

ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

# «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



ТЕЛЕКОНТРОЛЬ И ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЕ

ЛЕКЦИЯ №11

«Помехи в каналах связи»

Лектор:  
доцент каф. ЭАФУ ФТИ  
Горюнов А.Г.

Томск 2012 г.

# План лекции

- ☐ Типы помех
- ☐ Классификация аддитивных помех и источников
- ☐ Флуктуационные помехи и их характеристики
- ☐ Сосредоточенные помехи
- ☐ Помехоустойчивость передачи сигналов
- ☐ Помехоустойчивость порогового приёмника
- ☐ Помехоустойчивость идеального приёмника Котельникова (потенциальная помехоустойчивость)
- ☐ Методы повышения помехоустойчивости дискретных сигналов

# 11.1. Типы помех

**Помехи** – случайные воздействия, искажающие передаваемый сигнал.

Воздействие помехи на сигнал может быть двояким. Если помеха  $\xi(t)$  складывается с сигналом  $s(t)$  и на вход приёмника действует их сумма  $x(t) = \xi(t) + s(t)$ , то такую помеху называют **аддитивной**. Если результирующий сигнал равен произведению помехи и передаваемого сигнала  $x(t) = \xi(t) \cdot s(t)$ , то помеху называют **мультипликативной**.

**Мультипликативная помеха** выражается в изменении характеристик линии связи (сопротивление ЛС, частота среза ЛС, нелинейность характеристик ЛС). Стандартных способов компенсации мультипликативной помехи не существует. Величина помехи зависит от качества средств канала связи и качества обслуживания.

**Аддитивная помеха** не зависит от ЛС и определяется внешними воздействиями на среду передачи сигналов.

Поскольку подавляющее большинство сообщений в промышленной телемеханике передаётся по проводным линиям связи, которые являются линейными электрическими цепями, при воздействии помех на эти цепи мультипликативные помехи не возникают. Воздействие помех на передаваемый сигнал имеет аддитивный характер. Поэтому будем рассматривать только аддитивные помехи.

# 11.2. Классификация аддитивных помех

## и источников

4

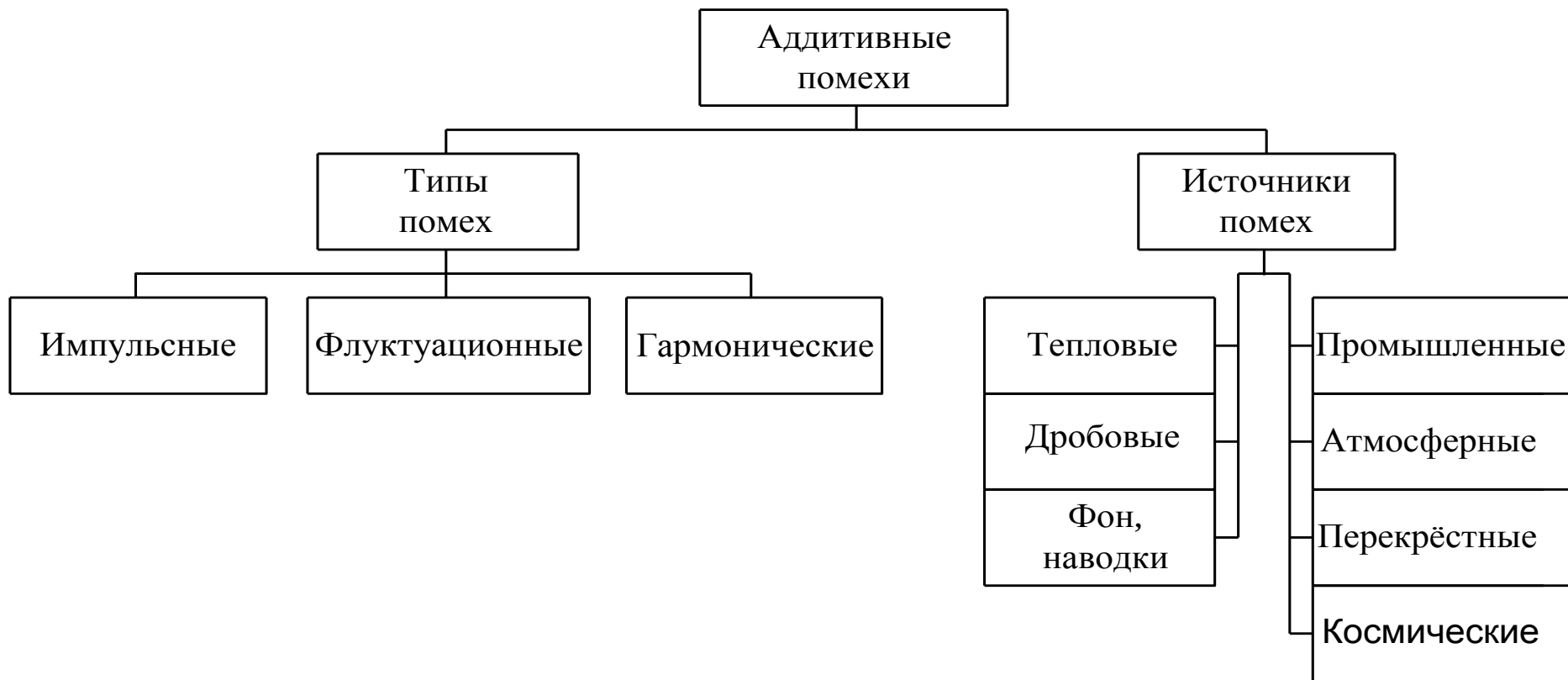


Рисунок 11.1 Классификация аддитивных помех

По форме аддитивные помехи (см. рисунок 11.1 и 11.2) можно разделить на сосредоточенные во времени (импульсные), гармонические (сосредоточенные по частоте).

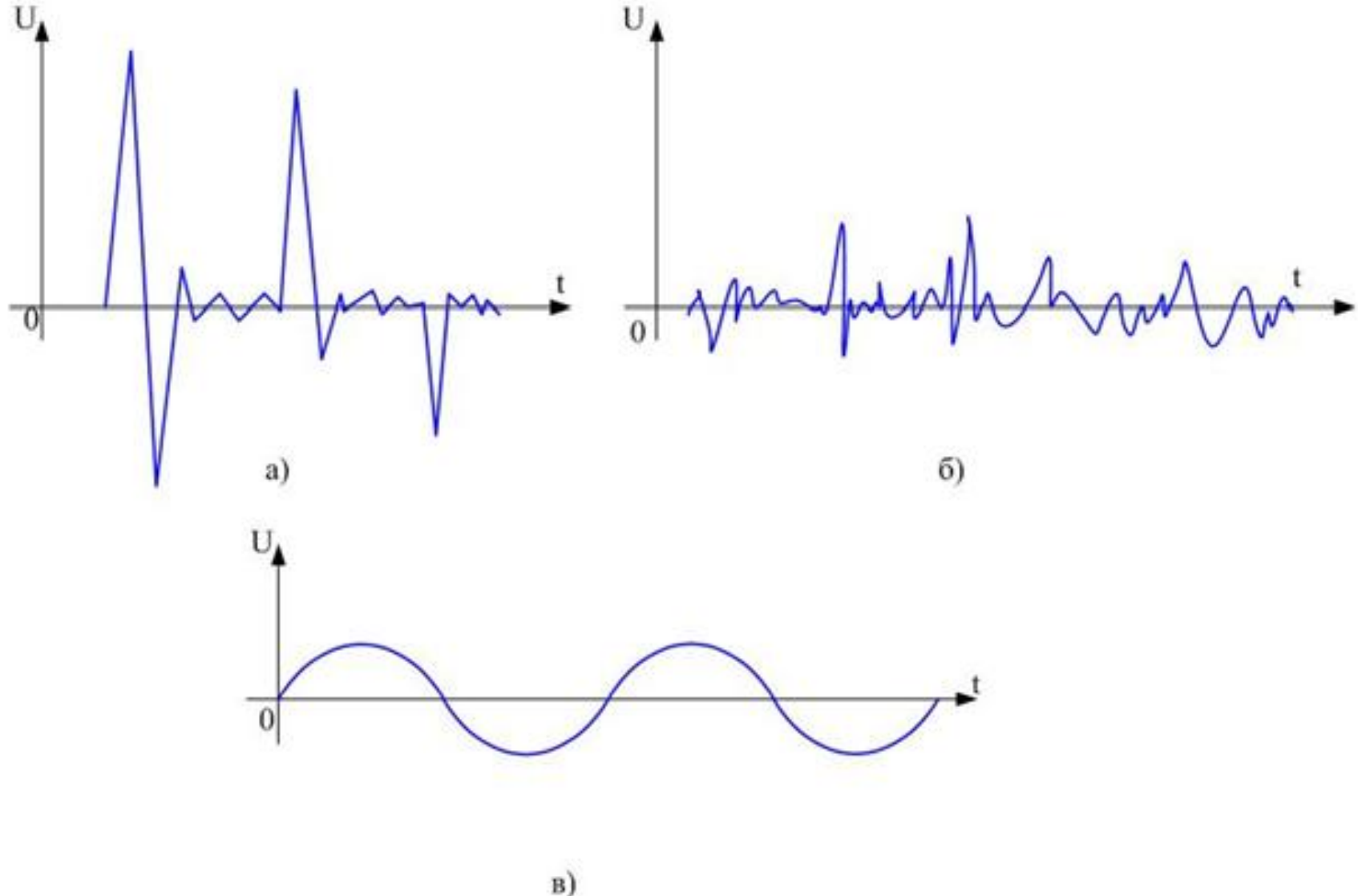


Рисунок 11.2 Типы помех:

а – импульсные; б – флуктуационные; в – гармонические.

**Источники помех:** Источниками помех являются внешние воздействия и внутренние шумы, возникающие в цепях и аппаратуре.

**К внутренним шумам** относятся тепловые шумы, возникающие из-за беспорядочного движения свободных электронов в проводах и резисторах и шумы, обусловленные дробовым эффектом в электронных лампах и полупроводниковых приборах. В результате дробового эффекта ток не является постоянным и флуктуирует относительно среднего значения. Внутренние шумы существуют всегда и являются источниками флуктуационных помех, которые принципиально неустранимы, их необходимо ограничивать.

Наибольшее влияние на канал связи оказывают внешние помехи, главнейшими из которых являются **промышленные** (искусственные) помехи. Промышленные помехи создаются различными устройствами: электродвигателями, электросваркой и т.д. Основной причиной этих помех является искрообразование, связанное с **резким прерыванием тока** в электрических цепях в процессе их коммутации.

**Атмосферные помехи** обусловлены перемещением электрических зарядов в атмосфере. Молнии создают токовые разряды в десятки тысяч ампер, и помехи от них носят импульсный характер.

# 11.3. Флуктуационные помехи и их характеристики

7

Флуктуационные помехи являются результатом наложения большого числа импульсных помех, вследствие чего кривая напряжения помех является непрерывной во времени случайной величиной. Поэтому флуктуационные помехи описываются вероятностными характеристиками.

Флуктуационные помехи, имеющие практически неограниченный спектр частот, называются «**белым шумом**».

Белый шум характеризуется нормальным (гауссовым) распределением мгновенных значений амплитуд напряжения помехи  $U_{\text{п}}$

$$\omega(U_{\text{п}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi U_{\text{пск}}}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{пск}}} \right)^2} \quad (11.1)$$

где  $U_{\text{пск}}$  – среднеквадратичное напряжение помехи,  $\omega$  – плотность вероятности помех при нормальном распределении.

Флуктуационные помехи характеризуют следующие параметры:

1. Удельное напряжение помехи – эффективное напряжение помехи на единицу частотной полосы приёмного фильтра:

$$\sigma_0 = \frac{U_{\text{пск}}}{\sqrt{\Delta F}} \quad (11.2)$$

где  $\Delta F$  – диапазон частот канала связи.

2. Удельная мощность помехи  $\sigma_0^2$ .

3. Отношение сигнал/помеха – отношение амплитуды сигнала  $U_m$  к амплитуде помехи:

$$\alpha = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot U_{\text{пск}}} \quad (11.3)$$

4. Отношение энергии сигнала к удельной мощности помехи:

$$\alpha_0^2 = \frac{1}{\sigma_0^2} \cdot \int_0^{\tau} U_c^2(t) dt \quad (11.4)$$

## 11.4. Сосредоточенные помехи

Сосредоточенные помехи подразделяются на следующие:

1. Аперриодическая помеха (см. рисунок 11.3).

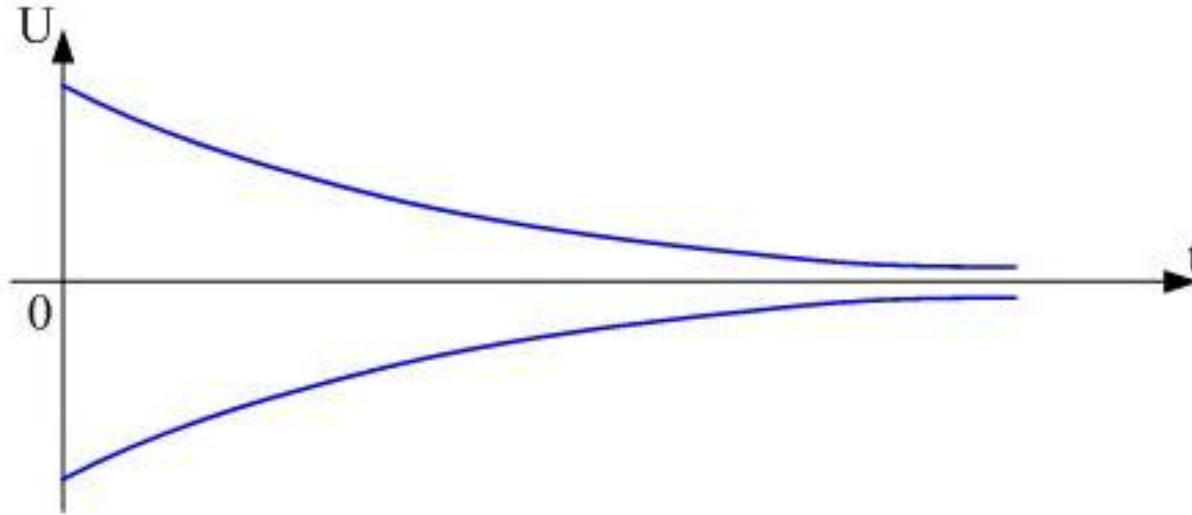


Рисунок 11.3 Аперриодическая помеха

Аперриодическую помеху можно описать выражением:

$$U = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ e^{-at}, & t > 0 \end{cases} \quad (11.5)$$

## 2. Полупериодическая помеха (см. рисунок 11.4)

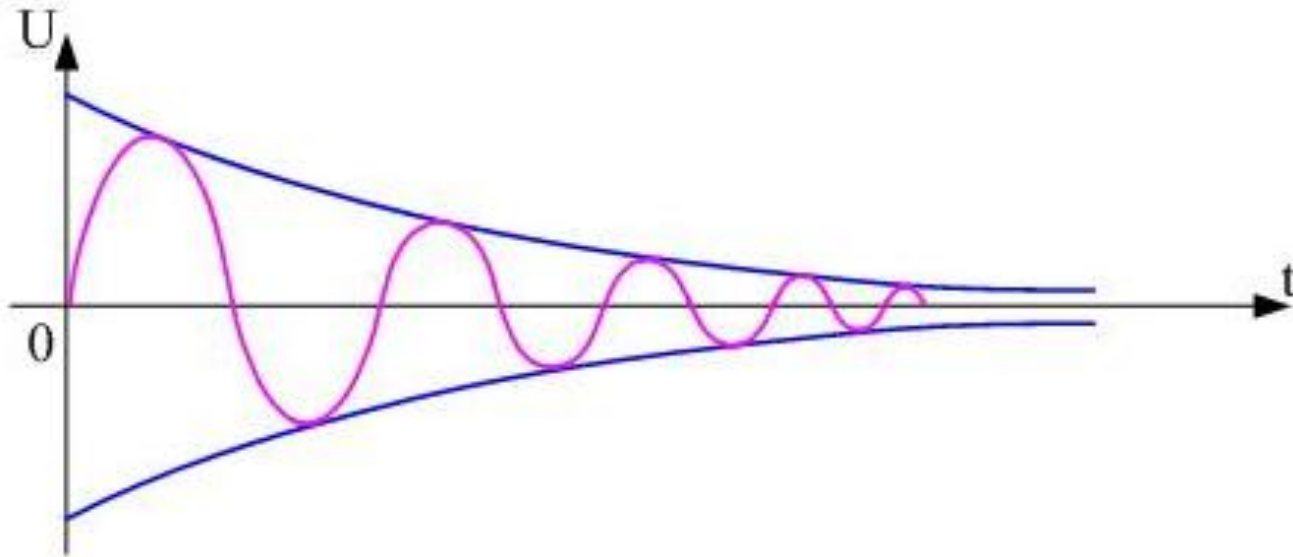


Рисунок 11.4 Полупериодическая помеха

Полупериодическую помеху можно описать выражением:

$$U = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ e^{-at} \cdot \sin(\omega t), & t > 0 \end{cases} \quad (11.6)$$

# 11.5. Помехоустойчивость передачи сигналов

**Помехоустойчивость** – это способность сигнала противостоять действию помех (т.е. сохранять содержащуюся в нём информацию, несмотря на действие помех).

**Потенциальная помехоустойчивость метода связи** – предельно допустимая помехоустойчивость, которая может быть обеспечена идеальным приёмником.

**Реальная помехоустойчивость** – это помехоустойчивость метода передачи с использованием неоптимального приёмника.

**Трансформация телемеханического сообщения** – это необнаруженное изменение телемеханического сообщения, возникающее под действием помех и приводящее к приёму ложного сигнала.

### 11.5.1. Помехоустойчивость дискретных сигналов

Элементарный дискретный сигнал содержит один бит информации «1» или «0».

Помехоустойчивость такого сигнала характеризуется вероятностью правильного приёма сигнала при заданном уровне помех.

Обозначим  $p(1 \rightarrow 0)$  – вероятность ложного приёма «0» вместо «единицы»,  
 $p(0 \rightarrow 1)$  – вероятность ложного приёма «1» вместо «0».

Для симметричного двоичного канала без памяти эти вероятности одинаковы и характеризуются вероятностью приёма ложного сигнала  $p = p(1 \rightarrow 0) = p(0 \rightarrow 1)$  .

Соответственно помехоустойчивость сигнала характеризуется вероятностью правильного приёма  $q = 1 - p$  при заданном уровне помех.

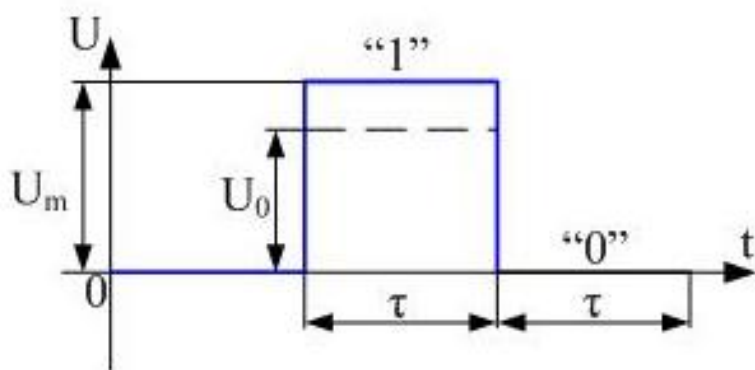
# 11.6. Помехоустойчивость порогового приёмника

13

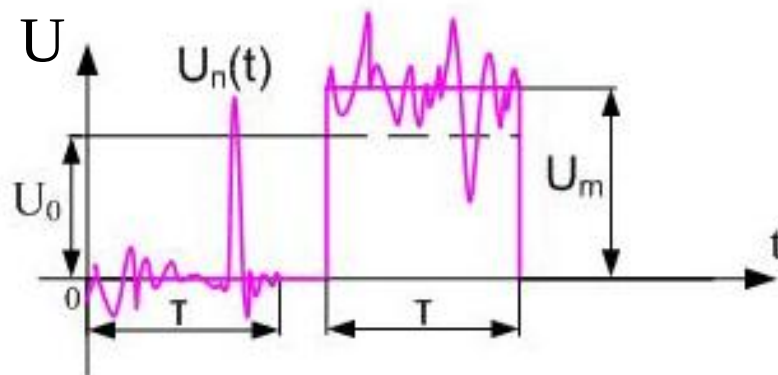
Пороговый приёмник реагирует на мгновенное значение уровня принимаемого сигнала.

Пусть передаётся амплитудно-модулированный прямоугольный сигнал с амплитудой  $U_m$ . Тогда, логическая «1» соответственно верхнему уровню, а «0» – отсутствию сигнала (см. рисунок 11.5а).

Пороговый приёмник имеет порог  $U_0$ . Если проходящий сигнал превосходит порог, то приёмник фиксирует «1», если нет, то «0» (см. рисунок 11.5б).



а)



б)

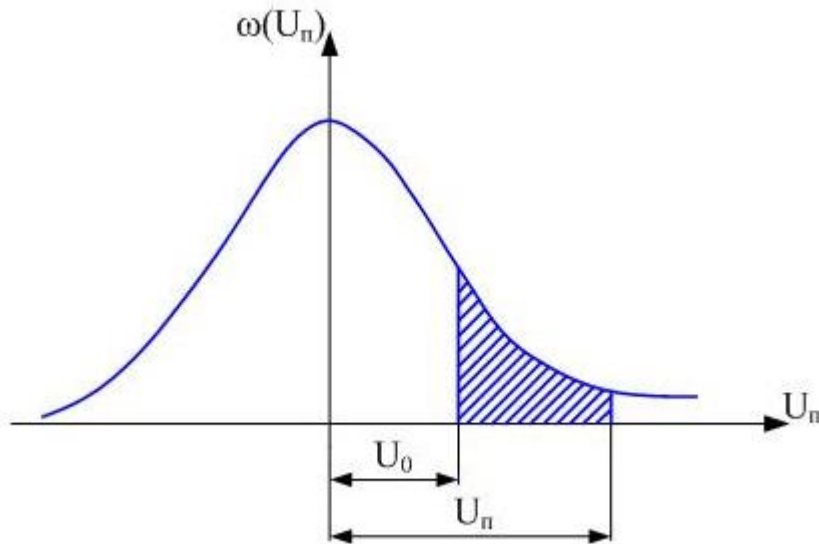
Рисунок 11.5 Временная диаграмма сигнал/помеха:

а – амплитудно-модулированный прямоугольный сигнал; б – прохождение сигнала через пороговый приемник.

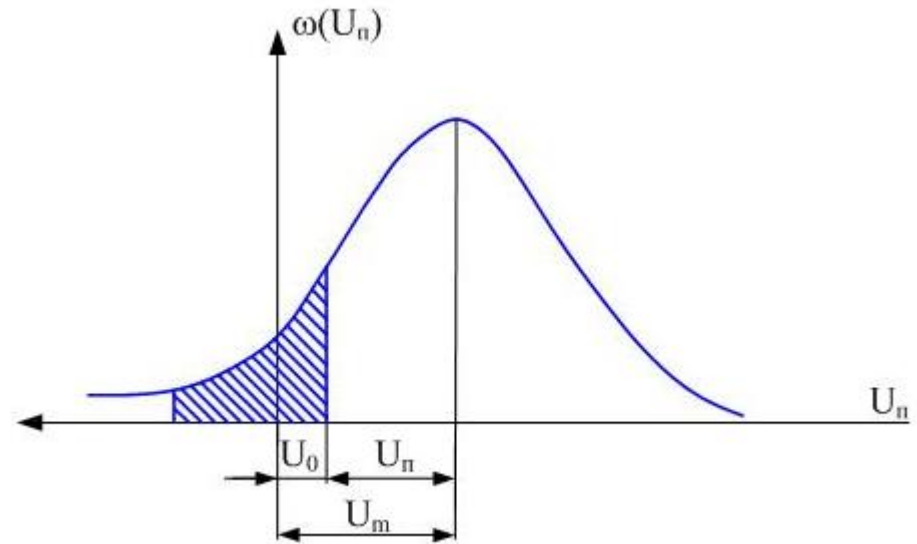
Вероятность того, что помеха достигнет порогового уровня, при котором приёмник воспримет помеху как сигнал, определяется следующим образом:

$$p(U_{\text{п}} \geq U_0) = p(0 \rightarrow 1) = \int_{U_0}^{\infty} \omega(U_{\text{п}}) dU_{\text{п}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot U_{\text{пск}}} \cdot \int_{U_0}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{пск}}} \right)^2} dU_{\text{п}} \quad (11.7)$$

Это выражение соответствует заштрихованной области на графике распределения плотности вероятности помехи (см. рисунок 11.6).



а)



б)

Рисунок 11.6 Распределение плотности вероятности помехи:

а – полезный сигнал отсутствует; б – подавление сигнала помехой.

Если обозначить  $\frac{U_0}{U_{\text{пск}}} = \beta$  и  $\frac{U_n}{U_{\text{пск}}} = z$ ,  $\frac{U_0}{U_{\text{пск}}} = \beta$ ;  $\frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{пск}}} = z$  (11.8)

получим

$$p(U_{\text{п}} \geq U_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\beta}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = v(\beta) \quad (11.9)$$

где  $v(\beta)$  – интеграл вероятности.

Таким образом, вероятность превышения помехой порогового уровня  $U_0$ , т.е.  $p(0 \rightarrow 1)$ , выражается интегралом  $v(\beta)$  и является однозначной функцией порогового уровня  $U_0$  при заданном уровне помех  $U_{\text{пск}}$ .

Аналогичным образом определяется вероятность подавления сигнала помехой, т.е. вероятность того, что помеха окажется по абсолютной величине достаточной, чтобы «подавить» сигнал амплитуды  $U_m$  до уровня  $U_0$ , меньшего, т.е.  $|U_{\text{п}}| > U_{\text{п}} - U_0$  :

$$p(1 \rightarrow 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{U_m - U_0}{\sqrt{U_{\text{пск}}}}} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (11.10)$$

Выразив верхний предел через отношение сигнал/помеха

$$\alpha = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot U_{\text{пск}}} \quad (11.11)$$

и  $\beta$ , получим

$$p(1 \rightarrow 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\alpha\sqrt{2}-\beta} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = v(\alpha\sqrt{2}-\beta) \quad (11.12)$$

Для симметричного канала

$$p(1 \rightarrow 0) = p(0 \rightarrow 1) \Rightarrow \beta = \alpha\sqrt{2} - \beta, \text{ т.е. } \beta = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \quad (11.13)$$

Если подставим  $\alpha$  и  $\beta$ , то получим условие симметричного канала для простейшего порогового приёмника:

$$U_0 = \frac{U_m}{2} \quad (11.14)$$

Таким образом, для симметричного двоичного канала вероятность ложного приёма бита выражается интегралом вероятности:

$$P = v(\beta) = v\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}}\right) \quad (11.15)$$

# 11.7. Помехоустойчивость идеального приёмника Котельникова

## (потенциальная помехоустойчивость)

17

В теории доказывается, что наилучшей помехоустойчивостью в условиях флуктуационных помех обладает приёмник, в котором производится сравнение получаемых сигналов с их образцами (эталоны) и вычисляется энергия разности принятого сигнала:

$$I_1 = \int_0^{\tau} [x(t) - A_1(t)]^2 dt; \quad I_2 = \int_0^{\tau} [x(t) - A_2(t)]^2 dt \quad (11.16)$$

где  $A_1(t)$ ,  $A_2(t)$  – эталоны первого и второго сигналов.

Если  $I_1 - I_2 > 0 \Rightarrow$  принят  $A_1(t)$ . Если  $I_1 - I_2 < 0 \Rightarrow$  принят  $A_2(t)$ .

В общем случае разность сравнивается с некоторым пороговым значением  $\beta$ , т.е. если  $I_1 - I_2 > \beta$ , то  $x(t)$  относят к  $A_1(t)$ , если  $I_1 - I_2 < \beta$ , то  $x(t)$  относят к  $A_2(t)$ .

Помехоустойчивость идеального приёмника при приёме дискретных сигналов («1» и «0») в общем случае определяется соотношениями:

$$p(0 \rightarrow 1) = v(\beta); \quad p(1 \rightarrow 0) = v(\alpha_0 \sqrt{2} - \beta) \quad (11.17)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{\sigma_0} \cdot \sqrt{\int_0^{\tau} [A_1(t) - A_2(t)]^2 dt} \quad (11.18)$$

Рассмотрим помехоустойчивость идеального приёмника для двух дискретных сигналов при различных импульсных признаках, полагая, что канал связи симметричный, т.е.:

$$p(1 \rightarrow 0) = p(0 \rightarrow 1) \Rightarrow \beta = \alpha_0 / \sqrt{2} \quad (11.19)$$

### 11.7.1. Амплитудный признак

Для видеосигнала:  $A_1(t) = U_m$  , длительностью  $\tau$  ,  $A_2(t) = 0$  , получаем:

$$\alpha_0 = \frac{U_m \sqrt{\tau}}{\sigma_0} \quad (11.20)$$

Для радиосигнала:  $A_1(t) = U_m \cdot \sin(\omega t)$  , длительностью  $\tau$  ,  $A_2(t) = 0$  , получаем :

$$\alpha_0 = \frac{U_m \sqrt{\tau}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_0} \quad (11.21)$$

Если растёт  $\sigma_0$  , следовательно, растёт помехоустойчивость, и следовательно помехоустойчивость видеоимпульса выше, чем радиоимпульса.

## 11.7.2. Частотный признак

Пусть  $A_1(t) = U_m \cdot \sin(\omega_1 t)$  ,  $A_2(t) = U_m \cdot \sin(\omega_2 t)$  , сигнал длительностью  $\tau$  .  
Подставим эти выражения в  $\alpha_0$  , получим:

$$\alpha_0 = \frac{U_m \sqrt{\tau}}{\sigma_0} \quad (11.22)$$

Следовательно, при использовании частотного признака (частотной манипуляции) помехоустойчивость по сравнению с амплитудным признаком и использованием радиосигналов (амплитудная модуляция) повышается, достигая помехоустойчивости сигналов постоянного тока (видеоимпульсов).

## 11.7.3. Полярный признак

Пусть  $A_1(t) = U_m$  ,  $A_2(t) = -U_m$  , сигнал длительностью  $\tau$  . В результате чего величина помехоустойчивости определяется выражением:

$$\alpha_0 = \frac{2 \cdot U_m \sqrt{\tau}}{\sigma_0} \quad (11.23)$$

Следовательно, полярный импульсный признак наиболее помехоустойчивый из всех рассмотренных выше.

### 11.7.4. Широтно-импульсный признак

Пусть  $A_1(t) = U_m$  ,  $A_2(t) = U_m$  , длительностью  $\tau_2$  . Величина помехоустойчивости в этом случае:

$$\alpha_0 = \frac{U_m \sqrt{\tau_2 - \tau_1}}{\sigma_0} \quad (11.24)$$

Следовательно, помехоустойчивость широтно-импульсного признака зависит от разности длительностей импульсов «1» и «0» и может быть получена сколь угодно высокой при увеличении этой разности.

# **11.8. Методы повышения помехоустойчивости дискретных сигналов**

Существуют следующие методы:

1. Параметрические методы. Основаны на выборе наиболее выгодного вида модуляции и использование коррекции формы и длительности импульсов (подбор метода передачи).
2. Применение избыточных корректирующих кодов.
3. Избыточность передаваемых сообщений.
4. Использование обратного канала.

## 11.8.1. Методы борьбы с помехами

### 1. Уменьшение энергии помех.

- 1). Удаление источника помех от канала связи.
- 2). Экранирование источника помех.
- 3). Правильное выполнение заземлений (см. рисунок 11.7).

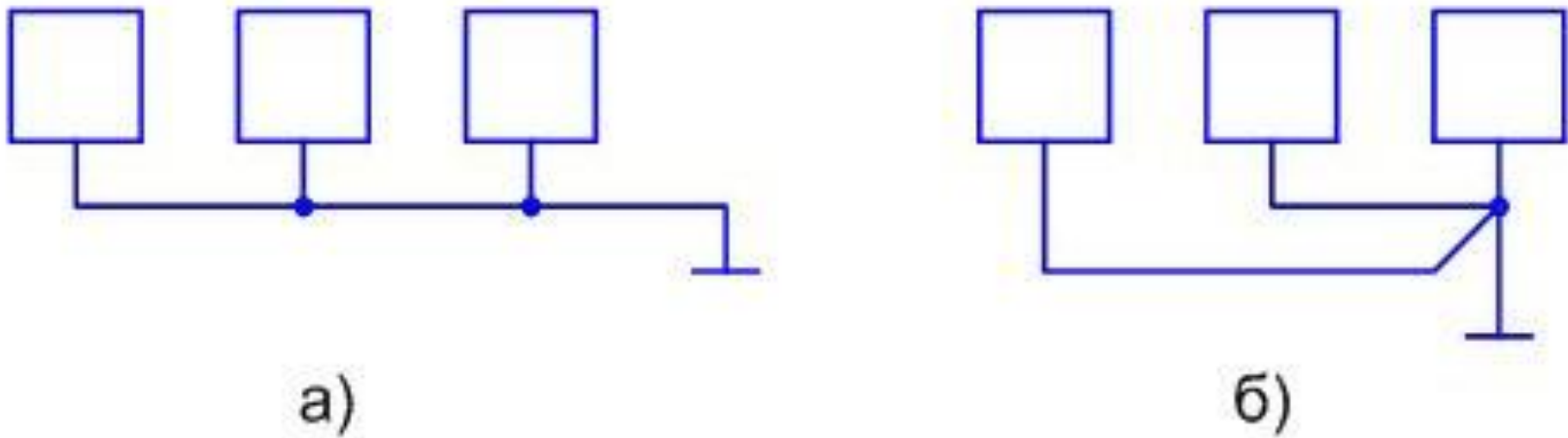


Рисунок 11.7 Пример реализации заземлений:

а – неправильное выполнение заземлений; б – правильное выполнение заземлений.

2. Использование схем подавления помех.
3. Уменьшение паразитных связей между каналом связи и источником помех (разносят силовые и сигнальные кабели, экранирование, использование гальванической развязки).
4. Увеличение помехоустойчивости сигнала (увеличение энергии сигнала, использование помехоустойчивого кодирования, передача с повтором, использование помехоустойчивой модуляции).
5. Использование различий между сигналом и помехой.
  - 1). Использование ограничений сигнала.
  - 2). Фильтрация.
6. Комбинированные методы.
  - 1). Дифференциальные линии связи.
  - 2). Приём с предсказанием.
  - 3). Интегрирование с выбранным интервалом.
  - 4). Стробирование приёмника и передатчика.