

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ПЕРЕДАЧИ МОДУЛИРОВАННЫХ
СИГНАЛОВ ДАННЫХ
ПРИ НАЛИЧИИ АДДИТИВНЫХ ПОМЕХ**

Методические указания
к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Инфокоммуникационные системы и сети»
для студентов дневного и заочного отделения по направлению
09.03.02 «Информационные системы и технологии»,
09.03.03 «Прикладная информатика»

Севастополь
СевГУ
2026

УДК 004.624:004.3'122(076.5)
ББК 32.973.202:32.811.7 я73
И889

Р е ц е н з е н т ы :

И.В. Кудрявченко - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры
«Информационные технологии и системы»

Е.А. Редькина - канд. техн. наук, доцент, доцент
кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составитель: В.С. Чернега

И889 Исследование процесса передачи модулированных сигналов данных при наличии аддитивных помех: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Инфокоммуникационные системы и сети» для студентов дневного и заочного отделения по направлению 09.03.02 «Информационные системы и технологии», 09.03.03 «Прикладная информатика» / Севастопольский государственный университет; сост. В.С. Чернега. – Севастополь: СевГУ, 2026. – 20 с. – Текст : электронный.

Цель указаний: помочь студентам в изучении видов модуляции и методов передачи данных с помощью модулированных сигналов по линиям и каналам связи при наличии помех, а также измерениям и оценке искажений принимаемых сигналов данных при передаче их по линиям и каналам связи при наличии в канале аддитивных флуктуационных помех.

Предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине "Инфокоммуникационные системы и сети" для студентов дневной и заочной форм обучения.

УДК 004.624:004.3'122(076.5)
ББК 32.973.202:32.811.7 я73

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на методическом семинаре и заседании кафедры «Информационные технологии и системы», протокол № 7 от 30 января 2026 г.

© Чернега В.С., сост., 2026
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа «Исследование процесса передачи модулированных сигналов данных при наличии аддитивных помех»	4
1. Цель работы	4
2. Основные теоретические положения	4
2.1. Способы представления несущего колебания	5
2.2. Виды модуляции, используемые в системах передачи данных...	7
2.3. Аддитивные и мультипликативные помехи	11
3. Описание лабораторной установки	15
4. Программа работы	16
5. Содержание отчета	17
6. Контрольные вопросы	18
7. Список рекомендованной литературы	19
Приложение. Таблица значений интеграла вероятностей (Функции Крампа)	

Лабораторная работа

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕДАЧИ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ДАННЫХ ПО СИММЕТРИЧНЫМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ ПРИ НАЛИЧИИ АДДИТИВНЫХ ПОМЕХ

1. Цель работы

Углубить знания в области построения дискретных каналов, способов модуляции и демодуляции сигналов, оценки помехоустойчивости передачи сигналов данных. Исследовать влияния характеристик канала связи и помех на величину краевых искажений сигналов. Приобрести практические навыки в построении и исследовании схем преобразования сигналов при передаче цифровой информации в среде моделирования Proteus.

2. Основные теоретические положения

Аналоговые (непрерывные) каналы связи не позволяют непосредственно передавать дискретные сигналы в связи с тем, что обычно полоса пропускания канала связи и спектр сигналов данных не совпадают. Для переноса спектра сигнала в полосу пропускания канала используется модуляция, а для восстановления исходного сигнала на приемной стороне применяется демодуляция. Модуляция дискретными сигналами называется манипуляцией. Совокупность непрерывного канала и модулятора и демодулятора называется дискретным (цифровым) каналом связи, схема которого изображена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Система передачи дискретных сигналов

Информационная последовательность от источника дискретных сообщений (ИДС) преобразуется с помощью модулятора (М) в непрерывные сигналы и после ограничения спектра полосовым фильтром (ПФ), передается по непрерывному каналу или линии связи (ЛС). Полосовой фильтр на приемной стороне служит для подавления помех вне полосы сигнала. Затем сигнал восстанавливается в демодуляторе и поступает получателю дискретных сообщений (ПДС).

2.1. Способы представления несущего колебания

Модуляцией называется изменение параметра(ов) переносчика сигнала (несущего колебания) в соответствии с функцией, отображающей передаваемое сообщение. Целью модуляции является согласования параметров сигналов с характеристиками канала связи и обеспечение максимальной помехоустойчивости приема сигналов при наличии помех в канале. В качестве переносчика сигналов применяется гармоническое (синусоидальное) колебание.

Существует четыре способа представления синусоидальных колебаний:

1. В виде тригонометрической функции:

$$u(t) = U_m \sin(2\pi ft + \varphi_0),$$

где U_m – амплитуда (максимальное значение) колебаний, f – частота колебаний, φ_0 – начальная фаза синусоидальных колебаний.

2. В виде графиков изменений функций во времени (рисунок 2.2):

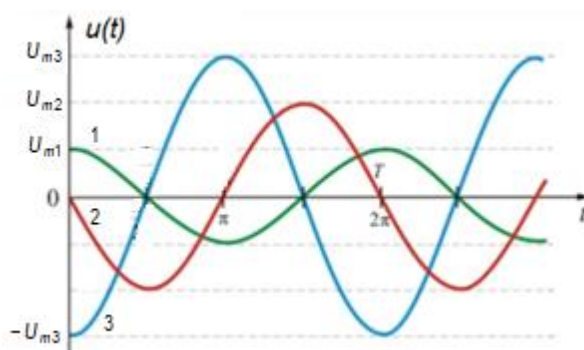


Рисунок 2.2 – Графическое представление синусоидальных колебаний с различной амплитудой и начальной фазой: 1 – $\varphi_0 = 90^\circ$; 2 – $\varphi_0 = 180^\circ$; 3 – $\varphi_0 = 270^\circ$

3. Гармонический сигнал может быть представлен в виде вектора длиной U_m , который вращается против часовой стрелки вокруг точки O прямоугольной системы координат (рисунок 2.3). Угловая скорость вращения вектора $\omega = 2\pi f$, где f – частота сигнала. Один полный оборот вектора (360° или 2π радиан) соответствует периоду сигнала T . Угол поворота относительно оси координат X соответствует мгновенной фазе колебания.

Мгновенное значение напряжения $u(t)$ равно проекции вектора на ось Y в момент времени t , т.е. $u(t) = U_m \sin(2\pi ft + \varphi_0)$. В начальный (нулевой) момент времени значение напряжения определяется начальной фазой φ_0 , т.е. $u(t=0) = U_m \sin(\varphi_0)$. При совместном рассмотрении двух гармонических сигналов одной и той же частоты разность их начальных фаз $\Delta\varphi = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ называется сдвигом фаз.

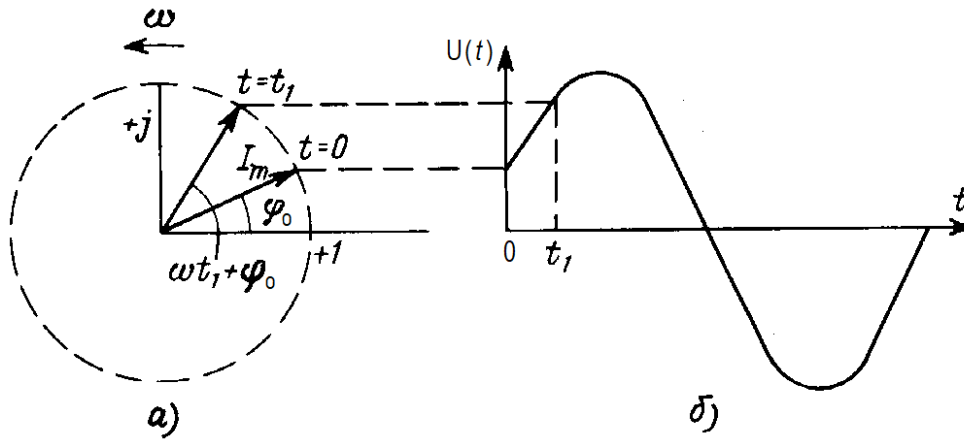


Рисунок 2.3 – Векторное представление гармонического колебания

4. Гармонический сигнал также может быть представлен на комплексной плоскости с координатами по действительной (**Re** – *Real*) и мнимой (**Im** – *Imaginary*) осей в виде векторов. Это позволяет использовать при анализе процессов в электрических цепях математический аппарат векторной алгебры, упростить математические операции и упростить анализ электрических цепей, находящихся под воздействием гармонических сигналов. Операции над гармоническими функциями можно заменить операциями над комплексными амплитудами, которые являются символическими изображениями этих функций.

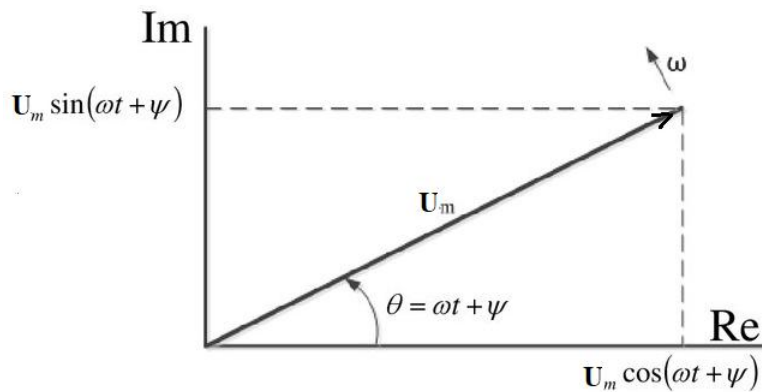


Рисунок 2.4 – Представление гармонического колебания в виде вектора на комплексной плоскости

Вектор U_m , вращающийся в положительном направлении (против хода часовой стрелки) с угловой скоростью ω , может быть выражен в комплексном представлении следующим образом:

$$U_m e^{j(\omega t + \psi)} = U_m e^{j\omega t} e^{j\psi} = \overrightarrow{U_m} e^{j\omega t}$$

где $U_m = U_m e^{j\omega t}$ – комплексная амплитуда, равная вектору в момент времени $t=0$. Множитель $e^{j\omega t}$ – оператор вращения. Умножение комплексной амплитуды U_m на $e^{j\omega t}$ означает поворот вектора на угол (ωt) в положительном направлении.

2.2. Виды модуляции, используемые в системах передачи данных

В настоящее время в системах передачи данных используется амплитудная (АМ), частотная (ЧМ) и относительно-фазовая (ОФМ) манипуляция либо комбинация этих способов, преимущественно амплитудно-фазовая модуляция (АФМ) в связи с тем, что увеличение позиций сигнала не приводит к расширению спектра сигнала, ширина которого определяется только скоростью передачи сигналов. Немодулированные сигналы (импульсы постоянного тока), в состав которых входит постоянная составляющая, применяются лишь при передаче по физическим линиям электросвязи, так как полоса пропускания таких линий начинается с нуля.

Дискретный канал с амплитудной манипуляцией начал применяться на заре развития систем передачи данных. Основным преимуществом систем с АМ является простота построения, а недостатком – невысокая помехоустойчивость. Однако они применяются и в настоящее время на каналах с низким уровнем помех. При амплитудной модуляции сигналу логической 1 соответствует отрезок гармонического колебания (несущей), а логическому 0 отсутствие колебания или колебание с меньшей амплитудой. Аналитически процесс модуляции реализуется перемножением несущего колебания с колебанием, отображающим информационную последовательность. На практике амплитудный модулятор зачастую представляет собой электронный ключ, управляемый информационными сигналами. При открытии ключа сигнал несущей поступает на его выход, а при закрытом состоянии ключа сигнал на выходе отсутствует. Демодуляция АМ сигнала осуществляется путем двухполупериодного выпрямления принятого отрезка колебаний несущей и последующей фильтрации фильтром нижних частот.

Энергетический спектр АМ сигнала $G(\omega)$ определяется на основании его корреляционной функции и имеет вид

$$G_{ам}(\omega) = \frac{U_m^2}{2} + \frac{U_m^2 \tau_0}{2} \frac{\sin^2[(\omega - \omega_0) \tau_0 / 2]}{[(\omega - \omega_0) \tau_0 / 2]^2}. \quad (2.1)$$

Из этой формулы следует, что спектр амплитудно-манипулированного сигнала располагается в области частоты вспомогательного (несущего) колебания и содержит несущую частоту ω_0 и две боковые полосы: верхнюю и нижнюю. Форма боковых частот спектра манипулированного сигнала анало-

гична форме спектра модулирующих посылок. Спектр модулированного сигнала получается вдвое шире спектра сигнала данных.

На практике амплитудная модуляция применяется для реализации амплитудно-фазовой модуляции. При этом используются два амплитудных модулятора, на которые поступают несущие колебания одной и той же частоты, но сдвинутые по фазе на 90° т.е., находящихся в квадратуре. Затем оба модулированных колебания суммируются. Такой вид модуляции получил **название квадратурная амплитудная модуляция** (КАМ, англ. QAM). При изменении амплитуды модулирующих сигналов частота сигнала остается прежней, а фаза колебания меняется. На рисунке 2.5 показана упрощенная структурная схема формирователя QAM-сигнала.

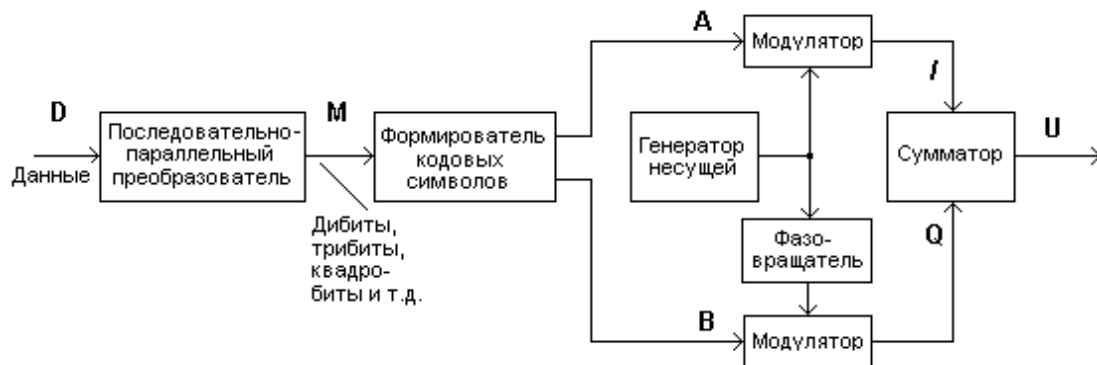


Рисунок 2.5 – Схема реализации квадратурной амплитудной манипуляции

Аналитически QAM-сигнал представляется в виде

$$u_{\text{КАМ}}(t) = U_m [A(t) \cos \omega_0 t + B(t) \sin \omega_0 t], \quad (2.2)$$

где $A(t)$ и $B(t)$ – модулирующие сигналы в квадратурном и синфазном каналах соответственно.

В передатчике, осуществляющем модуляцию, одна из этих составляющих синфазна колебанию генератора несущей частоты, а вторая сдвинута на 90° , т.е. находится в квадратуре по отношению к этому колебанию (отсюда — квадратурная модуляция). Синфазная составляющая обозначается зачастую как **I** (*In Phase*), а квадратурная — как **Q** (*Quadrature*).

Любой m -й сигнал также может быть представлен в комплексном виде:

$$U_m = I_m + j Q_m,$$

или

$$u_m(t) = U_m \exp(2\pi f t + \varphi_m),$$

$$\text{где } U_m^2 = I_m^2 + Q_m^2; \quad \varphi_m = \arctg(Q_m/I_m).$$

В векторной форме изображение суммарного колебания на комплексной плоскости показано на рисунке 2.6. Оба вектора, синфазный и квадра-

турный, вращаются одновременно против хода часовой стрелки со скоростью $\omega = 2\pi ft$. С такой же скоростью будет вращаться и суммарный вектор. Поэтому частота суммарного сигнала будет равна частоте несущего колебания.

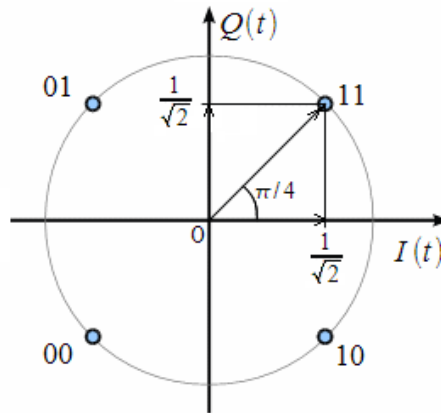


Рисунок 2.6 – Изображение сигналов QAM в виде векторов на комплексной плоскости

Для цифровой фазовой манипуляции характерно, что при модулировании синфазной и квадратурной составляющей несущего колебания используется одно и то же значение величины *изменения амплитуды*. Поэтому окончания векторов модулированного колебания образуют прямоугольную сетку на фазовой плоскости действительной $\text{Re}\{U_{\text{кам}}\}$ и мнимой составляющей вектора модулированного сигнала $\text{Im}\{U_{\text{кам}}\}$. Число узлов этой сетки определяется количеством позиций результирующего сигнала, т.е. типом используемого алгоритма QAM. Схема расположения узлов на фазовой плоскости модулированного QAM-колебания представляет другую форму изображения модулированных сигналов и называется **сигнальным созвездием** (англ. *Constellation Diagram*).

На первом этапе преобразования поток входных данных $D\{d_0, d_1, \dots, d_k\}$, поступающих от источника сигнала, преобразуется в последовательность групп битов $M\{m_0, m_1, \dots, m_j\}$. Число битов в этой группе равно $\log m_c$, где m_c – количество позиций сигналов. Формирователь кодовых символов преобразует группу битов в пару кодовых символов a_j и b_j . Так, например, для алгоритма QAM-16 стандартом установлены значения a_j и b_j , принадлежащие множеству $\{1, 3, -1, -3\}$, а для QAM-64 a_j и b_j могут принимать значения $\{1, 3, 5, 7, -1, -3, -5, -7\}$.

Величины a_j и b_j и определяют соответственно значения реальной и мнимой координаты вектора модулированного колебания. Сформированные значения $A\{a_j\}$ и $B\{b_j\}$ используются для амплитудной модуляции синфазной I и квадратурной Q составляющих несущего колебания. На последнем этапе преобразования выполняется суммирование этих колебаний и формирование результирующего сигнала U . Сигнальные созвездия для QAM-16 и QAM-64 изображены на рисунке 2.7.

При демодуляции QAM-сигналов используются два когерентных демодулятора, частоты и фазы которых с точностью до начальной фазы совпадают с несущими колебаниями синфазного и квадратурного модуляторов на передающей стороне. Затем демодулированные сигналы используются для восстановления на основании значений амплитуд синфазных и квадратурных компонент исходного цифрового сообщения.

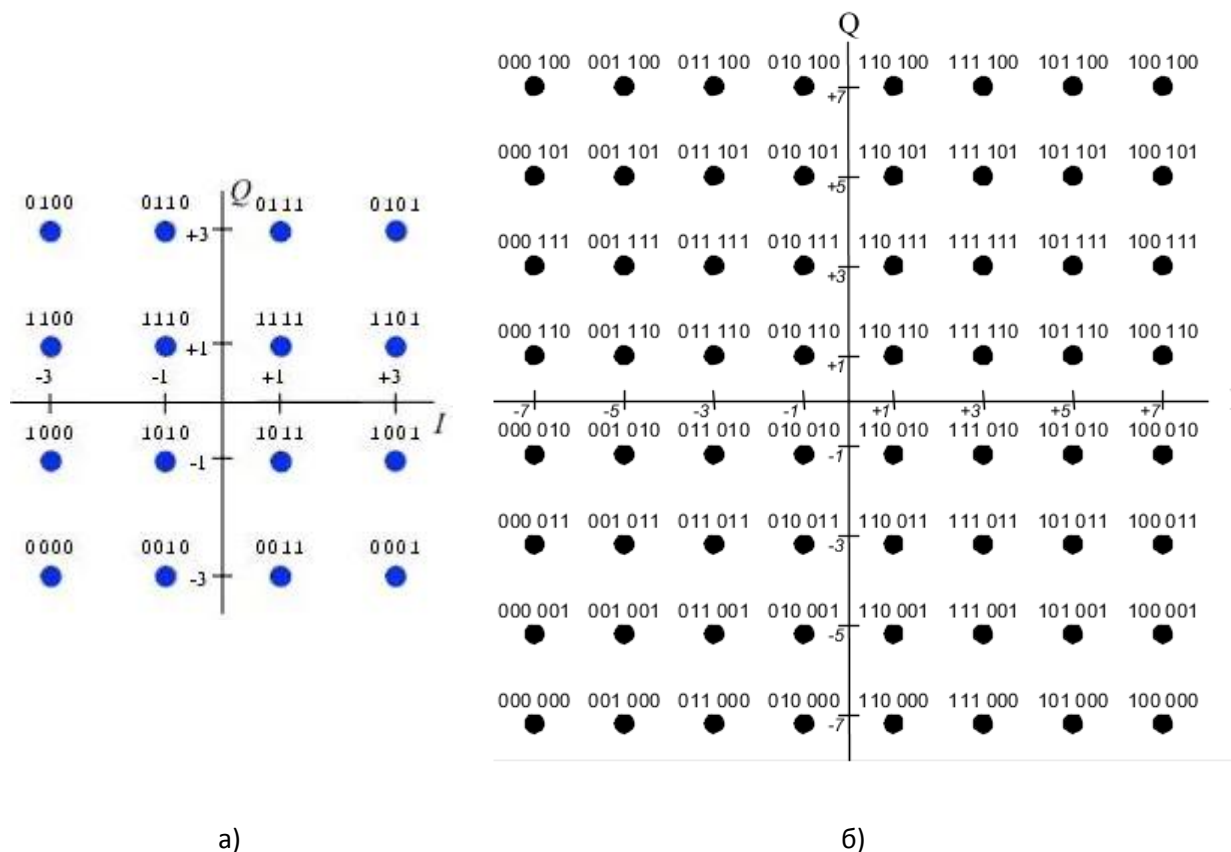


Рисунок 2.7 – Сигнальные созвездия QAM-16 (а) и QAM-64 (б)

Другой разновидностью амплитудно-фазовой модуляции является АФМ с подавлением несущей и передачей одной боковой полосы. Такой способ в зарубежной литературе известен под названием **САР**-модуляция (*Carrier less Amplitude modulation / Phase modulation*). Известно, что несущая частота используется при модуляции только для переноса спектра сигнала и не является информативной. Передача двух боковых полос модулированного сигнала является в информационном смысле избыточной. Поэтому передача на одной боковой позволяет более эффективно использовать мощность сигнала и полосу канала связи.

2.2. Аддитивные и мультипликативные помехи

Помимо передаваемого сигнала в канале всегда присутствуют случайные процессы различного происхождения, называемые *помехами* или *шумами*. По характеру воздействия на принимаемые сигналы различают помехи **аддитивные** и **мультипликативные**. **Аддитивная** помеха представляет собой электрическое возмущение, складывающееся с сигналом. При этом напряжение на выходе приемного тракта можно представить как сумму переданного сигнала и аддитивной помехи

$$x(t) = s(t) + n(t). \quad (2.3)$$

Большое число аддитивных помех имеет флуктуационный характер с нормальным законом распределения. **Флуктуационные помехи** представляют собой реализацию стационарного случайного процесса с *нормальным* распределением вероятностей (гауссовский процесс). Помехи этого вида имеют место во всех типах каналов связи, используемых в компьютерных сетях, и заметно влияют на достоверность передачи данных.

Практическое значение нормальной флуктуационной помехи связано с тем, что, во-первых, она неизбежно присутствует во всех реальных КС в виде тепловых шумов, возникающих в каналобразующей аппаратуре, во-вторых, она достаточно хорошо аппроксимирует сумму любых помех, происходящих от различных источников.

Флуктуационная помеха тоже может быть представлена вектором, длина и угол которого являются случайными величинами. В результате воздействия флуктуационной помехи $n(t)$ на передаваемый сигнал $s(t)$ вектор смеси сигнала с помехой $x(t)$ на приемной стороне будет изменяться по амплитуде и по начальной фазе (рисунок 2.8, а).

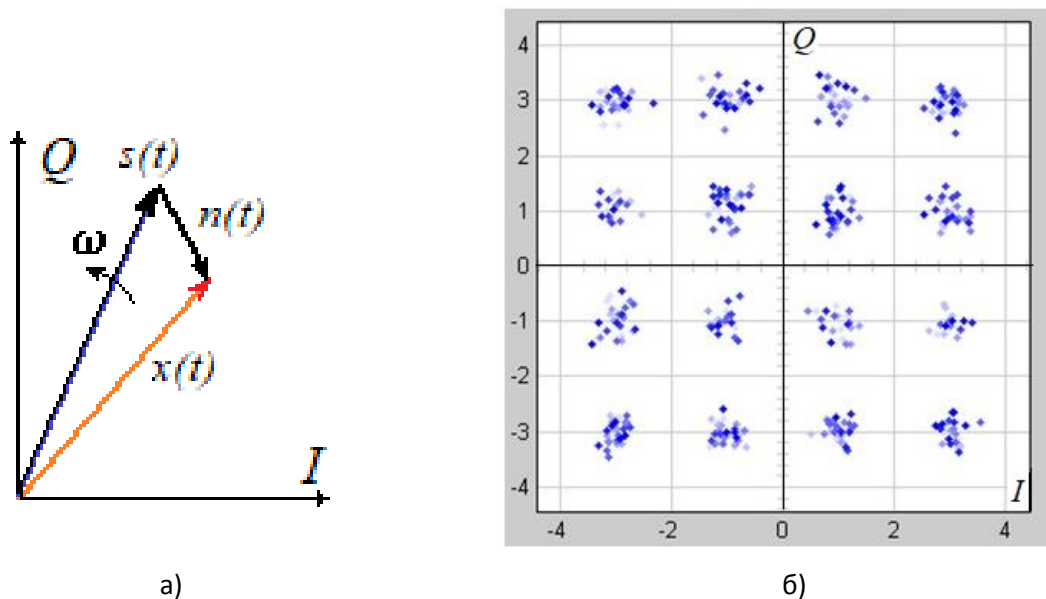


Рисунок 2.8 – Результат воздействия вектора флуктуационной помехи на вектор сигнала (а) и сигнальное созвездие смеси сигнала с помехой на приемной стороне (б)

При этом концы векторов принимаемых сигналов будут образовывать некоторое облако случайных точек вокруг идеальной точки (рисунок 2.8, б).

Мультипликативной помехой называется случайное изменение коэффициента передачи канала связи $\mu(j\omega t)$. Принимаемые сигналы могут быть подвержены одновременному воздействию аддитивных и мультипликативных помех.

В общем случае передаваемый сигнал распространяется по нескольким путям (лучам), что характерно для *WiFi* и других каналов радиосвязи. Тогда зависимость между принимаемым сигналом $x(t)$ и передаваемым $s(t)$ может быть представлена следующим образом:

$$x(t) = \sum \mu_k S(t - \tau_k) + n(t), \quad (2.4)$$

где μ_k - коэффициент передачи k -го пути распространения сигнала; τ_k - время запаздывания в k -м луче; $n(t)$ - аддитивная помеха.

Во многих случаях имеет место только один путь распространения. Тогда выходной сигнал на выходе канала с помехой описывается выражением:

$$x(t) = \mu S(t - \tau) + n(t). \quad (2.5)$$

Параметры канала μ и τ в общем случае являются функциями времени.

Для характеристики распределения энергии составляющих помехи по частоте используется понятие энергетического спектра $G(\omega)$, который характеризует поведение реализаций случайной помехи в среднем (формула 2.1). На практике функция $G(\omega)$ обычно задается графически либо аналитически. Для реальных случайных процессов $G(\omega)$ спадает с ростом частоты. Случайный процесс, у которого $G(\omega) = N_0$ - постоянная величина, называется **белым шумом**. Здесь N_0 - спектральная плотность, под которой понимается мощность шума P_n , приходящаяся на 1 Гц полосы частот.

$$N_0 = P_n / \Delta F. \quad (2.6)$$

В большинстве случаев нормальная флуктуационная помеха имеет равномерный спектр в столь широкой полосе частот, что ее можно считать практически бесконечной. Такая помеха носит название **“нормальный аддитивный белый шум”**, которая полностью характеризуется спектральной плотностью.

При воздействии флуктуационной помехи на цифровой сигнал возникают краевые искажения (рисунок 2.9). На диаграмме 2.9, а изображены сигналы данных вида 1:1; на б) амплитудно-модулированные сигналы данных на выходе канала при воздействии флуктуационной помехи; на диаграмме в) - демодулированные сигналы с помехой; на г) - сигналы на выходе порогового устройства приемника.

Как видно из диаграмм, происходит смещение фронтов цифровых сигналов на приемной стороне по сравнению с фронтами сигналов данных на передающей стороне. То есть, возникают краевые искажения сигналов, величина которых имеет случайный характер. Для устранения краевых искажений и восстановления длительности исходных сигналов на приемной стороне применяются специальные способы обработки сигналов, которые исследуются в следующей работе.

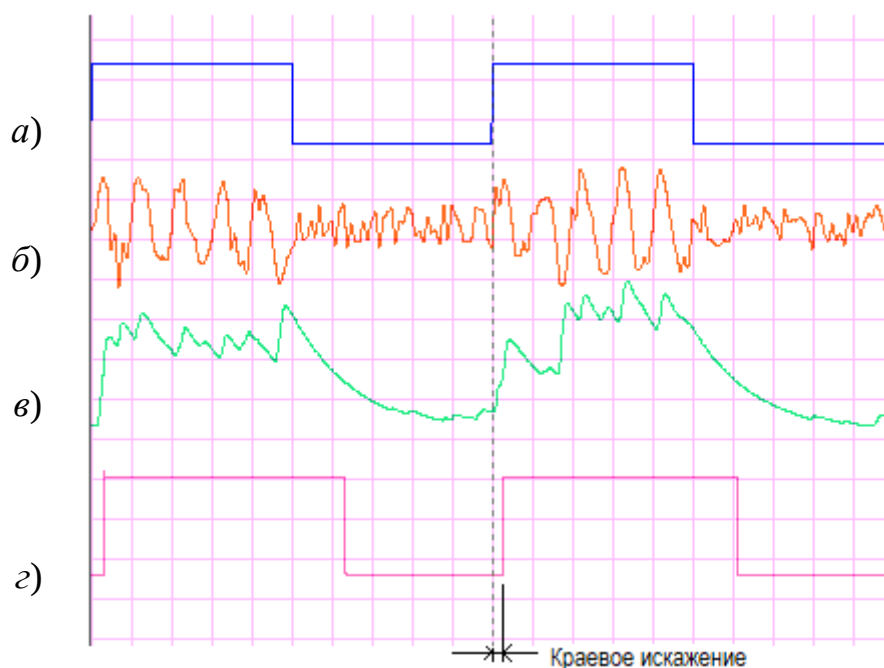


Рисунок 2.9 – Иллюстрация влияния флуктуационной помехи на АМ-сигналы

В случае превышения величины краевых искажений исправляющей способности приемного устройства, возникают ошибки. Идеальная исправляющая способность равна 50%. На практике для оценки искажений применяется эффективная исправляющая способность $\mu_{\text{эфф}}$, при которой учитывается длительность стробирующего импульса a и учитывается погрешность синхронизации ε_c . Эффективная исправляющая способность по искажениям рассчитывается по следующей формуле:

$$\mu_{\text{эфф}} = [(\tau_0 - a) / 2 - \varepsilon_c] / \tau_0, \quad (2.7)$$

где τ_0 – длительность единичного элемента сигнала.

Вероятность ошибочного приема сигналов зависит от отношения сигнал/шум, обозначаемое символами **C/Ш** (англ. **SNR** – *Signal to Noise Ratio*), которое определяется отношением мощности сигнала P_C и мощности флуктуационной помехи P_{Π} :

$$SNR = P_C / P_{\Pi} = U_C^2 / U_{\Pi-\text{ЭФФ}}^2, \quad (2.8)$$

где – $P_C = U_{C-ЭФФ}^2 / R$ – мощность сигнала; $P_{\Pi} = U_{\Pi-ЭФФ}^2 / R$ – мощность шума; $U_{C-ЭФФ} = Um / \sqrt{2}$ – эффективное (среднеквадратичное) значение сигнала; Um – амплитуда сигнала; $U_{\Pi-ЭФФ}$ – среднеквадратичное значение шума.

В системах передачи данных отношение сигнал/шум чаще выражается в децибелах (дБ) и рассчитывается по формуле:

$$SNR = 10 \log_{10} (P_C / P_{\Pi}) = 20 \log_{10} (U_{C-ЭФФ} / U_{\Pi-ЭФФ}) \text{ [дБ]}. \quad (2.9)$$

Отношение сигнал/шум служит оценкой помехоустойчивости систем передачи цифровой информации, под которой понимается способность коммуникационной системы обеспечивать прием цифровых сигналов с наперед заданной вероятностью ошибки при воздействии помех на передаваемые сигналы. Чем меньше вероятность возникновения ошибки при приеме сигналов данных при одном и том же отношении сигнал/шум, тем выше помехоустойчивость. Помехоустойчивость зависит от типа линии или канала связи, вида и интенсивности помех, видов и параметров сигналов, способов модуляции и кодирования. Наиболее высокой помехоустойчивостью обладают системы передачи данных с фазовой модуляцией, а самой низкой – системы с АМ. Системы с частотной модуляцией занимают по помехоустойчивости промежуточное место. Использование многопозиционных сигналов приводит к снижению помехоустойчивости.

Вероятность ошибочного приема сигнала данных зависит от способа модуляции сигналов и отношения энергии сигнала к спектральной плотности помехи. В теории связи это отношение обычно обозначается символом h^2 .

$$h^2 = E_C / N_0 = P_C \cdot \tau_0 / (P_{\Pi} / \Delta F) = (P_C / P_{\Pi}) \cdot (\tau_0 \Delta F). \quad (2.10)$$

В этой формуле ΔF – эффективная (*шумовая*) полоса пропускания канала (линии) связи. С учетом того, что для передачи сигналов данных со скоростью $B = 1/\tau_0$ минимально необходимая полоса пропускания канала (или входного полосового фильтра) ΔF_{min} должна быть не менее B , то формула (2.10) принимает вид

$$h^2 \approx P_C / P_{\Pi}. \quad (2.11)$$

Знак приблизительного равенства поставлен потому, что на практике полоса пропускания берется с некоторым запасом, который учитывает нестациональность и неидеальность амплитудно-частотной характеристики фильтра, т.е. $\Delta F = k \Delta F_{min}$. Коэффициент k на практике имеет значение 1,2...1,4.

В таблице 2.1, в качестве примера, приведены формулы для расчета вероятности ошибочного приема единичного элемента сигнала P_0 (анг. **BER** – *Bit Error Rate*) для некоторых видов модулированных сигналов.

Здесь $\Phi(x)$ – табулированная функция Крампа (интеграл вероятности). Таблица значений интеграла вероятностей приведена в приложении.

Когерентный прием предполагает совпадения несущего колебания на приемной стороне с колебанием на передающей с точностью до начальной фазы. При некогерентном приеме значение начальной фазы несущей не учитывается. Второй способ приема проще в реализации. Но уступает когерентному приему по вероятности ошибки.

Таблица 2.1 – Вероятности ошибок по битам P_0 при различных видах модуляции и способах приема цифровых сигналов

Вид цифровых сигналов	Когерентный прием	Некогерентный прием
АМ	$0,5 - \Phi(h/\sqrt{2})$	$\approx 0,5 \exp(-h^2/4)$
ЧМ	$0,5 - \Phi(h)$	$0,5 \exp(-h^2/2)$
ОФМ	$\approx 1 - 2 \Phi(h\sqrt{2})$	$0,5 \exp(-h^2)$

В реальных дискретных каналах данных для того, чтобы вероятность ошибочного приема цифрового АМ-сигнала не превышала 10^{-3} , отношение сигнал/шум должен быть не менее 5,6, что примерно соответствует уровню 15 дБ. Фазовая модуляция характеризуется существенно более высокой помехоустойчивостью. Так при двоичной фазовой модуляции для обеспечения вероятности ошибок 10^{-3} достаточно, чтобы сигнал превышал шум не менее, чем в 2 раза ($C/\Pi \geq 6$ дБ), а при 16-позиционной квадратурной амплитудной модуляции (16-QAM) это соотношение должно быть выше в 4 раза, что соответствует отношению $C/\Pi=12$ дБ.

3. Описание лабораторной установки

В качестве лабораторной установки используется персональный компьютер с установленной программой моделирования электронных схем Proteus, работа с которым описана в первой лабораторной работе. Изображение исследуемой схемы дискретного канала с АМ, выполненной в основном окне системы Proteus показана на рисунке 3.1.

На передающей стороне функцию модулятора выполняет перемножитель сигналов (категория Laplace Primitives элемент OP:MULTIPLY), на входы которого подаются колебания несущей частоты и информационные сигналы. Фильтры передачи и приема в схеме отсутствуют. В качестве линии связи используется эквивалентная схема замещения симметричной проводной линии. Соединение модулятора и демодулятора с линией связи выполнено через согласующие трансформаторы типа TRAN 2P2S, осуществляющих согласование несимметричной цепи источника с симметричным входом линии связи на передающей стороне и согласования симметричного выхода линии связи с несимметричным входом приемной части, а также гальваническую развязку линии связи с модулятором и демодулятором.

Демодулятор выполнен на основе двухполупериодной схеме выпрямителя и RC-фильтра нижних частот. Демодулированный сигнал подается на вход порогового устройства (микросхема LP 239), на выходе которого формируются прямоугольные импульсы данных с краевыми искажениями. Ко входу осциллографа подключены характерные точки исследуемого дискретного канала.

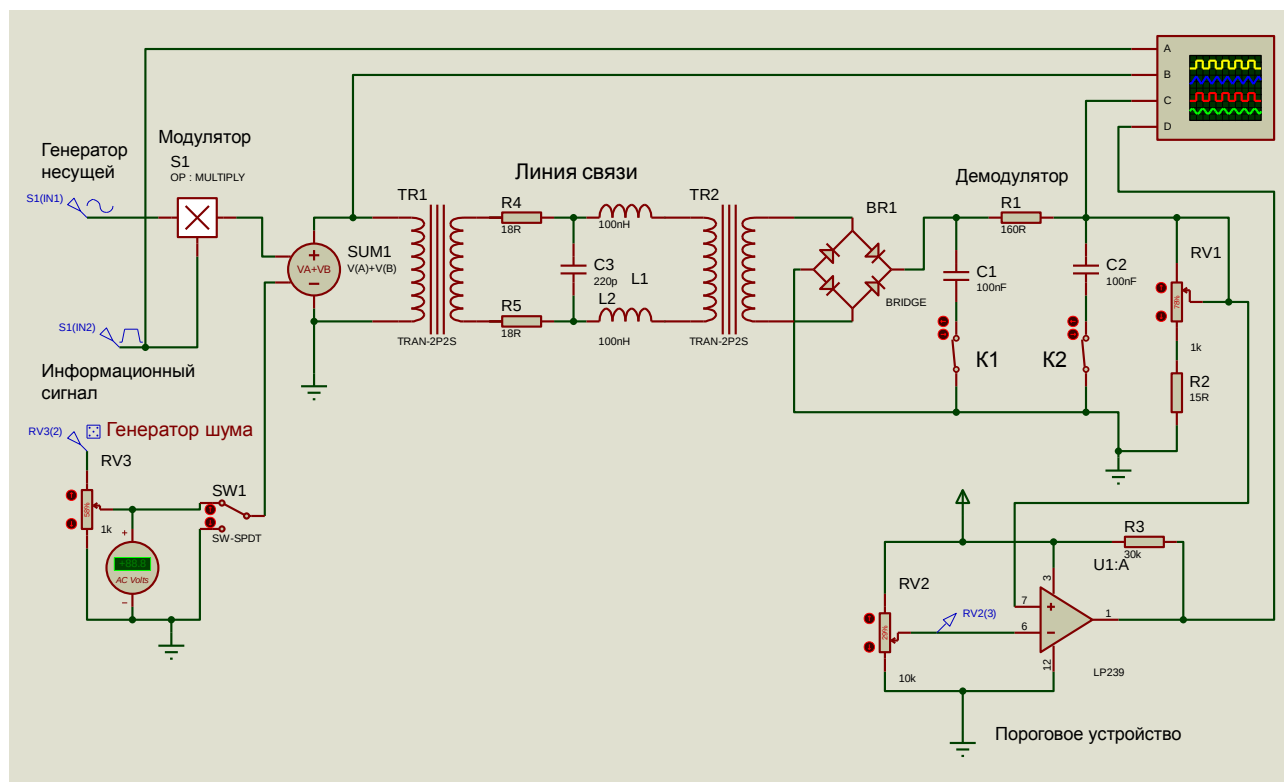


Рисунок 3.1 – Схема дискретного канала с АМ

Потенциометр RV1 позволяет регулировать уровень выходного сигнала на входе порогового устройства, а потенциометр RV2 служит для установки порогового значения в пороговом устройстве.

4. Программа работы

4.1. Повторить теоретический материал, относящийся к видам цифровой модуляции, вопросам модуляции и демодуляции сигналов и построении дискретных каналов (выполняется в процессе домашней подготовки).

4.2. Составить в рабочем окне симулятора схему дискретного канала, изображенную на рисунке 3.1. Генератор шума должен быть отключен (переключатель SW1 в нижнем положении).

4.3. Установить параметры генератора несущих сигналов: частота $(10+i)$ кГц, где i – последняя цифра номера зачетной книжки, амплитуда 5 В.

4.4. Задать частоту информационных сигналов вида 1:1, равную $(1000 + 100i)$ Гц.

4.5. Запустить процесс моделирования, задать с помощью потенциометра RV1 уровень сигнала на выходе демодулятора и потенциометра RV2 пороговое значение таким образом, чтобы сигнал на выходе порогового устройства был прямоугольной формы без дроблений и с минимальными краевыми искажениями. Зарисовать осциллограммы в точках измерения и пояснить их характер.

4.6. Отключать по очереди конденсаторы фильтра нижних частот. Зарисовать вид сигнала на выходе приемного устройства и пояснить причину изменения их формы. Затем снова подключить оба конденсатора.

4.7. Меняя с помощью потенциометра RV2 пороговое напряжение от 0,75 до 2-х В, измерить абсолютную и относительную величину краевых искажений.

4.8. Не меняя скорость передачи информации установить вид информационного сигнала 1:4 и измерить абсолютную и относительную величину краевых искажений. Зарисовать форму сигналов в контрольных точках.

4.9. Подключить к сумматору генератор шума и повторить пп.4.3 - 4.8 при воздействии помех с соотношением сигнал/шум $(U_{с-эфф} / U_{п-эфф})$ от 20 до 6 дБ. Проследить как меняется величина и вид искажений при различных значениях отношения сигнал/шум в канале связи.

4.10. Сделать выводы по работе и оформить отчет.

5. Содержание отчета

5.1. Титульный лист.

5.2. Цель и программа работы.

5.3. Схемы дискретного канала с АМ.

5.4. Осциллограммы сигналов в характерных точках при отсутствии и наличии шума различного уровня.

5.5. Результаты измерений краевых искажений при различных отношениях сигнал/шум.

5.6. Выводы по результатам исследований.

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Что называют дискретным каналом? Начертите его структурную схему.
- 6.2. Зачем нужна модуляция сигналов данных?
- 6.3. Поясните принцип работы модулятора и демодулятора, используемых в лабораторной установке.
- 6.4. Нарисуйте временные диаграммы сигналов в канале связи при АМ, ЧМ и ФМ.
- 6.5. Почему при перемножении сигналов сдвигается спектр результирующего колебания?
- 6.6. Какие частотные компоненты будут на выходе перемножителя при несущем гармоническом колебании 10000 Гц и прямоугольной последовательности вида 1:1 со скоростью модуляции 1000 бод?
- 6.7. Что такое «квадратурная амплитудная модуляция» и для чего она используется?
- 6.8. Нарисуйте временное представление сигналов на выходе 4-позиционного квадратурного модулятора при поступлении на его вход последовательности вида 11011000.
- 6.9. Что называют краевыми искажениями сигналов и как измерить их абсолютную и относительную величину на практике?
- 6.10. Покажите на схеме демодулятора процесс двухполупериодного выпрямления сигнала.
- 6.11. Почему при изменении положения регулятора RV1 изменяется величина и вид искажений?
- 6.12. Почему при изменении положения регулятора RV2 изменяется величина краевых искажений?
- 6.13. Что называется помехоустойчивостью передачи данных и что является количественной оценкой помехоустойчивости приема цифровых сигналов?
- 6.14. В каких единицах измеряется отношение сигнал/шум?
- 6.15. Как количественно можно оценить вероятность ошибочного приема единичных элементов сигнала?

7. Список рекомендованной литературы

1. Аминев, А. В. Измерения в телекоммуникационных системах : учебник для вузов / А. В. Аминев, А. В. Блохин ; под общей редакцией А. В. Блохина. — Москва : Юрайт, 2025. — 223 с. — (Высшее образование). — URL: <https://urait.ru/bcode/563951> (дата обращения: 10.03.2026). — ISBN 978-5-534-05138-4. — Текст : электронный.

2. Голиков, А. М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика : учебное пособие для вузов / А. М. Голиков. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 452 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/189336> (дата обращения: 10.03.2026). — Текст : электронный.

3. Лузин, В. И. Основы формирования, передачи и приема цифровой информации : учебное пособие / В. И. Лузин, Н. П. Никитин, В. И. Гадзиковский ; науч. ред. В. И. Гадзиковский. - Москва : СОЛОН-Пресс, 2020. - 316 с. - URL: <https://znanium.ru/catalog/product/1858788> (дата обращения: 10.03.2026). — Режим доступа: по подписке. - ISBN 978-5-321-01961-0. — Текст : электронный.

4. Сети и телекоммуникации : учебник и практикум для вузов / под редакцией К. Е. Самуйлова, И. А. Шалимова, Д. С. Кулябова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Юрайт, 2026. — 464 с. — (Высшее образование). — URL: <https://urait.ru/bcode/583116> (дата обращения: 10.03.2026). — ISBN 978-5-534-17315-4. — Текст : электронный.

5. Чернега, В. С. Компьютерные сети : учебное пособие для студентов направления "Компьютерные науки" вузов / В. С. Чернега, Б. Платтнер ; Севастопольский национальный университет. - Севастополь : СевНТУ, 2006. - 499 с. : ил ; 21 см. - Библиография: с. 489-491. - Предметный указатель: с. 492-499. - ISBN 966-7473-98-8 (в пер.). - Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица значений интеграла вероятностей (Функции Крампа)

х	$\Phi(x)$	х	$\Phi(x)$	х	$\Phi(x)$	х	$\Phi(x)$
0,50	0,1915	1,55	0,4394	2,60	0,4953388	3,65	0,4998689
0,55	0,2088	1,60	0,4452	2,65	0,4959754	3,70	0,4998922
0,60	0,2257	1,65	0,4505	2,70	0,4965330	3,75	0,499116
0,65	0,2422	1,70	0,4554	2,75	0,4970202	3,80	0,499276
0,70	0,2580	1,75	0,4599	2,80	0,4974449	3,85	0,499409
0,75	0,2734	1,80	0,4641	2,85	0,4978140	3,90	0,499519
0,80	0,2881	1,85	0,4678	2,90	0,4981342	3,95	0,499609
0,85	0,3023	1,90	0,4713	2,95	0,4984111	4,00	0,499683
0,90	0,3159	1,95	0,4744	3,00	0,4986601	4,05	0,499755
0,95	0,3289	2,00	0,4772	3,05	0,4988558	4,10	0,499793
1,00	0,3413	2,05	0,4798	3,10	0,4990324	4,15	0,499834
1,05	0,3531	2,10	0,4821	3,15	0,4999836	4,20	0,499867
1,10	0,3643	2,15	0,4842	3,20	0,4993129	4,25	0,499893
1,15	0,3749	2,20	0,4860966	3,25	0,4994230	4,30	0,499915
1,20	0,3849	2,25	0,4877755	3,30	0,4995166	4,35	0,499932
1,25	0,3944	2,30	0,4892759	3,35	0,4996959	4,40	0,499946
1,30	0,4032	2,35	0,4906133	3,40	0,4996631	4,45	0,499957
1,35	0,4115	2,40	0,4918025	3,45	0,4997197	4,50	0,499966
1,40	0,4192	2,45	0,4928572	3,50	0,4997674	4,55	0,499973
1,45	0,4265	2,50	0,4937903	3,55	0,4998074	4,60	0,499980
1,50	0,4332	2,55	0,4946139	3,60	0,4998409	5,00	0,499997
						6,00	0,499999

В авторской редакции