2$  (00, 01, 10, 11), то этот непомяхоустойчивый код, превращаясь в инверсный (0000, 0110, 1001 и 1111), увеличивает минимальное кодовое расстояние до  $d_{min} = 2$  и позволяет обнаруживать все одиночные ошибки и 67 % двойных ошибок. Действительно, в каждой комбинации может быть  $C_4^2 = 6$  двойных ошибок: так, комбинация 0000 при двойных ошибках примет вид 1100, 0110, 0011, 1001, 1010 и 0101. При этом только второе и четвертое искажения не могут быть обнаружены, так как, инвертируя, например, во второй искаженной комбинации контрольные символы 10 на 01, после их сложения с основными символами получим нули.

У трехразрядного обычного двоичного кода (000, 001, ..., 111) после преобразования его в инверсный код кодовое расстояние увеличивается до  $d_{min} = 3$ . Это значит, что такой код гарантированно обнаруживает все двойные ошибки. Кроме того, он обнаруживает 80 % тройных и четверных ошибок и все пяти- и шестикратные ошибки.

Четырехразрядный обычный двоичный код (0000, 0001, ..., 1111) после преобразования его в инверсный код имеет  $d_{min} = 4$ . Он обнаруживает все ошибки во втором, третьем, пятом, шестом и седьмом символах, не обнаруживает 22 % четырехкратных ошибок и совсем не обнаруживает восьмикратные ошибки.

Следует помнить, что высокие помехообнаруживающие возможности инверсного кода достигаются за счет большой избыточности. В этом

отношении инверсный код значительно уступает циклическому коду, о котором будет сказано далее.

Описанный инверсный код называют также кодом с повторением и инверсией в отличие от обычного кода с повторением (без инверсии), в котором независимо от четного или нечетного числа единиц в комбинации она дополняется такой же комбинацией. Например, если вторая комбинация из табл. 2. будет послана, как и в рассмотренном коде, т.е. 11111011111101, то третья комбинация примет вид 11111111111111. Разница между этими двумя комбинациями в двух символах ( $d = 2$ ), тогда как в инверсном коде эти комбинации различаются в семи символах ( $d = 7$ ).

1.2. Используя материал лекций и краткий теоретический материал, осуществите следующие действия.

1.2.1. Заполните представленную ниже таблицу (табл.5), осуществив перевод десятичных чисел в код с числом единиц, кратным 3. Даны следующие числа: 10; 12; 15; 17; 21; 30; 45; 54.

Таблица 5. Кодирование данных с использованием кода с числом единиц, кратным 3.

№ п/п	Десятичное число	Двоичный код	Код с числом единиц, кратным 3
1	.		

1.2.2. Заполните представленную ниже таблицу (табл. 6), осуществив обратный перевод чисел из кода с числом единиц, кратным 3 в десятичные числа. Даны следующие коды: 10100100; 10010100; 100000110; 100100010; 11110110; 10110000; 100100100; 10000011.

Таблица 6. Обратный перевод чисел из кода с числом единиц, кратным 3 в десятичные числа.

№ п/п	Код с числом единиц, кратным 3	Двоичный код	Десятичное число
1.			

1.2.3. Заполните представленную ниже таблицу (табл. 7), осуществив перевод десятичных чисел в корреляционный код. Даны следующие числа: 88; 91; 100; 103; 94; 87; 76; 49.

Таблица 7. Кодирование данных с использованием корреляционного кода.

№ п/п	Десятичное число	Двоичный код	Корреляционный код
1.			

1.2.4. Заполните представленную ниже таблицу (табл.8), осуществив обратный перевод корреляционного кода десятичные числа. Даны следующие коды: 10101010011010; 1010101001010110; 1001100110011010; 10100101011010; 10101001100110; 101010101001; 101010011010; 100110101010.

Таблица 8. Обратный перевод чисел из корреляционного кода в десятичные числа.

п/п	Корреляционный код	Двоичный код	Десятичное число
1.			

1.2.5. Заполните представленную ниже таблицу (табл.9), осуществив перевод десятичных чисел в инверсный код. Даны следующие числа: 18; 23; 34; 56; 82; 105; 122; 141.

Таблица 9. Кодирование данных с использованием инверсного кода.

п/п	Десятичное число	Двоичный код	Инверсный код
1.			

1.2.6. Заполните представленную ниже таблицу (табл.10), осуществив обратный перевод инверсного кода в десятичные числа. Даны следующие коды: 110111001000; 10010110110100; 10101110101000; 10111010100010; 11001110011000; 101111010000; 10110011011001; 1000100101110110.

Таблица 10. Обратный перевод чисел из инверсного кода в десятичные числа.

п/п	Инверсный код	Двоичный код	Десятичное число
1.			

1.3. Запишите представленные ниже сообщения системы «Фобос» с использованием корреляционного и инверсного кодов (служебные символы «старт бит» и 2 «стоп бита» – без изменений):

- а) НТ  $\alpha$  V 0 1 1 0 1 П КТ;
- б) НТ # V 0 2 0 9 8 В КТ;
- в) НТ  $\alpha$  V 0 3 0 7 5 Н КТ.

Каждый из символов кодируется в шестнадцатиразрядной системе следующим образом: НТ – 02<sub>h</sub>;  $\alpha$  - 24<sub>h</sub>; # - 23<sub>h</sub>; V – 5C<sub>h</sub>; П – 70<sub>h</sub>; В – 77<sub>h</sub>; Н – 6E<sub>h</sub>; КТ – 03<sub>h</sub>.

1.4. Вычислите кодовые расстояния  $d$  для сообщений системы «Фобос», закодированных в кодах КОИ-7, корреляционного и инверсного ( $d$  рассчитывать отдельно для каждого из кодов).

1.5. По проделанной работе сделайте соответствующие выводы.

*Контрольные вопросы:*

1. Поясните принцип исправления ошибок, используя геометрическую модель двоичных кодов.

2. Дайте характеристику изученных кодов по их исправляющей способности.

*Вопросы и задания для самостоятельной работы:*

Вопросы:

1. Кодирование данных с использованием помехоустойчивых кодов.

2. Применение простейших кодов с исправлением ошибок.

Задание:

3. Изучить особенности образования кодов Хэмминга.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### «Исследование структуры оборудования временного группообразования многоканальной цифровой системы»

#### *Учебные вопросы:*

1. Установка общих параметров устройства тактовой синхронизации.
2. Исследование принципов работы модели устройства тактовой синхронизации.

#### *Краткий теоретический материал*

В устройствах синхронизации без непосредственного воздействия на генератор фаза подстраивается в промежуточном преобразователе ПП, через который проходит местное тактовое колебание (генерируемая последовательность тактовых импульсов). В качестве промежуточного преобразователя чаще всего используется делитель частоты следования импульсов. Устройства синхронизации с делителем частоты возможно реализовать целиком на дискретных элементах, что упрощает их изготовление, настройку и эксплуатацию. Часто такие устройства называют *устройствами с дискретным управлением* (или дискретными устройствами синхронизации). Принцип изменения фазы в процессе деления частоты можно пояснить, пользуясь рис. 9.1., рис. 9.2.

Генератор вырабатывает колебание высокой частоты, в  $m$  раз большее тактовой частоты:  $f_{вч} = mf_m$ , где  $m$  - коэффициент деления делителя. Формирователь превращает синусоидальное колебание в последовательность импульсов с частотой следования  $f_{вч}$ . Далее частота этой последовательности импульсов делится на определенное число  $m$ , например, делителем в виде цепочки из двоичных счетчиков. Процесс деления иллюстрируется временной диаграммой, представленной на рис. 9.2.б. На рисунке изображены исходная последовательность импульсов с частотой  $f_{вч}$  и получаемая на выходе тактовая последовательность с частотой  $f_m$ . Коэффициент деления  $m=8$ . В этом случае на выход выдается каждый восьмой импульс входной последовательности импульсов.

Если на вход делителя подать дополнительный импульс через схему добавления и исключения импульсов (СДИИ), то фаза выходных импульсов (рис. 9.2.в) сместится в сторону опережения на величину, равную периоду колебаний генератора:  $\Delta t = 1/f_{вч}$ .

Дополнительные импульсы не должны совпадать во времени с импульсами высокочастотного генератора. Если один из импульсов, подаваемых на делитель, исключить, то фаза выходных импульсов сместится на

ту же величину  $M$  в сторону отставания (рис. 9.2.г). Таким образом, добавлением и исключением импульсов легко изменять фазу тактовой последовательности в нужную сторону.

Устройство синхронизации с дискретным управлением показано на рис. 3. На выходе генератора с формирователем образуется последовательность импульсов с частотой  $f_{\text{сч}} = 2mf_m$ .

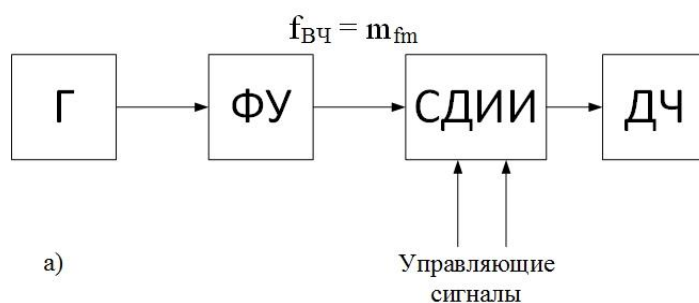


Рис. 9.1. Структурная схема деления частоты.

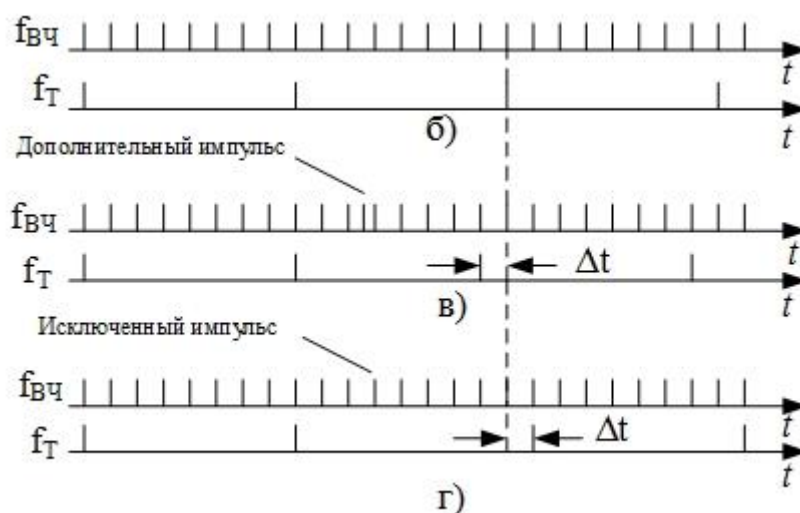


Рис. 9.2. К принципу изменения фазы в процессе деления частоты:

б - нормальный процесс деления на 8; в - добавление импульса;

г - исключение импульса.

Затем делитель на 2 образует две последовательности импульсов  $f_{\text{сч}} = mf_m$ , сдвинутые относительно друг друга на полтакта. Одна из последовательностей подается через схему запрета в делитель частоты на  $m$ . Полученная тактовая частота подается на фазовый дискриминатор (на схемы  $I_1$  и  $I_2$  подаются тактовые последовательности, сдвинутые относительно друг друга на полтакта).

При синфазности принимаемых сигналов и местных тактовых колебаний импульсы на выходах фазового дискриминатора отсутствуют. При

расфазировке короткие импульсы появятся на выходе схемы  $I_1$  или  $I_2$  в зависимости от знака расхождения фазы (влияние реверсивного счетчика РС будет пояснено ниже; пока будем считать, что он отсутствует). Если импульс появится на выходе  $I_1$ , то он откроет схему  $I_3$ , которая пропустит один импульс с выхода делителя на 2 на выход делителя на  $m$ . Этот импульс будет расположен в середине между основными импульсами, проходящими через схему запрета. Под действием этого дополнительного импульса фаза тактовой последовательности сдвинется в сторону опережения на один шаг  $\Delta t$ . Если импульс появится на выходе схемы  $I_2$ , схема запрета закроется и таким образом исключится один импульс на входе делителя. В результате фаза тактовой последовательности сдвинется на один шаг  $\Delta t$  в сторону отставания.

1.2. Создайте модель устройства тактовой синхронизации. Примерный вид модели показан на рис. 9.4. При создании модели проведите четкие аналогии между функциональной схемой устройства (рис. 9.3) и моделью устройства (рис. 9.4).

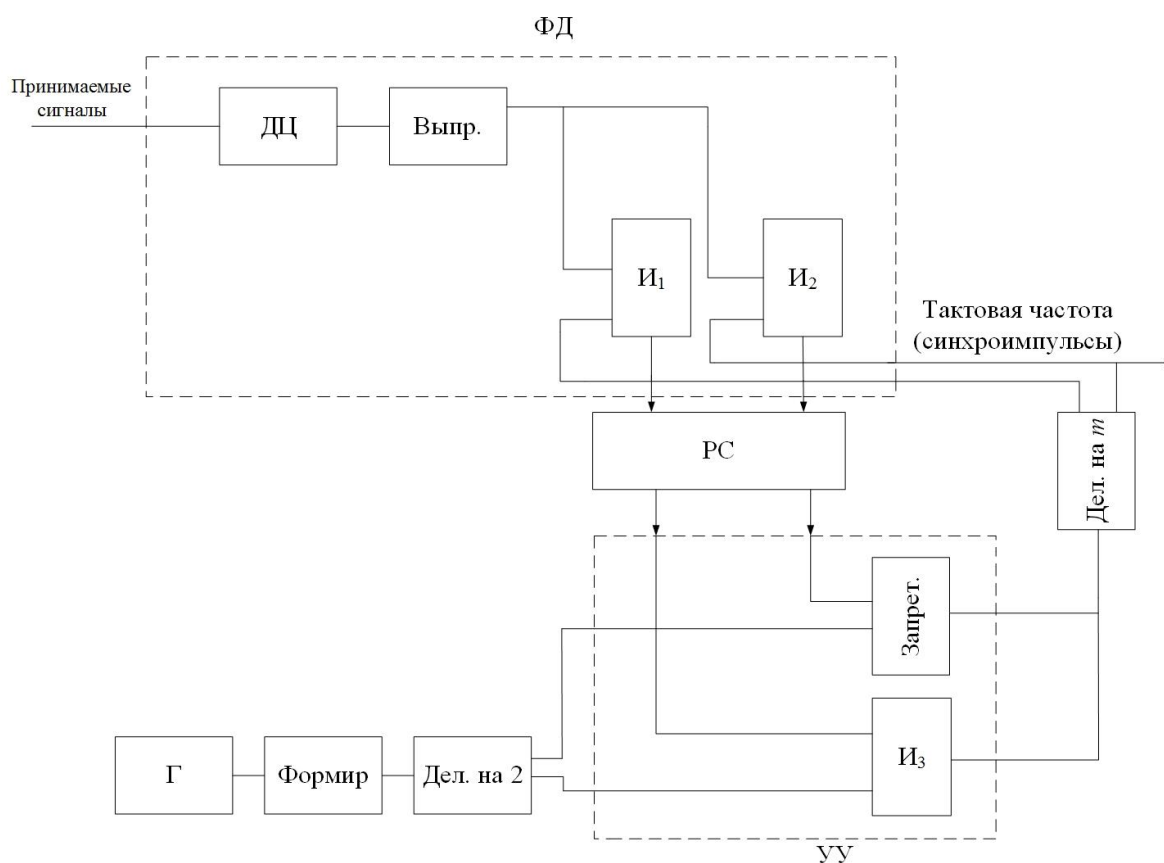


Рис. 9.3. Функциональная схема устройства синхронизации без непосредственного воздействия на генератор.

Расположение блоков устройства представлено в табл. 9.1.

Таблица 9.1. Расположение блоков

№ п/п	Блок	Путь
1.	Внешний ген.	C:\MATLAB6p5\Work\Vgen
2.	Местный ген.	C:\MATLAB6p5\Work\Mgen
3.	Дел. на 256	C:\MATLAB6p5\Work\Del_256

1.3. Для установки общих параметров устройства тактовой синхронизации осуществите следующие действия:

- установите время моделирования – 1 с.;
- установите параметры внешнего генератора. Данные параметры в зависимости от варианта приведены в табл. 2;
- установите параметры местного генератора. Для этого необходимо произвести вычисление частоты местного генератора  $f_{м.г.}$ . При этом необходимо учесть разрядность делителя частоты, используемого в модели;
- проверьте работоспособность модели (при заданных параметрах устройство должно синхронизироваться с местным генератором за  $t < 1$  с.

Зафиксируйте в рабочих тетрадах схему построения устройства.

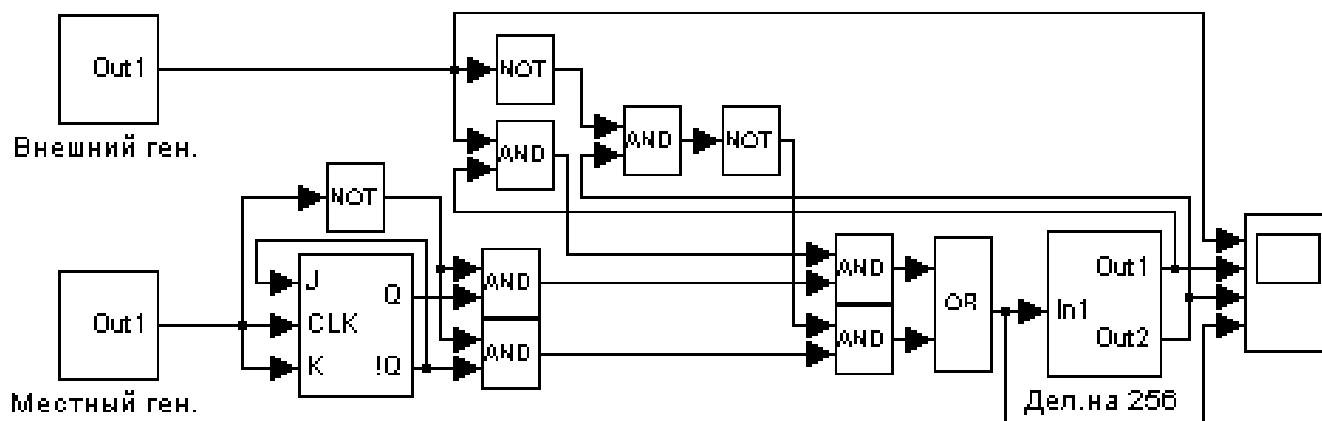


Рис. 9.4. Модель устройства тактовой синхронизации.

Таблица 9.2. Исходные данные

№ варианта	Частота внешнего генератора, Гц.	Начальная фаза, с.
1.	3	-0.0148
2.	4	-0.028
3.	5	-0.025
4.	6	-0.041
5.	7	-0.0139
6.	8	-0.0204

## *2. Исследование принципов работы модели устройства тактовой синхронизации*

2.1. Проведите анализ принципов работы устройства тактовой синхронизации.

При проведении анализа необходимо рассмотреть назначение каждого из блоков, а также пояснить процесс синхронизации в соответствии с осциллограммами работы устройства.

2.2. Постройте график зависимости времени вхождения устройства в синхронизм от начальной фазы внешнего генератора. Начальную фазу внешнего генератора изменять в диапазоне  $(-T \div 0)$ .

### *Контрольные вопросы:*

1. Поясните общие принципы работы устройства тактовой синхронизации.

2. Поясните назначение каждого из блоков устройства.

3. Поясните особенности вхождения в синхронизм с использованием осциллограмм работы.

4. Поясните полученные зависимости времени вхождения устройства в синхронизм от начальной фазы внешнего генератора.

### *Задание на самоподготовку:*

1. Подготовить отчет по выполненной работе.

2. Рассмотреть принципы функционирования устройств цикловой синхронизации.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 «ПОСТРОЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ»

### Учебные вопросы:

1. Создание динамических моделей формирования АМ – сигналов.
2. Формирование групповых сигналов.

### *Краткий теоретический материал*

Высокая стоимость линий связи обуславливает разработку систем и методов, позволяющих одновременно передавать по одной линии связи большое число независимых сообщений, т.е. использовать линию многократно. Такие системы связи называют *многоканальными*.

Используемые методы разделения каналов (РК) можно классифицировать как линейные и нелинейные (комбинационные). В большинстве случаев разделения каналов каждому источнику сообщения выделяется специальный сигнал, называемый *канальным*. Модулированные сообщениями канальные сигналы объединяются, в результате чего образуется *групповой сигнал*. Если операция объединения линейна, то получившийся сигнал называют *линейным групповым сигналом*.

Для унификации многоканальных систем связи за основной или стандартный канал принимают *канал тональной частоты* (канал ТЧ), обеспечивающий передачу сообщений с эффективно передаваемой полосой частот 300...3400 Гц, соответствующей основному спектру телефонного сигнала. Многоканальные системы образуются в результате объединения каналов ТЧ в группы, обычно кратные 12 каналам. В свою очередь, часто используют «вторичное уплотнение» каналов ТЧ телеграфными каналами и каналами передачи данных. На рис.1.1. приведена структурная схема наиболее распространенных систем многоканальной связи.

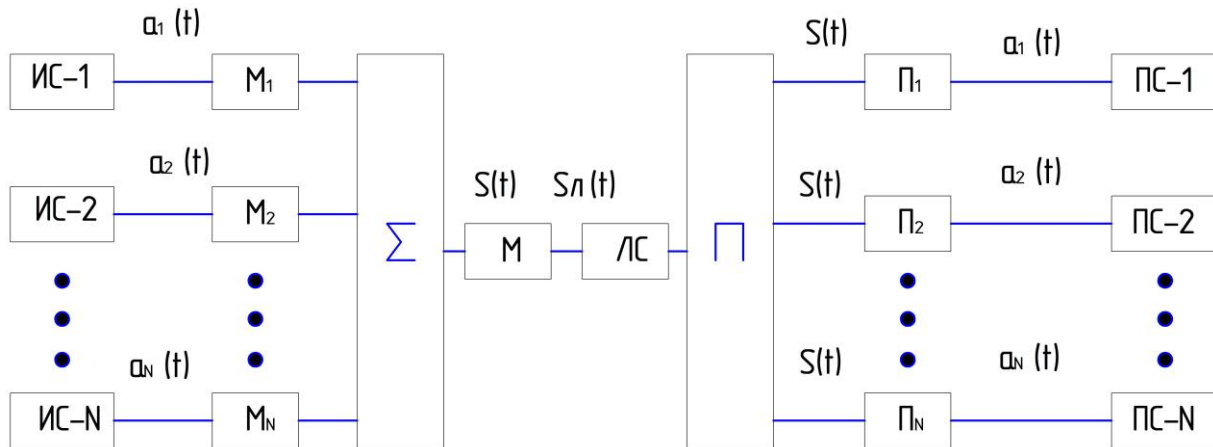


Рис. 1.1. Структурная схема систем многоканальной связи.

Реализации сообщений каждого источника ( $a_1(t)$ ,  $a_2(t), \dots, a_N(t)$ ) с помощью индивидуальных передатчиков (модуляторов) преобразуются в соответствующие каналные сигналы. Совокупность каналных сигналов на выходе суммирующего устройства образует групповой сигнал  $s(t)$ . Наконец, в групповом передатчике  $M$  сигнал  $s(t)$  преобразуется в линейный сигнал  $s_{\text{Л}}(t)$ , который и поступает в линию связи ЛС. Допустим, что линия пропускает сигнал практически без искажений и не вносит шумов. Тогда на приемном конце линии связи линейный сигнал  $s_{\text{Л}}(t)$  с помощью группового приемника  $\Pi$  может быть вновь преобразован в групповой сигнал  $s(t)$ . Канальными или индивидуальными приемниками  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N$  из группового сигнала  $s(t)$  выделяются соответствующие каналные сигналы  $s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)$  и затем преобразуются в предназначенные получателям сообщения  $a_1(t), a_2(t), \dots, a_N(t)$ .

Канальные передатчики вместе с суммирующим устройством образуют аппаратуру объединения. Групповой передатчик  $M$ , линия связи ЛС и групповой приемник  $\Pi$  составляют групповой канал связи (тракт передачи), который вместе с аппаратурой объединения и индивидуальными приемниками составляет систему многоканальной связи.

В общем случае групповой сигнал может формироваться не только простейшим суммированием каналных сигналов, но также и определенной логической обработкой, в результате которой каждый элемент группового сигнала несет информацию о сообщениях источников. Это так называемые системы с *комбинационным разделением*.

Чтобы разделяющие устройства были в состоянии различать сигналы отдельных каналов, должны существовать определенные признаки, присущие только данному сигналу. Такими признаками в общем случае могут быть параметры переносчика, например, амплитуда, частота или фаза в случае

непрерывной модуляции гармонического переносчика. При дискретных видах модуляции различающим признаком может служить и форма сигналов. Соответственно различаются и способы разделения сигналов: частотный, временной, фазовый и др.

*Амплитудная модуляция.*

В случае амплитудной модуляции (АМ) амплитуда сигнала изменяется пропорционально модулирующему сигналу сообщения  $S_M$  :

$$S_{AM}(t) = S_M(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (1)$$

Процесс амплитудной модуляции иллюстрируется на рис. 1.2. Заметим, что здесь изменение полярности (знака)  $S_M$  приводит к изменению фазы несущей модулированного сигнала на  $\pi$  радиан.

Эта разновидность амплитудной модуляции получила название амплитудной модуляции с двумя боковыми полосами и подавленной несущей (АМ-ДБП-ПН), поскольку спектр модулированного сигнала не содержит несущей, а боковые полосы сосредоточены вокруг частот  $\pm\omega_0$ . Если рассматривать только положительные частоты, имеющие физический смысл, то в результате амплитудной модуляции требуемая полоса частот увеличивается вдвое. Спектральные составляющие, расположенные выше частоты  $\omega_0$ , образуют так называемую верхнюю боковую полосу, а спектральные составляющие, расположенные ниже частоты  $\omega_0$ , - нижнюю боковую полосу.

Демодуляция АМ-ДБП-ПН сигнала осуществляется путем его перемножения на опорный сигнал несущей и последующей низкочастотной фильтрации.

Наличие фазовой ошибки (фазового сдвига) в опорном сигнале несущей приводит только к уменьшению уровня демодулированного сигнала, частотная ошибка  $\Delta\omega$  приводит к недопустимым мультипликативным искажениям. Поэтому для демодуляции АМ-ДБП-ПН сигнала необходимо использовать синхронный демодулятор.

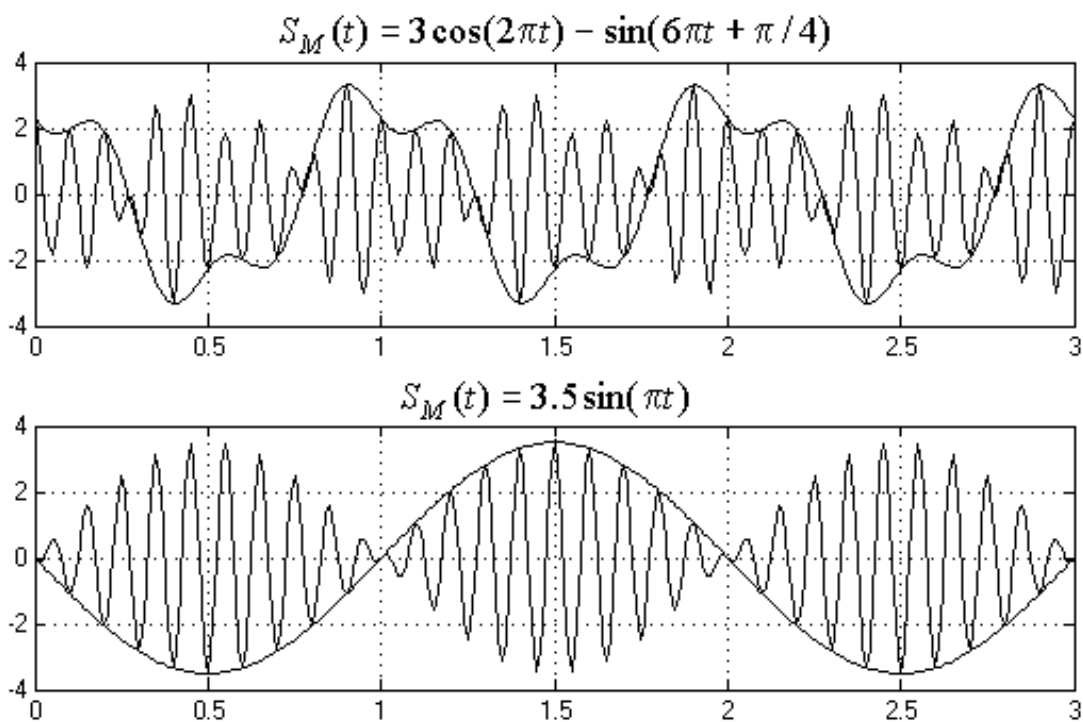


Рис. 1.2. Процесс формирования АМ-ДБП-ПН.

Использование АМ-ДБП-ПН требует наличия в демодуляторе опорного сигнала несущей, совпадающего с несущей демодулированного сигнала с точностью до начальной фазы. А поскольку сигнал несущей в АМ-ДБП-ПН отсутствует, то для восстановления необходимо дополнительные средства. Это несколько усложняет схему демодулятора. Чтобы избежать этого, можно к АМ-ДБП-ПН сигналу добавить сигнал немодулированной несущей с таким уровнем, чтобы в нем отсутствовали скачки фазы на  $\pi$ , вызванные изменениями полярности модулирующего сигнала. В этом случае получим другую разновидность амплитудной модуляции, которая получила название амплитудной модуляции двумя боковыми полосами (АМ-ДБП), или просто АМ. Математически АМ-ДБП сигнал может быть представлен в следующем виде:

$$S_M(t) = A_M \cos(\Omega t + \varphi), \quad S_{AM}(t) = (A_0 + A_M \cos(\Omega t + \varphi)) \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2)$$

При соответствующем выборе значения  $A_0$  амплитуда модулированного сигнала будет пропорциональна  $S_M(t)$  (рис. 1.3).

Процесс демодуляции в этом случае упрощается и сводится к выделению огибающей с помощью диодного детектора и фильтра нижних частот. Кроме того, здесь необходимо исключить постоянную составляющую, обусловленную наличием немодулированной несущей.

Отношение между амплитудами модулирующего сигнала и несущего колебания называется коэффициентом модуляции или глубиной модуляции:

$m = A_M / A_0$ . Как правило значение коэффициента модуляции находится в пределах 0...1. При  $m > 1$  имеет место перемодуляция (рис. 1.4).

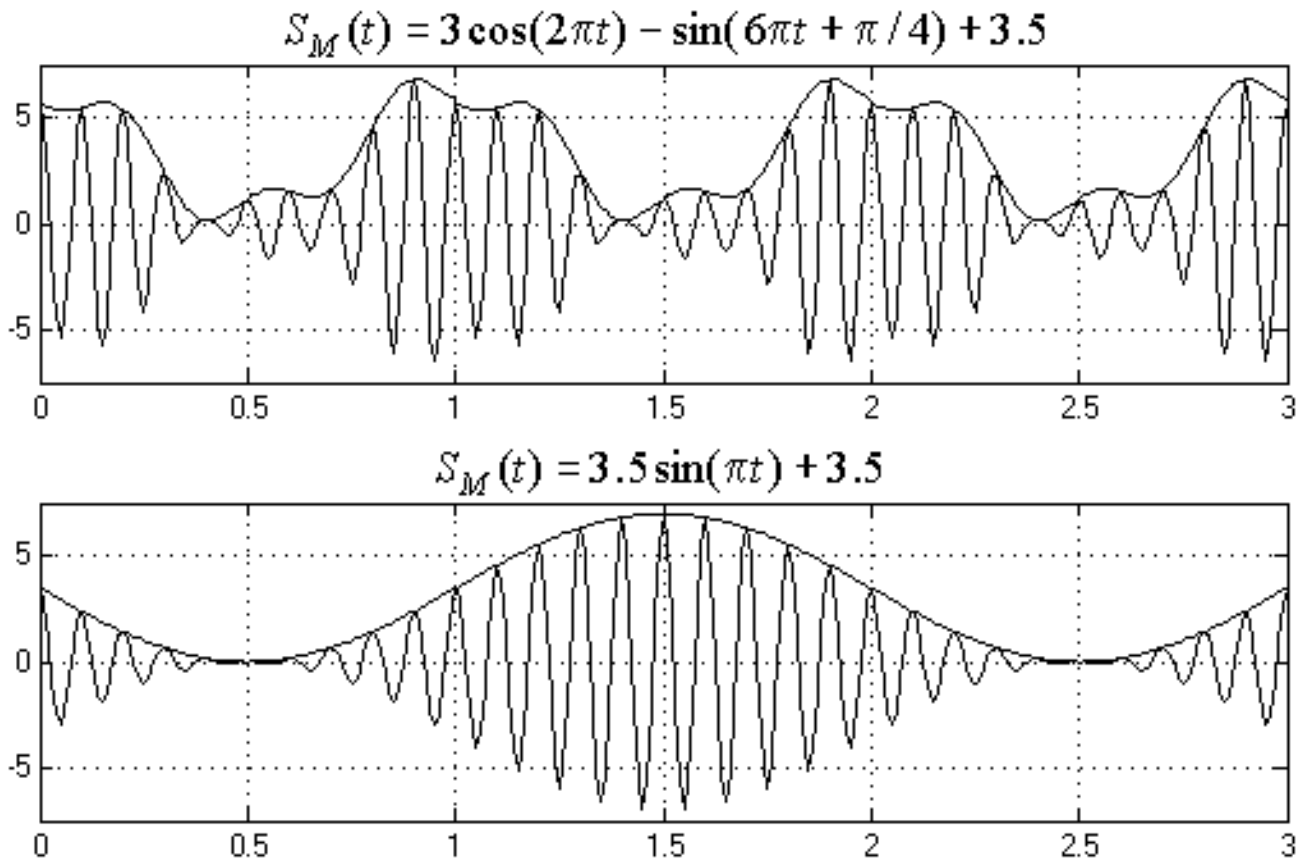


Рис. 1.3. Процесс формирования АМ-ДБП

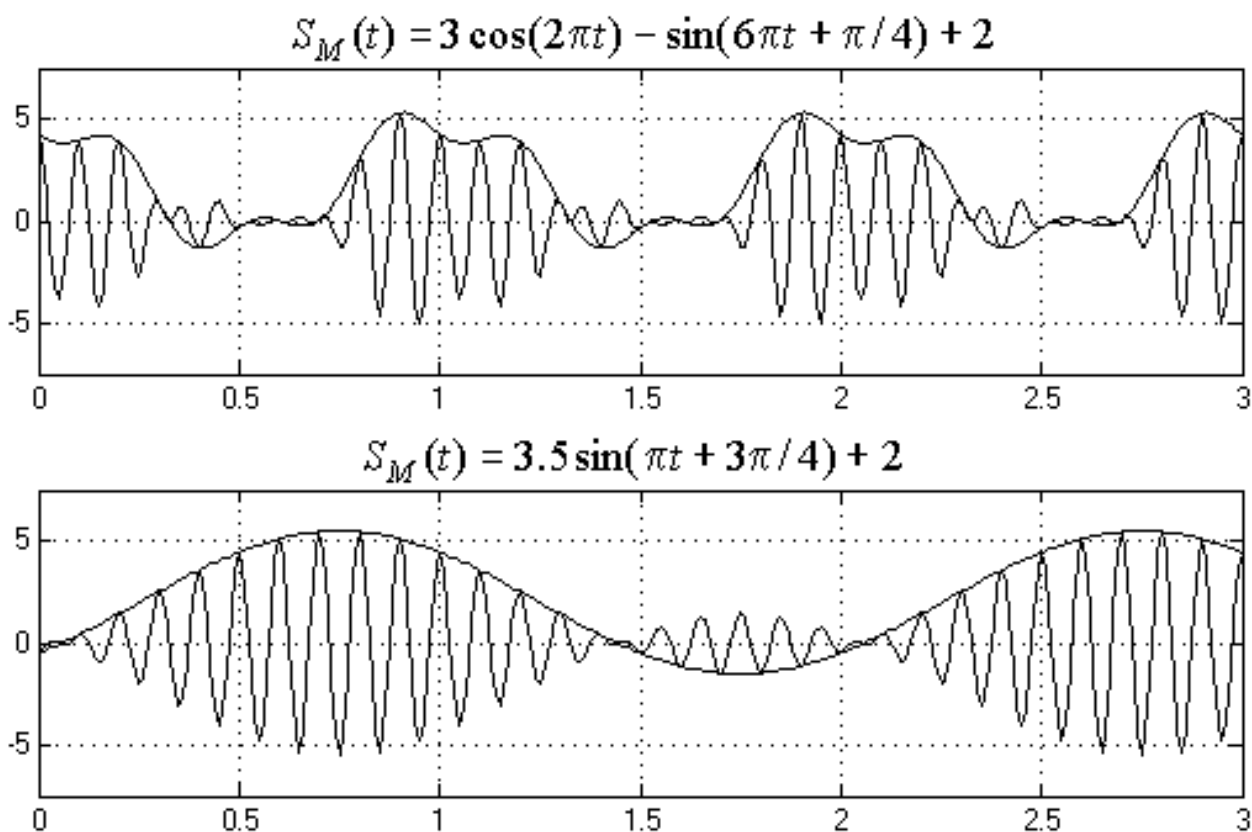


Рис. 1.4. Процесс перемодуляции АМ-ДБП

1.2. Создайте модели формирования трех АМ-ДБП-ПН сигналов. Параметры модулирующих сигналов выбираются из табл.1. в соответствии с № варианта. Частота несущей – 10 Гц.

Для создания модели воспользуйтесь выражением (1). Сложение или вычитание сигналов производите с использованием блока «Sum» (Simulink\Math Operations). В результате работы вы должны получить 3 формирователя АМ-ДБП-ПН сигналов, работающих на одной несущей (для всех трех моделей используйте 1 генератор). Подсоединение формирователей к осциллографу осуществите в соответствии с рис. 1.5.

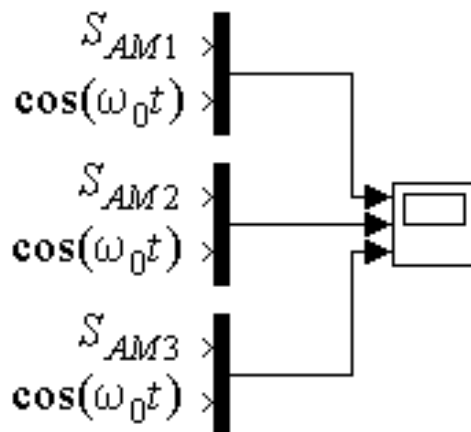


Рис. 1.5. Подсоединение формирователей к осциллографу

Для этого воспользуйтесь блоком «Mux» (Simulink\\Signal Routing).

Таблица 1.1. Исходные данные

№ варианта	Модулирующие сигналы
1 – 3	$S_{M1}(t) = 3 \cos(2\pi t) - \sin(6\pi t + \pi/4)$ , $S_{M2}(t) = \cos(2\pi t)$ , $S_{M3}(t) = \sin(4\pi t + \pi)$ .
4 – 6	$S_{M1}(t) = 2 \cos(3\pi t) - \sin(7\pi t + \pi/4)$ , $S_{M2}(t) = 2 \cos(2\pi t)$ , $S_{M3}(t) = \sin(4\pi t + \pi)$ .
7 – 9	$S_{M1}(t) = \cos(2\pi t) + \sin(2\pi t + \pi)$ , $S_{M2}(t) = \cos(4\pi t)$ , $S_{M3}(t) = -\sin(2\pi t + \pi)$ .
10 – 12	$S_{M1}(t) = \cos(2\pi t) - \sin(6\pi t + \pi/3)$ , $S_{M2}(t) = \cos(4\pi t + \pi/4)$ , $S_{M3}(t) = -\sin(5\pi t + \pi)$ .
13 – 15	$S_{M1}(t) = \cos(2\pi t) - \cos(6\pi t + \pi/3)$ , $S_{M2}(t) = \cos(6\pi t + \pi/4)$ , $S_{M3}(t) = \sin(4\pi t + \pi)$
16 – 19	$S_{M1}(t) = 3 \cos(2\pi t) - \sin(2\pi t + \pi/4)$ , $S_{M2}(t) = \cos(3\pi t)$ , $S_{M3}(t) = -\sin(2\pi t + \pi)$ .

1.2. Перед запуском полученной модели откройте пункт меню «Simulation\\Simulation parameters» и установите следующие параметры моделирования: время моделирования - 4.0 с; максимальный шаг интегрирования системы однородных дифференциальных уравнений Max step size – 1e-3. Настройку осциллографа произведите известным способом (Т1. Лр).

1.3. Запустите полученную модель. Результаты моделирования зафиксируйте в рабочих тетрадах.

1.4. Используя выражение (2) и уже созданные модели АМ-ДБП-ПН, произведите моделирование АМ-ДБП сигналов. Добавление константы  $A_0$  произведите с использованием блока «Constant» (Simulink\\Sources). Результаты моделирования зафиксируйте в рабочих тетрадах и сделайте соответствующие выводы.

## 2. Формирование групповых сигналов

2.1. Для формирования группового сигнала к каждому формирователю АМ-ДБП подключите собственный генератор несущей. Значения частот несущих – 10, 20 и 30 Гц соответственно.

2.2. Объедините блоки формирователей в подсистемы. Для этого произведите выделение блоков каждого из формирователей включая генератор

несущей. Зайдите в п-т меню «Edit» и выберите п/п-т «Create subsystem». Подписи «Subsystem» исправьте на «канал 1», «канал 2» и «канал 3» соответственно.

2.3. Подключите выходы каналов к сумматору. На выходе блока получите групповой сигнал  $S_{Mzp}$ . Результат зафиксируйте в рабочих тетрадах.

Осуществите формирование группового АМ-ДБП сигнала. Частота несущей – 60 Гц. Объедините полученные блоки в подсистему с названием «Групповой модулятор». Откройте подсистему «Групповой модулятор» и добавьте туда блок «Out2» путем копирования блока «Out1». На «Out2» выведите групповой сигнал  $S_{Mzp} + A_0$ . Закройте блок и через «Mix» оба сигнала выведите на осциллограф. Полученная модель будет иметь вид аналогичный рис.6. Результат наблюдения зафиксируйте в рабочих тетрадах и сделайте соответствующие выводы.

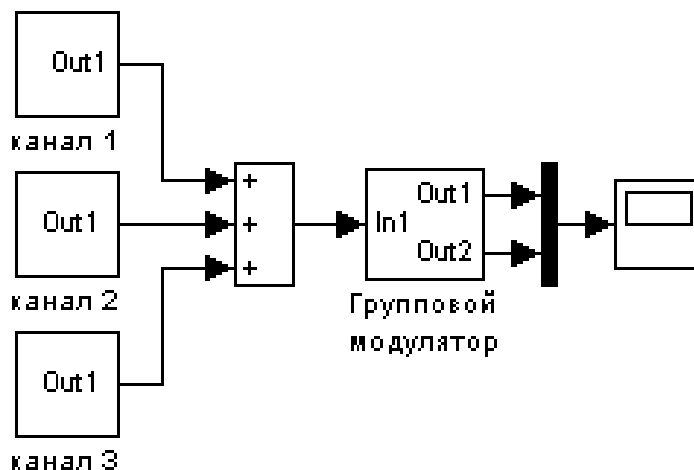


Рис. 1.6. Получение группового сигнала.

2.4. Уберите блоки «Mix», осциллограф и к выходу 1 группового модулятора подключите групповой демодулятор. Структура блока аналогична блоку группового модулятора. Однако там будет отсутствовать сумматор и константа  $A_0$ . В блоке «Групповой модулятор» удалите второй выход.

2.5. Дополните полученную модель тремя полосовыми фильтрами (DSP Blockset\\Filtering\\Filter Designs\\Analog Filter Design) и канальными демодуляторами. Перетащите фильтр в модель и установите параметр «тип фильтра» («Filter type») как «Bandpass» - полосовой. Блоки канальных демодуляторов формируются аналогично блоку «групповой демодулятор» с учетом соответствующих частот несущих. Полученная модель будет иметь вид аналогичный рис.7.

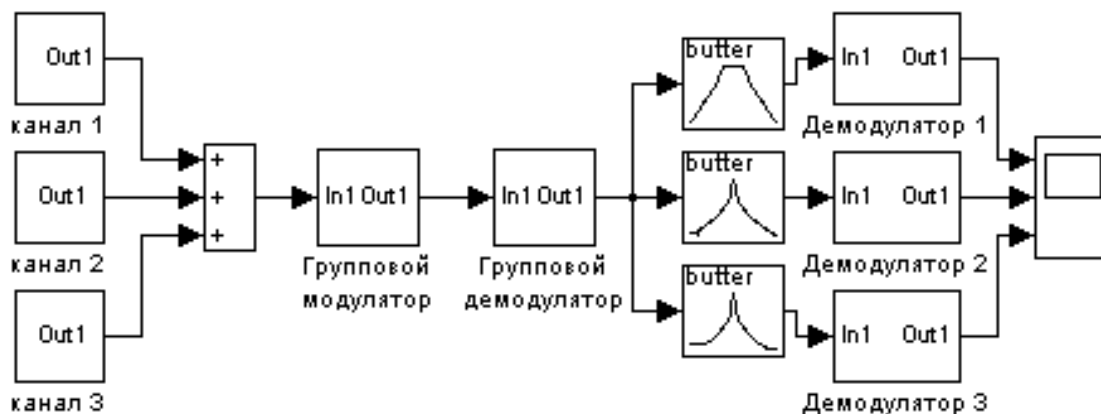


Рис. 1.7. Упрощенная модель системы многоканальной связи.

2.6. Управляя параметрами «Lower passband edge frequency (rads/sec)» (нижняя частота) и «Upper passband edge frequency (rads/sec)» (верхняя частота), добейтесь максимального подобия исходных сигналов и огибающих выходных сигналов. Результаты зафиксируйте в рабочих тетрадях и сделайте соответствующие выводы.

*Вопросы и задания для самостоятельной работы*

Вопросы:

1. Поясните основные принципы формирования многоканальной связи.
2. Дайте характеристику способам формирования АМ – сигналов.

Задание:

1. Изучить пакет визуального моделирования динамических систем Simulink системы MATLAB.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ТРАКТА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ»

### Учебные вопросы:

Исследование изменения формы импульсного сигнала при передаче его по каналам связи с различной полосой пропускания.

### *Краткий теоретический материал*

#### *Описание установки*

Установка «Линейный тракт цифровой системы передачи» предназначена для проведения лабораторно-практических занятий по курсу «Многоканальные системы передачи».

Лабораторная установка состоит из 3 основных частей:

- 1) левая панель – источники передаваемых сигналов;
- 2) средняя панель – эквивалент линии связи с регулируемыми параметрами;
- 3) правая панель – устройства приёма и обработки принятого сигнала.



Рис. 11.1. Внешний вид установки

Установка позволяет проводить лабораторные работы по темам:

1. Особенности передачи импульсных сигналов по каналу связи с различными параметрами (полоса пропускания, затухание, уровень шума);
2. Изучение линейных кодов:
  - код без возвращения к нулю (NRZ);
  - код с чередующейся полярностью импульсов (AMI);
  - биполярный код с замещением трёх нулей (B3ZS);
  - манчестерский код (СМІ);
  - парноизбирательный троичный код (PST);

### 3. Регенерация цифрового сигнала:

- вопросы синхронизации;
- выделение тактовой частоты;
- восстановление формы сигнала;

4. Сравнение помехозащищённости линейных кодов при прохождении сигналов через линии связи с различными параметрами.

Установка содержит:

- источник передаваемого кода;
- формирователь линейных кодов (линейный кодер);
- линейный усилитель;
- эквивалент линии связи с переключаемыми параметрами;
- блок регенерации принятого сигнала;
- блок выделения тактовой частоты
- индикатор принятого кода;
- блок подсчёта ошибок.

На левой панели установки (рис.2.) расположен формирователь передаваемого кода, который включает в себя:

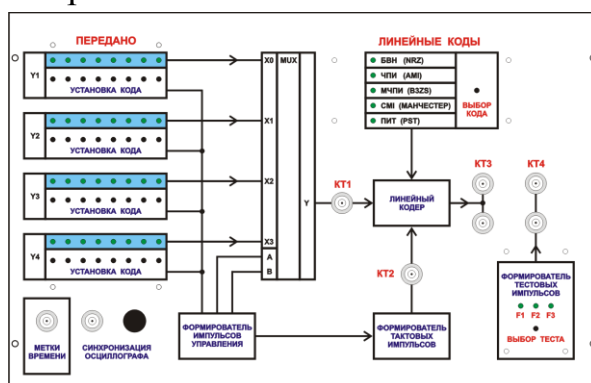


Рис.2.

— четыре восьмиразрядных регистра с возможностью параллельной записи информации, представляющей собой четыре цифровых сигнала;

— мультиплексор, выполняющий побайтовое объединение четырёх цифровых сигналов в единый поток. Коэффициент мультиплексирования равен четырём.

— линейный кодер, который преобразует объединённый поток в один из выбранных кодов:

- без возврата к нулю (NRZ);
- чередующей полярностью импульсов (AMI);
- биполярный код с замещением трёх нулей (B3ZS);
- манчестерский код (СМТ);
- парноизбирательный троичный код (PST).

— формирователь импульсов управления, который вырабатывает импульсные сигналы для считывания информации с регистров Y1, Y2, Y3 и Y4, управления работой мультиплексора и синхронизации генератора тактовых импульсов, необходимых для работы формирователя линейных кодов.

— генератор меток времени (рис.3), предназначенных для визуальной индикации:

- начала цикла объединённого потока;
- начала байта цифрового сигнала;
- начала каждого бита.

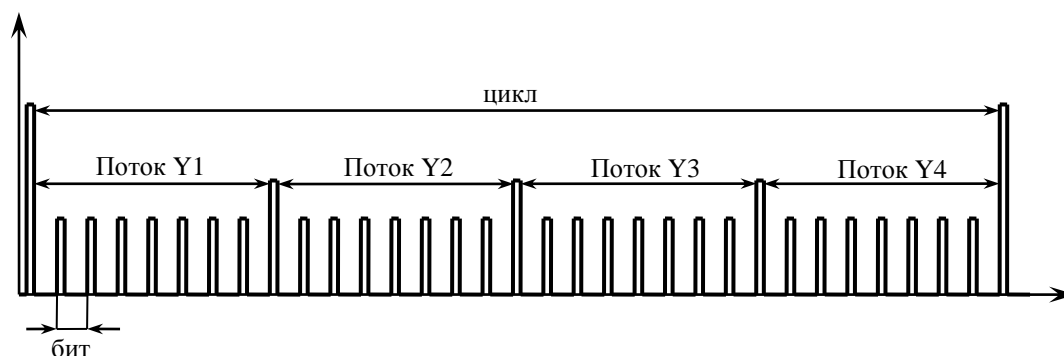


Рис.3. Метки времени

— выход для синхронизации осциллографа, позволяющий просматривать поочерёдно потоки цикла Y1, Y2, Y3 и Y4. Выход этого блока подключается к входу внешней синхронизации осциллографа.

— формирователь тестовых импульсов вырабатывает три варианта импульсных сигналов со следующими параметрами:

- период (T) равен 16 мс;
- частота (f) равна 62,5 Гц;
- амплитуда ( $U_m$ ) равна 5 В;
- длительность ( $\tau$ ) равна:
  - ◇ F1 = 0,125 мс;
  - ◇ F2 = 0,25 мс;
  - ◇ F3 = 0,5 мс;
- скважность (q) равна:
  - ◇ F1 = 128;
  - ◇ F2 = 64;
  - ◇ F3 = 32.

На средней панели установки (рис.4.) расположен эквивалент линии связи, который включает в себя:

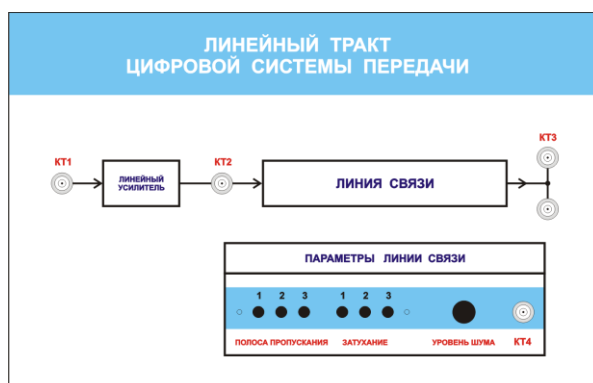


Рис.4.

— линейный усилитель, который усиливает мощность передаваемого сигнала с коэффициентом усиления по напряжению равным 1;

— эквивалент линии связи с изменяемыми параметрами:

- полоса пропускания:

- 1) 1100 Гц;
- 2) 2050 Гц;
- 3) 9000 Гц;

- затухание:

- 1) 1,5 дБ;
- 2) 9 дБ;
- 3) 18 дБ;

- генератор шума с регулируемым уровнем.

На правой панели установки (рис.5.) расположена приёмная часть, которая включает в себя:

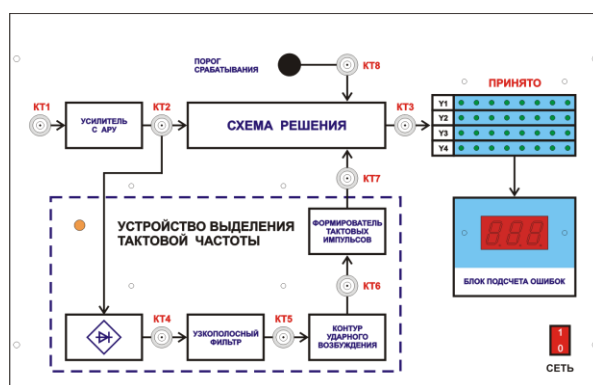


Рис.5.

— усилитель с АРУ (автоматической регулировкой уровня);

— устройство выделения тактовой частоты:

- выпрямитель;
- узкополосный фильтр;
- контур ударного возбуждения;

- формирователь тактовых импульсов;

- схема решения с изменением порога срабатывания от -5 до +5 В;
- индикатор принятого кода, зелёным светом загораются правильно принятые импульсы (присутствующие на передаче), красным светом не правильно принятые (отсутствующие на передаче);
- блок подсчёта ошибок показывает процент ошибок в линии.

Установка выполнена в металлическом корпусе, устанавливается на полку лабораторного стола. Питание установки осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением 220В частотой 50Гц.

Для проведения лабораторных занятий из внешних измерительных приборов требуется двухканальный осциллограф с полосой 20 МГц.

### Порядок сборки и включения установки

- собрать лабораторный стол, следуя указаниям инструкции по сборке;
- после распаковки установку выдержать 24 часа в комнатных условиях;
- провести внешний осмотр установки и убедиться в отсутствии механических повреждений корпуса и шнура питания;
- проверить надёжную фиксацию переключателей;
- корпус установки необходимо заземлить. Клемма для защитного заземления находится на задней панели;
- проверить наличие предохранителя;

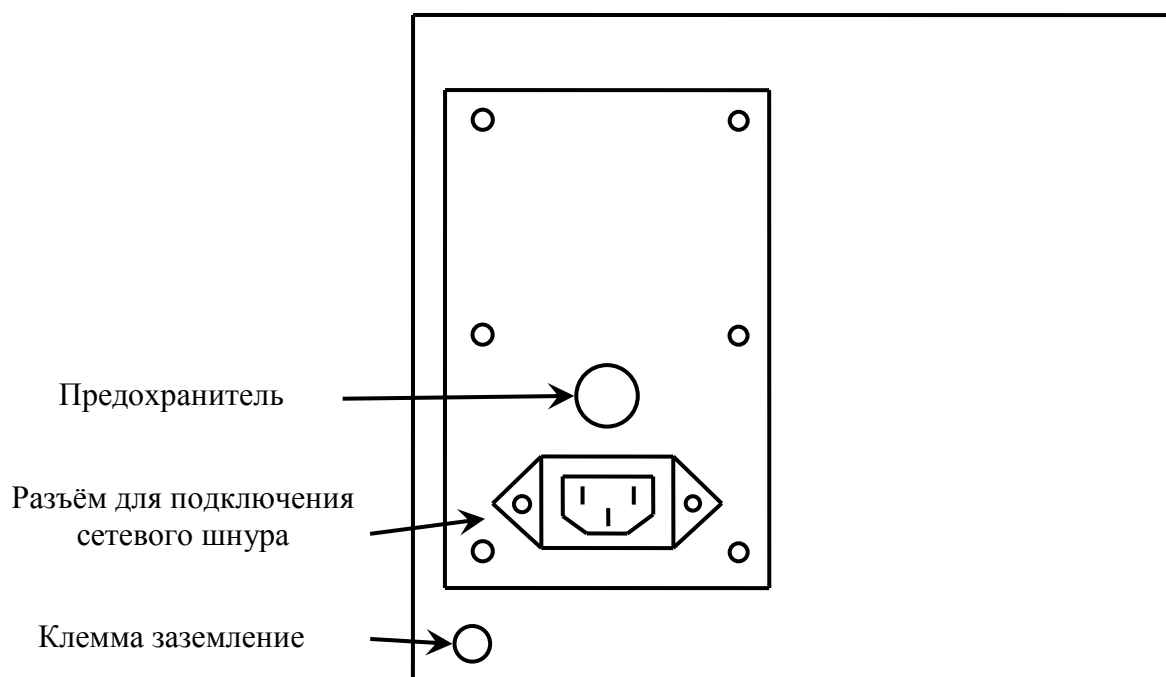


Рис.6. Вид задней части установки

- подсоединить шнур питания к установке;
- установить кнопку «сеть» в выключенное положение;
- шнур питания подключить к однофазной сети переменного тока напряжением 220В частотой 50Гц;
- установить кнопку «сеть» во включенное положение, при этом кнопка должна засветиться.

*Порядок проверки работоспособности установки*

- подключить осциллограф к гнезду «метки времени», проверить наличие импульсов меток времени;
- подключить осциллограф к формирователю тестовых импульсов (гнездо КТ4), проверить наличие тестовых импульсов F1, F2 и F3.

*1. Определение основных параметров тестовых импульсов*

При исследовании используются:

- формирователь тестовых импульсов, расположенный на левой панели;
- синхронизация осциллографа, расположенная на левой панели;
- осциллограф с внешней синхронизацией.

Формирователь вырабатывает три тестовых сигнала F1, F2 и F3. Вы должны определить основные параметры тестовых сигналов:

- период;
- частоту;
- длительность импульса;
- скважность;
- амплитуду.

Последовательность подключения:

- подключите выход формирователя тестовых импульсов к входу канала А осциллографа;
- подключите выход «синхронизации осциллографа», расположенный на левой панели установки, к входу внешней синхронизации осциллографа.

Схема соединений изображена на рисунке 1.

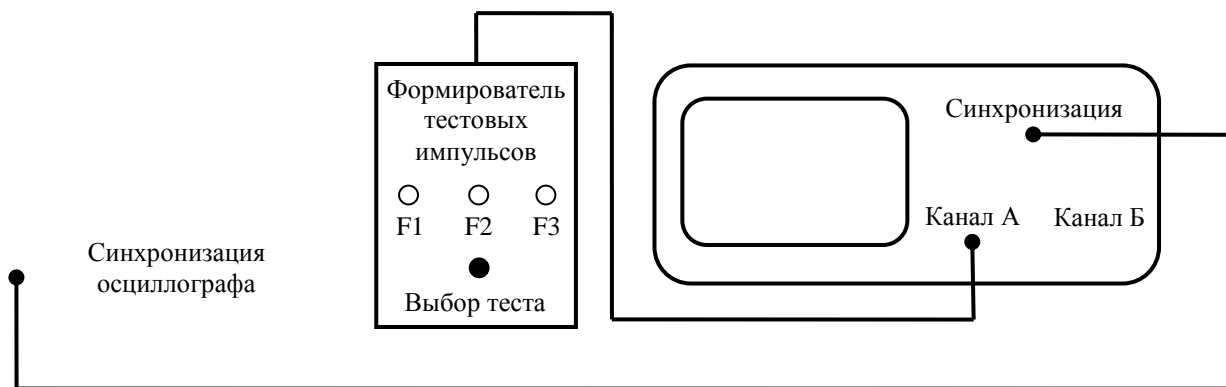


Рис.1.

Последовательность исследования:

- установите тестовый импульс F1;
- зарисуйте осциллограмму импульса;
- по осциллограмме определите основные параметры:
  - период (T);
  - длительность ( $\tau$ );
  - амплитуду ( $U_m$ );
- рассчитайте:
  - частоту (f);
  - скважность (q).
- все основные параметры занесите в таблицу 1;
- повторите измерения для тестовых импульсов F2 и F3.

Таблица 1

Тестовый импульс	F1	F2	F3
T			
$\tau$			
$U_m$			
f			
q			

## 2. Построение спектра тестовых импульсов

Алгоритм приближённого построения спектра ПППИ (периодическая последовательность прямоугольных импульсов):

- 1) рассчитать постоянную составляющую:

$$U_0 = \frac{U_m}{q}$$

2) рассчитать частоты, на которых огибающая спектра пересекает ось абсцисс:

$$\frac{1}{T}, \quad \frac{2}{T}, \quad \frac{3}{T} \dots$$

3) рассчитать экстремумы огибающей спектра:

$$S_0 = \frac{2U_m}{q} \quad S_1 \approx \frac{S_0}{5} \quad S_2 \approx \frac{S_0}{8}$$

4) определить частоты составляющих спектра

$$F_1 = \frac{1}{T}, \quad F_2 = \frac{2}{T}, \quad F_3 = \frac{3}{T} \dots$$

5) построить спектр

общий спектр изображён на рисунке 2

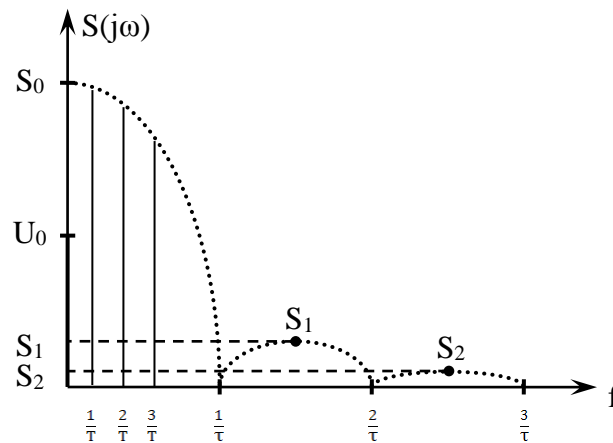


Рис.2.

По алгоритму постройте спектр тестовых сигналов F1, F2 и F3.

Определите диапазон частоты, в которой сосредоточено 80% и 95% энергии.

### 3. Исследование прохождения импульсов с разными спектрами через линию связи с разными полосами пропускания

При исследовании используются:

- формирователь тестовых импульсов, расположенный на левой панели;
- синхронизация осциллографа, расположенная на левой панели;
- линия связи, расположенная на средней панели;
- осциллограф с внешней синхронизацией.

Схема соединений изображена на рисунке 3.

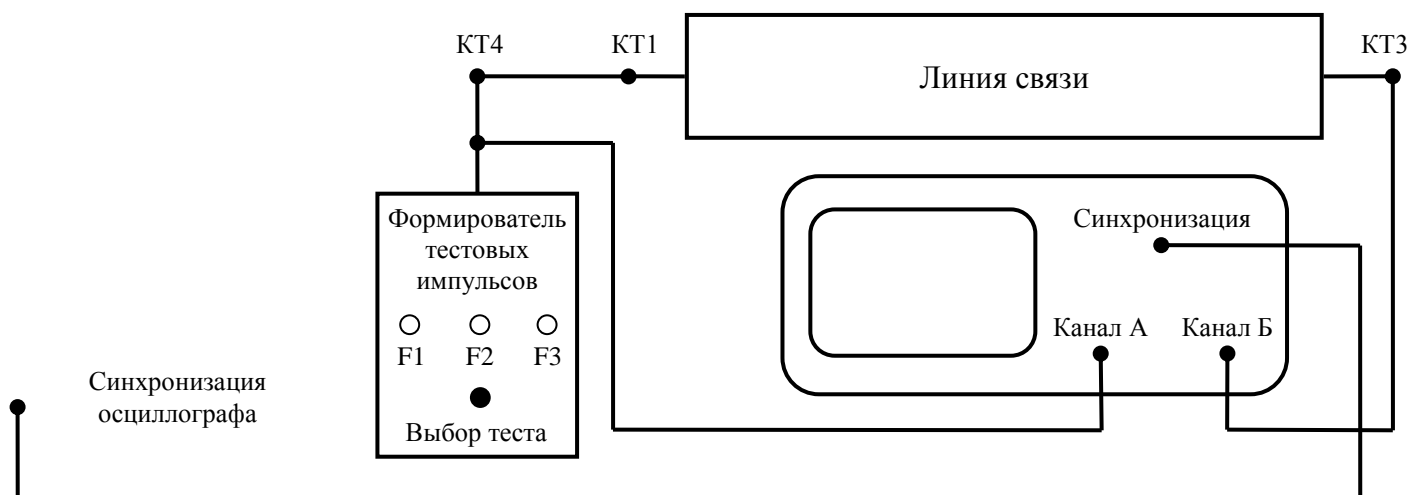


Рис.3.

Последовательность подключения:

- подключите выход формирователя тестовых импульсов (КТ4 левой панели) к каналу А осциллографа;
- подключите выход синхронизации осциллографа, расположенный на левой панели установки, к входу внешней синхронизации осциллографа;
- соедините выход формирователя тестовых импульсов (КТ4 левой панели) с входом линии связи (КТ1 средней панели);
- подключите выход линии связи к каналу Б осциллографа (КТ3 средней панели).

Последовательность исследования:

- установите переключатель «полоса пропускания» в положение 1;
- установите тестовый импульс F1, зарисуйте осциллограмму на выходе линии связи (КТ3 средней панели);
- зарисуйте осциллограммы для положений переключателя «полоса пропускания» 2 и 3.
- повторите измерения для тестовых импульсов F2 и F3.

*Содержание отчёта*

1. Осциллограммы тестовых импульсов;
2. Таблица 1 с параметрами тестовых импульсов;
3. Расчёт спектров тестовых импульсов;
4. Осциллограммы сигналов на выходе линии связи для 3-х положений переключателя «полоса пропускания» (для всех 3-х тестовых импульсов F1, F2 и F3);
5. По полученным результатам сформулировать выводы о связи формы импульса на выходе линии от спектра передаваемых импульсов и полосы пропускания

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Федеральный закон «О связи» от 07.07.2003 №126-ФЗ (ред. 07.06.2018) [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.consultant.ru/>.
2. Бабкин А.Н. Защищенные системы связи ОВД: учебное пособие / А.Н. Бабкин [и др.]. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2009. – 91 с.
3. Бабков В.Ю. Системы мобильной связи: термины и определения / В. Ю.Бабков, Г.З. Галант. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 158 с.
4. Бокова О.И. Системы и сети передачи информации: учебное пособие / О.И. Бокова, Д.А. Жайворонок, Н.Н. Оськин, Н.С. Хохлов. – М.: ДГСК МВД России 2015. – 188 с.
5. Бокова О.И. Сети и системы радиосвязи ОВД и средства их информационной защиты: учебное пособие / О.И. Бокова, Н.С. Хохлов, О.С. Авсентьев, А.Н. Бабкин, Д.А. Жайворонок. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2012. – 227 с.
6. Бокова О.И. Организация радиосвязи в органах внутренних дел / О.И. Бокова, Н.С. Хохлов. – Воронеж: ВИ МВД России, 2016. – 106 с.
7. Будылин Н.В. Сетевые технологии высокоскоростной передачи данных: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.П. Шувалова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 342 с.
8. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь: учебное пособие / В.А. Галкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 592 с.
9. Добровольский Е.Е. Развитие и совершенствование радиосвязи, радиовещания и телевидения / Е. Е. Добровольский. – М., 2014. – 123 с.
10. Дьяконов В.П. Matlab и Simulink в электроэнергетике. Справочник. / В.П. Дьяконов, А.А. Пеньков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с..
11. Лукьянов А.С. Основы применения инфокоммуникационных систем специального назначения: учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] / А.С. Лукьянов, Д.А. Жайворонок. – Электр. дан. и прогр. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2015. – 99 с.
12. Пудовкин А.П. Электромагнитная совместимость и помехозащищенность РЭС: Учеб. пособие / А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, Т.И. Чернышова. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 92 с.
13. Скляр Б. Цифровая радиосвязь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е испр.: Перевод с англ. / Б. Скляр. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2009. – 201 с.
14. Томаси У. Электронные системы связи / У. Томаси. – М.: Техносфера, 2007. – 90 с.