

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

Кафедра систем управления

Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко

ТЕЛЕМЕХАНИКА

Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии
и управление в технических системах» всех форм обучения

В 2-х частях

Часть 1

СООБЩЕНИЯ И СИГНАЛЫ

Минск БГУИР 2010

УДК 621.398(076.5)
ББК 32.968я73
С65

Р е ц е н з е н т:

заведующий кафедрой теоретических основ электроники
учреждения образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»,
доктор технических наук, профессор Л. Ю. Шилин

Сорока, Н. И.

С65 Телемеханика : лаб. практикум для студ. спец. 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» всех форм обуч. В 2 . Ч. 1 : Сообщения и сигналы / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2010. – 79 с. : ил.

ISBN 978-985-488-466-0 (ч. 1)

Практикум содержит описания шести лабораторных работ, составляющих первую часть общего цикла лабораторных работ по дисциплине «Телемеханика», и предназначен для экспериментального изучения методов преобразования телемеханической информации студентами специальности «Информационные технологии и управление в технических системах» всех форм обучения.

Выполнению каждой лабораторной работы предшествует краткое изложение теоретического материала. Список рекомендуемой литературы для самостоятельного изучения дается в конце каждой работы.

**УДК 681.398(076.5)
ББК 32.968я73**

**ISBN 978-985-488-466-0 (ч. 1)
ISBN 978-985-488-465-3**

© Сорока Н. И., Кривинченко Г. А., 2010
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2010

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

СПЕКТРЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Цель работы: изучение спектрального состава периодической последовательности импульсов прямоугольной формы при различных частотах следования и длительностях импульсов; исследование влияния полосы частот канала связи на форму видеоимпульсов и изучение методов борьбы с импульсными помехами.

1.1 Теоретическая часть

1.1.1 Дискретный спектр. Представить сигнал с заданным периодом T рядом Фурье – это значит найти амплитуды и начальные фазы всех его гармонических составляющих. Совокупность амплитуд называют спектром амплитуд, а совокупность начальных фаз – спектром фаз [1]. Во многих частных случаях достаточно рассчитать только спектр амплитуд сигнала, который для краткости назовем просто спектром.

Периодический сигнал $f(t)$ с периодом T в общем случае имеет бесконечный спектр, который можно представить в виде ряда Фурье:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \Omega_1 t + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin \Omega_1 t. \quad (1.1)$$

Амплитуды косинусоидальных и синусоидальных членов при разложении определяются следующими выражениями:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\Omega_1 t) dt; \quad (1.2)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\Omega_1 t) dt; \quad (1.3)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt. \quad (1.4)$$

Коэффициент a_0 имеет определенный физический смысл – это среднее значение сигнала за период.

Определим спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов (рисунок 1.1) длительностью τ и с периодом T . Напряжение такой формы действует в каналах связи и часто рассматривается как основной периодический сигнал при исследовании передачи информации по линии связи.

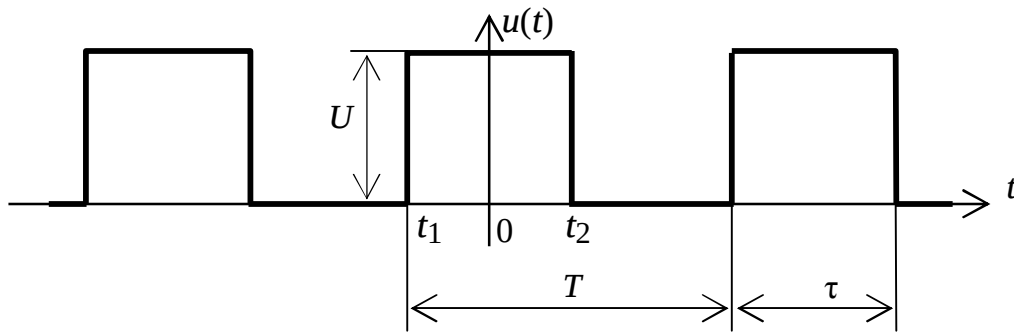


Рисунок 1.1 – Периодическая последовательность прямоугольных импульсов

Определим по формулам (1.2) – (1.4) постоянную, косинусоидальные и синусоидальные составляющие ряда Фурье:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} U dt = U \frac{\tau}{T}; \quad (1.5)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} U \cos k\Omega_1 t dt = \frac{2U}{k\pi} \sin k \frac{\tau}{T} \pi; \quad (1.6)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} U \sin(k\Omega_1 t) dt. \quad (1.7)$$

Таким образом, спектр данного сигнала имеет только косинусоидальные и постоянную составляющие, синусоидальные равны нулю, а следовательно, выражение для периодической последовательности (см. рисунок 1.1) выглядит следующим образом:

$$u(t) = U \frac{\tau}{T} \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} 2 \frac{\sin(k\Omega_1 \tau/2)}{k\Omega_1 \tau/2} \cos k\Omega_1 t \right) = U \left(\frac{\tau}{T} + \frac{2}{\pi} \left(\sin \frac{\tau}{T} \pi \cos \Omega_1 t + \frac{1}{2} \sin 2 \frac{\tau}{T} \pi \cos 2\Omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3 \frac{\tau}{T} \pi \cos 3\Omega_1 t + \dots \right) \right). \quad (1.8)$$

Спектр амплитуд сигнала изображают в виде спектральных линий, длины которых пропорциональны амплитудам гармоник (рисунок 1.2). Такой спектр называют линейчатым или дискретным.

Как следует из выражения (1.8), гармонические составляющие, номера которых кратные скважности, имеют амплитуды, равные нулю, что и подтверждает рисунок 1.2.

Непрерывная кривая, соединяющая концы линий спектра и показанная на рисунке 1.2 пунктиром, носит название огибающей спектра амплитуд и определяется уравнением

$$A(\Omega) = \frac{2U\tau}{T} \left| \frac{\sin(\Omega\tau/2)}{\Omega\tau/2} \right|, \quad (1.9)$$

где $\Omega = k\Omega_1$ для k -й гармоники.

С изменениями длительности импульса τ при том же периоде следования импульсов T или с изменением периода T при постоянной длительности τ спектр существенно преобразуется. Если длительность импульса растет, то увеличивается удельный вес постоянной составляющей и гармоник с небольшими порядковыми номерами, а удельный вес высших гармоник падает. Если, наоборот, уменьшить длительность импульса τ , то удельный вес гармоник с небольшим порядковым номером уменьшается, а удельный вес высших гармоник растет.

При изменении не длительности импульсов τ , а периода их повторения T спектр амплитуд становится реже или гуще. Так, с увеличением периода T основная частота уменьшается ($\Omega_1 = 2\pi/T$) и спектр становится гуще.

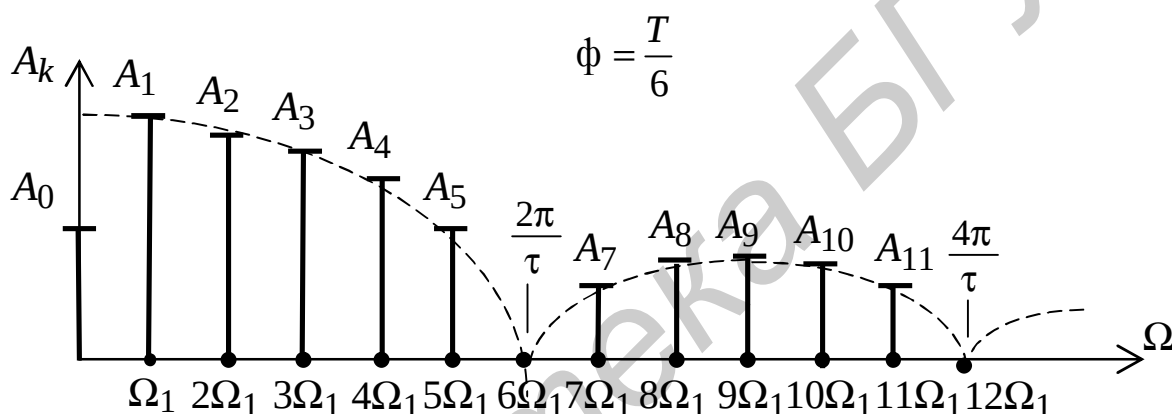


Рисунок 1.2 – Спектр периодического повторяющегося прямоугольного импульса при $\Omega = 6$

1.1.2 Практическая ширина спектра. Теоретически, как следует из выражения (1.8), для большинства периодических функций спектр неограничен, т. е. для передачи сигналов телемеханики без изменения формы необходимы бесконечно большая полоса пропускания канала связи и отсутствие амплитудных и фазовых искажений. Практически все каналы связи имеют ограниченную полосу пропускания, и форма сигналов при передаче по каналу изменяется даже при отсутствии в этой полосе амплитудных и фазовых искажений. Очевидно, важно передать ту часть спектра сигнала, которая содержит гармонические составляющие с относительно большими амплитудами. В связи с этим вводится понятие практической ширины спектра сигнала. Под практической шириной спектра сигнала понимается та область частот, в пределах которой сосредоточены гармонические составляющие сигнала с амплитудами, превышающими наперед заданную величину.

Поскольку средняя мощность, выделяемая сигналом на активном сопротивлении, равном 1 Ом, складывается из мощностей, выделяемых на этом сопротивлении всеми составляющими, т. е.

$$P_{\text{ср}} = A_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_k^2}{2}, \quad (1.10)$$

то практическая ширина спектра с энергетической точки зрения может быть определена как область частот, в пределах которой сосредоточена подавляющая часть мощности сигнала (обычно 90 %).

Ограничение спектра сигнала оказывает также влияние на его форму. На рисунке 1.3 показано изменение формы прямоугольных импульсов (рисунок 1.3, а) при сохранении в спектре только постоянной составляющей и первой гармоники (рисунок 1.3, б), при ограничении спектра частотой $3\Omega_1$ (рисунок 1.3, в) и при ограничении спектра частотой $5\Omega_1$ (рисунок 1.3, г). Как следует из рисунка, чем круче становится фронт импульса, тем большее число высших гармонических составляющих должно входить в состав сигнала.

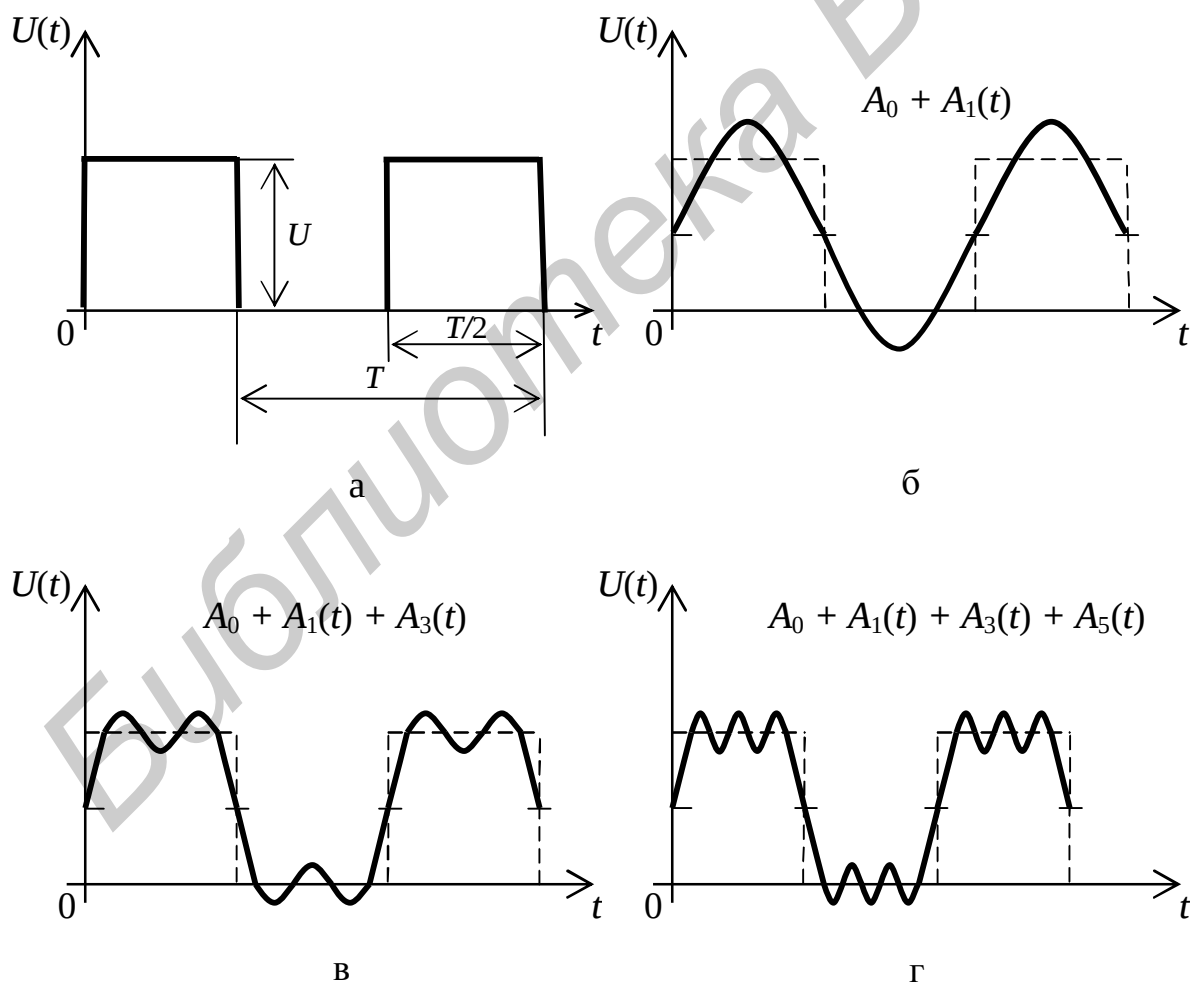


Рисунок 1.3 – Формы сигнала при ограничении спектра последовательности прямоугольных импульсов

Рассмотренная зависимость формы периодического сигнала от количества суммируемых гармоник показывает, что при выборе практической ширины спектра сигнала нельзя ограничиваться только энергетическими соображениями. Необходимо учитывать требования к сигналу на выходе системы как с энергетической точки зрения, так и с точки зрения сохранения его формы. В общем случае практическая ширина спектра сигнала выбирается из условия

$$\Delta\omega = 2\pi\mu/\tau, \quad (1.11)$$

где $\mu = 0,5 - 2$ – коэффициент формы импульса; при $\mu = 1$ обеспечивается передача около 90 % всей энергии сигнала.

1.1.3 Методы борьбы с помехами. В реальных каналах связи на полезный сигнал воздействуют помехи, которые его искажают. Случайные помехи делятся на флуктуационные и импульсные. Ниже будут рассмотрены основные методы подавления импульсных помех.

Метод ограничения снизу. Этот метод применяется, если амплитуда помехи U_n значительно меньше амплитуды сигнала U_c (рисунок 1.4, а). После ограничения снизу заштрихованная часть сигнала и помеха срезаются. Пороговое устройство приемника срабатывает только от U'_c .

Метод фильтрации применим, если амплитуда помехи соизмерима с амплитудой сигнала, а длительность помехи значительно меньше длительности сигнала (рисунок 1.4, в). Перед пороговым устройством ставится узкополосный фильтр, который заваливает фронт передаваемого сигнала, но до такой степени, чтобы его амплитуда не уменьшалась. При этом амплитуда импульсной помехи значительно уменьшается (рисунок 1.4, д), так как ее длительность во много раз меньше длительности сигнала. Пороговое устройство срабатывает только от сигнала, но не срабатывает от уменьшенной амплитуды импульсной помехи.

Метод ШОУ (широкая полоса – ограничитель – узкая полоса). Этот метод позволяет подавлять импульсные помехи, если их амплитуда существенно превышает амплитуду сигнала.

Если на входе фильтр не будет обладать широкой полосой пропускания, то на ограничитель помеха поступит не только несколько уменьшенной по амплитуде, но и значительно увеличенной по длительности (показана пунктиром на рисунке 1.4, б). От такой помехи методом фильтрации избавиться будет невозможно.

Если фильтр обладает достаточно широкой полосой, то сигнал и помеха на его выходе (см. рисунок 1.4, б) будут иметь вид, мало отличающийся от поданных на вход (рисунок 1.4, г). Далее следует ограничение сверху (рисунок 1.4, е) и пропускание сигнала и помехи через узкополосный тракт. Сигнал на выходе этого тракта показан на рисунке 1.4, ж. Если необходимо полностью избавиться от помехи, то применяют ограничение снизу (см. рисунок 1.4, а).

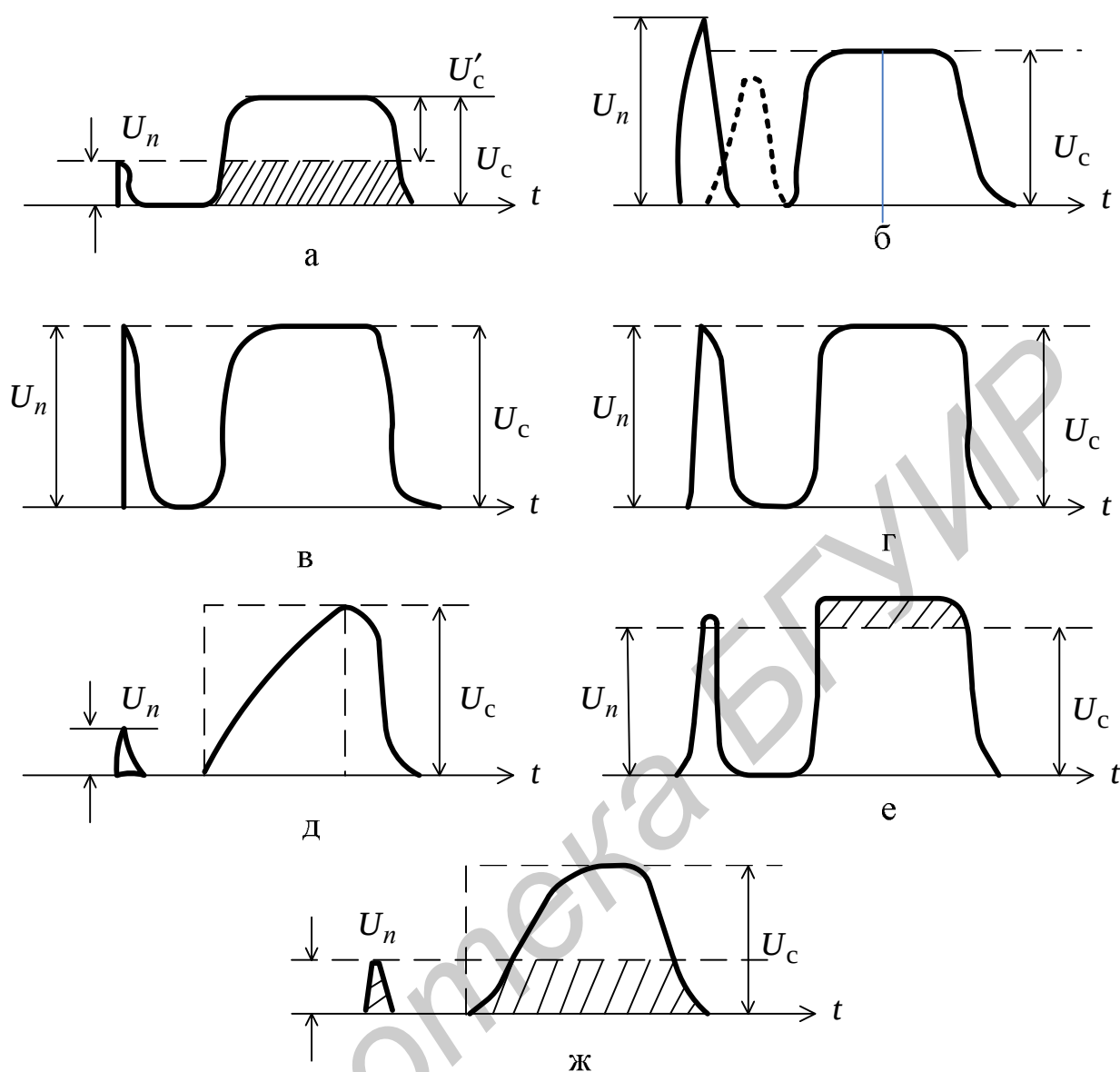


Рисунок 1.4 – Методы борьбы с помехами

Метод ШОУ не применим, если длительность помехи соизмерима с длительностью сигнала и если помехи следуют настолько часто, что переходные процессы от них во входном фильтре перекрывают друг друга.

Кроме рассмотренных выше методов борьбы с импульсными помехами, существуют и другие: метод селекции по длительности, метод запирания приемника на время отсутствия сигнала, метод обратного канала.

1.1.4 Потенциальная помехоустойчивость видеоимпульсов. Передача цифровых сообщений по медным проводным линиям осуществляется, как правило, однополярными или двухполярными видеоимпульсами. В теории потенциальной помехоустойчивости доказано, что вероятность подавления сигнала и образования ложного при симметричном канале одинаковы и определяются выражением

$$P_{01} = P_{10} = P_1 = V(\alpha/\sqrt{2}), \quad (1.12)$$

где V – вероятностный интеграл (табличная функция);
 α – величина, характеризующая потенциальную помехоустойчивость:

$$\alpha^2 = \frac{1}{P_0} \sqrt{\int_0^{\tau} (A_1(t) - A_2(t))^2 dt}, \quad (1.13)$$

где P_0 – удельная мощность помехи в полосе частот 1 Гц;

$A_i(t)$ – образцы сигналов логических нуля и единицы.

Состояние канала связи считается удовлетворительным, если вероятность искажения элементарного сигнала составляет $10^{-3} \dots 10^{-4}$.

1.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой набор стандартных элементов и блоков Simulink, позволяющих исследовать спектры периодических сигналов, влияние полосы пропускания фильтра на воспроизведение сигнала и методы борьбы с помехами, а также оконный интерфейс, созданный в системе Matlab. Программа запускается с помощью файла «Спектры». После запуска программы открывается окно регистрации (рисунок 1.5), в которое необходимо внести данные о пользователе: фамилию, имя и отчество, номер группы и номер варианта.

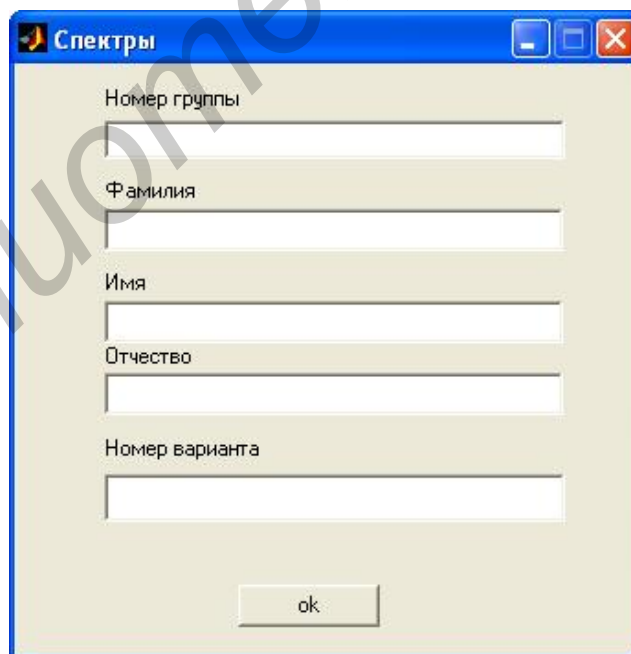


Рисунок 1.5 – Окно регистрации

После нажатия кнопки «ok», открывается окно выбора (рисунок 1.6), в котором, нажимая соответствующую кнопку, можно выбрать исследование спектров сигналов либо исследование помех.

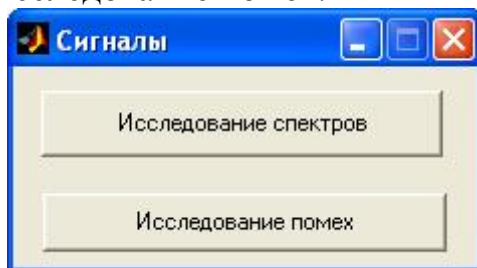


Рисунок 1.6 – Окно выбора части лабораторной работы

При выборе пункта «Исследование спектров» будет открыто окно (рисунок 1.7), которое создает интерфейс к установке для исследования спектров сигналов и влияния на них фильтров.

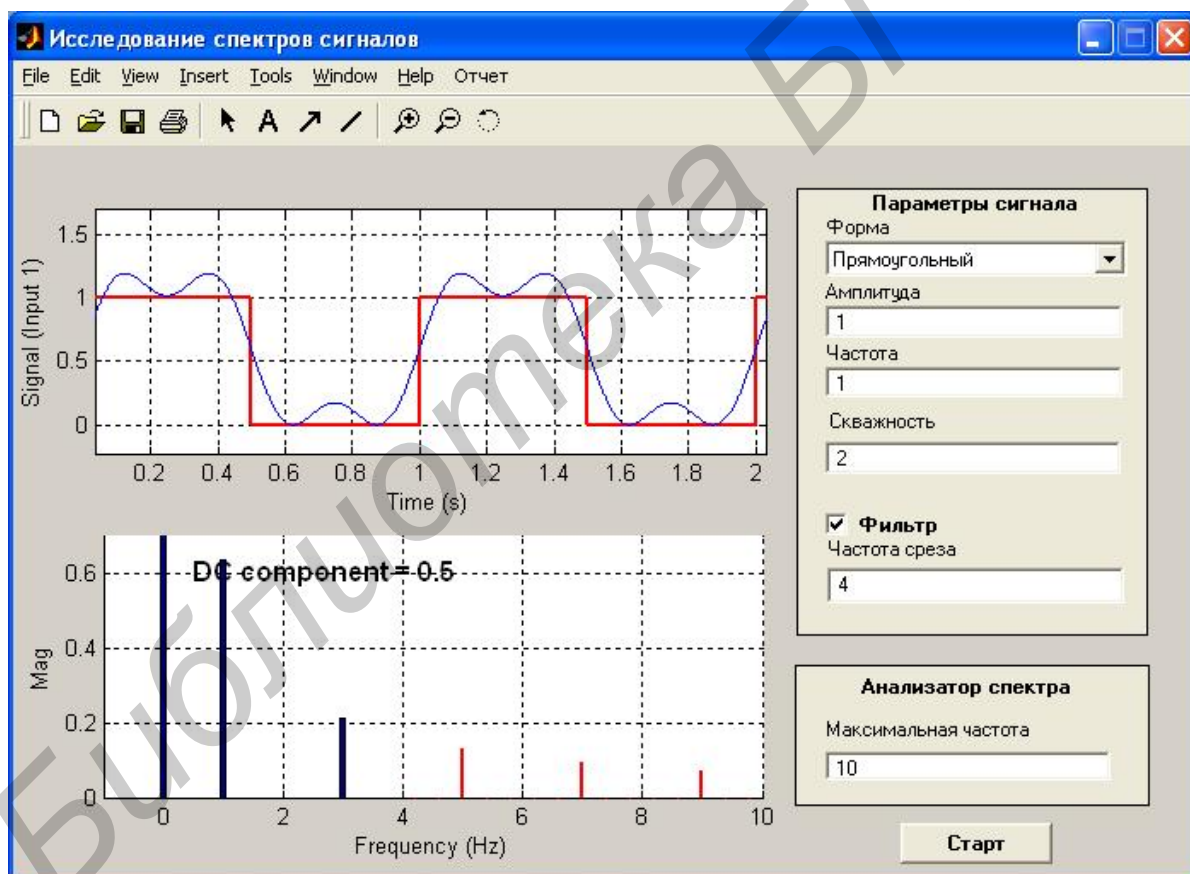


Рисунок 1.7 – Окно для исследования спектров

Установка позволяет исследовать спектры сигналов различных форм (прямоугольной, треугольной, пилообразной, трапецидальной, косинусоидальной, колоколообразной). Меню «Форма» (см. рисунок 1.7) служит для выбора формы сигнала и осуществляет переключение ключей SWM1 – SWM6 ус-

тановки для изучения спектров (рисунок 1.8). В результате этого к входам осциллографа (scope) и анализатора спектра (spectr) оказывается подключенным один из генераторов.

Поля «Амплитуда», «Частота» и «Скважность» (см. рисунок 1.7) предназначены для настройки параметров соответствующих генераторов.

В установке предусмотрена возможность анализа формы и спектра прямоугольных импульсов после прохождения через фильтр нижних частот. Для подключения фильтра необходимо в соответствующем поле (см. рисунок 1.7) пометить галочкой поле «Фильтр» и установить частоту среза фильтра. Выполнение этих операций осуществит управление ключами SWM10 и SWMF при подключении генератора S7 к осциллографу и анализатору спектра (см. рисунок 1.8). Максимальная частота анализатора выбирается такой, чтобы на экране анализатора отображалось 2 – 4 лепестка спектра.

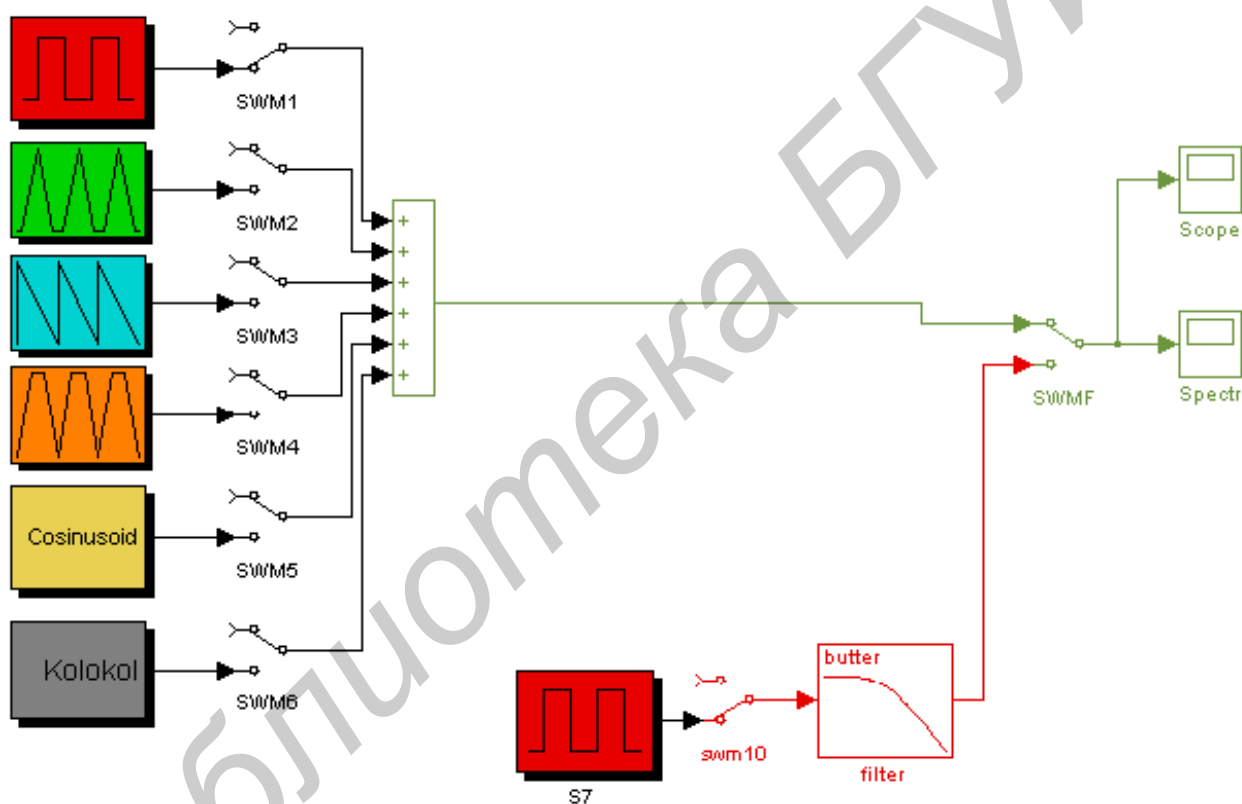


Рисунок 1.8 – Установка для изучения спектров

При выборе пункта главного меню «Исследование помех» будет открыто окно, создающее интерфейс к установкам исследования методов борьбы с помехами (рисунок 1.9).

Выбирая пункт меню «Метод», мы выбираем один из трех доступных методов борьбы с помехами: метод ограничения снизу, метод фильтрации, метод ШОУ. Для каждого метода борьбы с помехами реализована установка, которую можно выбирать с помощью меню для проведения конкретного эксперимента.

Поля «Амплитуда», «Частота», «Скважность» позволяют настроить генераторы прямоугольных импульсов для сигнала и помехи.

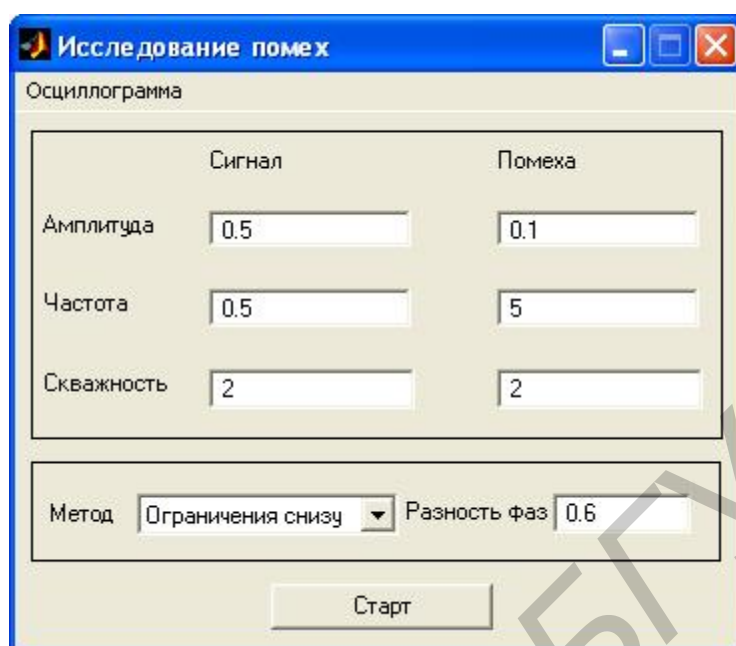


Рисунок 1.9 – Окно для исследования помех

Для обоих генераторов устанавливается смещение фазы сигнала. Установки для борьбы с помехами представлены на рисунках 1.10 – 1.12.

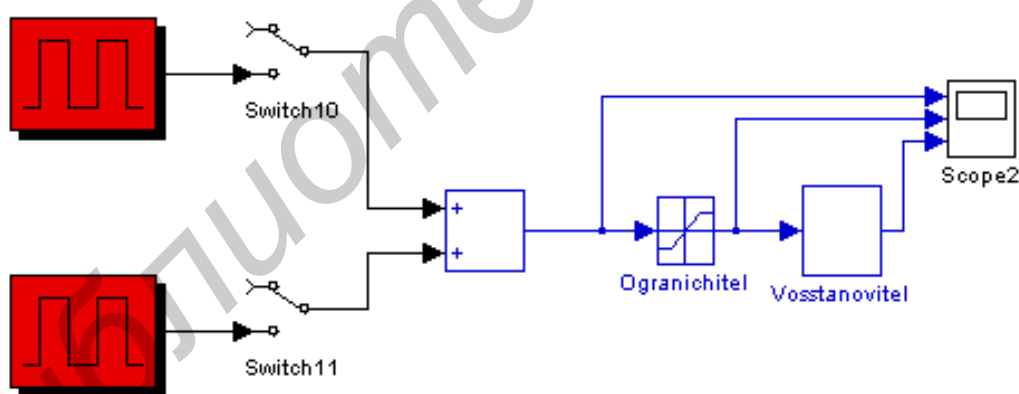


Рисунок 1.10 – Борьба с помехами: метод ограничения снизу

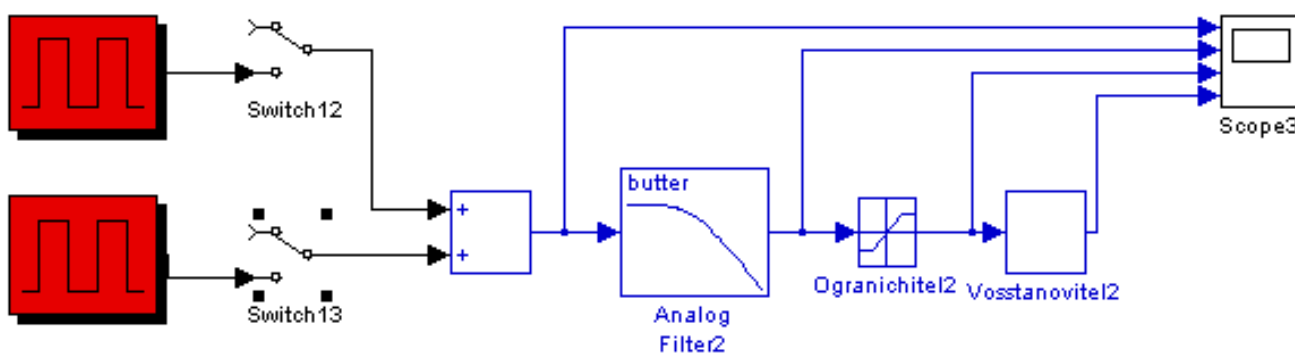


Рисунок 1.11 – Борьба с помехами: метод фильтрации

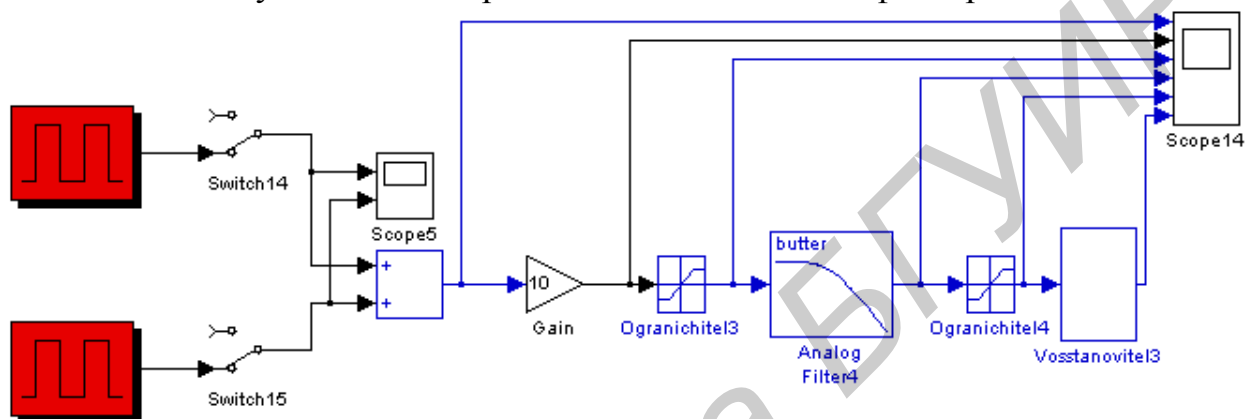


Рисунок 1.12 – Борьба с помехами: метод ШОУ

Во время работы с программой имеется возможность автоматически создавать отчет с включенными данными из проделанных опытов. Для этого в окне пользовательского интерфейса (см. рисунок 1.9) предусмотрена кнопка «Осциллограмма». При нажатии кнопки «Отчет» (см. рисунок 1.7) в конечный документ добавляется скриншот пользовательского интерфейса с введенными данными, вид сигнала и его спектр, а также значения амплитуд и частот гармонических составляющих спектра.

Файл отчета хранится в папке «D:\Work\Спектры» под именем «Спектры.doc». Сформированный отчет будет сохранен только до следующего запуска макета, поэтому по завершении работы его необходимо переместить на иной носитель информации.

1.3 Домашнее задание

1.3.1 Изучить теоретическую часть и описание лабораторной установки по данному методическому пособию и литературе [1].

1.3.2 Рассчитать спектры сигналов для первых десяти гармонических составляющих, где амплитуда и частота сигнала выбирается в соответствии с вариантом, а скважность указана в пятом столбце таблицы 1.1.

1.3.3 Ознакомиться с методикой расчета вероятности искажения элементарного сигнала; коэффициента, характеризующего потенциальную помехо-

устойчивость; мощности сигнала P_c и помехи P_{Π} ; коэффициентов a_0 , a_k и b_k для двухполярных импульсов.

1.4 Порядок выполнения работы

1.4.1 Снять спектры и осциллограммы сигналов, используя схему MATLAB для амплитуды, частоты и скважностей, указанных в вашем варианте (см. таблицу 1.1). Снять спектр и осциллограмму прямоугольных импульсов. По желанию можно исследовать спектры сигналов других форм. Для этого:

а) в окне, изображенном на рисунке 1.7, выберите генератор колебаний нужного вида с помощью меню «Форма»;

б) настройте параметры колебаний. Для этого укажите в соответствующих полях амплитуду, частоту и скважность сигнала. Максимальную частоту анализатора спектра (см. рисунок 1.7) установите такую, чтобы на экране анализатора отображалось 2 – 4 лепестка спектра. Затем нажмите кнопку «Старт»;

в) после нажатия кнопки «Старт» автоматически станет активным окно, содержащее схему Simulink. После завершения работы схемы автоматически появится окно программы (см. рисунок 1.7). В левой части окна будет отображена осциллограмма сигнала (сверху) и спектр сигнала (снизу).

Для того чтобы изменить масштаб просмотра осциллограммы или спектра, нужно выбрать в меню View пункт figure toolbar. В результате вверху окна добавится панель инструментов (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Пиктограммы масштабирования

Для увеличения масштаба необходимо щелкнуть по той части панели, которую вы хотите увеличить или просто выделить ее. Для уменьшения необходимо щелкнуть по диаграмме, которую нужно уменьшить.

Если вам нужно скопировать осциллограмму и спектр в отчет, нажмите на кнопку «Отчет».

1.4.2 Определить для трех спектров (один рассчитанный и два снятых с установки), сколько процентов от мощности сигнала занимает мощность первого лепестка спектра сигнала.

1.4.3 Снять осциллограммы и спектры видеоимпульсов (с параметрами, указанными в варианте), пропущенных через ФНЧ с частотами пропускания, включающими один, два и три лепестка спектра. Спектр снимается для двух разных скважностей, указанных в четвертом столбце таблицы 1.1.

Для этого нужно установить форму и параметры сигнала, как в пункте 1.4.1, в соответствующем поле задать частоту среза фильтра (в герцах), пометить галочкой поле «Фильтр» и нажать «Старт». Спектр снимается так же, как и для пункта 1.4.1.

1.4.4 Получить значение коэффициента α для случаев, когда элементарные сигналы передаются видеоимпульсами с пассивной паузой, т. е. $A_1(t) = U_c$, а $A_2(t) = 0$, и когда передача осуществляется двухполярным сигналом, т. е. $A_1(t) = +U_c$, а $A_2(t) = -U_c$.

1.4.5 Определить вероятность искажения элементарного сигнала для случаев, когда передача сообщений осуществляется видеоимпульсами, указанными в пункте 1.4.3 согласно заданному варианту для исследования. Отношение сигнал/шум задаются преподавателем.

1.4.6 Рассчитать мощности сигнала P_c и помехи P_n , а также P_0 для своего варианта.

1.4.7 Рассчитать коэффициенты a_0 , a_k и b_k для двухполярных импульсов, если их начало совпадает с началом осей координат.

1.4.8 В установке реализовано три метода борьбы с помехами. Определить, какие методы подходят для борьбы с помехой, какие нет. Частоты и скважности сигнала и помехи, а также опережение фазы сигнала относительно помехи берутся соответственно личному варианту в таблице 1.2. Амплитуда сигнала – 0,5 В. Выбрать наиболее простой метод борьбы с помехами, обеспечивающий подавление помехи при различных амплитудах помехи. Провести эксперимент для трех амплитуд помехи: 0.2; 0.4; 1.5. Осциллограммы наиболее простого метода для каждого уровня помех включить в отчет. Для включения осциллограмм в отчет следует нажать кнопку «Осциллограмма» (см рисунок 1.9).

1.5 Варианты заданий

а) для пунктов 1.4.1 – 1.4.7 и 1.3.2

Таблица 1.1 – Варианты заданий

№ варианта	Частота, Гц	Амплитуда, В	Скважности (для пунктов 1.4.1 – 1.4.7)	Скважность (для пунктов 1.3.2 и 1.4.2)
1	1	0.5	3; 5	2
2	1	1	3; 5	4
3	1	2	3; 5	2
4	1	0.5	2; 4	3
5	1	1	2; 4	5
6	1	2	2; 4	3
7	2	0.5	2; 4	5
8	2	1	2; 4	3
9	2	2	2; 4	5
10	2	0.5	3; 5	4
11	2	1	3; 5	2

12	2	2	3; 5	4
13	5	0.5	3; 5	2
14	5	1	3; 5	4
15	5	2	3; 5	2
16	5	0.5	2; 4	3
17	5	1	2; 4	5
18	5	2	2; 4	3
19	4	0.5	3; 5	4

Продолжение таблицы 1.1

№ варианта	Частота, Гц	Амплитуда, В	Скважности (для пунктов 1.4.1 – 1.4.7)	Скважность (для пунктов 1.3.2 и 1.4.2)
20	4	1	3; 5	2
21	4	2	3; 5	4
22	4	0.5	5; 3	2
23	4	1	4; 2	5
24	4	2	4; 2	3
25	10	0.5	4; 2	5
26	10	1	3; 5	4

б) параметры помех для пункта 1.4.8

Таблица 1.2 – Параметры помех

№ варианта	Частота помехи, Гц	Скважность помехи	Частота сигнала	Скважность сигнала	Опережение фазы сигнала, С
1	0.2	2.5	0.2	2.5	2.5
2	0.2	5	0.2	2	2
3	0.2	6.666	0.4	1.666	0.8
4	0.2	5	0.4	2.5	1.25
5	0.2	10	0.6	2	0.8
6	0.2	6.666	0.6	2.5	0.9
7	0.5	2.5	0.5	2.5	1
8	0.5	5	0.5	2	0.8
9	0.5	6.666	1	1.666	0.64

10	0.5	5	1	2.5	1
11	0.5	10	1.5	2	0.64
12	0.5	6.666	1.5	2.5	0.72
13	1	2.5	1	2.5	0.5
14	1	5	1	2	0.4
15	1	6.666	2	1.666	0.32
16	1	5	2	2.5	0.5
17	1	10	3	2	0.32
18	1	6.666	3	2.5	0.36

1.6 Содержание отчета

1.6.1 Рассчитанный спектр сигнала из пункта 1.3.2 в виде рисунка и таблицы 1.3.

Таблица 1.3 – Рассчитанный спектр сигнала

Вид импульсов и их параметры (частота, амплитуда, скважность)	
Частота	Значение амплитуды на частоте
...	...

1.6.2 Значение коэффициента α (пункт 1.4.4), вероятность искажения элементарного сигнала (пункт 1.4.5), расчеты мощностей P_c , P_n , P_0 и коэффициентов a_0 , a_k , b_k (пункты 1.4.6, 1.4.7).

1.6.3 Осциллограммы и спектры сигналов из пункта 1.4.1 порядка выполнения работы.

1.6.4 Расчеты из пунктов 1.3.2 и 1.4.2.

1.6.5 Осциллограммы и спектры сигналов из пункта 1.4.3.

1.6.6 Результаты исследования, полученные при выполнении пункта 1.4.8, представьте в виде осциллограмм наиболее простого метода борьбы с помехами для каждого уровня помех и таблицы 1.4, где A_n , A_c – амплитуды помехи и сигнала соответственно.

Таблица 1.4 – Методы борьбы с помехами и амплитуды помехи и сигнала

Амплитуды помехи и сигнала	Методы борьбы с помехами		
	Ограничения снизу	Фильтрации	ШОУ
$A_n < A_c$	+	–	–
$A_n \approx A_c$	...	...	...
$A_n > A_c$	...	...	...

Ячейки таблицы заполняются знаками «+» или «-». Знак «+» – помеха устраняется, «-» – помеха не устраняется.

1.6.7 Выводы.

1.7 Контрольные вопросы

- 1 Чем определяется спектр периодического сигнала?
- 2 Из каких соображений определяется практическая ширина спектра сигнала?
- 3 Чем отличается спектр одиночных импульсов от спектра их периодической последовательности?
- 4 От чего зависит воспроизведение формы видеоимпульса?
- 5 Чем определяется время нарастания переднего фронта прямоугольного импульса при прохождении его через ФНЧ?
- 6 Какие методы борьбы с импульсными помехами существуют и где они применяются?
- 7 Приведите выражение для расчета амплитуды постоянной и гармонических составляющих.
- 8 Приведите спектр меандра, имеющего двухполярные импульсы с началом положительного импульса, совпадающего с началом координат.

Литература

- 1 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах» В 4 ч. Ч. 1 : Сообщения и сигналы / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2000. – 128 с.
- 2 Рид, Р. Основы теории передачи информации / Р. Рид ; пер. с англ. – Издат. дом «Вильямс», 2005. – 320 с.
- 3 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах» и «Информационные технологии и управление в технических системах». В 4 ч. Ч. 3 : Линии связи и помехоустойчивость информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2005. – 132 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

НЕПРЕРЫВНЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ

Цель работы: изучение видов модуляции и их основных параметров во временной и частотной областях.

2.1 Теоретическая часть

2.1.1 Общие сведения. Основным назначением модуляции является преобразование или перенос сигнала из области низких частот в область более высоких частот для передачи с помощью радиосвязи или многоканальных кабельных линий. Последние могут иметь металлическое или оптоволоконное исполнение.

Сигнал несущей частоты – в предположении, что он синусоидальный, – может быть представлен в виде гармонического колебания:

$$U_H(t) = U_{\omega_1} \cos(\omega_1 t + \varphi_0) = U_{\omega_1} \cos(2\pi F_1 t + \varphi_0) = U_{\omega_1} \cos \Theta(t), \quad (2.1)$$

где U_{ω_1} – амплитуда носителя;

ω_1 – угловая частота;

φ_0 – произвольная фаза;

F_1 – линейная частота;

$\Theta(t) = 2\pi F_1 t + \varphi_0$ – полный угол.

При амплитудной модуляции (АМ) амплитуда U_{ω_1} модулируется (изменяется) в соответствии с передаваемым низкочастотным (модулирующим) сообщением (сигналом).

Угловая функция $\Theta(t)$ так же, как и амплитуда несущей частоты, может быть промодулирована – этот вид модуляции называется угловой модуляцией. Угловая модуляция может быть реализована двумя путями: с помощью фазовой модуляции (ФМ), когда фаза φ_0 изменяется в соответствии с амплитудой модулирующего сигнала, и частотной модуляции (ЧМ), когда частота несущей изменяется пропорционально амплитуде модулирующего сообщения.

2.1.2 АМ-, ЧМ- и ФМ-сигналы. Подробно каждый вид модуляции для случая, когда модулирующий сигнал (сообщение) представляет собой гармонический сигнал, рассмотрен в [1, с. 22 – 35], а технические средства модуляции и демодуляции рассмотрены в [1, с. 67 – 102].

2.1.3 Помехоустойчивость. Важнейшей характеристикой систем передачи непрерывных сообщений является помехоустойчивость, которая во многом зависит от видов модуляции. Помехоустойчивость АМ-, ЧМ- и ФМ-сигналов подробно рассмотрена в [2, с. 108 – 112], а методы повышения помехоустойчивости передачи непрерывных сообщений – в [2, с. 123 – 125].

2.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой набор элементов и блоков Simulink, позволяющих изучить и исследовать спектры непрерывных видов модуляции.

2.2.1 Регистрация пользователя. Чтобы оказаться в среде MATLAB необходимо запустить файл «Непрерывная модуляция». Перед вами появляется диалоговое окно (рисунок 2.1), в которое необходимо внести данные о пользователе: фамилию, имя и отчество, номер группы и номер варианта.

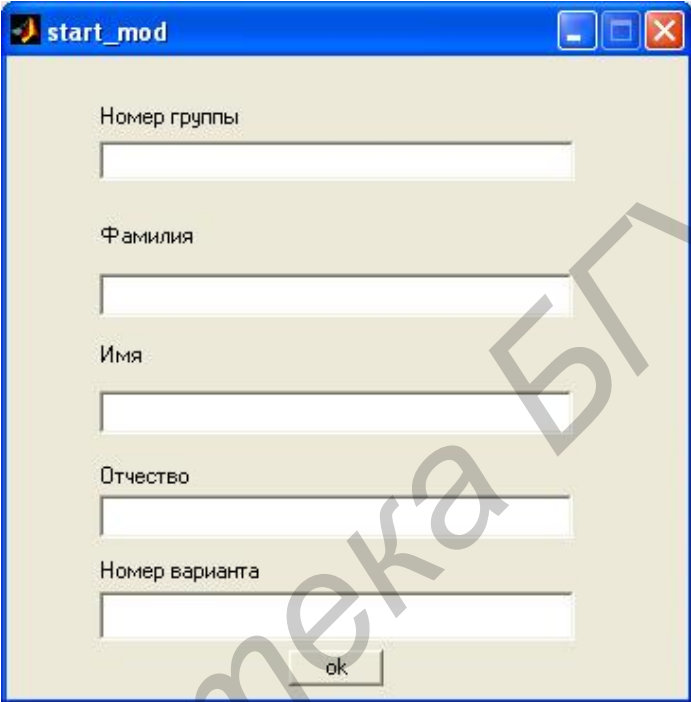
The image shows a Windows-style dialog box titled 'start_mod'. It has a blue title bar with standard minimize, maximize, and close buttons. The main area is light beige and contains five text input fields stacked vertically. The labels for these fields are 'Номер группы', 'Фамилия', 'Имя', 'Отчество', and 'Номер варианта'. Below the last field is an 'ok' button. A large, semi-transparent watermark 'Библиотека БГУИР' is visible across the right side of the dialog.

Рисунок 2.1 – Окно регистрации

2.2.2 Выбор вида модуляции. После ввода данных и нажатия клавиши «ok» на экране монитора появится «Меню выбора вида модуляции» (рисунок 2.2). В данной работе можно исследовать следующие виды модуляции: амплитудную, частотную, фазовую и амплитудную с подавлением несущей.

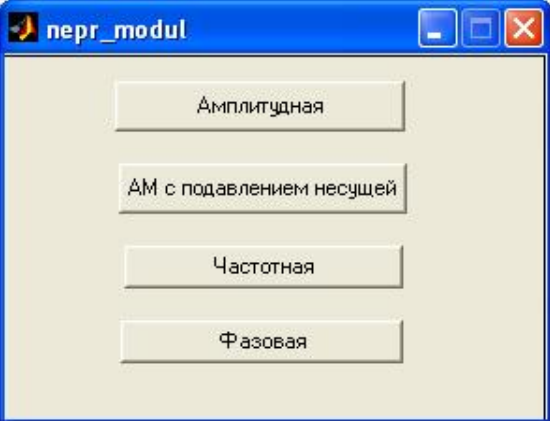
The image shows a Windows-style dialog box titled 'nepr_modul'. It has a blue title bar with standard minimize, maximize, and close buttons. The main area is light beige and contains four buttons stacked vertically. The labels on the buttons are 'Амплитудная', 'АМ с подавлением несущей', 'Частотная', and 'Фазовая'. A large, semi-transparent watermark 'Библиотека БГУИР' is visible across the left side of the dialog.

Рисунок 2.2 – Меню выбора вида модуляции

Выбор вида модуляции осуществляется нажатием соответствующей клавиши, после чего открывается окно «Рабочая область макета» (рисунок 2.3).

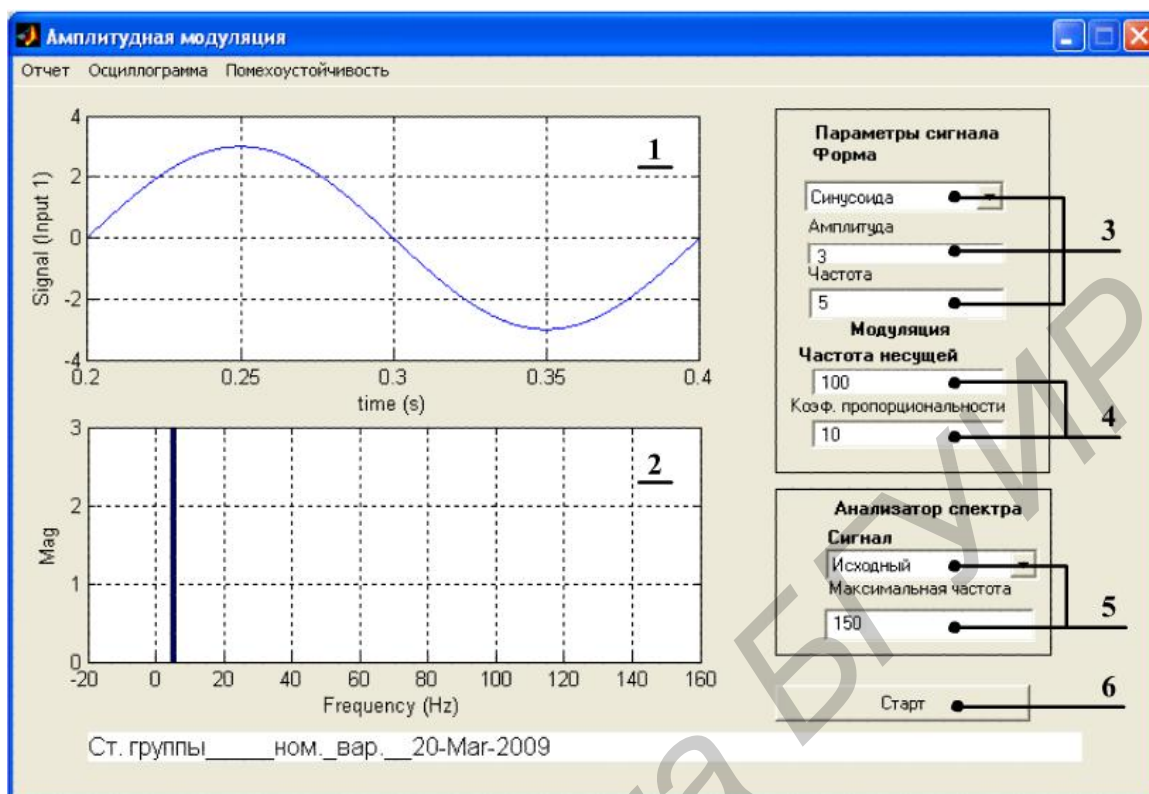


Рисунок 2.3 – Рабочая область макета

2.2.3 Рабочая область макета. Ниже приводится назначение полей, выделенных на рисунке 2.3:

Поле 1 – выводится осциллограмма указанного в поле 5 сигнала.

Поле 2 – выводится спектр сигнала, изображенного на поле 1.

Поле 3 – предназначено для ввода параметров исходного сигнала: форма, амплитуда и частота сообщения.

Поле 4 – параметры несущего сигнала: частота и коэффициент пропорциональности.

Поле 5 – выбирается вид сигнала, который будет отображаться на поле 1 (исходный либо промодулированный). Максимальная частота анализатора спектра выбирается такой, чтобы можно было проанализировать практическую полосу частот, необходимую для передачи данного сигнала.

6 – кнопка, предназначенная для запуска соответствующего модулятора.

После установки исходных данных в соответствии с вариантом нажимаете кнопку «Старт»: перед вами появляются два окна. Первое – осциллограф, на котором в зависимости от модуляции в соответствии с подключенными к его входам сигналами выводится необходимое количество осциллограмм (рисунок 2.4) (для АМ – три: исходный сигнал (1), промодулированный (2) и демодулированный (3)); второе – структурная схема (рисунок 2.7), по которой MATLAB производит расчет модуляции, осуществляемой по закону

$$U_{AM}(t) = (K + C(t))\cos(\omega_1 t + \varphi). \quad (2.2)$$

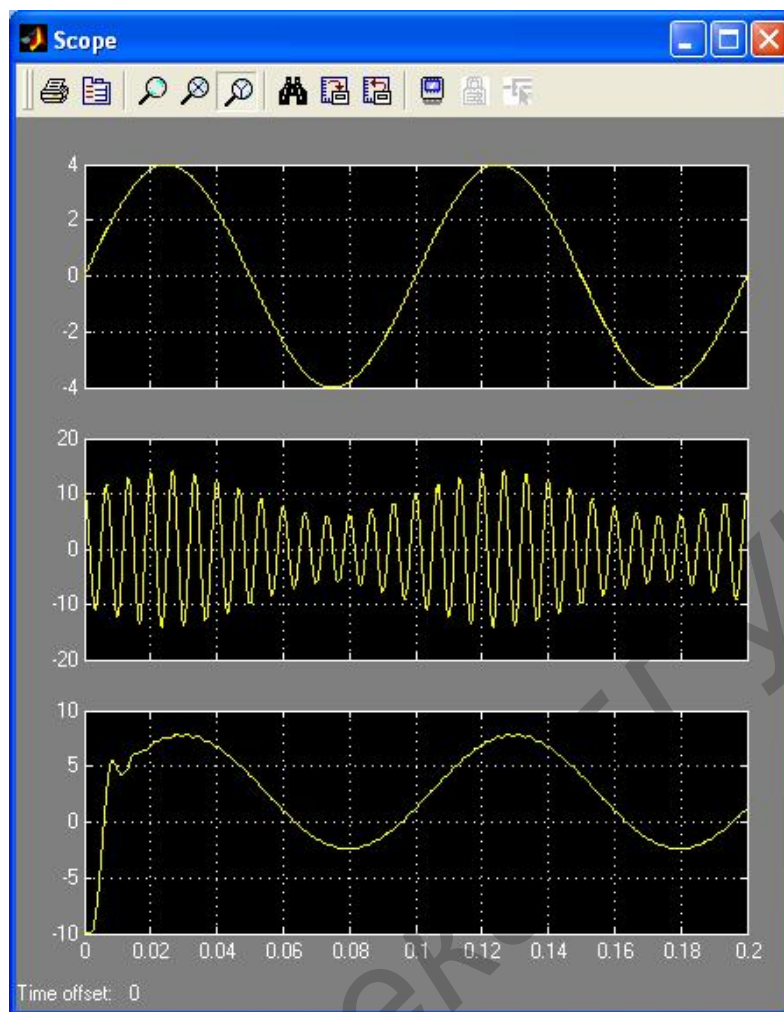


Рисунок 2.4 – Осциллограммы

После того как закончится эмуляция работы схемы, автоматически откроется окно (см. рисунок 2.3), на котором будут отображены осциллограммы и спектры исследуемых сигналов.

Данные об амплитудах и частотах выводятся в окно «Command Window».

При выполнении лабораторной работы для переключения между окнами используйте «Панель задач», на которой отображены следующие окна (рисунок 2.5):

1 – Command Window, основное окно, в нем отображаются амплитуды и частоты спектра.

2 – окно, изображенное на рисунке 2.2, – меню выбора вида модуляции.

3 – окно, изображенное на рисунке 2.3, – рабочая область макета.

4 – осциллограмма (см. рисунок 2.4).

5 – структурная схема макета (см. рисунок 2.7).



Рисунок 2.5 – Панель задач

На панели инструментов есть меню «Опции». После выставления галочки напротив поля «Звук» можно на слух воспринимать произведенную модуляцию.

Автоматическая генерация отчета. Во время работы с программой возможно автоматически создавать отчет с включенными данными из проделанных опытов. Для этого в окне пользовательского интерфейса (см. рисунок 2.3) предусмотрены две кнопки: «Отчет» и «Осциллограмма». При нажатии кнопки «Отчет» в конечный документ добавляется скриншот пользовательского интерфейса с введенными данными, а также вид сигнала и его спектр.

Файл отчета хранится в папке «D:\Work\» под именем «непрерывная_модуляция.doc». Сформированный отчет будет сохранен только до следующего запуска макета, поэтому по завершении работы его необходимо переместить на иной носитель информации.

В отчет необходимо добавлять только участки осциллограммы, отображающие особенности исследуемого вида модуляции. Для этого на панели управления осциллографа (см. рисунок 2.4) предусмотрены кнопки управления (рисунок 2.6):

- 1 – увеличение выделенной области;
- 2 – масштабирование по оси X ;
- 3 – масштабирование по оси Y ;
- 4 – автомасштабирование по содержимому;
- 5 – сохранение текущих настроек осей;
- 6 – возврат к предыдущим настройкам осей.

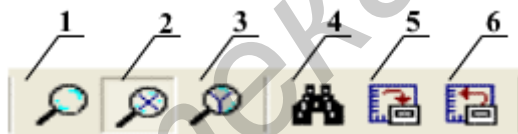


Рисунок 2.6 – Кнопки управления

Для внесения результатов проделанных опытов в отчет после установки масштаба нажать кнопку «Осциллограмма» в окне «Рабочая область макета» (см. рисунок 2.3).

Для того чтобы кнопки «Отчет» и «Осциллограмма» снова стали активными, следует нажать кнопку «Старт».

2.2.4 Структурная схема макета. На рисунках 2.7, 2.10 – 2.12 приведены структурные схемы макетов для непрерывных видов модуляции. Структурные схемы включают следующие блоки:

Signal (сигнал) – исходный сигнал (сообщение).

Zero (дискретизация) – элемент дискретизации, необходимый для пересчета аналогового сигнала в дискретный (данное преобразование необходимо MATLAB, в реальных системах этого элемента нет).

Score (осциллограф) – многолучевой осциллограф, который в зависимости от вида модуляции позволяет выводить на экран от 2 до 5 осциллограмм.

Pgen (генератор) – генератор опорных импульсов.

Ammod (модулятор) – элемент, производящий соответствующую модуляцию сигнала.

Amdemod (демодулятор) – элемент, производящий соответствующую демодуляцию сигнала.

Рассмотрим работу схемы на примере схемы АМ (амплитудной модуляции), представленной на рисунке 2.7.

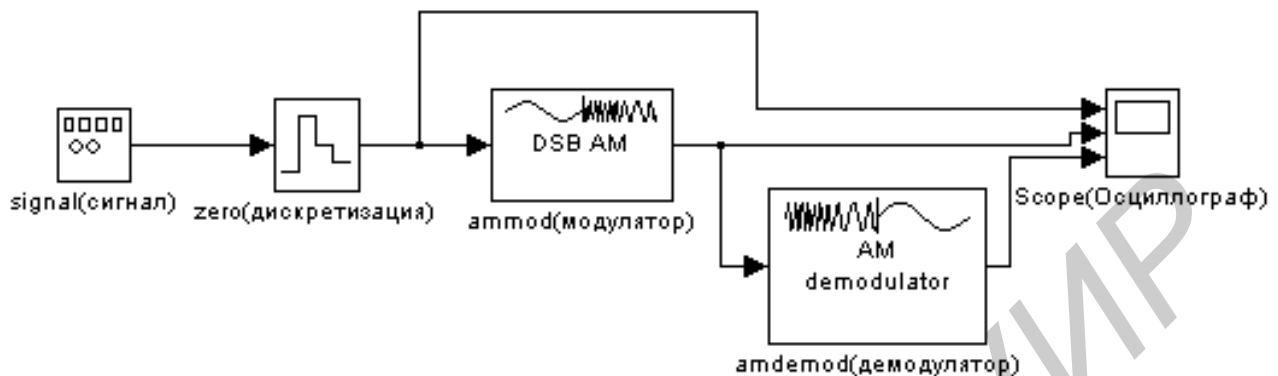


Рисунок 2.7 – Структурная схема амплитудной модуляции

Как видно из рисунка, на осциллограф подается три сигнала: исходный, промодулированный и демодулированный. Первый сигнал поступает напрямую. Второй – через преобразования, осуществляемые элементами схемы: исходный сигнал сначала подается на элемент дискретизации, где он преобразуется в удобную для внутрипрограммной обработки форму, затем этот сигнал поступает на модулятор «ammod», сигнал с выхода модулятора поступает на вход демодулятора «amdemod».

Структурная схема модулятора приведена на рисунке 2.8.

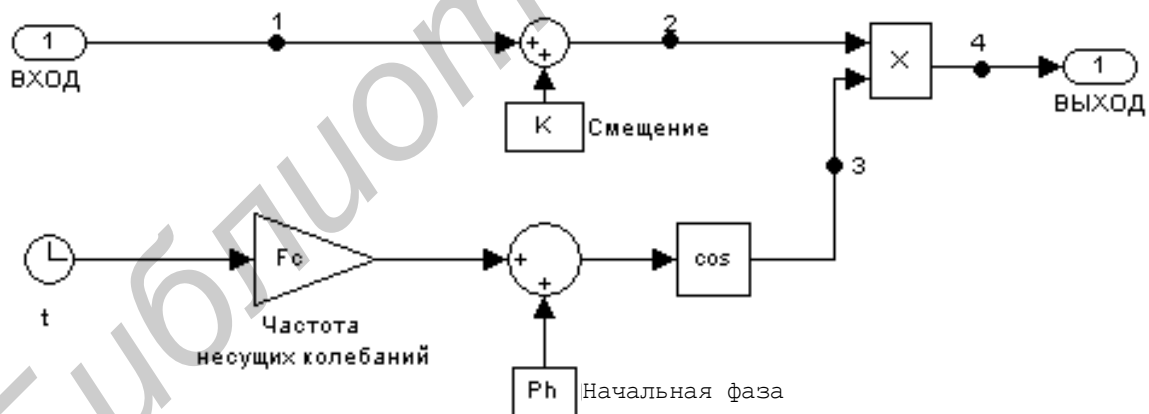


Рисунок 2.8 – Структурная схема модулятора

Полезный сигнал (1) предварительно смещается (2) и поступает на блок умножения, куда также подается сигнал с выхода генератора несущих колебаний (3), который состоит из следующих элементов: таймер, усилитель, блок косинусов и источник постоянного сигнала: таким образом реализуется выражение (2.2). Усилитель служит для того, чтобы задать частоту несущих колебаний; источник постоянного сигнала позволяет определить начальную фазу. Для выделения полезного сообщения АМ-сигнал (1) берется по модулю (2) и поступает на вход ФНЧ.

Затем полученное сообщение поступает на вход блока сложения (3), где из него вычитается смещение, добавленное на этапе модуляции.

Структурная схема демодулятора АМ-сигнала представлена на рисунке 2.9.

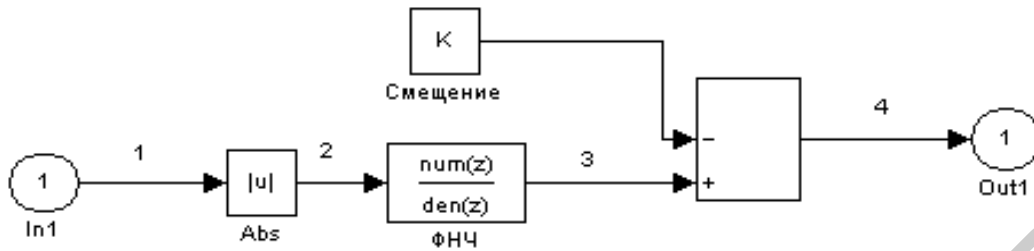


Рисунок 2.9 – Структурная схема демодулятора

Работу блоков схем и их реализацию для других видов модуляции (см. рисунки 2.10 – 2.12) можно просмотреть в пакете Simulink; для этого нужно выбрать в меню «View» пункт «Model browser options», поставить галочки напротив «Model browser», «Show library link», «Show masked subsystem» и в появившемся слева окне выбрать интересующий блок.

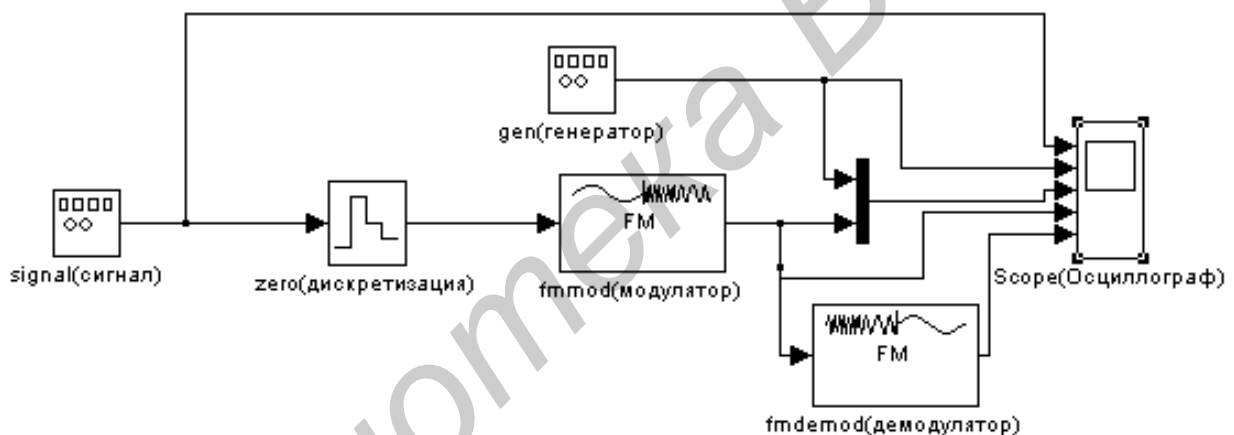


Рисунок 2.10 – Структурная схема частотной модуляции

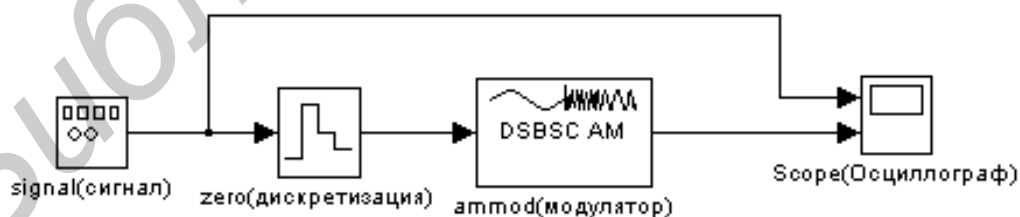


Рисунок 2.11 – Структурная схема амплитудной модуляции с подавлением несущей

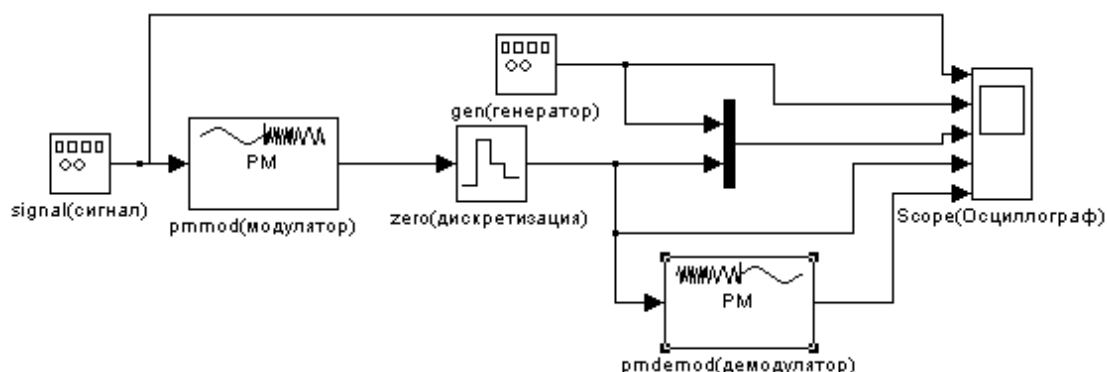


Рисунок 2.12 – Структурная схема фазовой модуляции

2.3 Домашнее задание

2.3.1 Изучить теоретические основы амплитудной, частотной и фазовой модуляции по [1, с. 22 – 35].

2.3.2 Изучить принцип работы модуляторов и демодуляторов непрерывных видов модуляции по [1, с. 67 – 102].

2.3.3 Уяснить принцип расчета помехоустойчивости АМ-, ЧМ- и ФМ-сигналов по [2, с. 108 – 112].

2.3.4 Ознакомиться с техническим заданием на проведение эксперимента согласно индивидуальному варианту.

2.3.5 Изучить описание лабораторной установки.

2.3.6 Наметить пути проведения эксперимента по снятию частотных и временных параметров модулированных сигналов.

2.4 Порядок выполнения работы

2.4.1 Укажите свои данные в соответствии с пунктом 2.2.1.

2.4.2 Выберите вид модуляции и установите исходные данные в соответствии с вашим вариантом.

2.4.3 Нажмите кнопку «Старт» и после завершения эмуляции работы схемы установите масштаб, удобный для просмотра осциллограммы и пояснения процесса модуляции.

2.4.4 Для внесения результатов опыта в отчет нажмите кнопки «Отчет» и «Осциллограмма» (см. рисунок 2.3).

2.4.5 По осциллограмме пункта 3 рассчитайте девиацию частоты и индекс модуляции (коэффициент глубины АМ).

2.4.6 Запишите выражение для АМ, ЧМ и ФМ с конкретными параметрами, полученными в результате проведения эксперимента.

2.4.7 Рассчитайте среднеквадратичную приведенную погрешность для АМ, ЧМ и ФМ (отношение сигнал/шум задается преподавателем).

2.5 Содержание отчета

2.5.1 Осциллограмма модулирующего и модулированного сигнала.

2.5.2 Спектры исследуемых сигналов.

2.5.3 Расчет мощности, практической полосы частот, отношений $P_{\text{нес}} / P_{\text{полной}}$, $P_{2 \text{бок}} / P_{\text{полной}}$, $P_{\text{ОАМ}} / P_{\text{полной}}$.

2.5.4 Расчет девиации частоты, индекса модуляции (коэффициента глубины АМ).

2.5.5 Выражение для АМ, ЧМ и ФМ с конкретными параметрами, полученными в результате проведения эксперимента.

2.5.6 Расчет среднеквадратичной приведенной погрешности для АМ, ЧМ и ФМ.

2.5.7 Выводы по пунктам 2.5.1 – 2.5.4. Сравнение различных видов модуляции между собой.

2.6 Варианты заданий

Таблица 2.1 – Амплитудная модуляция

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	2	3	4	5	3	2	5	7	2	8	3	4	1	6
Частота сигнала, F_c	5	1	2	10	20	10	15	12	25	50	100	16	50	18	6
Частота несущей, F_n	25	10	40	150	80	150	60	60	100	500	1500	160	250	180	120
Смещение, K	5	2	2	10	20	10	15	12	25	50	100	16	50	18	60

Таблица 2.2 – Частотная модуляция

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	2	3	4	5	2	8	1	10	15	10	8	6	3	1
Частота сигнала, F_c	5	5	8	15	50	50	200	25	100	160	50	80	100	50	200
Частота несущей, F_n	50	40	100	100	400	500	1000	200	800	1600	500	400	400	1000	800
Коэффициент пропорциональности, K_c	30	9	16	20	40	75	50	20	50	100	25	20	20	25	50

Таблица 2.3 – Фазовая модуляция

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	2	3	4	5	2	8	7	10	15	5	8	2	3	1
Частота сигнала, F_c	5	1	2	10	20	100	200	250	100	400	800	80	100	500	20
Частота несущей, F_n	50	20	50	400	200	500	2000	1000	400	2000	4000	1600	1000	2500	200
Начальная фаза	$\pi/6$	$\pi/9$	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/12$	$\pi/4$	$\pi/9$	$\pi/9$	$\pi/12$	$\pi/16$	$\pi/6$	$\pi/9$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/3$

Таблица 2.4 – Амплитудная модуляция с подавлением несущей

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	2	3	4	5	3	2	5	7	2	8	3	4	1	6
Частота сигнала, F_c	5	1	2	10	20	10	15	15	25	50	100	16	50	18	10
Частота несущей, F_H	25	10	40	150	80	150	60	60	100	500	1500	160	250	180	100
Начальная фаза	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/6$	$\pi/9$	$\pi/16$	$\pi/2$	$\pi/9$	$\pi/4$	$\pi/2$	$\pi/3$	$\pi/9$	$\pi/16$	$\pi/6$	$\pi/2$	$\pi/4$

2.7 Контрольные вопросы

1 Запишите выражение для однополосного АМ-сигнала при передаче верхней боковой составляющей.

2 Поясните принцип работы балансного модулятора.

3 Приведите аналитическое выражение и спектр сигнала на выходе нелинейного элемента амплитудного детектора.

4 Поясните принцип работы затворного модулятора.

5 Поясните принцип работы ЧМ-модулятора на базе реактивного полевого транзистора.

6 Приведите схему и поясните принцип работы частотного дискриминатора с двумя взаимно расстроенными контурами.

7 Поясните принцип работы фазового модулятора с реактивным транзистором.

8 Запишите выражение для коллекторных токов транзисторов фазового детектора и поясните принцип его работы.

9 Поясните, чем отличается демодуляция АМ-сигнала с использованием линейного участка ВАХ диода от демодуляции с использованием нелинейного участка.

10 Приведите структурную схему получения ОАМ-сигнала фазовым методом.

Литература

1 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах» В 4 ч. Ч. 1 : Сообщения и сигналы / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2000. – 128 с.

2 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах» и «Информационные технологии и управление в технических системах» В 4 ч. Ч. 3 : Линии связи и помехоустойчивость информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2005. – 132 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИМПУЛЬСНЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ

Цель работы: изучение видов модуляции импульсных носителей и их основных характеристик во временной и частотной областях.

3.1 Теоретическая часть

3.1.1 Общие сведения. При импульсных видах модуляции в качестве носителя используется, как правило, периодическая последовательность прямоугольных импульсов, которая описывается рядом Фурье в следующем виде:

$$U(t) = \frac{U\tau}{T_1} \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} 2 \frac{\sin\left(k\omega_1 \frac{\tau}{2}\right)}{k\omega_1 \frac{\tau}{2}} \cos k\omega_1 t \right). \quad (3.1)$$

Учитывая, что $\omega_1 = 2\pi/T_1$ и $T_1/\tau = Q$, выражение (3.1) представим в виде

$$U(t) = U \left(\frac{1}{Q} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \sin \frac{k\pi}{Q} \cos k\omega_1 t \right). \quad (3.2)$$

Как следует из выражений (3.1) и (3.2), изменяя модулирующим сообщением амплитуду, длительность импульса, период следования, а также время появления импульсов относительно тактовых точек, можно получать соответственно амплитудно-импульсную модуляцию (АИМ), широтно-импульсную (ШИМ), частотно-импульсную (ЧИМ) и фазоимпульсную (ФИМ).

3.1.2 Теоретические основы указанных выше импульсных видов модуляции рассмотрены в [1, с. 37 – 47].

3.1.3 Технические средства осуществления импульсных видов модуляции и демодуляции приведены в [1, с. 103 – 114].

3.1.4 Методика расчета помехоустойчивости АИМ, ШИМ и ФИМ сигналов приведена в [2, с. 112 – 116].

3.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой набор стандартных элементов и блоков Simulink, позволяющих изучить и исследовать спектры импульсных видов модуляции.

3.2.1 Регистрация пользователя. Для начала работы с макетом необходимо запустить файл «Импульсная модуляция». Процесс регистрации пользователя рассмотрен в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.1).

3.2.2 Выбор вида модуляции осуществляется аналогично рассмотренному в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.2), за исключением того, что в меню выбора вида модуляции (рисунок 3.1) будут представлены импульсные виды модуляции.

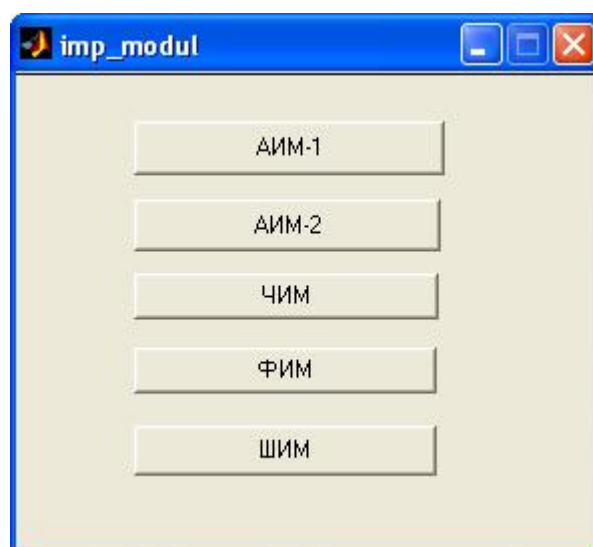


Рисунок 3.1 – Окно выбора вида модуляции

В дальнейшем работа установки осуществляется аналогично рассмотренной в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.3).

3.2.3 Структурная схема макета. На рисунках 3.2 – 3.6 приведены структурные схемы макетов для непрерывных видов модуляции. Структурные схемы включают блоки, рассмотренные в пункте 2.2.4 лабораторной работы №2.

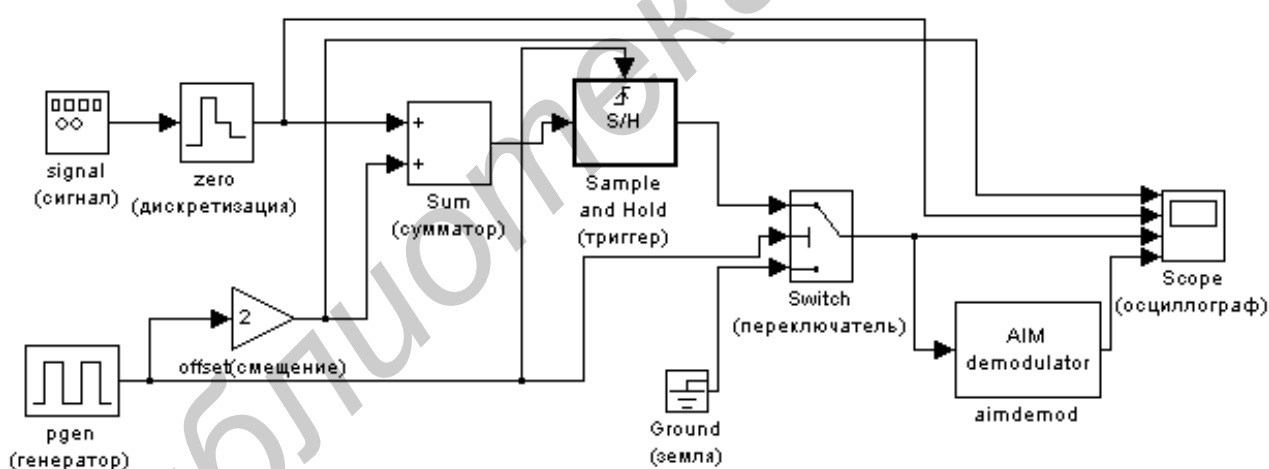


Рисунок 3.2 – Структурная схема ЧИМ

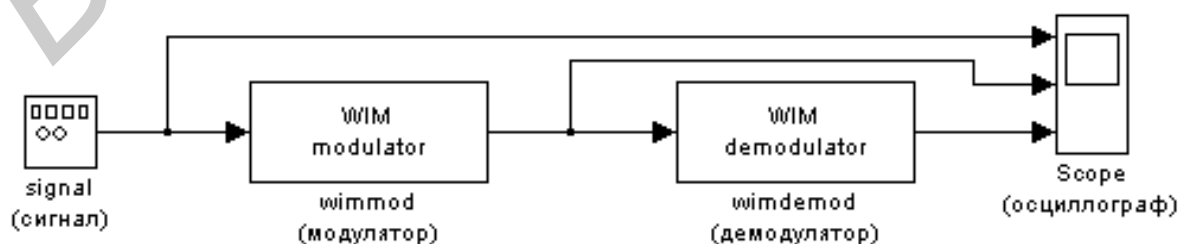


Рисунок 3.3 – Структурная схема ШИМ

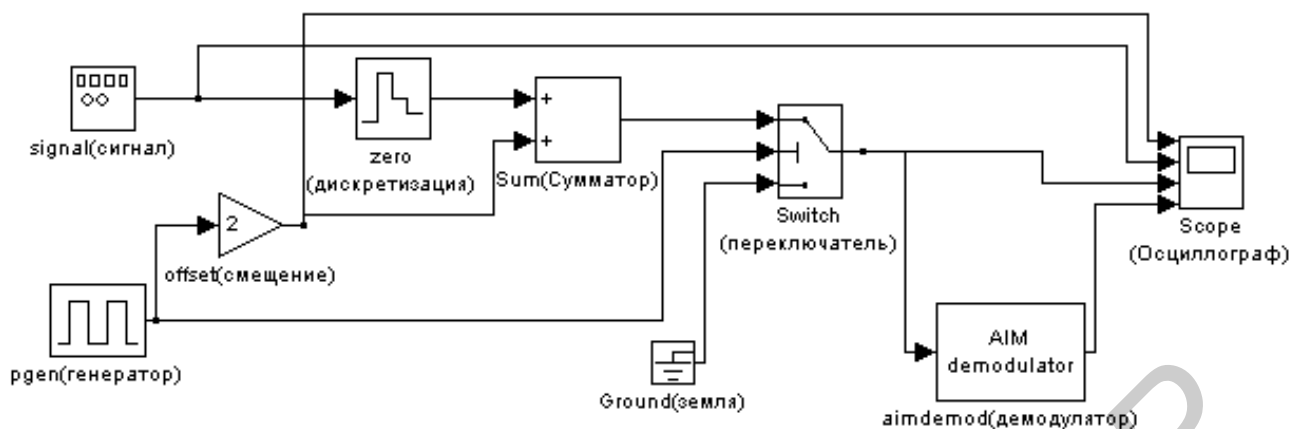


Рисунок 3.4 – Структурная схема АИМ-1

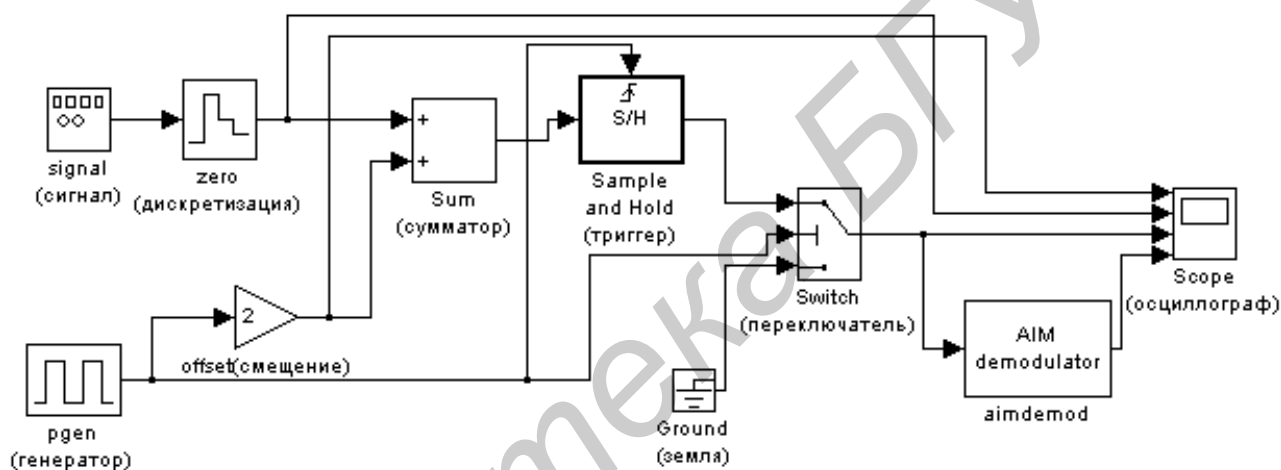


Рисунок 3.5 – Структурная схема АИМ-2

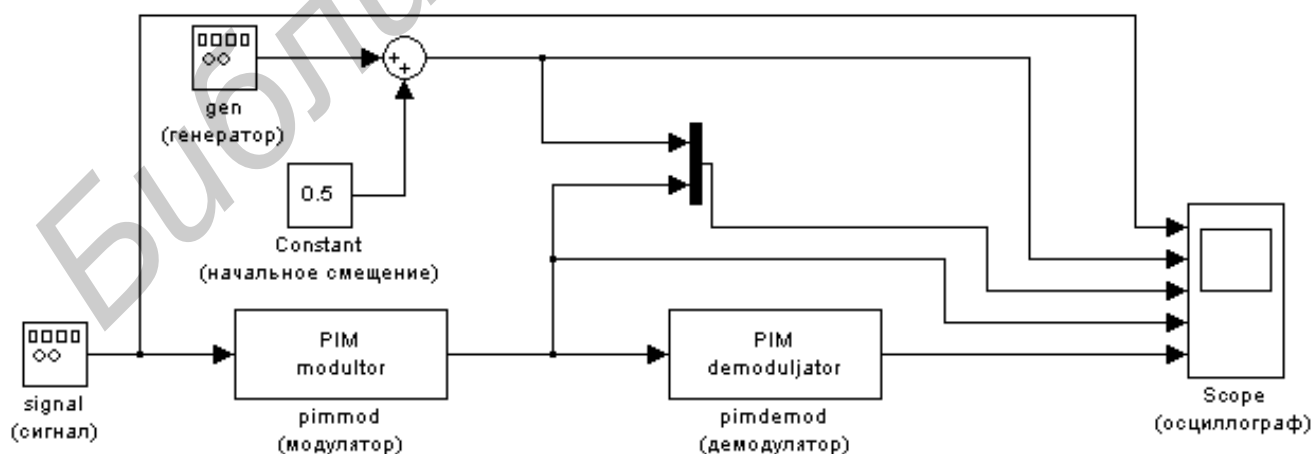


Рисунок 3.6 – Структурная схема ФИМ

Работу блоков схем и их реализацию можно просмотреть в пакете Simulink; для этого нужно выбрать в меню «View» пункт «Model browser / options», поставить галочки напротив «Model browser», «Show library link», «Show masked subsystem» и в появившемся слева окне выбрать интересующий блок.

3.3 Домашнее задание

3.3.1 Изучить теоретические основы АИМ, ШИМ, ЧИМ и ФИМ по [1, с. 37–47].

3.3.2 Изучить принципы работы модуляторов и демодуляторов импульсных видов модуляции по [1, с. 103 – 114].

3.3.3 Уяснить принцип расчета помехоустойчивости АИМ, ШИМ и ФИМ по [3, с. 112 – 116] и пути повышения достоверности по [3, с. 123 – 125].

3.3.4 Ознакомиться с техническим заданием на проведение эксперимента согласно индивидуальному варианту.

3.3.5 Изучить описание лабораторной установки.

3.3.6 Наметить пути проведения эксперимента по определению частотных и временных параметров модулированных импульсных сигналов.

3.4 Порядок выполнения работы

3.4.1 Укажите свои данные в соответствии с пунктом 2.2.1.

3.4.2 Выберите вид модуляции и установите исходные данные в соответствии с вашим вариантом.

3.4.3 Нажмите кнопку «Старт» и после завершения эмуляции работы схемы установите масштаб, удобный для просмотра осциллограммы и пояснения процесса модуляции.

3.4.4 Для внесения результатов опыта в отчет нажмите кнопки «Отчет» и «Осциллограмма» (см. рисунок 2.3).

3.4.5 Рассчитайте мощность и практическую полосу частот.

3.4.6 Запишите выражения для импульсно-модулированных сигналов с конкретными параметрами, полученными в результате проведения эксперимента.

3.4.7 Рассчитайте среднеквадратичную приведенную погрешность для исследуемых видов модуляции. Отношение мощностей сигнал/шум задаются преподавателем.

3.5 Содержание отчета

3.5.1 Осциллограммы модулирующего и модулированного сигналов.

3.5.2 Спектры исследуемых сигналов.

3.5.3 Расчет мощности и практической полосы частот.

3.5.4 Расчет временных параметров, индекса модуляции (коэффициента глубины модуляции для АИМ).

3.5.5 Выражения для импульсно-модулированных сигналов с конкретными параметрами, полученными в результате проведения эксперимента.

3.5.6 Расчет среднеквадратичной приведенной погрешности для исследуемых видов модуляции.

3.5.7 Выводы. Сравнение различных видов модуляции между собой.

3.6 Варианты заданий

Таблица 3.1 – Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ-1)

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	2	3	4	5	6	7	8	7	6	5	4	3	2	1
Частота сигнала, F_c	5	1	2	5	1	5	5	10	4	4	5	2	20	5	2
Частота несущей, F_n	50	10	20	50	10	50	50	100	20	20	50	20	200	100	20
Сквозность	5	5	2	2	4	4	5	5	2	4	5	2	4	2	4

Таблица 3.2 – Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ-2)

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	2	3	4	5	6	7	8	7	6	5	4	3	2	1
Частота сигнала, F_c	5	1	2	5	1	5	5	10	4	4	8	2	10	1	1
Частота несущей, F_n	50	10	16	35	10	30	50	100	48	40	40	24	100	24	7
Сквозность	5	5	2	5	4	3	4	2	2	3	5	4	5	4	4

Таблица 3.3 – Фазоимпульсная модуляция

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	5	1	2	4	3	8	4	5	10	6	15	5	7	9	2
Частота сигнала, F_c	4	5	4	8	4	2	16	5	4	4	10	4	4	5	4
Частота несущей, F_n	40	25	50	32	80	25	80	40	40	40	200	80	64	64	64
Коэффициент, K	$\pi/2$	$\pi/3$	$\pi/6$	$\pi/12$	$\pi/2$	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/6$	$\pi/5$	$\pi/3$	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/6$	$\pi/3$

Таблица 3.4 – Частотно-импульсная модуляция

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	5	1	2	10	3	8	4	5	10	6	15	5	5	9	2
Частота сигнала, F_c	4	5	4	8	2	5	16	10	4	4	40	4	25	20	4
Частота несущей, F_n	20	25	50	40	8	25	40	500	40	8	200	8	125	200	8
Коэффициент, K	12	5	30	24	2	5	5	25	3	2	30	2	25	20	4

Таблица 3.5 – Широтно-импульсная модуляция

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	1	2	3	8	6	9	4	6	3	5	4	6	2	6
Частота сигнала, F_c	5	10	5	1	6	4	8	6	8	8	6	4	8	6	8
Частота несущей, F_n	100	200	100	10	100	160	160	100	100	200	160	100	160	200	100
Коэффициент пропорциональности	2	2	4	4	7	5	8	5	8	6	4	5	6	4	9

3.7 Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте теорему В. А. Котельникова.
- 2 Какое влияние оказывают помехи в канале связи на импульсно-модулированные сигналы?
- 3 Приведите порядок расчета среднеквадратичной ошибки для исследуемых видов модуляции от флуктуационных помех.
- 4 Приведите выражения для расчета $m_{\text{АИМ}}$, $m_{\text{ФИМ}}$, $m_{\text{ШИМ}}$, $m_{\text{ЧИМ}}$.
- 5 Приведите выражение для расчета практической полосы частот исследуемых сигналов.
- 6 Назовите методы повышения помехоустойчивости.
- 7 Поясните работу модуляторов и демодуляторов исследуемых сигналов.
- 8 Назовите области применения импульсных видов модуляции.

Литература

- 1 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах». В 4 ч. Ч. 1 : Сообщения и сигналы / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2000. – 128 с.
- 2 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах» и «Информационные технологии и управление в технических системах». В 4 ч. Ч. 3 : Линии связи и помехоустойчивость информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2005. – 132 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 МАНИПУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ

Цель работы: изучение дискретных видов модуляции и их основных характеристик во временной и частотной областях.

4.1 Теоретическая часть

4.1.1 Общие сведения. Немодулированная передача данных обычно требует наличия канала, частотный спектр которого занимает полосу от 0 Гц (постоянный ток) до частоты, кратной скорости передачи. Схемы постоянного тока, конечно, получили некоторое распространение, в частности, в телефонных сетях общего пользования, но из-за существенного затухания сигнала с увеличением расстояния такие линии непригодны для передачи данных на дистанции свыше 20 км, тем более с большой скоростью.

Для преодоления частотных ограничений схем, работающих на постоянном токе, данные модулируются с помощью несущей частоты, которую легко передать по аналоговому каналу.

Синусоидальная несущая описывается ее амплитудой, частотой и фазой, а каждый из этих трех параметров может быть промодулирован или проманипулирован с помощью цифрового модулирующего сигнала, который описывается рядом Фурье. Три основных формы модуляции сигналов: АМ, ЧМ и ФМ в случае использования цифровых сигналов носят названия амплитудной (АМн), частотной (ЧМн) и фазовой (ФМн) манипуляции.

4.1.2 Теоретические основы указанных выше манипулированных сигналов изложены в [1, с. 47 – 53].

4.1.3 Технические средства модуляции и демодуляции (модели) рассмотрены в [1, с. 114 – 126].

4.1.4 Расчет коэффициента потенциальной помехоустойчивости указанных выше манипулированных сигналов приведен в [2, с. 88 – 90].

4.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой набор стандартных элементов и блоков Simulink, позволяющих изучить и исследовать спектры импульсных видов модуляции.

4.2.1 Регистрация пользователя. Для начала работы с макетом необходимо запустить файл «Манипуляция». Процесс регистрации пользователя рассмотрен в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.1).

4.2.2 Выбор вида манипулированного сигнала осуществляется аналогично рассмотренному в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.2), за исключением того, что в меню выбора вида модуляции (рисунок 4.1) будут представлены виды манипулированных сигналов.

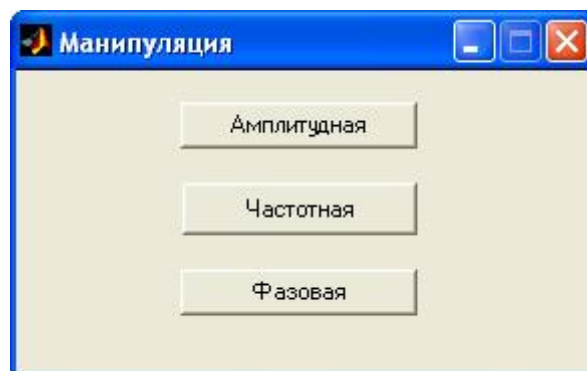


Рисунок 4.1 – Окно выбора вида манипулированного сигнала

В дальнейшем работа установки осуществляется аналогично рассмотренной в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.3).

4.2.3 Структурная схема макета. На рисунках 4.2 – 4.4 приведены структурные схемы макетов для дискретных видов модуляции. Структурные схемы включают блоки, рассмотренные в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.4).

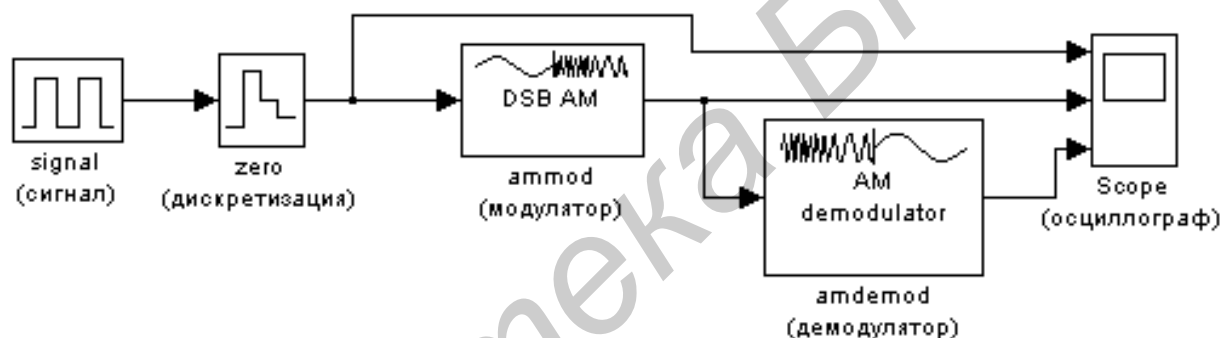


Рисунок 4.2 – Структурная схема АМн

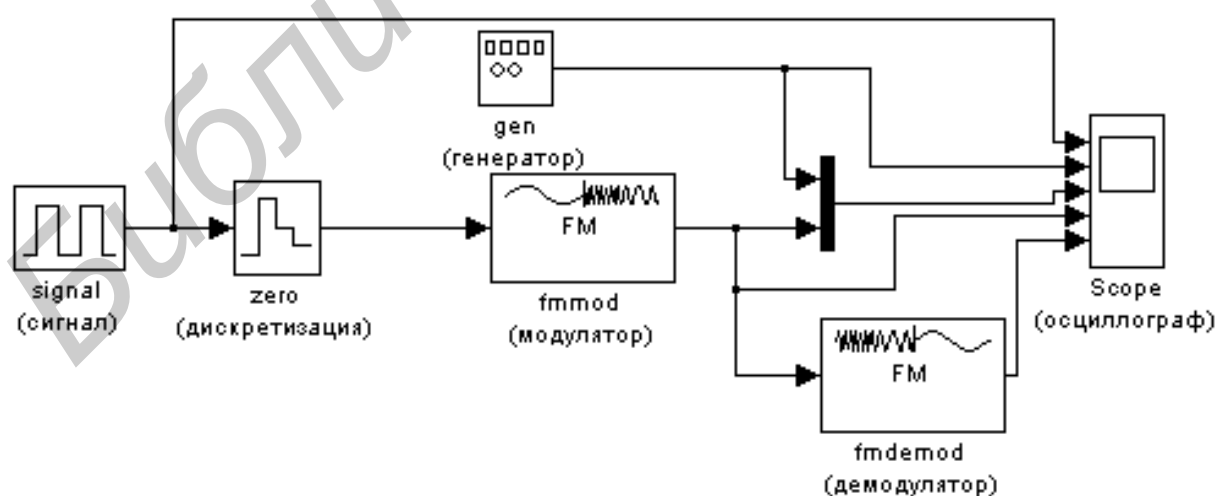


Рисунок 4.3 – Структурная схема ЧМн

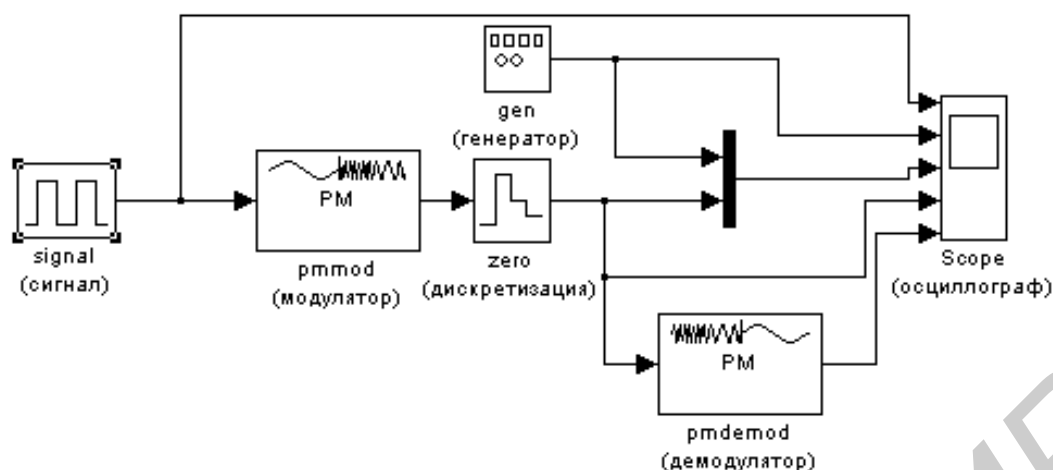


Рисунок 4.4 – Структурная схема ФМн

Работу блоков схем и их реализацию можно просмотреть в пакете Simulink, для этого нужно выбрать в меню «View» пункт «Model browser options» поставить галочки напротив «Model browser», «Show library link», «Show masked subsystem» и в появившемся слева окне выбрать интересующий блок.

4.3 Домашнее задание

4.3.1 Изучить теоретические основы АМн-, ЧМн- и ФМн-сигналов по [1, с. 47 – 53].

4.3.2 Изучить принципы работы модемов по [1, с. 114 – 126].

4.3.3 Освоить методику расчета коэффициента потенциальной помехоустойчивости по [3, с. 88 – 90].

4.3.4 Ознакомиться с техническим заданием на проведение эксперимента согласно индивидуальному варианту.

4.3.5 Изучить описание лабораторной установки.

4.3.6 Разработать методику проведения эксперимента по определению частотных и временных параметров манипулированных сигналов.

4.4 Порядок выполнения работы

4.4.1 Укажите свои данные в соответствии с пунктом 4.2.1.

4.4.2 Выберите вид манипуляции и установите исходные данные в соответствии с вашим вариантом.

4.4.3 Нажмите кнопку «Старт» и после завершения эмуляции работы схемы установите масштаб, удобный для просмотра осциллограммы и пояснения процесса манипуляции.

4.4.4 Для внесения результатов опыта в отчет нажмите кнопки «Отчет» и «Осциллограмма» (см. рисунок 2.3).

4.4.5 Рассчитайте мощность и практическую полосу частот.

4.4.6 Рассчитайте временные параметры и индексы модуляции.

4.4.7 Запишите выражения для манипулированных сигналов с конкретными параметрами, полученными в результате проведения эксперимента.

4.4.8 Рассчитайте коэффициент потенциальной помехоустойчивости и вероятность искажения элементарного сигнала для манипулированных сигналов. Отношение мощностей сигнала и помехи задается преподавателем.

4.5 Содержание отчета

4.5.1 Осциллограммы модулирующего и манипулированного сигналов.

4.5.2 Спектры исследуемых сигналов.

4.5.3 Расчет мощности и практической полосы частот.

4.5.4 Расчет временных параметров и индексов модуляции.

4.5.5 Выражения для манипулированных сигналов с конкретными параметрами, полученными в результате проведения эксперимента.

4.5.6 Расчет коэффициента потенциальной помехоустойчивости и вероятности искажения элементарного сигнала для манипулированных сигналов.

4.5.7 Выводы. Сравнение манипулированных сигналов между собой.

4.6 Варианты заданий

Таблица 4.1 – Амплитудная манипуляция

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	3	5	5	5	2	5	3	2	6	1	2	2	3	8
Частота сигнала, F_c	10	5	5	10	50	10	25	10	10	100	25	50	20	20	25
Сквозность	2	5	4	5	4	4	2	4	5	4	5	2	5	4	2
Частота несущей, F_n	100	50	50	200	500	40	100	100	100	1000	250	500	100	200	500
Смещение, K	1	2	5	2	3	2	5	1	3	3	1	1	2	3	2

Таблица 4.2 – Частотная манипуляция

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	3	5	5	3	5	4	8	5	5	3	1	3	5	3
Частота сигнала, F_c	10	5	1	10	50	5	5	4	10	2	100	10	8	40	8
Сквозность	4	4	5	4	4	4	4	5	4	5	5	4	4	5	5
Частота несущей, F_n	100	50	10	100	500	50	20	40	100	20	1000	100	80	400	80
Коэффициент пропорциональности, K_c	80	20	5	90	200	20	30	15	50	10	500	80	120	80	40

Таблица 4.3 – Фазовая манипуляция

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	5	3	9	2	2	5	4	1	6	2	3	2	3	8	1
Частота сигнала, F_c	4	0.5	2	4	5	10	20	25	0.1	1	5	50	20	4	5
Скважность	5	4	2	5	5	5	5	4	4	5	4	4	5	4	4
Частота несущей, F_n	20	10	20	50	25	100	200	100	1	5	50	500	200	40	100
Коэффициент пропорциональности, K_c	$\pi/6$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/6$	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$	$\pi/6$	$\pi/5$	$\pi/5$	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/3$

4.7 Контрольные вопросы

- 1 Принципы работы модемов.
- 2 Чем отличаются модулированные сигналы от манипулированных?
- 3 Чем определяется спектр АМн- и ФМн-сигналов?
- 4 Запишите выражение для практической полосы частот ЧМн-сигнала.
- 5 Поясните спектры манипулированных сигналов.
- 6 Какие параметры сигналов влияют на помехоустойчивость?
- 7 Перечислите основные методы повышения достоверности передачи дискретных сообщений.
- 8 Назовите области применения манипулированных сигналов.

Литература

- 1 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах». В 4 ч. Ч. 1 : Сообщения и сигналы / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2000. – 128 с.
- 2 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах» и «Информационные технологии и управление в технических системах». В 4 ч. Ч. 3 : Линии связи и помехоустойчивость информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2005. – 132 с.
- 3 Галкин, В. А. Телекоммуникации и сети / В. А. Галкин, Ю. А. Григорьев. – М. : МГТУ им. Баумана, 2003.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 ДВУХСТУПЕНЧАТЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ

Цель работы: изучить двухступенчатые виды модуляции и их основные характеристики во временной и частотной областях.

5.1 Теоретическая часть

5.1.1 Общие сведения. Для повышения помехоустойчивости модулированное по амплитуде или частоте сообщение иногда дополнительно модулируют по частоте или амплитуде. Такой способ модуляции обозначается двумя индексами: первый обозначает способ модуляции поднесущей, второй – несущей. Например АМ-АМ, ЧМ-ЧМ. Кроме того, двухкратная модуляция применяется при передаче сообщений по радиоканалам, а также в выделенной полосе частот проводной линии связи.

При двухкратных видах модуляции различают сигналы:

– модулирующее сообщение:

$$C(t) = U_{\Omega} \cos(\Omega t + \varphi_{\Omega}); \quad (5.1)$$

– немодулированная поднесущая:

$$U_{\Pi}(t) = U_{\omega_1} \cos(\omega_1 t + \varphi_{\omega_1}); \quad (5.2)$$

– немодулированная несущая:

$$U_{\Pi}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (5.3)$$

но при этом должно обязательно соблюдаться условие: $\omega_0 \gg \omega_1 \gg \Omega$.

5.1.2 Теоретические основы АМ-АМ, АМ-ЧМ, ЧМ-АМ и ЧМ-ЧМ изложены в [1, с. 57 – 65].

5.1.3 Выражения для оценки помехоустойчивости сложных видов модуляции приведены в [2] разделе 4.4.

5.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой набор стандартных элементов и блоков Simulink, позволяющих изучить и исследовать спектры импульсных видов модуляции.

5.2.1 Регистрация пользователя. Для начала работы с макетом необходимо запустить файл «Двухкратная модуляция». Процесс регистрации пользователя рассмотрен в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.1).

5.2.2 Выбор вида модуляции осуществляется аналогично рассмотренному в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.2), за исключением того, что в меню выбора вида модуляции (рисунок 5.1) будут представлены двухступенчатые виды модуляции.

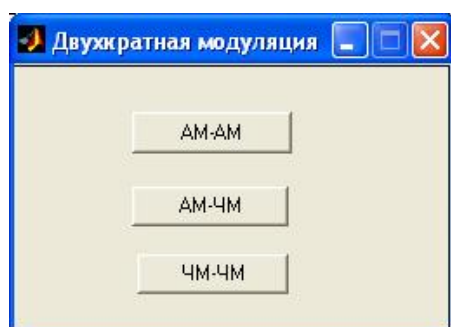


Рисунок 5.1 – Окно выбора вида модуляции

В дальнейшем работа установки осуществляется аналогично рассмотренной в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.3).

5.2.3 Структурная схема макета. На рисунках 5.2 – 5.4 приведены структурные схемы макетов для двухступенчатых видов модуляции. Структурные схемы включают блоки, рассмотренные в лабораторной работе №2 (пункт 2.2.3).

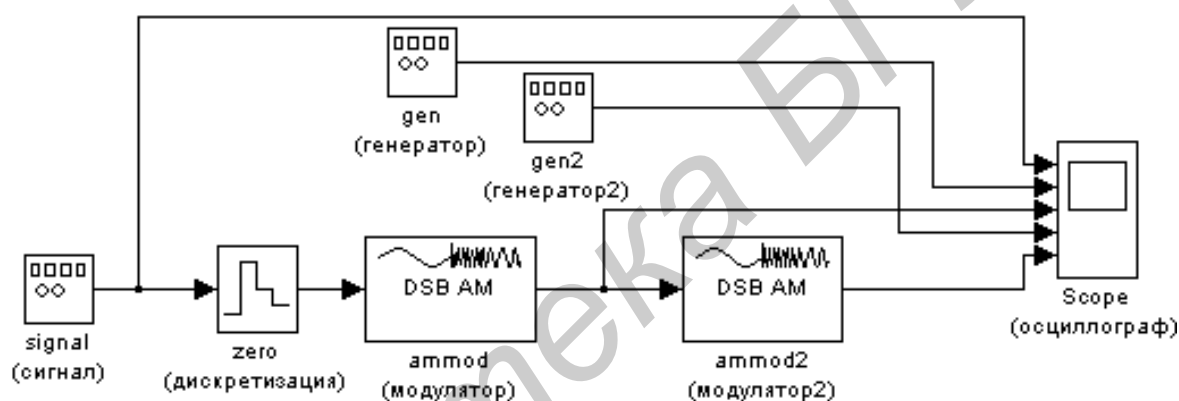


Рисунок 5.2 – Структурная схема АМ-АМ

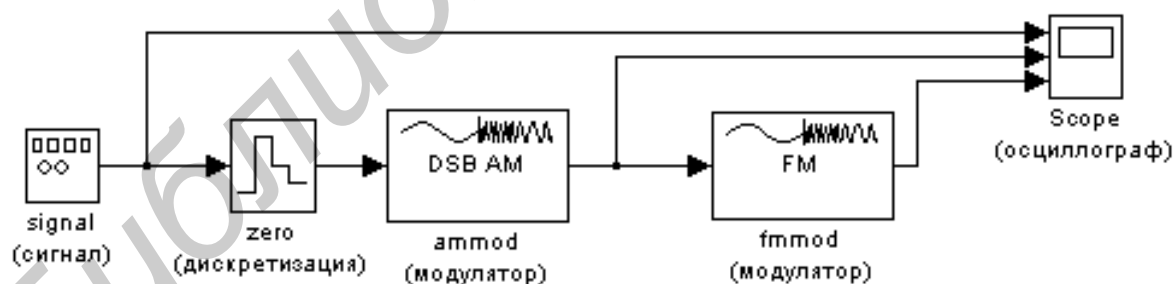


Рисунок 5.3 – Структурная схема АМ-ЧМ

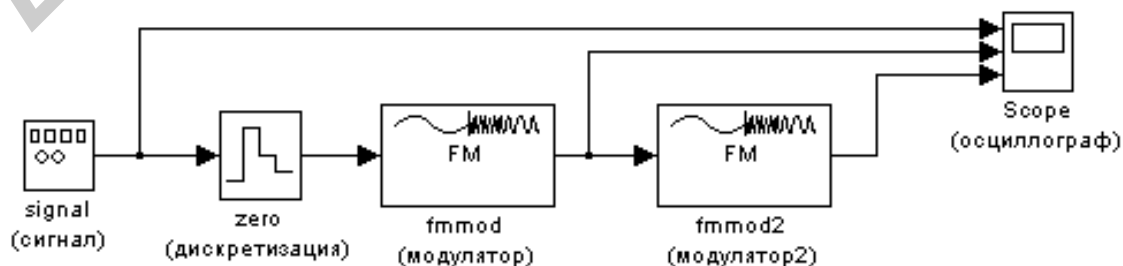


Рисунок 5.4 – Структурная схема ЧМ-ЧМ

Работу блоков схем и их реализацию можно просмотреть в пакете Simulink; для этого нужно выбрать в меню «View» пункт «Model browser options», поставить галочки напротив «Model browser», «Show library link», «Show masked subsystem» и в появившемся слева окне выбрать интересующий блок.

5.3 Домашнее задание

5.3.1 Изучить теоретические основы двухступенчатых видов модуляции по [1, с. 57 – 65].

5.3.2 Освоить технику построения спектров двухступенчатых видов модуляции без вывода аналитического выражения.

5.3.3 Ознакомиться с выражениями для расчета среднеквадратичной ошибки по [3, с. 117 – 118].

5.3.4 Ознакомиться с техническим заданием на проведение эксперимента согласно индивидуальному варианту.

5.3.5 Изучить описание лабораторной установки.

5.3.6 Разработать методику поведения эксперимента по определению частотных и временных параметров.

5.4 Порядок выполнения работы

5.4.1 Укажите свои данные в соответствии с пунктом 2.2.1.

5.4.2 Выберите вид модуляции и установите исходные данные в соответствии с вашим вариантом.

5.4.3 Нажмите кнопку «Старт» и после завершения эмуляции работы схемы установите масштаб, удобный для просмотра осциллограммы и пояснения процесса модуляции.

5.4.4 Для внесения результатов опыта в отчет нажмите кнопки «Отчет» и «Осциллограмма» (см. рисунок 2.3).

5.4.5 Рассчитайте мощность и практическую полосу частот двухступенчатого модулированного сигнала.

5.4.6 Запишите выражение для модулированной несущей с конкретными параметрами, полученными в результате проведения эксперимента.

5.4.7 Рассчитайте среднеквадратичную ошибку. Отсутствующие параметры задаются преподавателем.

5.5 Содержание отчета

5.5.1 Осциллограммы модулирующего сообщения, промодулированной поднесущей и модулированной несущей.

5.5.2 Спектры исследуемых сигналов.

5.5.3 Расчет мощностей и практической полосы частот двухступенчатого модулированного сигнала.

5.5.4 Расчет индексов ЧМ и коэффициентов глубины амплитудной модуляции как на первой, так и на второй ступенях модуляции.

5.5.5 Выражение для модулированной несущей с конкретными параметрами, полученными в результате проведения эксперимента.

5.5.6 Расчет среднеквадратичной ошибки.

5.5.7 Выводы. Сравнение двухступенчатых модулированных сигналов между собой по полосе частот, мощности и помехоустойчивости.

5.6 Варианты заданий

Таблица 5.1 – Способ модуляции АМ-АМ

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	5	2	1	2	4	2	3	2	5	10	2	3	1	5	2
Частота сигнала, F_c	20	5	1	5	50	10	4	2	20	50	10	10	30	100	2
Частота поднесущей, F_{Π}	100	20	10	10	100	100	40	20	200	150	20	40	60	200	10
Смещение, K	10	10	5	5	20	15	5	2	25	25	15	15	15	35	10
Частота несущей, F_H	500	100	100	50	600	150	160	100	600	250	60	100	360	400	100
Смещение 2, K	20	20	10	15	25	20	15	2	50	40	35	10	10	25	20

Таблица 5.2 – Способ модуляции АМ-ЧМ

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	1	2	3	2	3	10	15	5	6	5	50	1	2	20	5
Частота сигнала, F_c	2	5	1	2	3	10	50	25	2	5	10	25	10	20	20
Частота поднесущей, F_{Π}	20	20	10	50	75	100	500	200	200	50	250	100	100	200	100
Смещение, K	5	2	2	5	2	2	10	2	5	10	50	5	5	40	2
Частота несущей, F_H	200	200	100	100	150	500	2500	400	400	200	500	500	400	1000	1000
Коэффициент пропорциональности, K_c	20	5	2	5	25	10	25	25	50	4	5	20	20	5	5

Таблица 5.3 – Способ модуляции ЧМ-ЧМ

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Амплитуда, U_c	5	1	1	2	1	1	3	1	1	1	2	13	1	1	1
Частота сигнала, F_c	5	20	10	10	5	5	50	1	5	35	40	20	12	1	10
Частота поднесущей, F_{Π}	100	100	70	50	25	25	200	15	30	250	200	100	60	5	100
Коэффициент пропорциональности 1	2	10	3	5	5	5	15	1	5	5	10	1	8	1	10
Частота несущей, F_H	200	1000	1000	450	250	400	1400	60	200	1800	1600	800	800	60	600
Коэффициент пропорциональности 2	80	100	100	60	25	25	200	15	25	250	200	120	60	5	100

5.7 Контрольные вопросы

- 1 Где применяются двухступенчатые виды модуляции?
- 2 Поясните принцип получения аналитических выражений для сложных видов модуляции.
- 3 Чем определяется практическая полоса частот?
- 4 Как определяются индексы ЧМ-ЧМ сигналов?
- 5 Какие параметры сигналов влияют на помехоустойчивость?
- 6 Поясните принцип построения спектра ЧМ-АМ сигнала.
- 7 Поясните на примере АМ-АМ сигнала расчет коэффициента модуляции на первой и второй ступенях.

Литература

- 1 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах». В 4 ч. Ч. 1 : Сообщения и сигналы / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2000. – 128 с.
- 2 Сорока, Н. И. Телемеханика : конспект лекций для студ. спец. «Автоматическое управления в технических системах» и «Информационные технологии и управление в технических системах». В 4 ч. Ч. 3 : Линии связи и помехоустойчивость информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2005. – 132 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ЦИФРОВЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ

Цель работы: изучение основных видов цифровой модуляции, а также принципов действия устройств модуляции и демодуляции. Получение и анализ временных диаграмм и спектров сигналов, участвующих в процессе цифровой модуляции и демодуляции. Оценка эффективности различных видов модуляции.

6.1 Теоретическая часть

Основы передачи цифровой информации. В настоящее время все большая часть информации, передаваемой по разнообразным каналам связи, существует в цифровом виде. Это означает, что передаче подлежит не непрерывный (аналоговый) модулирующий сигнал, а последовательность целых чисел $n_0, n_1, n_2, \dots, K$, которые могут принимать значения из некоторого фиксированного конечного множества. Эти числа, называемые символами, поступают от источника информации с периодом T_c , а частота, соответствующая этому периоду, называется символьной скоростью.

Типичным подходом при осуществлении передачи дискретной последовательности символов является многопозиционная модуляция. При этом каждый из возможных значений символа сопоставим с некоторым набором параметров несущего колебания: амплитудой, частотой, фазой. Эти параметры поддерживаются постоянными в течение интервала времени T_c , т. е. до прихода следующего символа. В зависимости от того, какие именно параметры изменяются, различают амплитудную (АМ), фазовую (ФМ), частотную (ЧМ), квадратурную амплитудную (КАМ), а также некоторые другие виды модуляции.

Многопозиционная модуляция предполагает переход от двоичного алфавита символов $\{0, 1\}$ дискретного сообщения к M -ичному:

$$M = 2^m, \quad m = \log_2 M, \quad (6.1)$$

где M – объем алфавита;

m – длина преобразуемых последовательностей двоичных символов.

К примеру, при $M = 4$ алфавит включает четыре символа $\{00, 01, 10, 11\}$. При $M = 2$ (двоичная модуляция) алфавит состоит всего из двух бинарных символов $\{0, 1\}$.

Каждый двоичный символ (бит) передается в течение времени T_6 , равного его длительности. Скорость передачи R_6 , выраженная в битах в секунду, определяется соотношением

$$R_6 = \frac{1}{T_6}. \quad (6.2)$$

Длительность передачи M -ичного символа вычисляется по формуле

$$T_c = mT_6 = T_6 \log_2 M. \quad (6.3)$$

Тогда скорость передачи M -ичных символов (символьная скорость) рассчитывается по формуле

$$R_c = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{T_0 \log_2 M} = \frac{R_0}{\log_2 M}. \quad (6.4)$$

Представление сигналов цифровой модуляции. Цифровая модуляция – это процесс преобразования цифровых символов в сигналы, совместимые с характеристиками канала связи. Если в качестве несущей волны используется высокочастотный синусоидальный сигнал, то цифровую модуляцию можно определить как процесс варьирования амплитуды, частоты или фазы (или их комбинаций) радиочастотной несущей согласно символам передаваемого сообщения.

В общем виде модулированный сигнал записывается следующим образом:

$$s(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)], \quad (6.5)$$

где $A(t)$ – закон изменения амплитуды;

f_0 – частота несущего гармонического колебания;

$\varphi(t)$ – закон изменения фазы сигнала.

Выражение (6.5) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} s(t) &= A(t) \cos(2\pi f_0 t) \cos \varphi(t) - A(t) \sin(2\pi f_0 t) \sin \varphi(t) = \\ &= I(t) \cos(2\pi f_0 t) - Q(t) \sin(2\pi f_0 t), \end{aligned} \quad (6.6)$$

где

$$I(t) = A(t) \cos \varphi(t) = \operatorname{Re} [A(t) \cdot e^{j\varphi(t)}], \quad (6.7)$$

$$Q(t) = A(t) \sin \varphi(t) = \operatorname{Im} [A(t) \cdot e^{j\varphi(t)}]. \quad (6.8)$$

Согласно выражению (6.6) модулированный радиосигнал можно представить в виде суммы двух гармонических колебаний, модулированных сигналами $I(t)$ и $Q(t)$, различающихся начальным фазовым сдвигом, равным 90° . В этом выражении составляющая $I(t) \cos(2\pi f_0 t)$ носит название *синфазной*, а $Q(t) \sin(2\pi f_0 t)$ – *квадратурной*.

Из выражений (6.7) и (6.8) получим соотношения для $A(t)$ и $\varphi(t)$:

$$A(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}, \quad (6.9)$$

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg} \frac{Q(t)}{I(t)}. \quad (6.10)$$

С учетом выражений (6.9) и (6.10) становится возможным графическое представление сигналов цифровой модуляции на комплексной плоскости (рисунок 6.1).

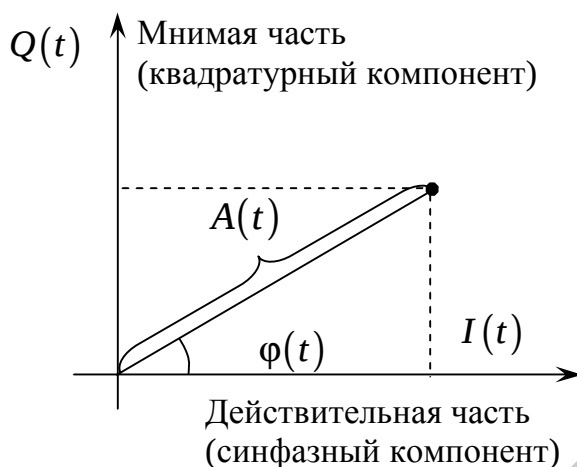


Рисунок 6.1 – Представление сигнальных точек на комплексной плоскости

Такое изображение обычно называют *сигнальным созвездием* или пространственной диаграммой. На рисунке 6.2 представлены примеры сигнальных созвездий АМ-4 (рисунок 6.2, а) и КАМ-16 (рисунок 6.2, б) радиосигналов.

Наряду с сигнальными созвездиями часто используются так называемые *диаграммы фазовых переходов*, которые представляют собой графические изображения траекторий перемещения сигнальных точек в сигнальном созвездии при переходе от одного передаваемого символа к другому. В качестве примера на рисунке 6.2, в приведена диаграмма фазовых переходов ФМ-4 радиосигнала.

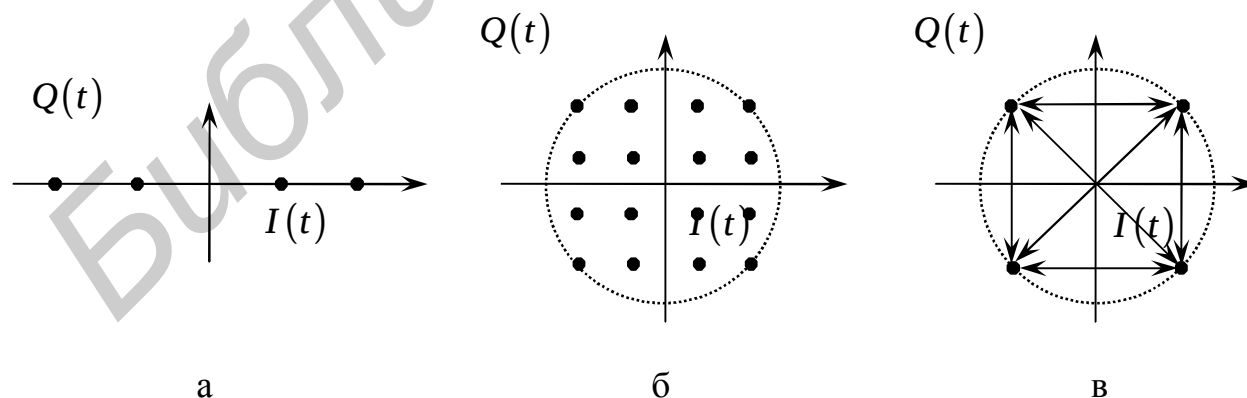


Рисунок 6.2 – Примеры сигнальных созвездий и диаграмм фазовых переходов

6.1.1 Основные показатели эффективности и качества цифровых видов модуляции

Спектральную эффективность различных видов модуляции принято оценивать удельной скоростью передачи:

$$\frac{R_6}{W} = \frac{1}{WT_6}, \quad (6.11)$$

где W – полоса частот, необходимая для передачи сигналов с выбранным видом модуляции, Гц.

Величина R_6/W представляет собой меру скорости передачи данных на единицу ширины полосы частот, а значит, показывает, насколько эффективно выбранный метод передачи сигналов использует ресурс полосы частот.

Энергетическую эффективность различных видов модуляции оценивают удельными энергетическими затратами:

$$\frac{E_6}{N_0} = \frac{S}{N_0 R_6}. \quad (6.12)$$

где E_6 – это энергия, затрачиваемая на передачу одного бита и описываемая произведением мощности сигнала S на время передачи бита T_6 ;

N_0 – спектральная плотность мощности шума.

Таким образом, величина E_6/N_0 представляет собой отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума (или просто отношение сигнал/шум). Чем меньше эта величина, тем меньший энергетический потенциал S/N_0 радиолинии требуется для передачи сообщений с заданными скоростью R_6 и достоверностью.

Следует отметить, что в системах цифровой передачи информации задачей приемника является не точное воспроизведение переданного сигнала, а определение на основе искаженного шумами сигнала, какой именно символ из конечного набора был послан передатчиком. Поэтому показателем достоверности передачи сообщений при использовании различных цифровых видов модуляции является *вероятность ошибки* при демодуляции M -ичного символа P_E .

График зависимости вероятности появления ошибочного символа P_E от отношения E_6/N_0 является одним из важнейших показателей, характеризующих качество систем цифровой связи.

На рисунке 6.3 показан типичный «водопадopodobный» вид большинства подобных кривых.

Для оценки вероятности ошибки при заданном отношении сигнал/шум в большинстве случаев используют гауссовый интеграл ошибок

$$V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt. \quad (6.13)$$

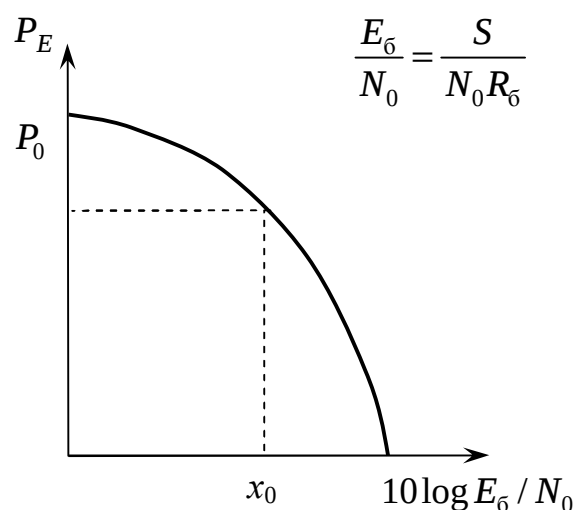


Рисунок 6.3 – Общий вид зависимости P_E от E_6/N_0

В таблице 6.1 приведены расчетные соотношения для оценки вероятности ошибки при заданном отношении сигнал/шум для различных видов цифровой модуляции.

Таблица 6.1 – Расчетные соотношения для оценки вероятности ошибки

Метод модуляции	Расчетные соотношения
Амплитудная	$P_E = \frac{2(M-1)}{M} V \left(\sqrt{\frac{6 \log_2 M}{M^2 - 1} \cdot \frac{E_6}{N_0}} \right)$
Фазовая (при $M = 2$)	$P_E = V \left(\sqrt{\frac{2E_6}{N_0}} \right)$
Фазовая (при $M = 4$)	$P_E = 2V \left(\sqrt{\frac{2E_6}{N_0}} \right) \cdot \left[1 - \frac{1}{2} V \left(\sqrt{\frac{2E_6}{N_0}} \right) \right]^2$
Фазовая (при $M > 4$)	$P_E \approx 2V \left(\sqrt{\frac{2E_6 \log_2 M}{N_0}} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \right)$
Частотная	$P_E = (M-1) V \left(\sqrt{\frac{E_6 \log_2 M}{N_0}} \right)$
КАМ (для четных m)	$P_E = 1 - \left[1 - 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) V \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \cdot \frac{E_6}{N_0}} \right) \right]^2$
КАМ (для нечетных m)	$P_E \leq 4V \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \cdot \frac{E_6}{N_0}} \right)$

Амплитудная модуляция. При амплитудной модуляции амплитуда передаваемого сигнала скачкообразно изменяется в соответствии с символами передаваемого сообщения:

$$s(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0). \quad (6.14)$$

Здесь $A(t)$ может принимать M возможных амплитуд, соответствующих $M = 2^m$ возможным m -битовым символам.

На рисунке 6.4 дана геометрическая иллюстрация формируемого ансамбля амплитудно-модулированных сигналов при объеме алфавита $M = 2$, $M = 4$ и $M = 8$.

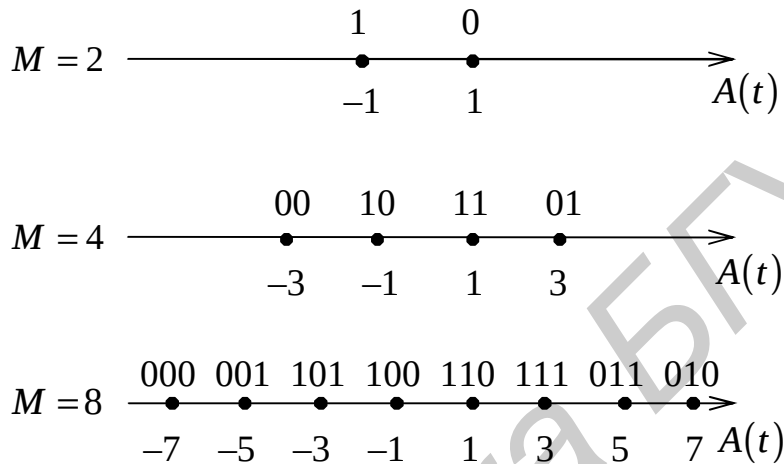


Рисунок 6.4 – Сигнальные созвездия АМ-сигналов

Заметим, что двоичные символы, создаваемые источником дискретных сообщений, предварительно кодируются кодом Грея. В результате соседние сигнальные точки отображают двоичные последовательности, различающиеся одним двоичным символом. Это свойство очень важно при рассмотрении характеристик помехоустойчивости демодуляторов.

Согласно теореме Котельникова необходимая минимальная полоса частот идеального канала связи равна

$$W = \frac{1}{2T_c}. \quad (6.15)$$

Следовательно, спектральная эффективность амплитудной модуляции будет определяться следующим выражением:

$$\frac{R_0}{W} = \frac{\log_2 M}{T_c} 2T_c = 2 \log_2 M. \quad (6.16)$$

Однако на практике спектральная эффективность амплитудной модуляции в силу определенных трудностей при формировании сигналов с минимальной полосой заключена в следующих пределах:

$$\log_2 M \leq \frac{R_0}{W} \leq 2 \log_2 M. \quad (6.17)$$

Фазовая модуляция. При фазовой модуляции в соответствии с символами передаваемого сообщения изменяется фаза гармонического колебания, поэтому передаваемый сигнал можно записать в следующем виде:

$$s(t) = A \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)] = I(t) \cos(2\pi f_0 t) - Q(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad (6.18)$$

где

$$\begin{aligned} I(t) &= A \cos \varphi(t) = \operatorname{Re} [A \cdot e^{j\varphi(t)}], \\ Q(t) &= A \sin \varphi(t) = \operatorname{Im} [A \cdot e^{j\varphi(t)}]. \end{aligned} \quad (6.19)$$

Здесь $\varphi(t)$ может принимать значения из множества

$$\left\{ \frac{2\pi}{M}(i-1) + \varphi_0, i = \overline{1, M} \right\},$$

где φ_0 – произвольная начальная фаза.

Геометрическая иллюстрация формируемого ансамбля ФМ-сигналов изображена на рисунке 6.5, а, б, в.

Здесь сигнальные точки лежат на окружности, радиус которой определяется энергией сигналов. Можно заметить, что с возрастанием M размерность сигнального пространства не изменяется, а следовательно, возрастает спектральная эффективность. Но с другой стороны, с увеличением M при постоянной энергии сигналов происходит сближение сигнальных точек. Поэтому для поддержания вероятности ошибки на прежнем уровне приходится увеличивать энергию сигналов (увеличивать радиус окружности). Иначе говоря, увеличение спектральной эффективности достигается за счет снижения энергетической.

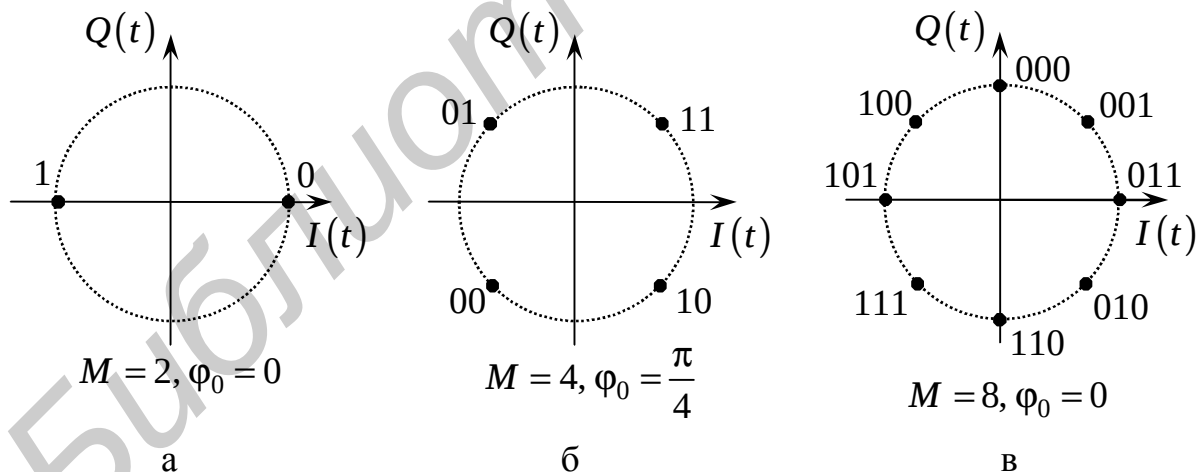


Рисунок 6.5 – Сигнальные созвездия ФМ-сигналов

Диаграмма фазовых переходов для ФМ-4 радиосигнала приведена на рисунке 6.6, а. Из этой диаграммы видно, что, например, при переходе из точки сигнального созвездия $(+1, +1)$ в точку $(-1, -1)$ осуществляется мгновенное изменение фазы несущего колебания от значения 45° к значению -135° . При изменении фазы на 180° могут возникнуть существенные изменения значений огибающей радиосигнала, что по многим причинам является нежелательным в

цифровых системах передачи информации. В связи с этим применение находит *фазовая модуляция со смещением*, на диаграмме фазовых переходов которой отсутствуют переходы через начало координат, а значит, отсутствуют и скачки фазы на 180° (рисунок 6.6, б).

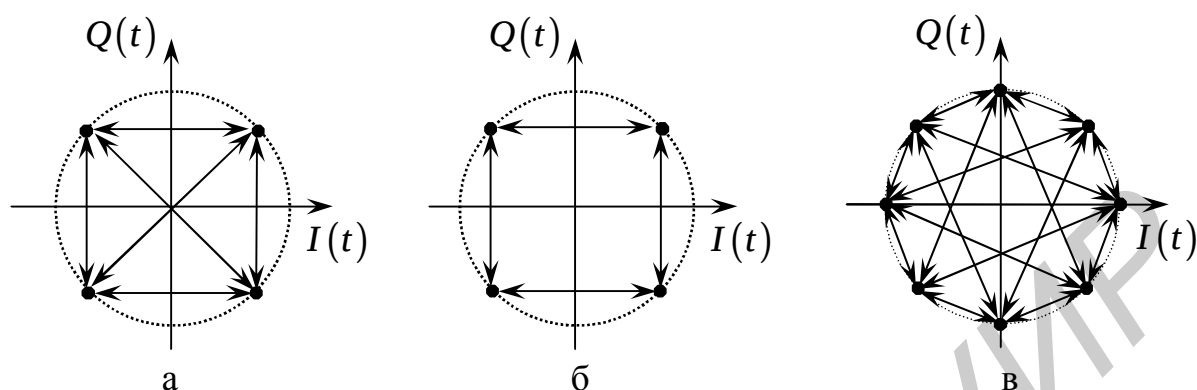


Рисунок 6.6 – Диаграммы фазовых переходов при фазовой модуляции

Таким образом, при ФМ-4 и ФМ-4 со смещением максимальное изменение фазы радиосигнала равно 180° и 90° соответственно. В настоящее время достаточно широко используется $\pi/4$ -квадратурная относительная фазовая модуляция, при которой максимальный скачок фазы равен 135° , а все возможные значения мгновенной фазы радиосигнала кратны значению $\pi/4$. Но в отличие от ФМ-4 при относительной фазовой модуляции каждая пара битов определяет не полную фазу несущего колебания, а ее приращение относительно предыдущего значения.

Диаграмма фазовых переходов при $\pi/4$ -квадратурной относительной фазовой модуляции приведена на рисунке 6.6, в. Ни одна траектория фазовых переходов не проходит через начало координат. В результате огибающая радиосигнала имеет меньшие провалы по сравнению с квадратурной фазовой модуляцией.

Частотная модуляция. При частотной модуляции в соответствии с символами передаваемого сообщения изменяется частота гармонического колебания, поэтому передаваемый сигнал можно записать в следующем виде:

$$s(t) = A \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)]. \quad (6.20)$$

Здесь частота колебания определяется производной по времени полной мгновенной фазы:

$$\frac{d}{dt}[2\pi f_0 t + \varphi(t)] = 2\pi f_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (6.21)$$

Из этого выражения видно, что при скачкообразном изменении мгновенной частоты фаза будет изменяться линейно. Поэтому частотную модуляцию можно рассматривать как фазовую модуляцию с непрерывным гладким изменением фазы.

Манипуляция с минимальным сдвигом (ММС) может рассматриваться как фазовая или как частотная модуляция с непрерывной фазой.

Основная особенность этого способа модуляции состоит в том, что приращение фазы несущего колебания на интервале времени, равном длительности одного символа T_c , всегда равно 90° или -90° в зависимости от знаков – симво-

лов модулирующего сигнала. Например, фаза несущего колебания в начале очередного импульса модулирующего сигнала равна φ_0 ; далее фаза несущего колебания, линейно нарастая к концу этого импульса, достигает значения 90° , или, линейно убывая, к концу импульса достигает значения -90° . Поскольку на интервале каждого очередного импульса модулирующего сигнала мгновенная фаза несущего колебания, отклоняясь от фазы немодулированного гармонического колебания, изменяется линейно, увеличиваясь или уменьшаясь, то мгновенная частота такого радиосигнала будет изменяться скачками. Таким образом, ММС-сигнал является частным случаем ЧМ-сигнала с частотами

$$f_1 = f_0 + \frac{1}{4T_6}, \quad f_2 = f_0 - \frac{1}{4T_6}. \quad (6.22)$$

Этот вид модуляции можно трактовать как квадратурную фазовую модуляцию, в которой модулирующие импульсы вместо прямоугольной формы имеют синусоидальную. Такая форма модулирующих импульсов приводит к плавному изменению фазы, поэтому на диаграмме фазовых переходов отсутствуют скачки фазы, характерные для ФМ-4 сигналов, и изменения фазы от одного значения к другому происходят по линейному закону.

Квадратурная амплитудная модуляция. Ранее были рассмотрены многопозиционные АМ и ФМ, которые могут быть использованы для передачи $\log_2 M$ битов информации с помощью одного сигнала. Лучшие показатели эффективности можно получить, если для передачи символов сообщения модулировать сразу два параметра: амплитуду и фазу. В этом случае сигнальные точки будут размещаться в двумерном сигнальном пространстве более рационально (рисунок 6.7).

Передаваемый сигнал при такой модуляции состоит из двух квадратурных несущих, модулированных по амплитуде многоуровневыми последовательностями импульсов. По этой причине этот вид модуляции носит название квадратурной амплитудной модуляции (КАМ).

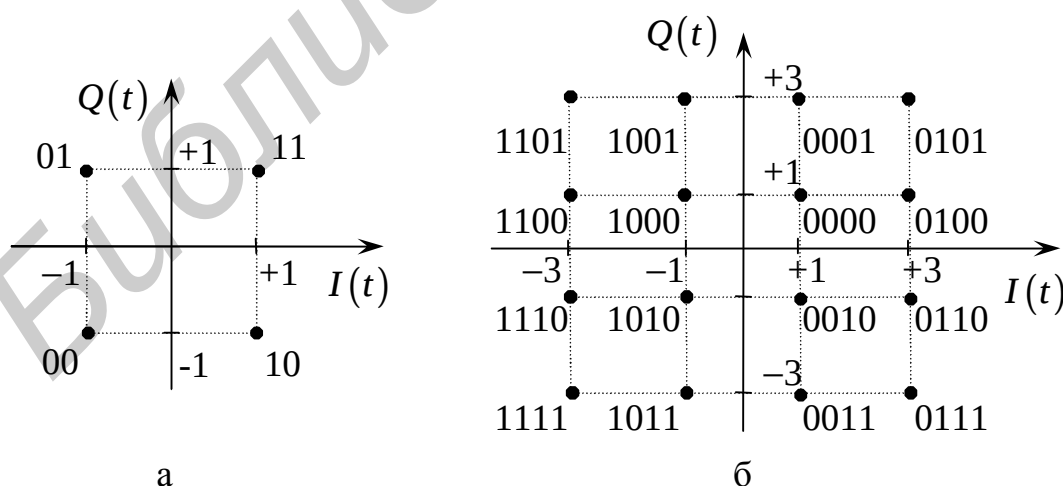


Рисунок 6.7 – Сигнальные созвездия КАМ-4 и КАМ-16 сигналов

В общем случае КАМ сигнал можно представить в виде

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t)). \quad (6.23)$$

Из теории связи известно, что при равном числе точек в сигнальном созвездии спектр сигналов КАМ идентичен спектру сигналов ФМ. Однако помехоустойчивость систем ФМ и КАМ различна. При большом числе точек сигналы системы КАМ имеют лучшие характеристики, чем системы ФМ. Основная причина этого состоит в том, что расстояние между сигнальными точками в системе ФМ меньше расстояния между сигнальными точками в системе КАМ. Расстояния d между соседними точками сигнальных созвездий в системах ФМ и КАМ (рисунок 6.8) с m уровнями модуляции и числом фаз M определяются выражениями

$$d_{\text{ФМ}} = 2 \sin \frac{\pi}{M}; \quad d_{\text{КАМ}} = \frac{\sqrt{2}}{m-1}. \quad (6.24)$$

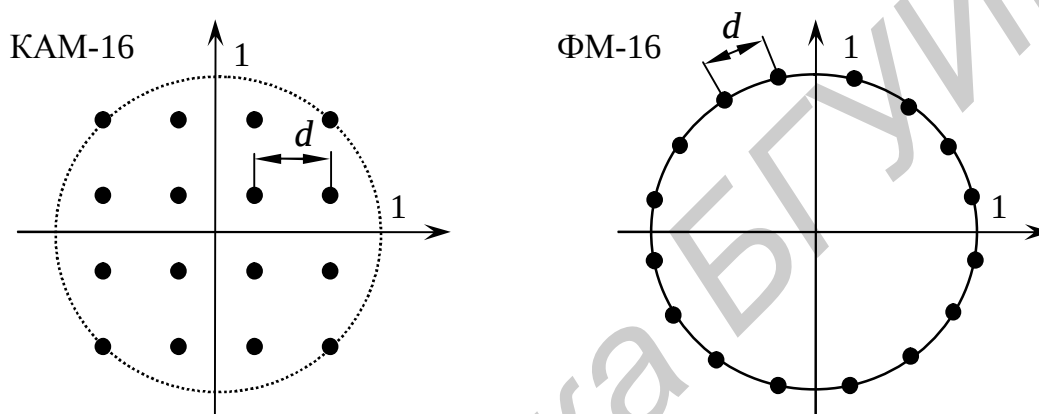


Рисунок 6.8 – Сигнальные созвездия КАМ-16 и ФМ-16 сигналов

Из приведенных выражений следует, что при увеличении значения M и при одном и том же уровне мощности системы КАМ предпочтительнее систем ФМ.

6.1.2 Принципы построения устройств цифровой модуляции и демодуляции

Основные элементы устройств цифровой модуляции. Обобщенная структурная схема устройства цифровой модуляции представлена на рисунке 6.9. Данная схема может использоваться при формировании АМ-, ФМ- и КАМ-сигналов.

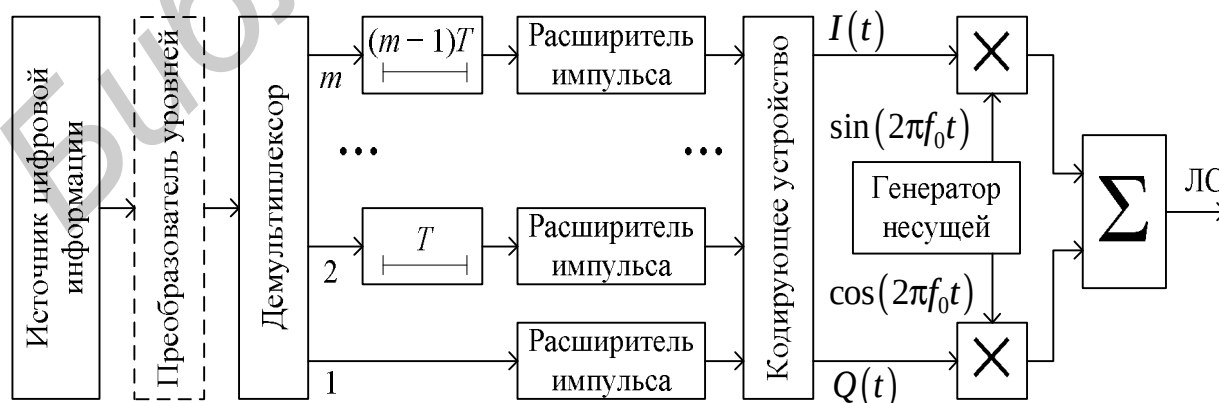


Рисунок 6.9 – Обобщенная структурная схема устройства цифровой модуляции

Источник цифровой информации предназначен для преобразования цифрового сообщения, заданного в виде последовательности двоичных битов a_i , в последовательность электрических импульсов $v(t)$ длительностью T_6 . Выходной сигнал источника информации, как правило, является однополярным, т. е. его амплитуда может принимать значения 0 либо 1.

Во многих случаях полученный сигнал требуется преобразовать в последовательность положительных и отрицательных электрических импульсов со значениями $+1$ или -1 . Для этих целей используется *преобразователь уровней*, осуществляющий отображение по следующему правилу: $0 \rightarrow +1$ и $1 \rightarrow -1$. В устройствах, осуществляющих амплитудную модуляцию, преобразователь уровней, как правило, не используется.

Демультимплексор осуществляет разделение цифрового сигнала на несколько составляющих. В устройствах, осуществляющих многопозиционную модуляцию, согласно выражению (6.1) демультимплексор должен иметь m выходов. В устройствах, осуществляющих двоичную модуляцию ($M = 2$) демультимплексор не требуется, так как $m = \log_2 M = 1$.

Сигнал на i -м выходе демультимплексора определяется соотношением

$$u_{\text{вых } i}(t) = \begin{cases} u_{\text{вх}}(t) & \text{при } T_6 \cdot (i + km - 1) \leq t \leq T_6 \cdot (i + km), \\ 0 & \text{при других значениях } t, \end{cases} \quad (6.25)$$

где $i = 1, 2 \dots K$;

$k = 0, 1, 2, \dots K$.

Устройства задержки обеспечивает временную задержку сигнала на один или несколько тактов, т. е. на одну или несколько длительностей элементарного импульса T_6 .

Расширитель импульса осуществляет расширение ненулевых импульсов до заданной длительности ($2T_6, 3T_6, \dots$).

Демультимплексор совместно с устройствами задержки сигналов и расширителями импульсов осуществляет преобразование последовательности m битов, составляющих M -ичный символ, в параллельный код. Временные диаграммы, поясняющие этот процесс в устройстве, осуществляющем четырехпозиционную модуляцию ($M = 4$) без преобразования уровней, приведены на рисунке 6.10.

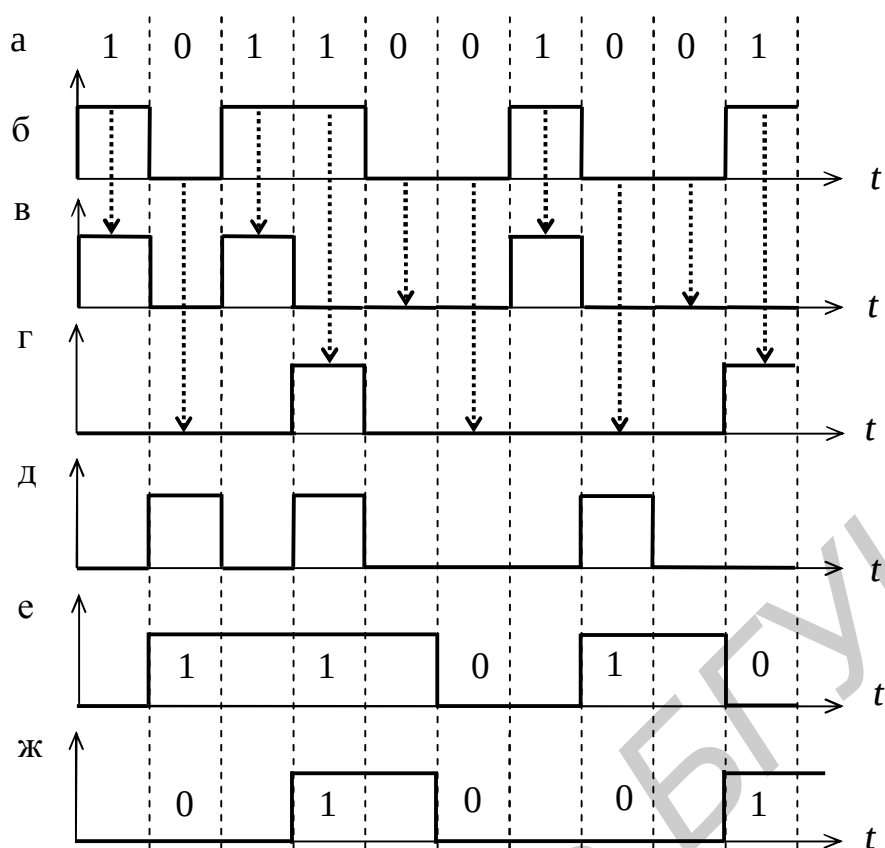


Рисунок 6.10 – Временные диаграммы работы устройства, осуществляющего четырехпозиционную модуляцию

Передаваемое сообщение (рисунок 6.10, а) преобразует последовательность битов в последовательность однополярных электрических импульсов (рисунок 6.10, б). Полученный сигнал поступает на вход демультиплексора, имеющего два выхода, так как $m = \log_2 M = 2$. В демультиплексоре осуществляется разделение входного сигнала на две подпоследовательности четных (рисунок 6.10, в) и нечетных (рисунок 6.10, г) импульсов. Второй выход демультиплексора соединен с устройством задержки, осуществляющим временную задержку сигнала на один такт (рисунок 6.10, д). Полученные сигналы поступают на вход расширителей импульсов, где преобразуются к виду, изображенному на рисунках 6.10, е, ж. Таким образом, последовательность битов 1011001001 на входе устройства, осуществляющего четырехпозиционную модуляцию, преобразуется в параллельный код, т. е. в каждый момент времени на выходе расширителей импульсов имеем пару смежных битов – 1 и 0, 1 и 1, 0 и 0 и т. д.

Кодирующее устройство (кодер) является одним из важнейших структурных элементов модулятора и служит для формирования модулирующего сигнала, непосредственно влияющего на носитель. Кодирующие устройства имеют принципиальные различия для устройств, осуществляющих разные виды модуляции.

Выходными сигналами кодирующего устройства являются $I(t)$ и $Q(t)$, которые, воздействуя на носитель, образуют синфазную и квадратурную компоненты сигнала. Суммарный сигнал этих ветвей и будет модулированным сигналом.

При амплитудной модуляции кодер не формирует квадратурную ветвь, так как в этом случае все сигнальные точки принадлежат действительной оси. Поэтому кодер, имеющий $m = \log_2 M$ входов, формирует сигнал, принимающий в общем случае M различных амплитуд.

Основные элементы устройств цифровой демодуляции. Как уже говорилось ранее, в системах цифровой передачи информации задачей приемника является не точное воспроизведение переданного сигнала, а определение на основе искаженного шумами сигнала, какой именно символ из конечного набора был послан. На этом принципе построено большинство устройств цифровой демодуляции.

На рисунке 6.11 приведена обобщенная структурная схема оптимального (в смысле минимальной средней вероятности ошибки при демодуляции) когерентного демодулятора. Когерентность в данном случае обозначает, что приемнику известны параметры несущей, сформировавшей модулированный сигнал. Основой когерентной демодуляции является перемножение модулированного сигнала на синхронную несущую.

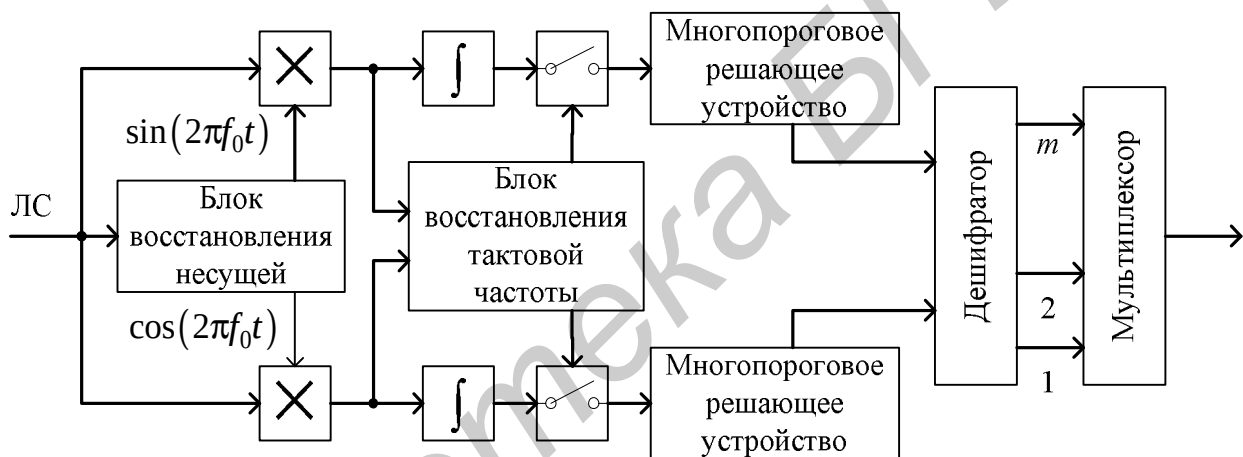


Рисунок 6.11 – Обобщенная структурная схема устройства цифровой демодуляции

Реализация *блоков восстановления несущей и тактовой частот* является достаточно сложной задачей, поэтому в данной лабораторной работе для этих целей используются генераторы, синхронизированные с соответствующими сигналами модулятора. Блок восстановления тактовой частоты используется для формирования последовательности стробирующих импульсов с частотой следования символов, моменты появления которых должны совпадать с моментами достижения выходными сигналами интегратора максимального значения.

Вместо интегратора с ключом сброса в устройствах демодуляции зачастую используют фильтр нижних частот, сглаживающий высокочастотный сигнал.

В моменты появления стробирующих импульсов в *многопороговых решающих устройствах* производится сравнение текущего отсчета выходного сигнала интегратора (ФНЧ) с возможными значениями, соответствующими алфавиту символов, и выносится решение в пользу ближайшего.

Работа *дешифратора* противоположна работе кодирующего устройства. Его задачей является преобразование переданного сигнала в M -ичные символы в двоичном параллельном коде. *Мультиплексор* преобразует полученную двоичную комбинацию в последовательный код.

Временные диаграммы, поясняющие работу основных элементов устройства цифровой демодуляции, приведены на рисунке 6.12.

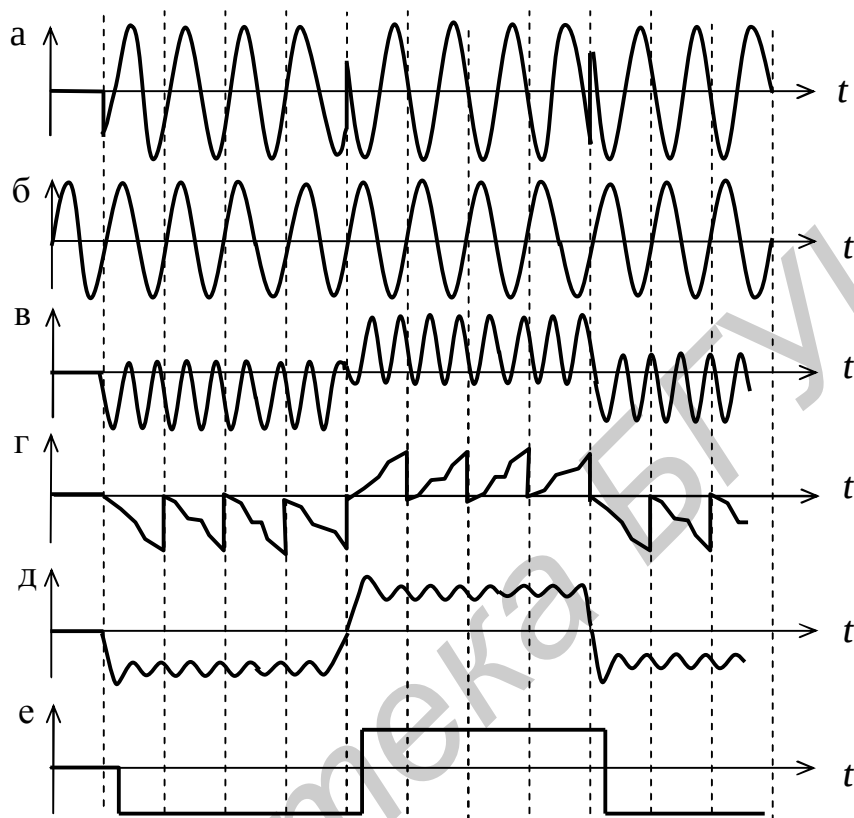


Рисунок 6.12 – Временные диаграммы работы демодулятора

Пусть на вход демодулятора поступает сигнал, изображенный на рисунке 6.12, а. После перемножения его на несущую (рисунок 6.12, б) получаем сигнал, представленный на рисунке 6.12, в. В случае если в устройстве цифровой демодуляции используются интеграторы, сигнал на входе многопорогового решающего устройства будет иметь вид, представленный на рисунке 6.12, г. Если используются фильтры нижних частот, то сигнал сглаживается, формируя огибающую (рисунок 6.12, д). Многопороговое решающее устройство преобразует полученный сигнал к прямоугольным импульсам (рисунок 6.12, е), которые после дешифрации будут соответствовать символам переданного сообщения.

Амплитудный модулятор и демодулятор. Рассмотрим подробности формирования и демодуляции АМ-сигналов на примере АМ-4 (амплитудная модуляция с $M = 4$). Структурная схема модулятора и когерентного демодулятора АМ-4 радиосигнала приведена на рисунке 6.13.

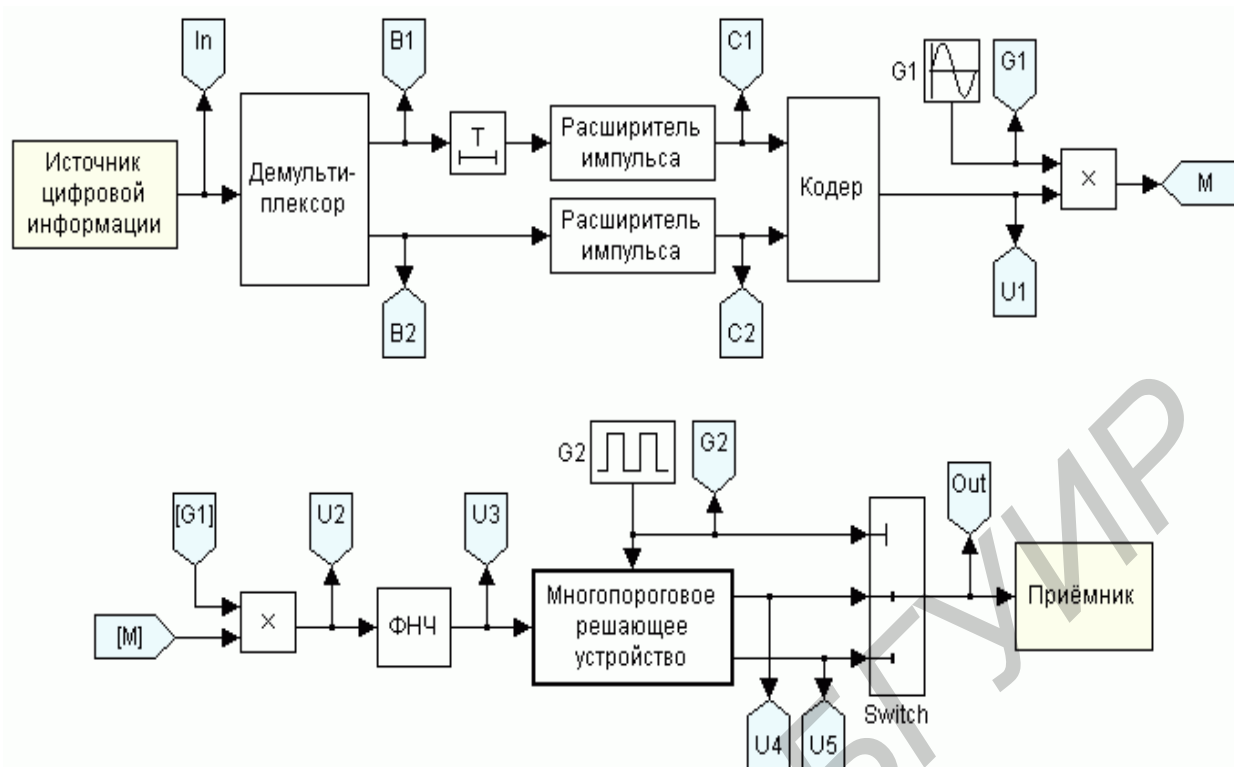


Рисунок 6.13 – Модулятор и демодулятор АМ-4 сигнала

Источник цифровой информации формирует последовательность прямоугольных импульсов длительностью T_6 . Эта последовательность разбивается демультиплексором на две подпоследовательности нечетных и четных битов. Импульсы с нечетными номерами (1, 3, 5, ...) задерживаются на время T_6 .

Далее длительность импульсов увеличивается до значения $2T_6$, после чего кодер осуществляет «свертку» полученных импульсов в сигнал, амплитуда которого соответствует символам M -ичного алфавита. В завершение полученный модулирующий сигнал переносится на несущую частоту f_0 , как и при обычной амплитудной модуляции.

На вход схемы демодулятора поступают АМ-4 радиосигнал и несущее гармоническое колебание. После их перемножения и сглаживания фильтром нижних частот формируется сигнал с малым уровнем пульсаций, сходный с тем, который был получен с помощью кодирующего устройства. Генератор прямоугольных импульсов $G2$ управляет работой многопорогового решающего устройства и аналогового коммутатора Switch. Моменты появления стробирующих импульсов совпадают с моментами достижения максимального значения выходными сигналами фильтра. В многопороговом решающем устройстве производится сравнение уровня входного сигнала с возможными значениями, соответствующими переданным символам, и выносится решение в пользу ближайшего. Далее M -ичный символ, длительность которого $2T_6$, в параллельном двоичном коде поступает на вход коммутатора, который обеспечивает последовательную выдачу каждого бита в течение времени T_6 .

Аналогичным образом строятся модуляторы и демодуляторы АМ-2 и АМ-8, их схемы приведены на рисунках 6.14 и 6.15 соответственно.

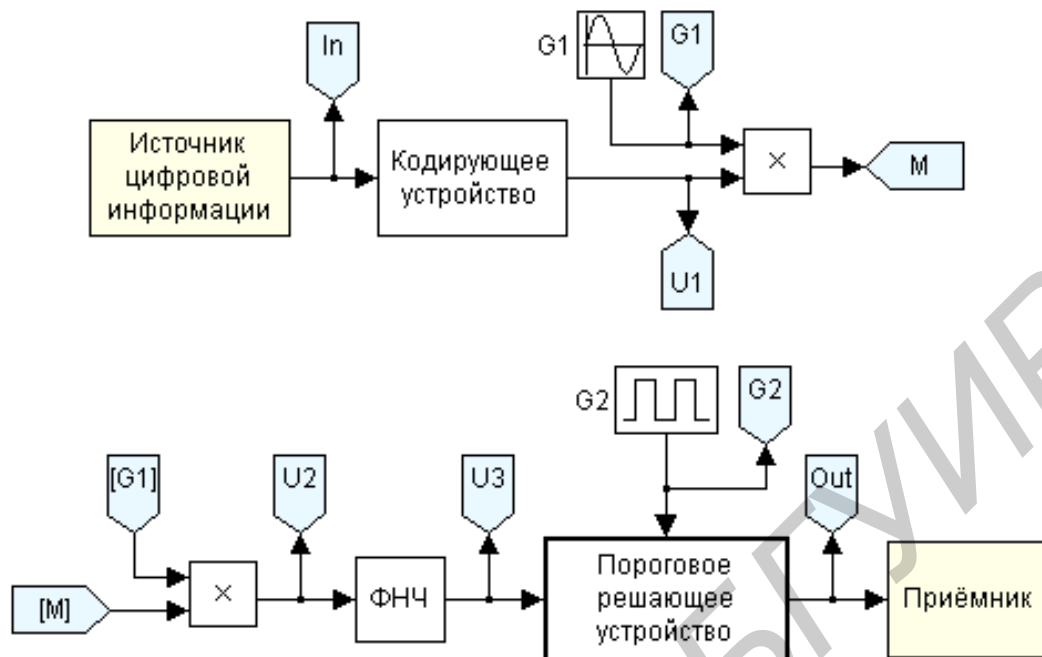


Рисунок 6.14 – Модулятор и демодулятор АМ-2 сигнала

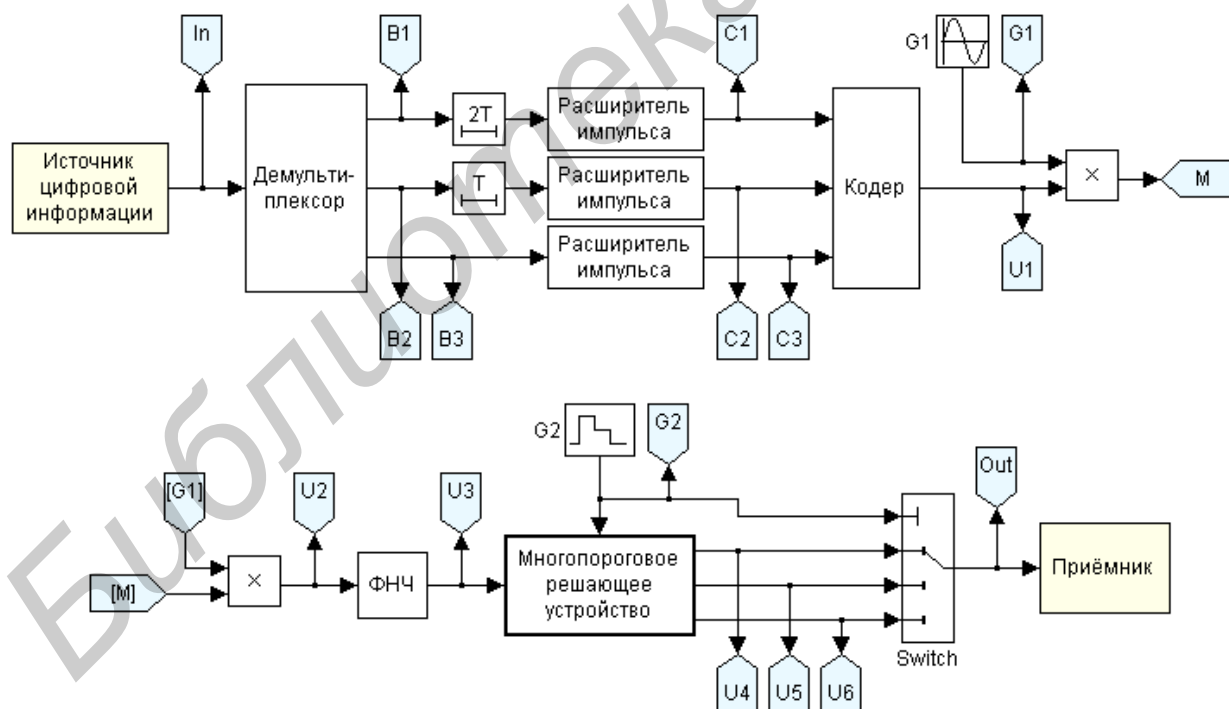


Рисунок 6.15 – Модулятор и демодулятор АМ-8 сигнала

Фазовый модулятор и демодулятор. Рассмотрим подробности формирования и демодуляции ФМ-сигналов на примере ФМ-4 (фазовая модуляция с $M = 4$).

Структурная схема модулятора и когерентного демодулятора ФМ-4 радиосигнала приведена на рисунке 6.16.

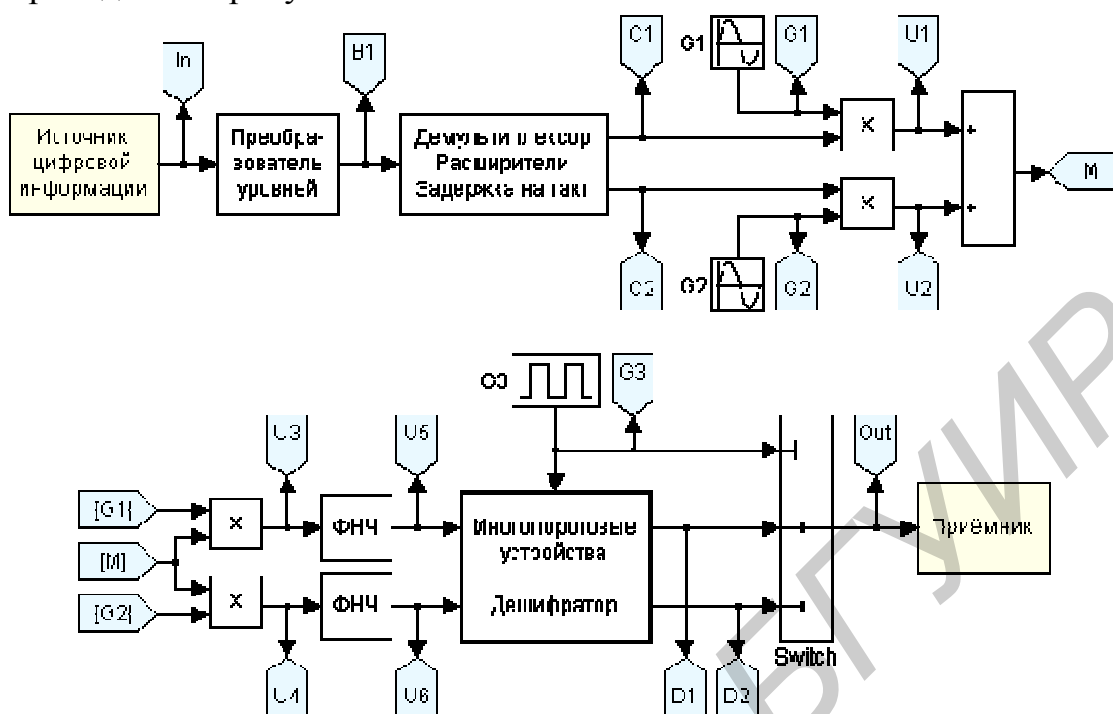


Рисунок 6.16 – Модулятор и демодулятор ФМ-4 сигнала

Как и в случае АМ-4, последовательность импульсов разбивается демультиплексором на две подпоследовательности нечетных и четных битов, которые направляются в синфазную и квадратурные ветви соответственно. Импульсы в синфазной ветви задерживаются на время T_0 . Далее длительность импульсов каждой подпоследовательности увеличивается до значения $2T_0$, после чего осуществляется перенос на частоту f_0 в каждой ветви. Сложение результатов перемножений завершает процесс формирования ФМ-4 радиосигнала.

Демодулятор ФМ-4 радиосигнала осуществляет перемножение ФМ-4 радиосигнала и несущей (синусоидальной и косинусоидальной). Как и в случае амплитудной модуляции, основную роль в демодуляции играют многопороговые решающие устройства и дешифратор, осуществляющие восстановление исходных символов сообщения.

Структурная схема модулятора ФМ-4 радиосигнала со смещением приведена на рисунке 6.17. Как можно заметить, единственным отличием данной схемы от схемы модулятора ФМ-4 сигнала является отсутствие элемента задержки на время T_0 в синфазной ветви. Демодулятор ФМ-4 радиосигнала со смещением полностью аналогичен соответствующему демодулятору сигнала без смещения.

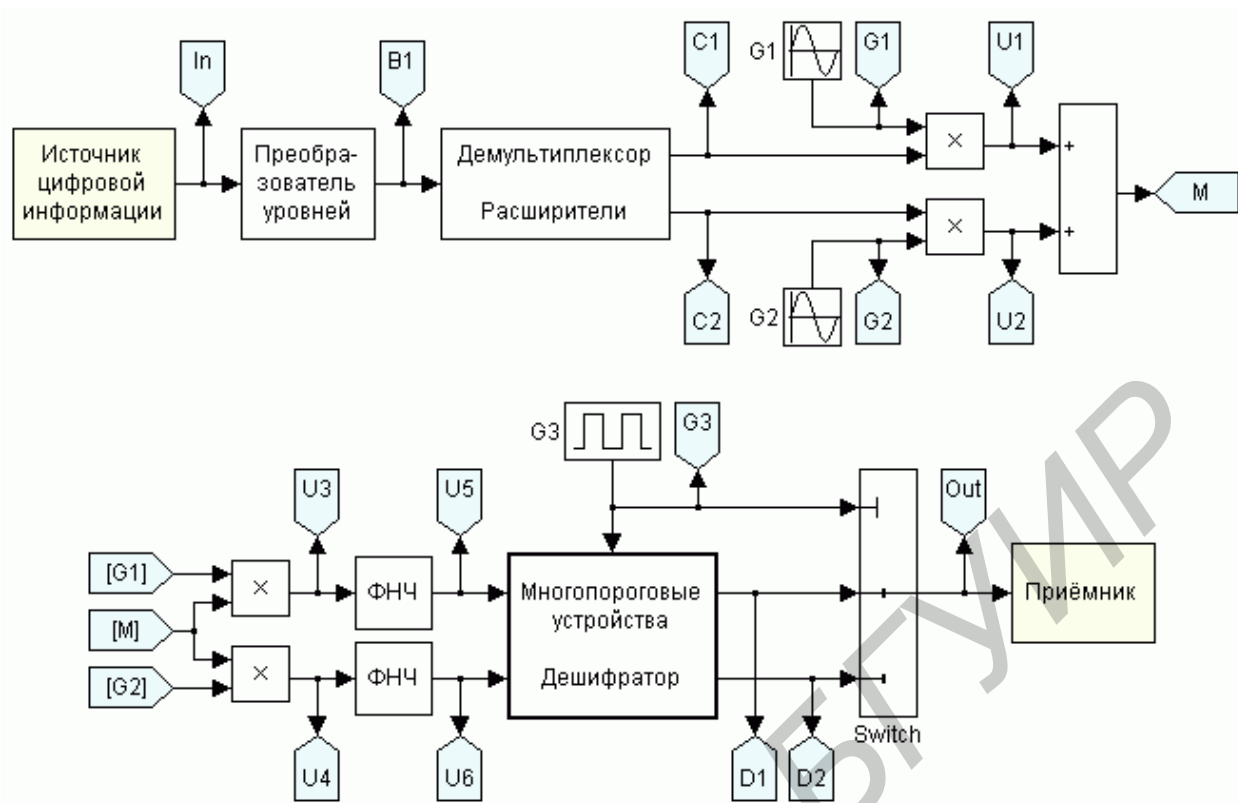


Рисунок 6.17 – Модулятор и демодулятор ФМ-4 сигнала со смещением

Структурные схемы ФМ-2, ФМ-8, $\pi/4$ -ОКФМ модуляторов и демодуляторов представлены на рисунках 6.18, 6.19 и 6.20 соответственно.

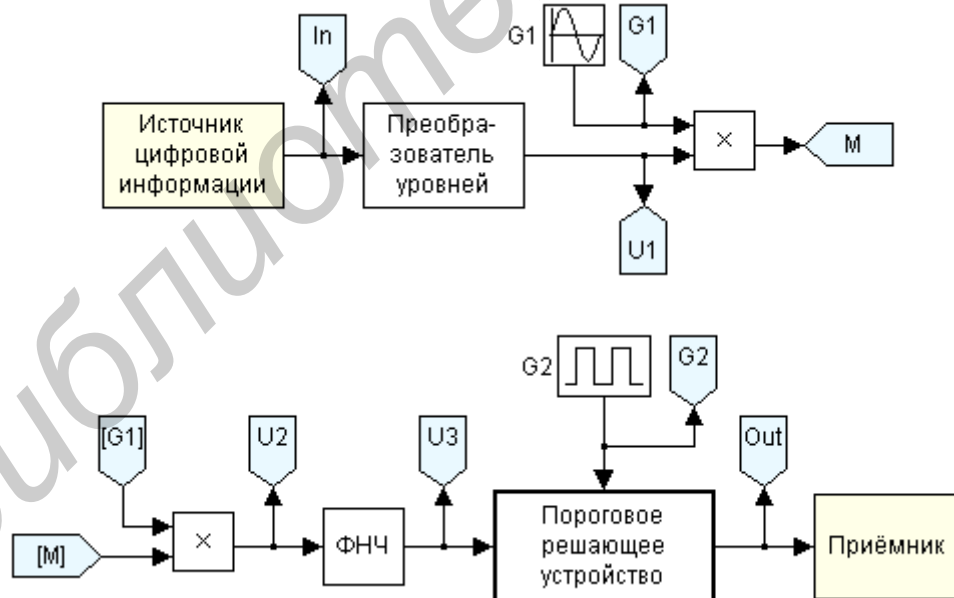


Рисунок 6.18 – Модулятор и демодулятор ФМ-2 сигнала

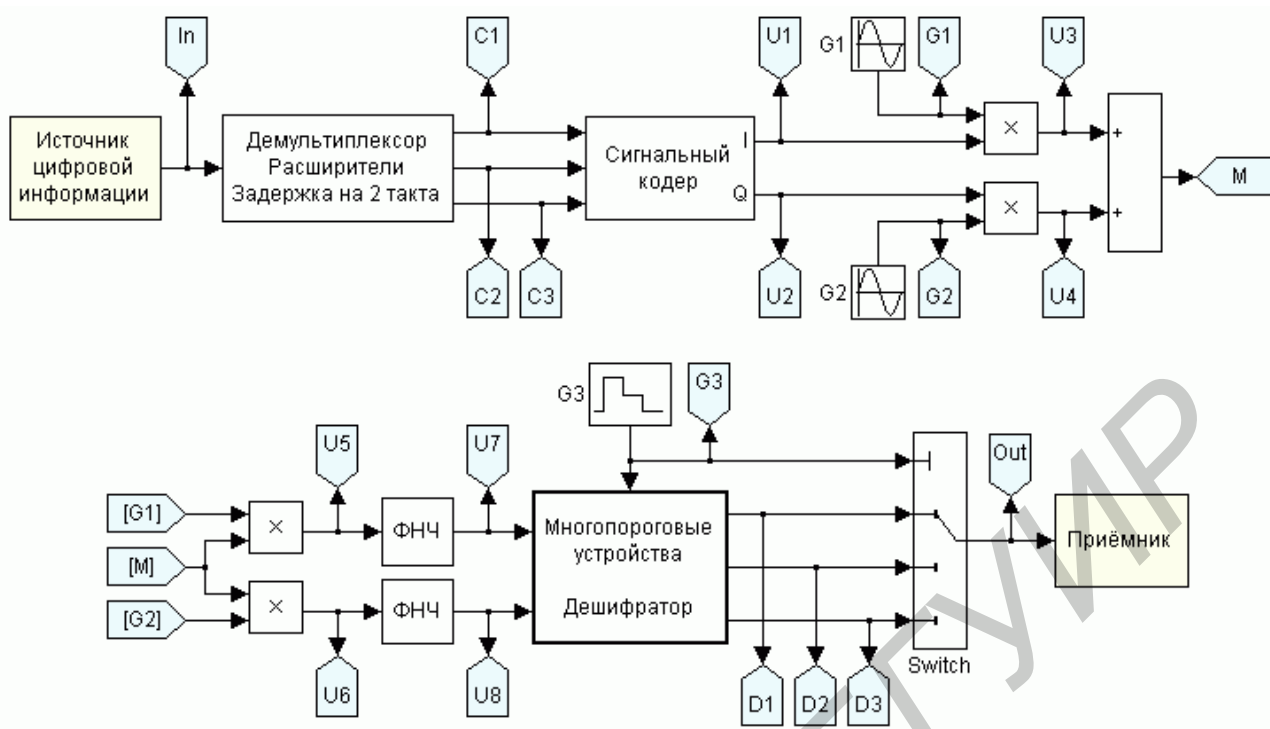


Рисунок 6.19 – Модулятор и демодулятор ФМ-8 сигнала

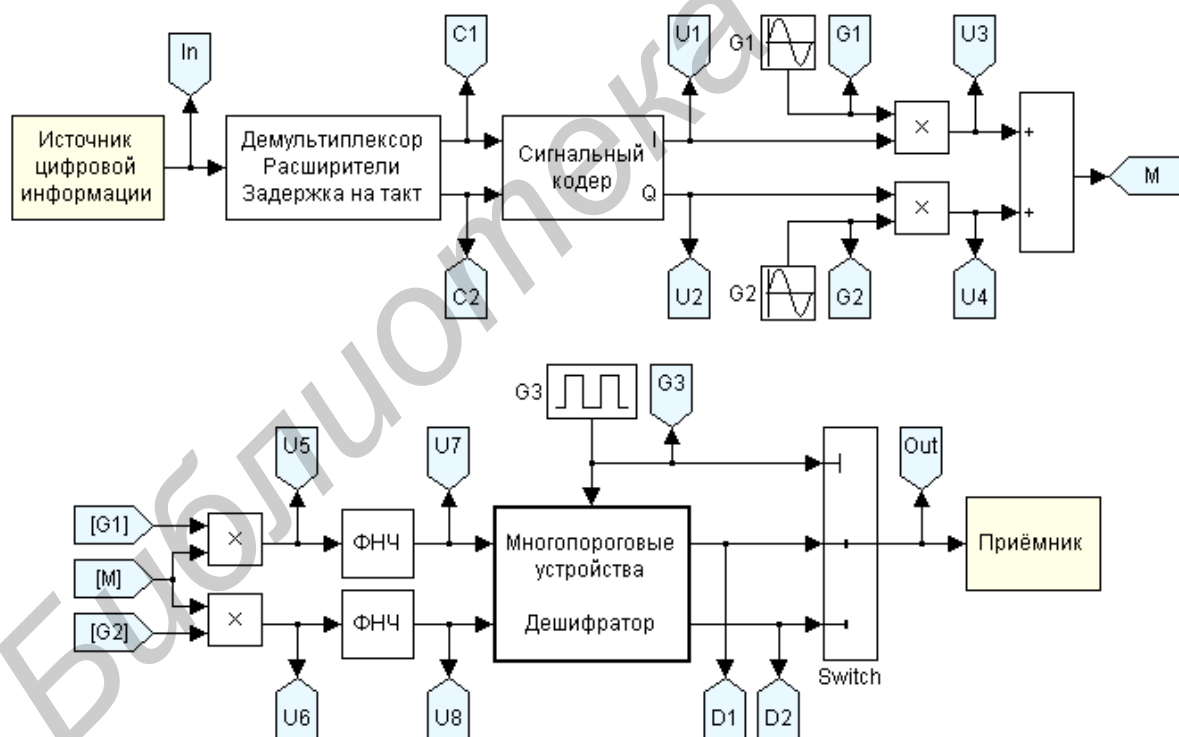


Рисунок 6.20 – Модулятор и демодулятор $\pi/4$ -ОКФМ сигнала

Частотный модулятор и демодулятор. Структурные схемы модуляторов сигналов с многопозиционной частотной модуляцией изображены на рисунке 6.21.

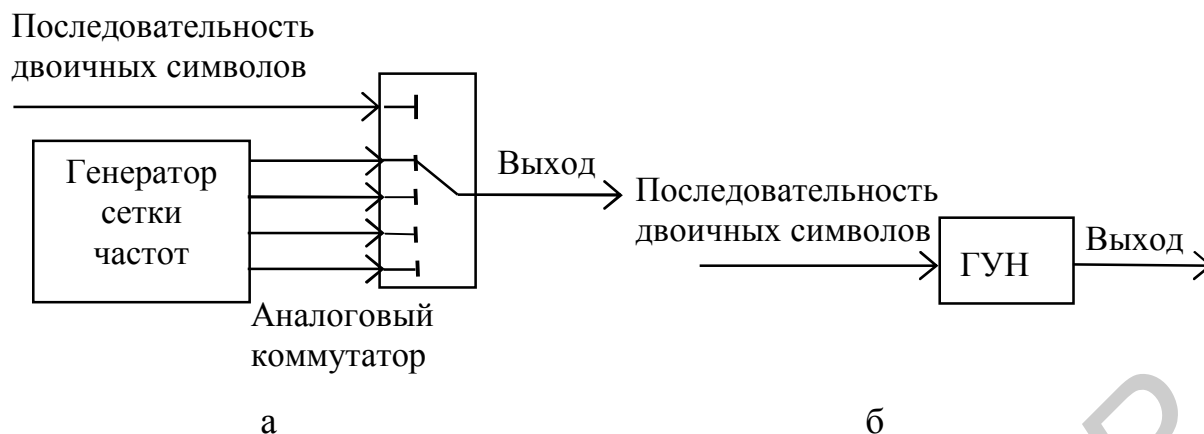


Рисунок 6.21 – Структурная схема модулятора ЧМ-сигналов

Как показано на рисунке 6.21, а, для формирования ЧМ-сигналов может быть использован набор из M генераторов гармонических сигналов, настроенных на соответствующие частоты и подключаемых к выходу схемы с помощью аналогового коммутатора. Главным недостатком такой схемы формирования является большой уровень внеполосных излучений, вызванных разрывами фазы в моменты коммутации.

Другая возможность формирования ЧМ-сигналов заключается в непосредственной модуляции одного управляемого по частоте генератора (ГУН – генератор, управляемый напряжением) многоуровневой последовательностью модулирующих импульсов (рисунок 6.21, б). В этом случае формируются ЧМ-сигналы с непрерывной фазой (НФЧМ-сигналы). Такие сигналы обладают более компактным спектром.

Структурная схема демодулятора ЧМ-4 сигнала изображена на рисунке 6.22. Он является оптимальным в смысле критерия максимального правдоподобия. Каждый канал демодулятора представляет собой последовательное соединение перемножителя, осуществляющего перемножение входного сигнала на гармонический опорный сигнал соответствующей частоты, и интегратора со сбросом, выполняющего интегрирование произведения в течение интервала времени T_0 . Полученные сигналы в оптимальные моменты времени сравниваются между собой, и решение выносится в пользу того канала, на выходе которого сигнал в моменты отсчета достигает максимального значения.

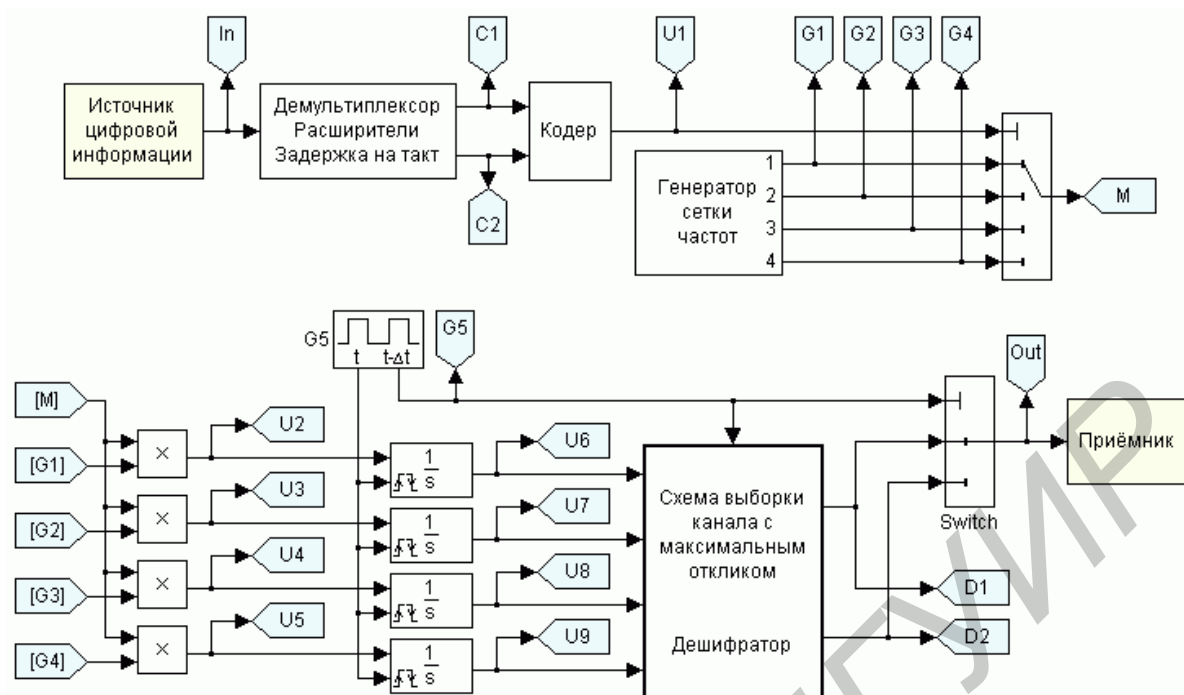


Рисунок 6.22 – Модулятор и демодулятор ЧМ-4 сигнала

Структурная схема устройства формирования ММС-сигнала изображена рисунке 6.23. Поток информационных битов преобразуется в последовательность положительных и отрицательных импульсов. Эти импульсы разбиваются демультиплексором на две подпоследовательности. Импульсы в синфазной ветви задерживаются на время T_0 . Далее длительность импульсов каждой подпоследовательности увеличивается до значения $2T_0$, перемножается на гармонические полуволны квадратурных каналов и переносится на высокую частоту f_0 .

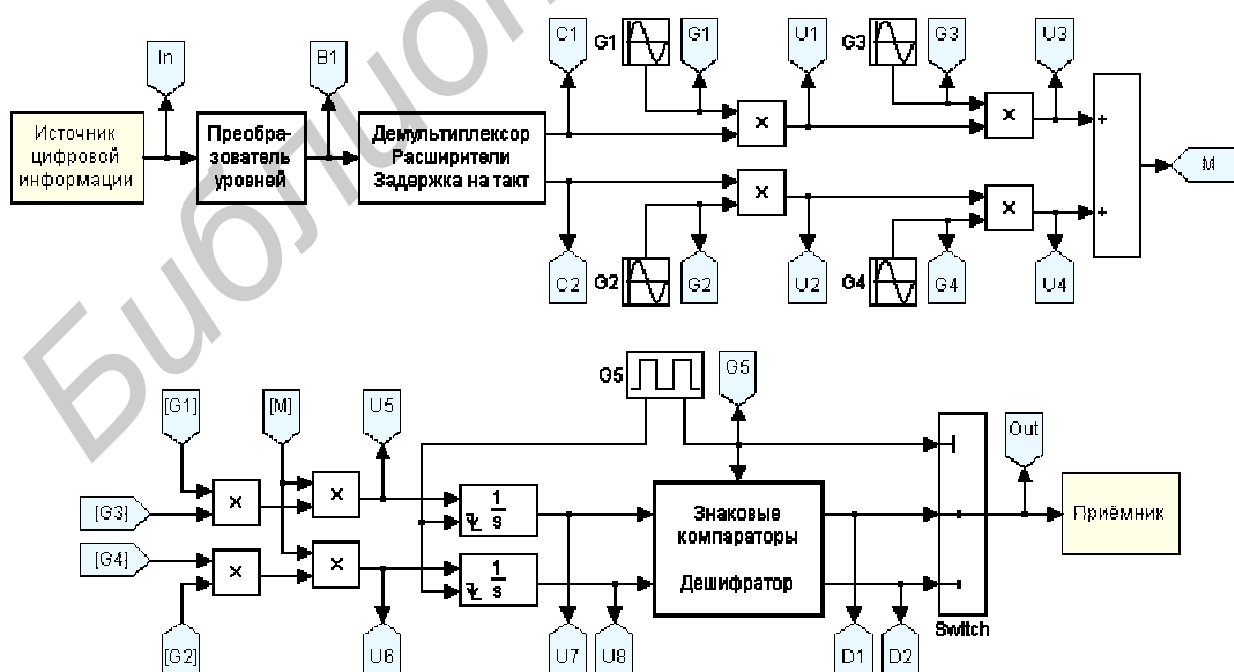


Рисунок 6.23 – Модулятор и демодулятор ММС-сигнала

При совпадении сигналов на выходе демультиплексора в синфазной и квадратурной ветвях формируется сигнал частотой f_2 , а при несовпадении – частотой f_1 , и его полярность зависит от полярности сигнала в синфазной ветви.

Демодулятор содержит два квадратурных канала, состоящих из перемножителя, интегратора со сбросом и решающего устройства (знакового компаратора). Каждый канал по существу реализует оптимальный алгоритм приема двух противоположных сигналов синусоидальной формы. Время интегрирования в интеграторах равно $2T_0$.

Структурная схема модулятора НФЧМ-4 на базе ГУН изображена на рисунке 6.24.

Квадратурный амплитудный модулятор и демодулятор. В связи с тем что сигнальные созвездия ФМ-4 и КАМ-4 сигналов совпадают, для их формирования и демодуляции можно использовать аналогичные устройства модуляции и демодуляции.

Структурные схемы устройства формирования и демодуляции КАМ-16 радиосигнала представлены на рисунке 6.25.

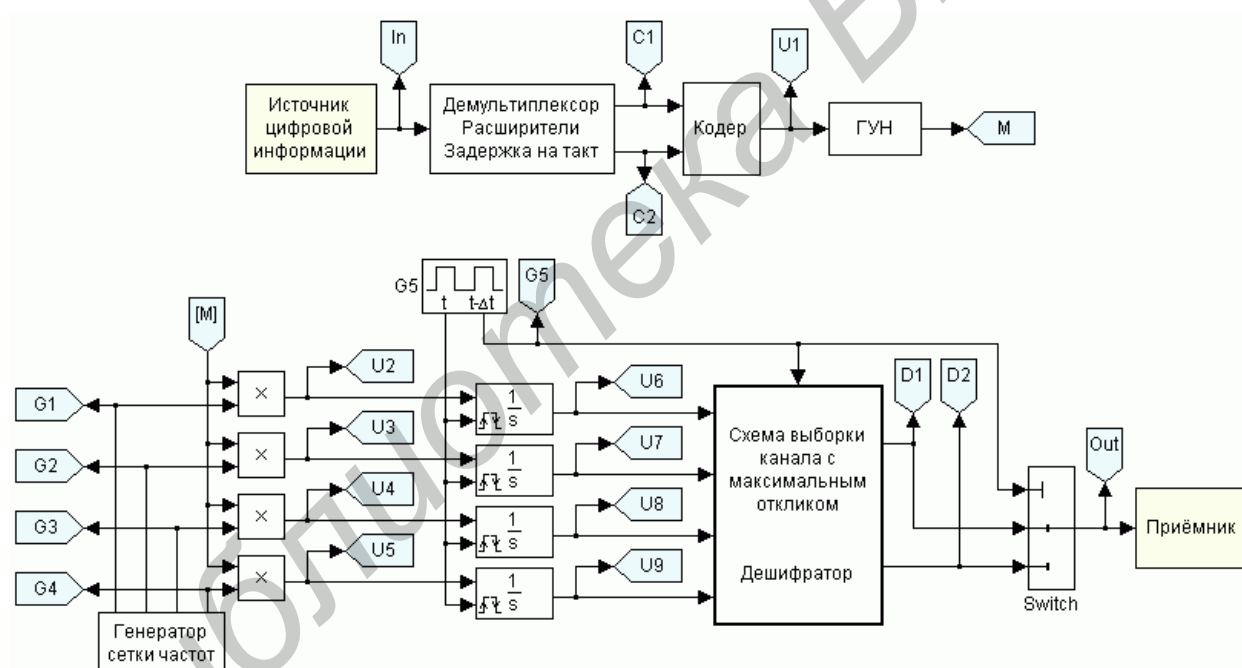


Рисунок 6.24 – Модулятор и демодулятор ЧМ-4 сигнала с непрерывной фазой

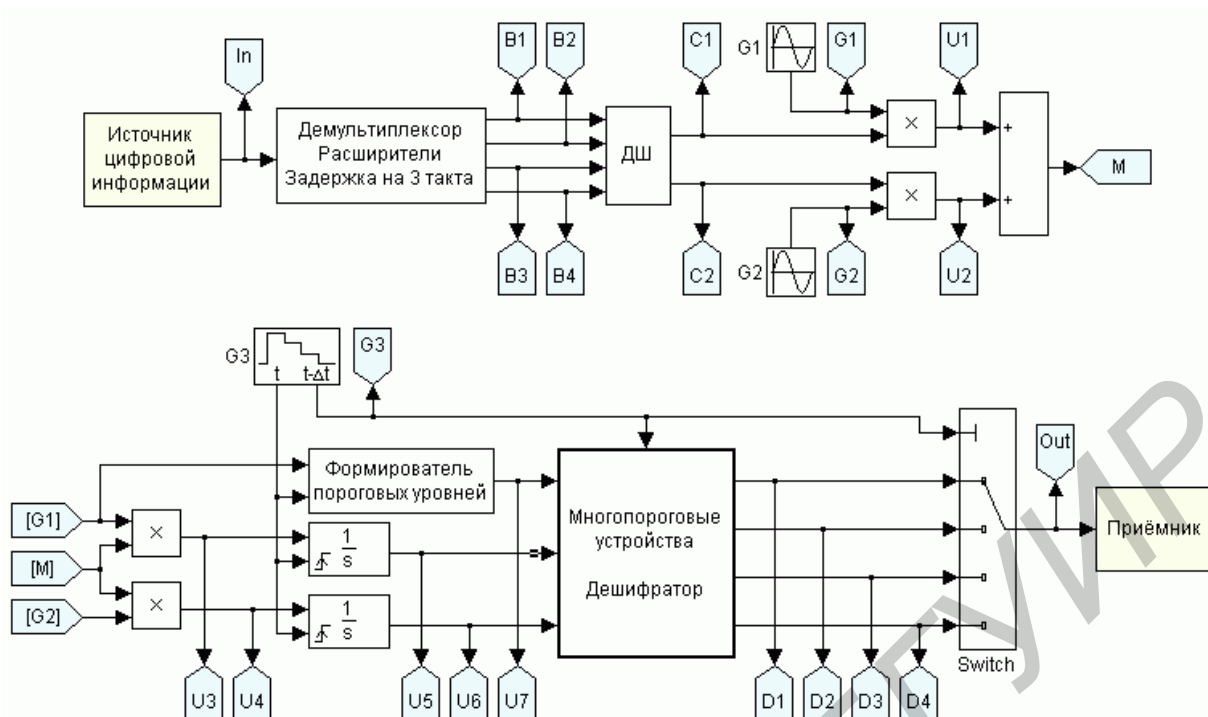


Рисунок 6.25 – Модулятор и демодулятор КАМ-16 сигнала

Демультимплексор, расширители импульсов и устройства задержки в схеме модулятора служат для представления передаваемой последовательности битов в параллельном коде. Кодер служит для формирования сигналов в синфазной и квадратурной ветвях, которые согласно сигнальному созвездию, представленному на рисунке. 6.7, б, могут принимать значения из множества $\{-3, -1, +1, +3\}$. Полученные сигналы переносятся на высокую частоту и суммируются.

Демодулятор содержит два квадратурных канала, состоящих из перемножителя, интегратора со сбросом и многопорогового решающего устройства. Время интегрирования в интеграторах равно $4T_0$. Назначение остальных устройств, входящих в состав демодулятора КАМ-16 радиосигнала, было рассмотрено ранее.

Структурная схема модулятора и демодулятора КАМ-4 представлена на рисунке 6.26.

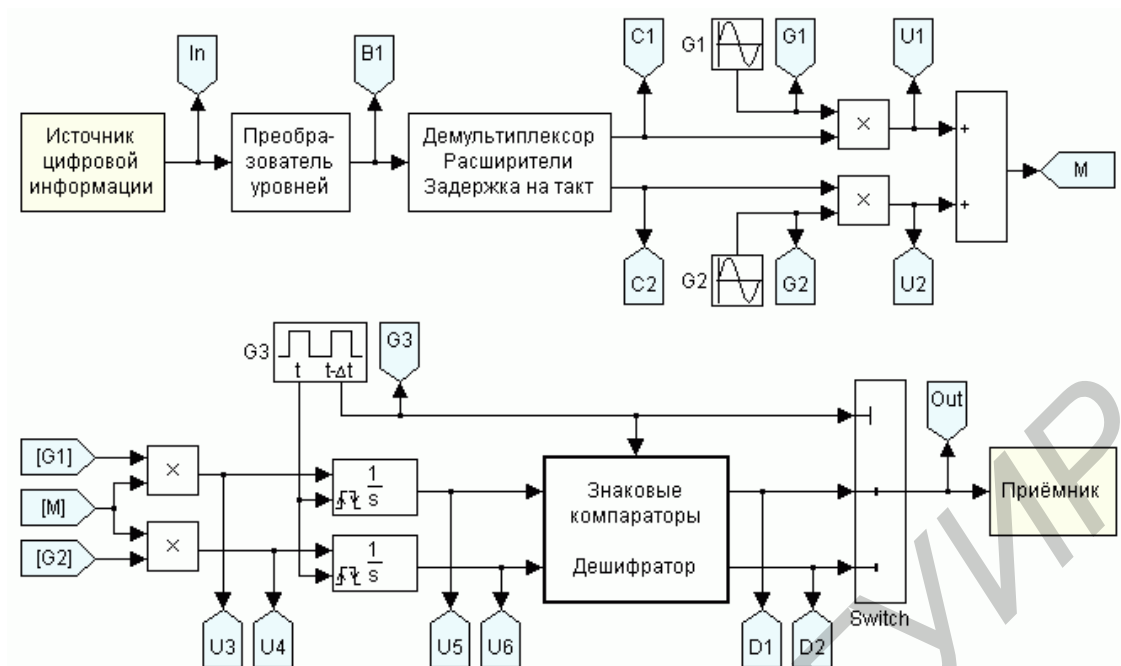


Рисунок 6.26 – Модулятор и демодулятор КАМ-4 сигнала

6.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой программный комплекс, построенный на базе системы MATLAB 6.5 с использованием среды моделирования динамических систем Simulink.

Для начала работы с макетом необходимо загрузить файл «Цифровая модуляция». После запуска программы на экране отображается навигационное окно, позволяющее выбрать исследуемый метод цифровой модуляции либо помехоустойчивость различных видов модуляции (рисунок 6.27).

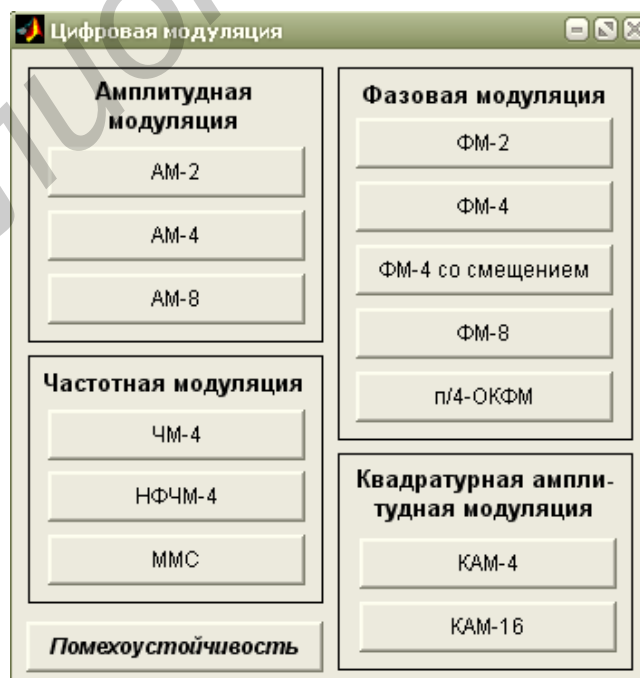


Рисунок 6.27 – Окно выбора методов цифровой модуляции

Лабораторный макет позволяет исследовать:

- амплитудную модуляцию (АМ-2, АМ-4, АМ-8);
- частотную модуляцию (ЧМ-4, НФЧМ-4, ММС);
- фазовую модуляцию (ФМ-2, ФМ-4, ФМ-4 со смещением, ФМ-8, $\pi/4$ -ОКФМ);
- квадратурную амплитудную модуляцию (КАМ-4, КАМ-16);
- помехоустойчивость всех вышеназванных видов цифровой модуляции.

В соответствии с полученным вариантом задания в навигационном окне следует выбрать требуемый для исследования вид модуляции, после чего на экране отобразится окно Simulink со схемами устройств модуляции и демодуляции (рисунок 6.28).

Для начала исследования необходимо установить параметры модуляции, дважды нажав указателем мыши на кнопку «Параметры», которая находится в правом верхнем углу окна. Согласно варианту задания устанавливаются следующие параметры:

- *передаваемое сообщение* записывается в виде последовательности двоичных символов (нулей и единиц);
- *скорость передачи* выражается в битах в секунду;
- *частота носителя* выражается в герцах;
- *начальная фаза носителя* (в радианах) может быть представлена математическим выражением на языке MATLAB (например, « $\pi/2$ », « $3.14/2$ »);
- *минимальная частота носителя* (для частотных видов модуляции);
- *частотный инкремент* задает расстояние между соседними частотными позициями (для частотных видов модуляции).

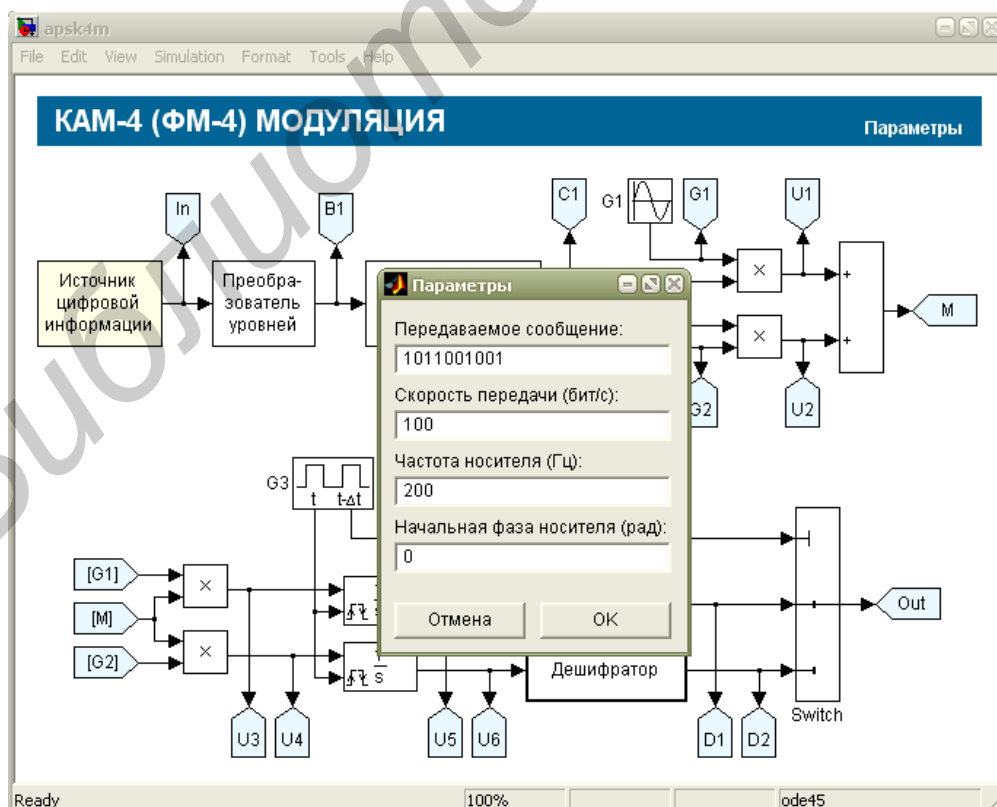


Рисунок 6.28 – Окно исследования модуляции и демодуляции

После установки параметров модуляции следует запустить процесс моделирования нажатием на кнопку «ОК».

Для просмотра результатов модуляции и демодуляции необходимо выбрать интересующий выход и двойным нажатием указателя мыши открыть окно осциллографа (рисунок 6.29).



Рисунок 6.29 – Окно осциллографа

Все выходы схемы имеют короткое символьное обозначение (например, «In», «Out», «G1» и др.) и представлены на схемах в виде голубых пятиугольников. Данные обозначения используются в дальнейшем в подрисуночных подписях к осциллограммам и спектрам и позволяют определить источник сигнала в каталоге схем.

При необходимости сохранения полученных осциллограмм необходимо выбрать в главном меню окна «Осциллограф» пункт меню «Файл» и подпункт «Сохранить в отчет».

Для исследования спектра следует выбрать в главном меню пункт «Режим работы» и подпункт «Анализатор спектра». После этого на экране отобразится спектр исследуемого сигнала (рисунок 6.30), а в главном окне MATLAB Command Window – данные об амплитудах и частотах спектра (рисунок 6.31).



Рисунок 6.30 – Окно анализатора спектра

Следует также заметить, что осциллограф и анализатор спектра подключаются одновременно в одну точку схемы, поэтому соответствующие окна всегда одновременно отображают осциллограмму и спектр одного и того же сигнала.

Для масштабирования осциллограммы или спектра сигнала следует воспользоваться мышью:

- для увеличения изображения достаточно выделить требуемый участок с помощью левой кнопки мыши;
- для уменьшения необходимо в любом месте изображения щелкнуть правой кнопкой мыши.

Чтобы перейти к исследованию сигнала с другого выхода, следует закрыть окно исследования текущего сигнала (пункт меню «Файл», подпункт «Закрыть окно») и выбрать требуемый сигнал. При необходимости визуального сопоставления осциллограмм нескольких сигналов окно исследования текущего сигнала закрывать не требуется. После открытия окон исследования всех требуемых сигналов их можно расположить относительно друг друга в любом удобном для восприятия порядке. Такой способ исследования позволяет увидеть «эволюцию» сигнала при прохождении через последовательность блоков схемы.

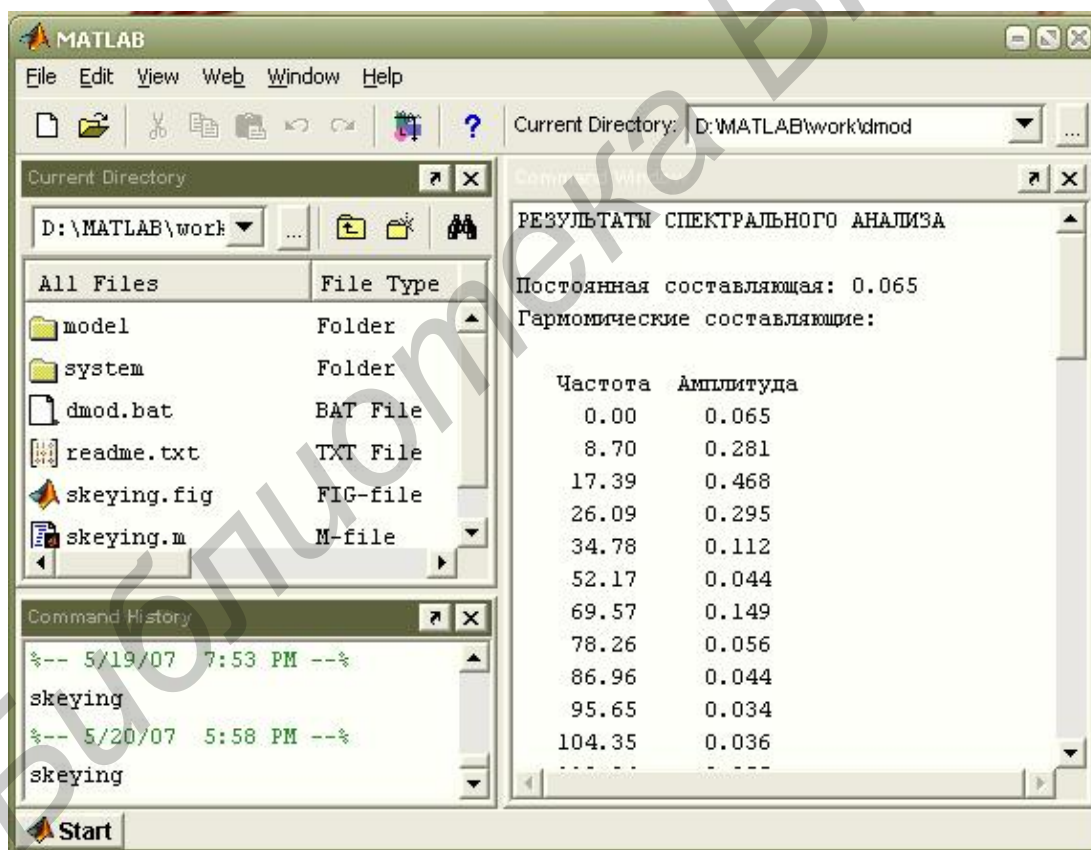


Рисунок 6.31 – Окно MATLAB Command Window

Последовательность сохранения спектра сигнала аналогична последовательности сохранения осциллограммы.

Если возникает необходимость исследовать схему при других параметрах модуляции, следует закрыть все открытые окна осциллографа и анализатора спектра и указать новые параметры модуляции с помощью кнопки «Параметры».

Для перехода к исследованию других устройств модуляции и демодуляции прежде всего необходимо закрыть текущее окно Simulink. При появлении запроса на сохранение файла следует нажать на кнопку «No».

Для получения зависимостей вероятности искажения символа при демодуляции от отношения сигнал/шум следует воспользоваться кнопкой «Помехоустойчивость» в навигационном окне. При этом откроется окно, изображенное на рисунке 6.32.

С помощью элементов выбора ☒ необходимо отметить исследуемые виды модуляции, после чего нажать кнопку «Старт». Построенные таким образом зависимости можно сохранить в отчет нажатием кнопки «Сохранить». Кнопка «Очистить» служит для сброса всех элементов выбора и стирания всех ранее построенных графиков.

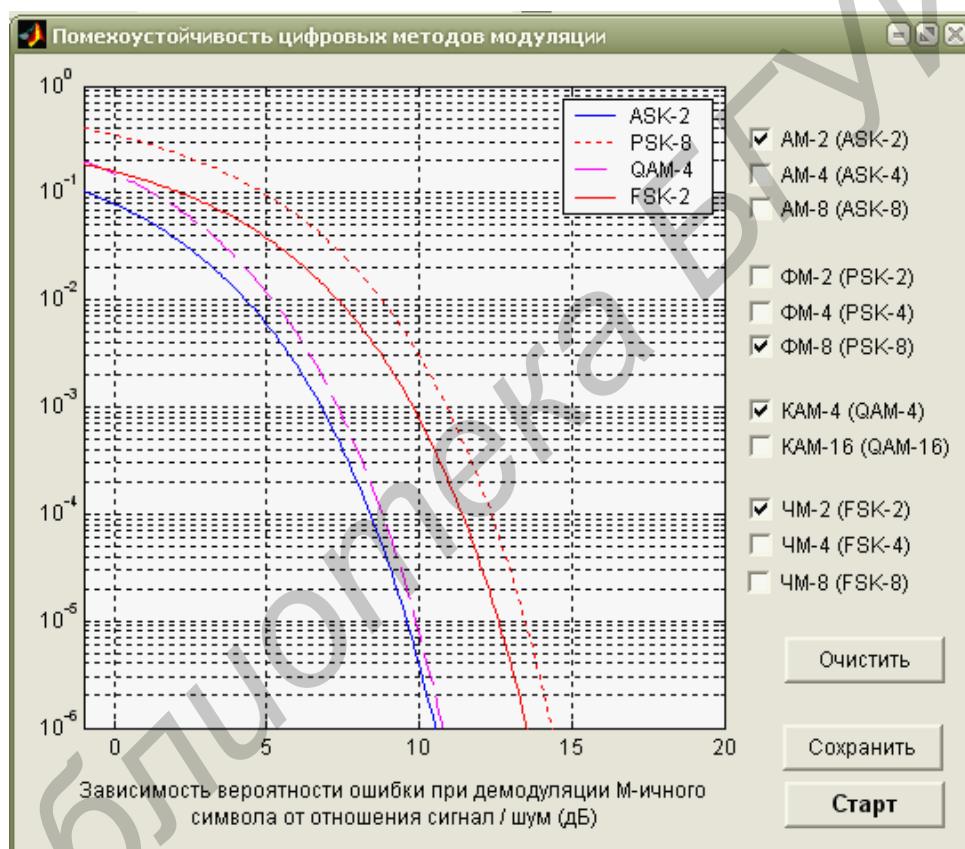


Рисунок 6.32 – Окно исследования помехоустойчивости различных видов модуляции

После завершения выполнения лабораторной работы и закрытия главного окна программы на экране пользователя отображается запрос о необходимости создания отчета (рисунок 6.33).

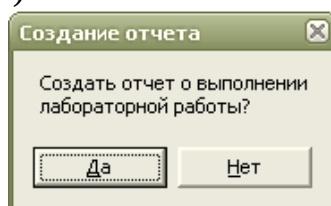
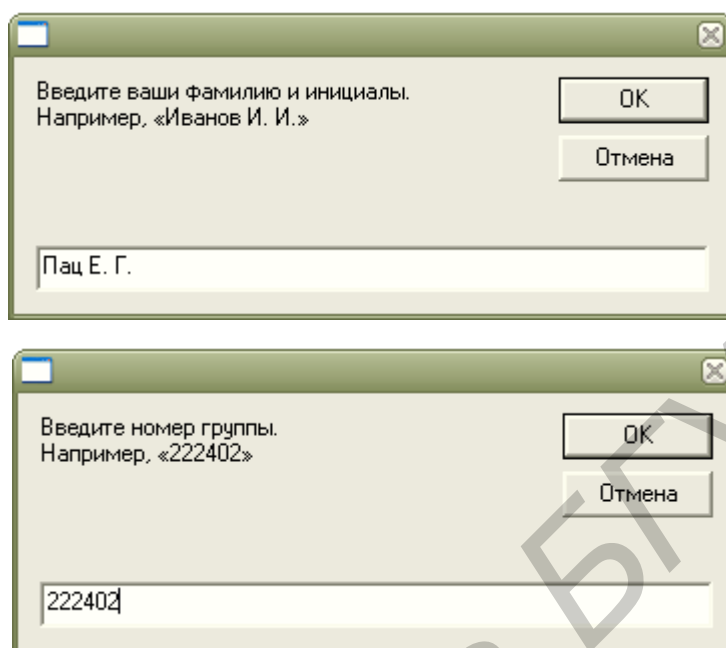


Рисунок 6.33 – Окно запроса о создании отчета

При нажатии на кнопку «Да» пользователю предлагается ввести фамилию и номер группы (рисунок 6.34). Эти данные будут использованы для формирования титульной страницы отчета и регистрации результатов выполнения лабораторной работы в базе данных.



Введите ваши фамилию и инициалы.
Например, «Иванов И. И.»

Пац Е. Г.

Введите номер группы.
Например, «222402»

222402

Рисунок 6.34 – Окна идентификации пользователя

Отчет формируется на базе шаблона в формате Microsoft Word. Данный отчет включает:

- титульный лист;
- цель выполнения лабораторной работы;
- задаваемые в соответствии с вариантом параметры исследуемых видов модуляции;
- снятые осциллограммы и спектры сигналов;
- полученные графики исследования помехоустойчивости различных видов модуляции.

6.3 Домашнее задание

6.3.1 Изучить теоретическую часть и описание лабораторной установки.

6.3.2 Изучить методику расчета мощности и практической ширины спектра сигнала.

6.3.3 В соответствии с вариантом для каждого вида модуляции определить объем алфавита символов M , длину последовательностей двоичных символов m , длительность и скорость передачи битов и символов.

6.3.4 В соответствии с вариантом задания и таблицей 6.2 рассчитать вероятность ошибки при декодировании символа для следующих отношений сигнал/шум: 1, 7, 10. Для определения гауссового интеграла ошибок рекомендуется использовать табличные значения.

6.4 Порядок выполнения работы

Для всех видов модуляции, указанных в варианте задания (см. таблицу 6.2), выполните следующие шаги.

6.4.1 В соответствии с вариантом задания (см. таблицы 6.2 и 6.3) установите параметры схемы и передаваемое сообщение. Снимите осциллограммы входного и выходного сигнала модулятора, а также произвольного сигнала (кроме входного и выходного) демодулятора. Выявите десять или более характерных точек спектра модулированного сигнала и определите амплитуды гармоник в этих точках.

6.4.2 Снимите осциллограмму выходного сигнала демодулятора (принятое сообщение) и определите его запаздывание относительно передаваемого сообщения.

6.4.3 Рассчитайте мощность и практическую ширину спектра модулированного сигнала.

6.4.4 Рассчитайте девиацию частоты либо индекс модуляции, либо коэффициент глубины модуляции в зависимости от вида модуляции.

6.4.5 Снимите зависимость вероятности ошибки символа при демодуляции.

6.5 Содержание отчета

6.5.1 Осциллограммы и спектры сигналов, полученные в ходе выполнения пункта 6.4.1 данной работы. В отчете должна быть представлена информация о десяти или более характерных точках спектра (амплитуда и частота гармонических составляющих).

6.5.2 Сигнальные созвездия исследуемых видов модуляции.

6.5.3 Оценка спектральной эффективности каждого вида модуляции.

6.5.4 Расчеты из пунктов 6.5.4 и 6.5.5 выполнения лабораторной работы.

6.5.5 Расчеты вероятностей ошибок для заданных отношений сигнал/шум, а также полученные графические зависимости. При сопоставлении этих результатов следует учесть, что в пункте 6.5.4 получены зависимости от отношения сигнал/шум в децибелах, т. е. от $10\log(E_6/N_0)$.

6.5.6 Выводы.

6.6 Варианты заданий

В таблице 6.2 указаны виды модуляции, которые необходимо исследовать в определенном для каждого студента варианте заданий.

Таблица 6.2 – Варианты заданий: виды модуляции и сообщения

Варианты заданий	Исследуемые виды модуляции	Передаваемое сообщение
1, 6, 11	АМ-2, ЧМ-4, ФМ-2, КАМ-16	01001110
2, 7, 12	АМ-4, НФЧМ-4, ФМ-4, КАМ-16	11001001
3, 8, 13	АМ-8, ММС, ФМ-4 со смещением, КАМ-4	101001
4, 9, 14	АМ-8, ММС, ФМ-8, КАМ-16	10010011
5, 10, 15	АМ-4, НФЧМ-4, $\pi/4$ -ОКФМ, КАМ-4	110111

В таблице 6.3 приведены варианты исходных параметров для каждого вида модуляции.

Таблица 6.3 – Варианты заданий: параметры схем

Параметры схемы	Варианты заданий														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Амплитудная модуляция															
Скорость передачи, бит/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Частота носителя, Гц	2	8	8	10	20	15	21	24	18	20	30	24	26	28	30
Начальная фаза носителя	0	0	0	0	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$
Фазовая модуляция, ММС															
Скорость передачи, бит/с	6	7	8	9	10	15	14	13	12	11	1	2	3	4	5
Частота носителя, Гц	15	15	20	20	20	30	30	30	20	20	5	5	10	10	10
Начальная фаза носителя	$\frac{\pi}{2}$	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2}$	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2}$	0	$-\frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2}$	0	$-\frac{\pi}{2}$
Частотная модуляция (ЧМ-4, НФЧМ-4)															
Скорость передачи, бит/с	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Минимальная частота, Гц	30	25	20	15	20	18	16	14	15	14	13	12	10	9	8
Частотный инкремент	5	5	5	5	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1
Амплитудно-фазовая модуляция (КАМ-4, КАМ-16)															
Скорость передачи, бит/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Частота носителя, Гц	4	4	10	10	10	10	20	20	20	20	20	40	40	40	40
Начальная фаза носителя	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

6.7 Контрольные вопросы

1 В чем отличия цифровых методов модуляции от аналоговых? Какие преимущества и недостатки имеют цифровые методы модуляции?

2 Каковы основные показатели эффективности и качества цифровых методов модуляции? Вспомните, как оценивалась эффективность аналоговых методов модуляции.

3 Какие основные структурные элементы используются при построении схем цифровой модуляции и демодуляции? Какие устройства применяются для преобразования сообщения из последовательного кода в параллельный и наоборот?

4 Что такое сигнальное созвездие, диаграмма фазовых переходов? Какую информацию можно узнать с их помощью?

5 В чем суть фазовой модуляции со смещением, $\pi/4$ -квадратурной относительно фазовой модуляции?

6 Какой метод цифровой модуляции является наиболее эффективным и почему?

7 Каковы причины запаздывания принятого сигнала относительно передаваемого сообщения?

8 В чем отличие реальных физических систем, осуществляющих цифровую модуляцию и демодуляцию, от лабораторных макетов? Какие дополнительные структурные элементы потребуются при реализации устройств цифровой модуляции и демодуляции? На каких реальных элементах возможна реализация этих устройств?

Литература

1 Сорока, Н. И. Телемеханика [Электронный ресурс] : конспект лекций для студ. спец. 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах». Ч. 5 : Технологии передачи дискретной информации / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2006.

2 Гаранин, М. В. Системы и сети передачи информации / М. В. Гаранин, В. Н. Журавлёв, С. В. Кунегин. – М. : Радио и связь, 2001.

3 Маковеева, М. М. Системы и средства связи с подвижными объектами / М. М. Маковеева, Ю. С. Шинаков. – М. : Радио и связь, 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. СПЕКТРЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ..	3
1.1 Теоретическая часть	3
1.2 Описание лабораторной установки	9
1.3 Домашнее задание	13
1.4 Порядок выполнения работы	14
1.5 Варианты заданий	15
1.6 Содержание отчета	17
1.7 Контрольные вопросы	18
Литература	18
Лабораторная работа №2. НЕПРЕРЫВНЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ	19
2.1 Теоретическая часть	19
2.2 Описание лабораторной установки	20
2.3 Домашнее задание	26
2.4 Порядок выполнения работы	26
2.5 Содержание отчета	27
2.6 Варианты заданий	27
2.7 Контрольные вопросы	28
Литература	28
Лабораторная работа №3. ИМПУЛЬСНЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ	29
3.1 Теоретическая часть	29
3.2 Описание лабораторной установки	29
3.3 Домашнее задание	32
3.4 Порядок выполнения работы	32
3.5 Содержание отчета	32
3.6 Варианты заданий	33
3.7 Контрольные вопросы	34
Литература	34
Лабораторная работа №4. МАНИПУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ	35
4.1 Теоретическая часть	35
4.2 Описание лабораторной установки	35
4.3 Домашнее задание	37
4.4 Порядок выполнения работы	37
4.5 Содержание отчета	38
4.6 Варианты заданий	38
4.7 Контрольные вопросы	39
Литература	39
Лабораторная работа №5. ДВУХСТУПЕНЧАТЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ	40
5.1 Теоретическая часть	40
5.2 Описание лабораторной установки	40
5.3 Домашнее задание	42

5.4 Порядок выполнения работы	42
5.5 Содержание отчета	42
5.6 Варианты заданий.....	43
5.7 Контрольные вопросы.....	44
Литература	44
Лабораторная работа №6. ЦИФРОВЫЕ ВИДЫ МОДУЛЯЦИИ.....	45
6.1 Теоретическая часть	45
6.1.1 Основные показатели эффективности и качества цифровых видов модуляции	48
6.1.2 Принципы построения устройств модуляции и демодуляции	54
6.2 Описание лабораторной установки	68
6.3 Домашнее задание	73
6.4 Порядок выполнения работы	74
6.5 Содержание отчета	74
6.6 Варианты заданий.....	74
6.7 Контрольные вопросы.....	76
Литература	76

Учебное издание

Сорока Николай Ильич
Кривинченко Георгий Александрович

ТЕЛЕМЕХАНИКА

Лабораторный практикум
для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии
и управление в технических системах» всех форм обучения

В 2-х частях

Часть 1

СООБЩЕНИЯ И СИГНАЛЫ

Редактор Т. П. Андрейченко
Корректор Л. А. Шичко
Компьютерная верстка Е. С. Чайковская

Подписано в печать 23.12.2009.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 4,5.

Формат 60х84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ 206.

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