

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра квантовой радиофизики

СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Учебно-методическое пособие

Составитель: ***Ю. В. Денисов***

МОСКВА
МФТИ
2012

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент Рождественский В.В.

СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ: учебно-методическое пособие / сост. Ю.В. Денисов. – М.: МФТИ, 2012. – 40 с.

Федеральное государственное, автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Недетерминированные сигналы	5
2. Источники случайных процессов в фотоэлектронных устройствах	10
3. Шумы некоторых фотоприемников	13
4. Пороговая чувствительность приемников излучения	18
5. Преобразование шумов линейными системами.....	20
6. Влияние шумов усилителя.....	22
7. Особенности методов измерения световых потоков.....	25
8. Детектирование переменных сигналов при наличии шума.....	26
9. Порядок выполнения работы. Работа с программой Lab-12D..	32
10. Упражнения.....	35
Литература.....	39

Цель работы: ознакомление с физическими процессами, приводящими к появлению случайных сигналов в фотоэлектрических регистрирующих устройствах, различным видом случайных сигналов, измерением их характеристик, источниками шумов в фотоэлектронных приборах и методами выделения полезных сигналов из помех, возникающих при регистрации световых сигналов. Работа проводится методом компьютерного моделирования.

Введение

Задача, которая постоянно стоит перед исследователями при регистрации световых потоков, заключается в увеличении точности измерения мощности светового сигнала и регистрации возможно меньшей ее величины.

Существуют принципиальные физические процессы, ограничивающие минимальный уровень сигнала, который может быть зарегистрирован или измерен с заданной точностью фотоприемным устройством. Эти процессы имеют случайный характер и не могут быть устранены.

В представленном учебно-методическом пособии рассматриваются природа и характеристики случайных процессов, а также основные источники случайных сигналов в фотоэлектрических устройствах, их преобразование электронными схемами, методы и устройства выделения сигналов на фоне случайных помех. Рассматриваются особенности регистрации сигналов различными фотоприемниками в присутствии помех.

Работа рассчитана на студентов, которые имеют начальные знания теории вероятности и впервые сталкиваются с наблюдением и обработкой случайных процессов. Поэтому главное внимание уделено наглядности представления материала.

1. Недетерминированные сигналы

В фотоэлектрических измерениях различают два типа сигналов: детерминированные и недетерминированные. Для детерминированных сигналов всегда можно указать его значение в любой наперед заданный момент времени с любой степенью точности. Например, $S(t) = A \sin(\omega t)$.

Недетерминированный или случайный сигнал характеризуется тем, что значения его параметров в любой наперед заданный момент времени можно предсказать лишь с некоторой вероятностью меньшей единицы. Этот сигнал описывается не регулярной, а случайной функцией времени $\xi(t)$, конкретного вида которой заранее указать нельзя. Если указывается конкретный вид $\xi(t)$, то тем самым выделяется одна из возможных реализаций случайного сигнала.

Числовые параметры случайных сигналов определяются, вообще говоря, многомерными плотностями вероятности и многомерными функциями распределения. Значительное число результатов при анализе случайных сигналов можно получить используя только одномерную – $p(x, t)$ или двумерную – $p(x_1, x_2, t_1, t_2)$ плотности вероятности.

Важными числовыми характеристиками в этом случае являются: среднее значение сигнала

$$\langle \xi(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x, t)dx = \xi_0(t), \quad (1.1)$$

дисперсия

$$\langle [\xi(t) - \xi_0(t)]^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} [x - \xi_0(t)]^2 p(x, t)dx = \sigma_{\xi}^2(t), \quad (1.2)$$

функция корреляции

$$\begin{aligned} \langle (\xi(t_1) - \xi_0(t_1)) \cdot (\xi(t_2) - \xi_0(t_2)) \rangle = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 p(x_1, x_2, t_1, t_2) dx_1 dx_2 = B(t_1, t_2). \end{aligned} \quad (1.3)$$

В этих определениях усреднение проводится по ансамблю реализаций.

Если $p(x, t)$ и $p(x_1, x_2, t_1, t_2)$ зависят от времени, то сигнал называется нестационарным. Для стационарных сигналов многомерные плотности вероятности и функции распределения от времени не зависят. Как следствие, среднее значение и дисперсия постоянны во времени: $\langle \xi(t) \rangle = \xi_0$,

$\sigma_{\xi}^2(t) = \sigma^2$, а функция корреляции зависит только от разности: $\tau = |t_2 - t_1|$ — $B(t_1, t_2) = B(\tau)$.

Отметим, что если дисперсия является мерой отклонения значения сигнала от его среднего значения, то функция корреляции является мерой статистической связи между значениями ξ в моменты времени t и $t + \tau$.

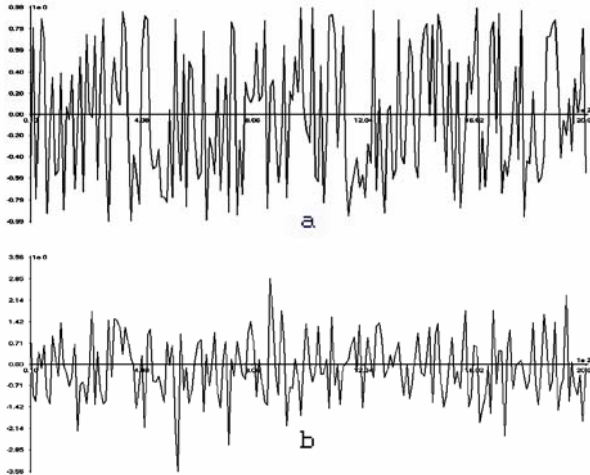


Рис. 1.1. Реализации случайных процессов с равномерным распределением плотности вероятности (а) и с гауссовым распределением (б). По оси абсцисс отложены номера последовательных выборок соответствующего случайного процесса

График на рис. 1.1а представляет случайный сигнал с равномерным распределением плотности вероятности на интервале значений x от -1 до 1 :

$$p(x) = 0.5 \, dx, \quad (1.4)$$

в то время как график на рис. 1.1б представляет случайный сигнал с нормальным распределением и дисперсией $\sigma^2 = 1$ и $x_0 = 0$:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_0 - x)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1.5)$$

Коэффициент 0.5 в формуле (1.4) и коэффициент $1/\sigma\sqrt{2\pi}$ в формуле (1.5) обусловлены условием нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1. \quad (1.6)$$

Наряду с процессами, которые подчиняются упомянутым выше распределениям, в ряде физических процессов статистические характеристики описываются дискретным распределением Пуассона:

$$p(n, n_0) = \frac{n_0^n}{n!} e^{-n_0} \quad (1.7)$$

которое, например, показывает вероятность вылета n электронов с поверхности фотокатода фотоэлемента на интервале времени T , когда среднее число электронов, вылетевших за это время, — n_0 .

При $n_0 > 9$ распределение Пуассона можно аппроксимировать нормальным распределением со средним и дисперсией, равными n_0 .

Что касается времени между двумя соседними вылетевшими электронами — τ , то оно подчиняется показательному распределению:

$$p(\tau)d\tau = \frac{1}{\tau_0} e^{-\tau/\tau_0} d\tau, \quad (1.8)$$

где $\tau_0 = T/n_0$ — средний интервал времени между моментами вылетов двух последовательно вылетевших электронов.

Большой класс стационарных случайных сигналов обладает эргодическим свойством: среднее по ансамблю реализаций равно среднему по времени для любой реализации:

$$\langle \xi(t) \rangle = \overline{\xi(t)} = \xi_0, \quad (1.9)$$

$$\langle [\xi(t) - \xi_0]^2 \rangle = \overline{[\xi(t) - \xi_0]^2} = \sigma_\xi^2, \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} & \langle (\xi(t) - \xi_0) \cdot (\xi(t - \tau) - \xi_0) \rangle = \\ & = \overline{[\xi(t) - \xi_0] \cdot (\xi(t - \tau) - \xi_0)} = B(\tau). \end{aligned} \quad (1.11)$$

Здесь и далее в выражениях угловые скобки означают усреднение по реализациям, а черта сверху – усреднение по времени, т.е.

$$\overline{\xi(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) dt, \quad (1.12)$$

$$\overline{[\xi(t) - \xi_0]^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\xi(t) - \xi_0]^2 dt, \quad (1.13)$$

$$\begin{aligned} & \overline{[\xi(t) - \xi_0] \cdot (\xi(t - \tau) - \xi_0)} = \\ & = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\xi(t) - \xi_0] \cdot (\xi(t - \tau) - \xi_0) dt. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Функция корреляции является четной функцией по τ : $B(\tau) = B(-\tau)$. Она максимальна при $\tau = 0$: $B(0) = \sigma^2$.

Коэффициент корреляции $\mathfrak{R}(\tau)$ определяется, как нормированная функция корреляции:

$$\mathfrak{R}(\tau) = B(\tau) / B(0). \quad (1.15)$$

С увеличением τ коэффициент корреляции стремится к нулю. Можно указать такое значение τ_c , при котором $|\mathfrak{R}(\tau_c)|$ будет меньше некоторого значения. Для времен $\tau > \tau_c$ можно считать процесс некоррелированным. Время τ_c называется временем корреляции процесса.

Непредсказуемость поведения функции $\xi(t)$ приводит к тому, что стандартным преобразованием Фурье

$$G'(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \xi(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (1.16)$$

спектр процесса – $G'(\omega)$ – найти невозможно. При таком преобразовании $G'(\omega)$ – случайная функция, т.к. мы не знаем конкретный вид функции $\xi(t)$ во всем бесконечном интервале времени. Поэтому для характеристики

спектральных свойств случайных сигналов используют преобразование Фурье от функции корреляции:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau. \quad (1.17)$$

Этот спектр является энергетическим спектром сигнала.

Действительно, при $\tau = 0$ и $\zeta_0 = 0$ выражение (1.17) принимает вид

$$B(0) = \overline{\xi^2(t)}. \quad (1.18)$$

Если под $\xi(t)$ подразумевать напряжение или ток, то $\overline{\xi^2(t)}$ – не что иное, как мощность сигнала на нагрузке в 1 Ом.

Функции $B(\tau)$ и $G(\omega)$ детерминированные, для них справедливо и обратное преобразование Фурье:

$$B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega. \quad (1.19)$$

Но при $\tau = 0$

$$B(0) = P_N = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) d\omega. \quad (1.20)$$

Следовательно, $G(\omega)/2\pi$ показывает, какая доля общей мощности сигнала P_N приходится на интервал частот $(\omega, \omega + d\omega)$.

Т.к. $B(\tau)$ – четная функция, то выражение (1.17) можно переписать следующим образом:

$$G(\omega) = 2 \int_0^{\infty} B(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau. \quad (1.21)$$

$G(\omega)$ в выше приведенных формулах определена для положительных и отрицательных значений частот, причем $G(\omega) = G(-\omega)$. В реальных устройствах мы имеем дело только с положительными частотами. Поэтому используют одностороннюю физическую плотность $G_+(\omega) = 2 \cdot G(\omega)$

В этом случае выражения (1.19) и (1.21) принимают вид

$$G_+(\omega) = 4 \int_0^\infty B(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (1.22)$$

$$B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty G_+(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega. \quad (1.23)$$

В дальнейшем мы будем использовать эти соотношения.

Случайные процессы в электронных устройствах зачастую называют шумом, поскольку на заре радиотехнической эры они проявляли себя в виде шума в громкоговорителях. Поэтому наряду с термином *случайный процесс* мы будем пользоваться термином *шум*.

Удобной идеализацией шума является так называемый *белый шум*. Спектр белого шума постоянен во всей области частот $G_+(\omega) = G_0 = \text{const}$, а его функция корреляции есть δ -функция: $\delta(\tau) = \infty$ при $\tau = 0$ и $\delta(\tau) = 0$ для всех других значений τ . Белый шум еще называют δ -коррелированным процессом.

Согласно (1.20) мощность белого шума в полосе частот $\Delta\omega$ пропорциональна полосе, в которой она измеряется:

$$P_N = \frac{1}{2\pi} G_0 \Delta\omega. \quad (1.24)$$

2. Источники случайных процессов в фотоэлектронных устройствах

2.1. Тепловой шум резистора

Из-за флуктуации электронной плотности в объёме резистора на его зажимах всегда существует случайно изменяющееся напряжение. Его средний квадрат определяется формулой Найквиста:

$$\overline{\Delta U_R^2} = \frac{2}{\pi} kTR \Delta\omega = 4kTR \Delta f. \quad (2.1)$$

Здесь k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, R – величина сопротивления резистора, Δf – полоса частот, в которой измеряется напряжение. Произведение $4kTR$ – спектральная плотность теплового шума резистора. Она постоянна вплоть до частот 10^{13} Гц, т.е. тепловой шум резистора можно считать белым шумом. Значение $4kT$ при $T = 300$ К составляет примерно $1,66 \cdot 10^{-20}$ В²/(Гц·Ом). Таким образом, резистор с

сопротивлением в 1 Мом в полосе частот в 1 Гц создает напряжение шума около 0,13 мкВ.

2.2. Токовый шум резистора, или шум $1/f$

Если через резистор пропускать постоянный ток I_* , то к тепловому шуму резистора добавится новая составляющая. Дополнительный шум называется токовым шумом $\overline{\Delta U_{\text{ток}}^2}$, или, как часто его называют, шум $1/f$, который вызван тепловыми флуктуациями в поликристаллической структуре проводника в проволочных сопротивлениях или пленки в пленочных сопротивлениях. Токовый шум – не «белый». Его спектральная плотность зависит от частоты

$$G(\omega) = \frac{a_N I_*^\alpha}{\omega^\beta}, \quad (2.2)$$

где константа α порядка 2, а константа β порядка 1.

Величина коэффициента a_N зависит от типа резистора. Токовый шум, как видно, резко увеличивается при приближении к нулевой частоте. На частотах выше 1 кГц он становится меньше теплового шума резистора.

2.3. Дробовой шум

Корпускулярная природа электрического тока приводит к флуктуациям его величины. Этот эффект называется дробовым шумом, величина которого выражается формулой Шоттки:

$$\overline{\Delta I_{\text{др}}^2} = 2qI_*\Delta f, \quad (2.3)$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, I_* – средняя величина тока, Δf – полоса частот, в которой производится измерения.

2.4. Генерационно-рекомбинационный шум

В полупроводниковых приборах по причине случайности процессов генерации и рекомбинации носителей концентрации электронов и дырок соответственно в зоне проводимости и валентной зоне флуктуируют во времени. Это приводит к случайному изменению проводимости и,

как следствию, флуктуациям напряжения на выводах полупроводника при протекании через него постоянного тока.

Т.к. в полупроводнике концентрации электронов и дырок не всегда равны между собой, то

$$\overline{\Delta U_N^2} = (2I_{\text{ср}} R)^2 \left[\frac{b+1}{bN_q + N_p} \right] \left[\left(\frac{N_q N_p}{N_q + N_p} \right) \frac{\tau}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2} \Delta f \right]. \quad (2.4)$$

Здесь $I_{\text{ср}}$ – постоянный ток, протекающий через полупроводник, R – его сопротивление, b – отношение подвижностей электронов и дырок, N_q – концентрация электронов и N_p – дырок, τ – время жизни свободных носителей (в предположении, что оно одинаково для электронов и дырок), Δf – полоса частот, в которой производятся измерения.

2.5. Фоновый шум

На фотоприемники всегда воздействует тепловое излучение окружающих предметов. Для оценки этого излучения принимают, что температура окружения составляет 300 К, а все предметы излучают, как абсолютно черное тело.

Шум, создаваемый этим излучением на выходе фотоприемника, имеет две составляющие. Так как световой поток от окружающего пространства – это поток фотонов, то он флуктуирует аналогично флуктуациям в потоке электронов при протекании тока. Такая составляющая шума обычно называется *фотонным шумом*. В то же время температура разных точек пространства случайно изменяется со временем и изменяется уровень излучения от них. Поэтому такая компонента шума называется *шумом температурных флуктуаций*. Если фотонный шум распределен равномерно в области частотных характеристик фотоприемников, то шум температурных флуктуаций растет с понижением частоты.

Выражение для величины фонового шума в явном виде получить не представляется возможным. Поэтому в формулах его пишут просто в виде $\overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}$.

Из рис. 2.1 видно, что основная доля излучения фона сосредоточена в области длин волн больших одного микрона. Поэтому фоновый шум может играть заметную роль только в приемниках инфракрасного излучения.

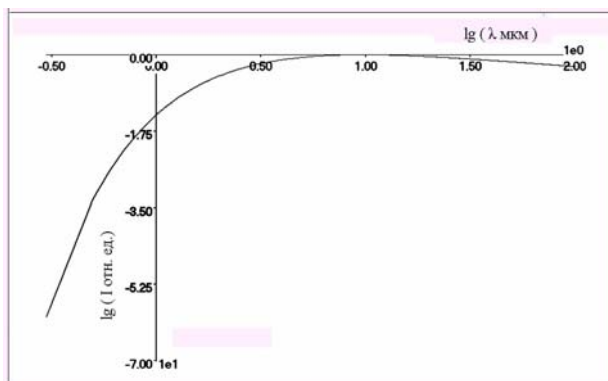


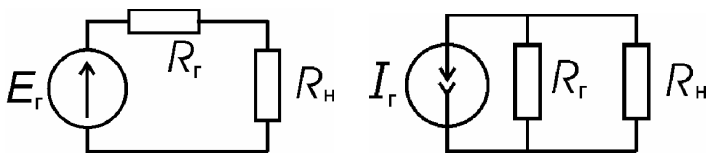
Рис. 2.1. Распределение энергии в излучении абсолютно черного тела, построенное в двойном логарифмическом масштабе

3. Шумы некоторых фотоприемников

В настоящем пособии не рассматриваются все характеристики фотоприемников. Здесь мы дадим только краткое описание их шумовых свойств.

Фотоприемник в электронной схеме рис. 3.1 можно представить в виде последовательного соединения генератора сигнала U_s и генератора шума $\sqrt{\Delta U^2_{N_{\text{фп}}}}$, которые подключены к сопротивлению нагрузки. Это применимо к любым типам фотоприемников.

(Вообще говоря, источник электрических сигналов можно изобразить по схеме Нортона генератором напряжения либо генератором тока по схеме Тевенина:



Генератор напряжения

Генератор тока

Мы будем использовать либо схему Нортона, либо Тевенина в зависимости от того, что сопротивление фотоприемника больше или меньше сопротивления нагрузки.)

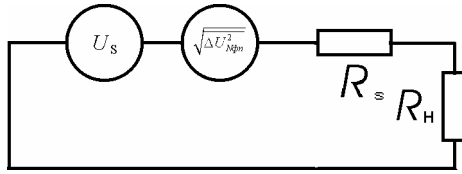


Рис. 3.1. Фотоприемник с нагрузкой

3.1. Приемники с внешним фотоэффектом

К таким приемникам относятся фотоэлементы (ФЭ) и фотоумножители (ФЭУ).

Т.к. приемники с внешним фотоэффектом работают в области спектра короче 1 мкм, то, исходя из кривой рис. 2.1, вклад фоновых флуктуаций в общем уровне шумов можно не рассматривать.

Схемы включения фотоэлемента и фотоумножителя идентичны схеме, изображенной на рис. 3.1. (Здесь и везде в дальнейшем мы опускаем все элементы схем, не имеющие отношения к рассматриваемому вопросу.)

В отсутствие засветки в схеме с фотоэлементом напряжение шума на выходе, т.е. на резисторе R_n , обусловлено двумя составляющими:

дробовыми шумами темнового тока фотокатода $I_{Тфк}$ –

$$\overline{\Delta U_{др}^2} = 2qI_{Тфк} R_n^2 \Delta f$$

и тепловыми шумами этого резистора – $\overline{\Delta U_R^2} = 4kTR_n \Delta f$.

Полный средний квадрат напряжения шума $\overline{\Delta U_{\Sigma}^2}$ равен

$$\overline{\Delta U_{\Sigma}^2} = \overline{\Delta U_R^2} + \overline{\Delta U_{др}^2}. \quad (3.1)$$

Анализ этой формулы показывает, что в устройствах с фотоэлементом тепловой шум резистора нагрузки всегда преобладает над дробовым шумом темнового тока.

Что касается шумов тока ФЭУ, то здесь картина более сложная, т.к. ток этот состоит из нескольких составляющих: тока фотокатода, усиленного диодной системой, и токов, возникающих от так называемых вторичных процессов. К вторичным процессам относятся: автоэлектронная эмиссия, оптическая, а также ионная, обратные связи, космическое излучение и т.д.

В общем, анодный ток ФЭУ состоит из последовательности отдельных импульсов, амплитуда которых флуктуирует от импульса к импульсу, а длительность отдельного импульса определяется разбросом времени пролета электронов в диодной системе.

В идеальном случае, когда анодный ток ФЭУ состоит только из усиленного тока фотокатода, а коэффициент вторичной эмиссии постоянная величина для каждого диода, напряжение дробовых шумов темнового тока можно записать в виде: $\overline{\Delta U_{др}^2} = 2Q^2 q I_{Тфк} R_n^2 \Delta f$, где Q – коэффициент усиления диодной системы, а заряд Qq – это заряд, переносимый отдельным импульсом. Коэффициент вторичной эмиссии отдельного диода флуктуирует от импульса к импульсу. По этой причине общий коэффициент усиления диодной системы Q случайно изменяется. В результате на аноде фотоумножителя наблюдается распределение импульсов по амплитуде. В реальных ФЭУ это распределение отражает не только флуктуации коэффициента вторичной эмиссии диодов, но и статистику импульсов от вторичных процессов. Когда вклад вторичных процессов не велик, то на амплитудном распределении наблюдается четко выраженный максимум – так называемый одноэлектронный пик. Такие фотоумножители наиболее пригодны для использования в режиме счета фотонов.

В упражнении 9 можно наблюдать вид тока на выходе фотоумножителя, амплитудное распределение импульсов, а также распределение интервалов между соседними импульсами.

В заключение заметим, что из-за большого значения Q вклад шумов резистора с сопротивлением больше 50 Ом в схемах с ФЭУ незначителен. Оценки показывают, что при коэффициенте усиления диодной системы $Q > 10^5$ тепловыми шумами резистора нагрузки с сопротивлением $R_n > 50$ Ом можно пренебречь.

3.2. Приемники с внутренним фотоэффектом

а) Фоторезистор

Шум фоторезистора складывается из:

теплового шума самого фоторезистора, как сопротивления, и шума резистора нагрузки –

$$\overline{\Delta U_R^2} = 4kTR_n R_\phi / (R_n + R_\phi) \Delta f, \quad (3.2)$$

генерационно-рекомбинационного шума – $\overline{\Delta U_N^2}$,

токового шума, вызванного модуляцией проводимости полупроводника причинами, отличными от флуктуации носителей в зонах, и контактными явлениями на границе металл–полупроводник – $\overline{\Delta U_{\text{ток}}^2}$, и фоновому шуму – $\overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}$.

Таким образом, средний квадрат напряжения шума на фоторезисторе можно представить как

$$\overline{\Delta U_{\Sigma}^2} = \overline{\Delta U_R^2} + \overline{\Delta U_N^2} + \overline{\Delta U_{\text{ток}}^2} + \overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}. \quad (3.3)$$

б) Фотодиод

Шумовые составляющие в фотодиодах такие же, как в фоторезисторах, но в зависимости от режима работы их доля различается.

В фотовольтаическом режиме через диод протекает незначительный ток. Поэтому токовым и генерационно-рекомбинационным шумами можно пренебречь. В результате формула для суммарного шума фотодиода будет выглядеть следующим образом:

$$\overline{\Delta U_{\Sigma}^2} = \overline{\Delta U_R^2} + \overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}. \quad (3.4)$$

В этой формуле под сопротивлением R_{ϕ} в члене $\overline{\Delta U_R^2}$ (см. формулу (3.2)) подразумевается прямое сопротивление фотодиода.

В фотодиодном режиме фотодиод заперт обратным напряжением и через него протекает обратный ток смещения. Поэтому

$$\overline{\Delta U_{\Sigma}^2} = \overline{\Delta U_R^2} + \overline{\Delta U_N^2} + \overline{\Delta U_{\text{ток}}^2} + \overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}. \quad (3.5)$$

Здесь в составляющей $\overline{\Delta U_R^2}$ под сопротивлением R_{ϕ} (см. формулу (3.3)) подразумевается обратное сопротивление фотодиода. Надо заметить, что оно на порядки больше прямого сопротивления.

3.3. Приемники с зарядовой связью (ПЗС)

В этих приемниках основную роль в шумах играют процессы генерации и рекомбинации носителей в приемных ячейках.

Поэтому в общей формуле для шумов

$$\overline{\Delta U_{\Sigma}^2} = \overline{\Delta U_{др}^2} + \overline{\Delta U_N^2} + \overline{\Delta U_{фон}^2} + \overline{\Delta U_{корр}^2} \quad (3.6)$$

члены $\overline{\Delta U_N^2}$ и $\overline{\Delta U_{фон}^2}$ обычно преобладают. Однако, необходим также учет дробового шума $\overline{\Delta U_{др}^2} = 2qI_T R_n^2 \Delta f$, где I_T – темновой ток ячейки.

Существенным моментом в работе ПЗС-приемников является то, что процесс переноса заряда между ячейками содержит случайную составляющую. При перетекании заряда между соседними ячейками часть заряда остается в предыдущей ячейке. От такта к такту эта часть, во-первых, флуктуирует, а во-вторых, величина оставшегося заряда зависит от величины заряда, находящегося в ячейке до процесса перетекания. Поэтому в шуме появляется корреляционная составляющая, которую мы отметили в формуле (3.6), как $\overline{\Delta U_{корр}^2}$.

3.4. Тепловые приемники

а) Болومتر

В полупроводниковых болометрах присутствуют все составляющие шумов, перечисленные в п. 2:

$$\overline{\Delta U_{\Sigma}^2} = \overline{\Delta U_R^2} + \overline{\Delta U_N^2} + \overline{\Delta U_{др}^2} + \overline{\Delta U_{ток}^2} + \overline{\Delta U_{фон}^2} \quad (3.7)$$

Только лишь в металлических болометрах не будет генерационно-рекомбинационного шума и

$$\overline{\Delta U_{\Sigma}^2} = \overline{\Delta U_R^2} + \overline{\Delta U_{др}^2} + \overline{\Delta U_{ток}^2} + \overline{\Delta U_{фон}^2} \quad (3.8)$$

Болومتر – очень инерционный приемник. Поэтому световой поток модулируется с частотой не выше 10 Гц, и регистрация сигнала должна вестись на таких низких частотах. В результате в общем уровне вклад шумов $\overline{\Delta U_{ток}^2}$, зависящий от частоты как $1/f$, становится заметным. Существуют электронные схемы, в которых вклад шумов $1/f$ сводится к минимуму.

б) Термопарный приемник

Термопарные приемники обычно используются в режиме холодного хода, и достаточно учесть только тепловые шумы сопротивления термопары и фоновый шум. Таким образом,

$$\overline{\Delta U_{\Sigma}^2} = \overline{\Delta U_R^2} + \overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}. \quad (3.9)$$

с) Пироэлектрический приемник

Пироэлектрический приемник представляет собой диэлектрический кристалл, относящийся к классу сегнетоэлектриков. Поэтому его внутреннее сопротивление чрезвычайно высоко (Гигаомы). В схемах сопротивление нагрузки всегда много меньше внутреннего сопротивления кристалла, а протекающие токи равны нулю. В результате в шуме пироэлектрического приемника достаточно учесть только тепловые шумы резистора нагрузки и фоновый шум

$$\overline{\Delta U_{\Sigma}^2} = \overline{\Delta U_R^2} + \overline{\Delta U_{\text{фон}}^2}. \quad (3.10)$$

4. Пороговая чувствительность приемников излучения

При попадании на фотоприемник светового сигнала на его выходе появляется помимо суммарного напряжения шума, которое мы обозначим как $\sqrt{\overline{\Delta U_{\Sigma}^2}}$, напряжение полезного сигнала U_s . Наличие шума, во-первых, ухудшает обнаружение слабых сигналов, а во-вторых, уменьшает точность измерения величины сигнала.

Чтобы охарактеризовать влияние шумов, вводится параметр – отношение сигнал/шум, который обозначается как S/N . В зависимости от характера сигнала при вычислении отношения сигнал/шум под S и N понимаются либо отношение напряжения сигнала S к корню из среднего квадрата напряжения шума N , либо отношение мощностей сигнала S и шума N , либо отношение их энергий. В случае сигналов с узким спектром для характеристики отношения S/N удобно пользоваться отношением амплитуды сигнала к корню из среднего квадрата амплитуды напряжения шума, а в случае сигналов с широким спектром – отношением мощностей. Мы будем использовать отношение напряжений.

Поскольку напряжение сигнала на выходе фотоприемника пропорционально мощности P_s светового потока $U_c = S_\lambda P_s$, где S_λ – спектральная чувствительность приемника, то

$$S / N = \frac{S_\lambda P_s}{\sqrt{\Delta U_\Sigma^2}}. \quad (4.1)$$

Считается, что сигнал зарегистрирован, когда отношение $S / N = 1$ и при этом мощность светового сигнала называется пороговой – P_{Smin} :

$$P_{Smin} = \frac{\sqrt{\Delta U_\Sigma^2}}{S_\lambda}. \quad (4.2)$$

На практике сначала измеряют среднюю амплитуду шума в отсутствие сигнала. Затем увеличивают мощность сигнала до тех пор, пока средний уровень суммарного напряжения U_{S+N} не станет вдвое большим, т.е. $U_{S+N} = 2\sqrt{\Delta U_\Sigma^2}$. Полученный уровень мощности P_{Smin} и определяет ее пороговую величину.

Величина P_{Smin} называется пороговой чувствительностью фотоприемника.

Т.к. в подавляющем большинстве экспериментов можно считать шум белым, то среднее напряжение шума пропорционально корню из полосы пропускания регистрирующего устройства (см. (1.24)). Это означает, что пороговая мощность также пропорциональна корню из полосы. По этой причине величина P_{Smin} указывается для полосы в 1 Гц.

Поскольку спектральная чувствительность приемников S_λ зависит от площади приемной площадки, то наряду с параметром пороговая чувствительность используется параметр обнаружительная способность – D^* . Они связаны между собой соотношением $D^* = (A \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}} P_{Smin}$, где A – площадь приемника, а Δf – ширина полосы пропускания измерительного тракта.

Обнаружительная способность более универсальный параметр, т.к. для однотипных приемников не зависит от площади и ширины полосы пропускания измерительного тракта.

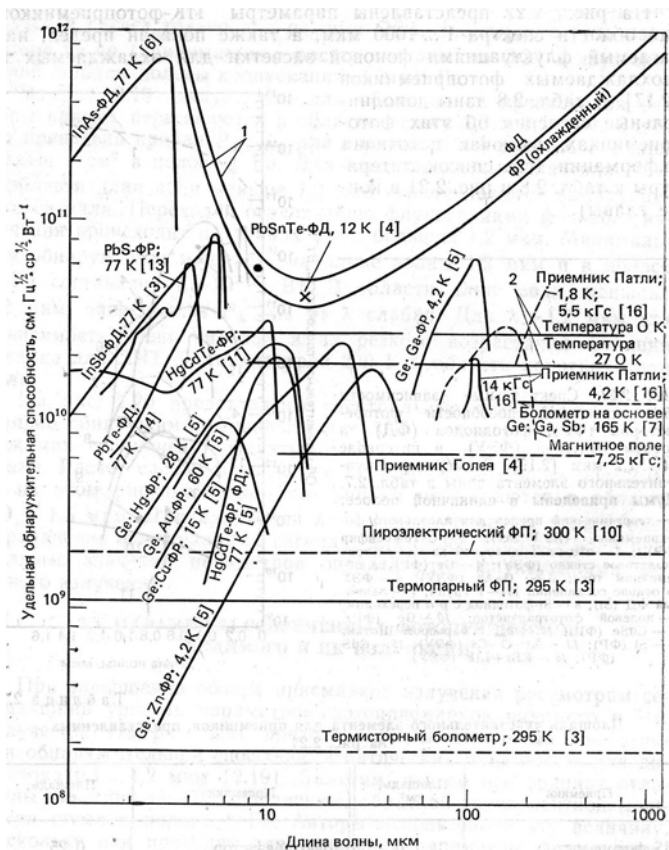


Рис. 4.1. Спектральные зависимости обнаружительной способности фотоприемников: 1 – теоретический предел в режиме ОФ, $T_{\text{фона}} = 295 \text{ K}$, апертура 2π ; 2 – теоретический предел для тепловых фотоприемников в режиме ОФ, $T_{\text{фона}} = 295 \text{ K}$

Кривые, приведенные на рис. 4.1, демонстрируют возможности обнаружения слабых световых сигналов современными фотоприемниками.

5. Преобразование шумов линейными системами

Если на вход устройства поступает шум со спектральной плотностью $G_{\text{вх}}(\omega)$, то его спектральная плотность на выходе в отсутствие собст-

венных шумов есть $G_{\text{вых}}(\omega) = |K^2(\omega)| G_{\text{вх}}(\omega)$, где $K(\omega)$ – коэффициент передачи устройства.

Мощность шума на выходе $P_{N_{\text{вых}}}$ тогда запишется так:

$$P_{N_{\text{вых}}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty |K^2(\omega)| G_{\text{вх}}(\omega) d\omega. \quad (5.1)$$

В практически важном случае белого шума $G_{\text{вх}}(\omega) = G_0 = \text{const}$ мощность шума на выходе определяется только частотной характеристикой устройства:

$$P_{N_{\text{вых}}} = \frac{G_0}{2\pi} \int_0^\infty |K^2(\omega)| d\omega. \quad (5.2)$$

Для количественной характеристики шумовых свойств электронной схемы вводится понятие шумовой полосы, когда реальная частотная характеристика системы заменяется прямоугольником со значением коэффициента передачи, равным максимальному значению коэффициента передачи реальной системы и площадью, равной полной площади передачи характеристики. Ширина этого прямоугольника и играет роль шумовой полосы. – $\Delta\omega_{\text{ш}}$:

$$\Delta\omega_{\text{ш}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\int_0^\infty |K^2(\omega)| d\omega}{K_0^2}. \quad (5.3)$$

В случае белого шума

$$P_{N_{\text{вых}}} = \frac{G_0 K_0^2}{2\pi} \Delta\omega_{\text{ш}}. \quad (5.4)$$

Удобство введения шумовой полосы состоит в том, что она для ряда линейных устройств близка к реальной полосе пропускания системы и позволяет сразу вычислять мощность шума на выходе. Так, для интегрирующей цепи и RLC-контура она всего в $\pi/2$ больше действительной полосы пропускания.

При одновременном воздействии полезного сигнала и шума на линейную систему можно считать, что сигнал будет зарегистрирован, если $S/N=1$, т.е. $P = P_{S_{\text{min}}}$. В то же время, используя сведения о характеристиках сигнала и выбирая соответствующую частотную характеристику

регистрирующего устройства, пороговую чувствительность можно улучшить. Так, если ширина спектра сигнала мала, то улучшение отношения сигнал/ шум оказывается возможным при использовании узкополосных систем. Выше мы показали, что мощность шума на выходе линейной системы пропорциональна шумовой полосе системы. Поэтому если сужать полосу, то отношение сигнал/шум на выходе системы будет расти. В пределе при $\Delta\omega_{ш} \rightarrow 0$ отношение $S/N \rightarrow \infty$, а мощность минимально обнаружимого сигнала будет стремиться к нулю. В действительности минимальная величина $\Delta\omega_{ш}$ ограничена, во-первых, временем наблюдения или регистрации сигнала, а во-вторых, шириной спектра сигнала $\Delta\omega_s$.

Первая причина обусловлена тем, что $\Delta\omega_{ш}$ пропорциональна полосе пропускания устройства $\Delta\omega_{0,7}$, которая связана со временем установления сигнала на его выходе $t_{уст}$ соотношением $t_{уст} \sim 1/\Delta\omega_{0,7}$. Поэтому уменьшение шумовой полосы вызывает увеличение времени установления процессов в системе, что при сохранении точности измерения приводит к увеличению времени наблюдения. Например, для интегрирующей цепи $\Delta\omega_{ш} = 1.15\pi/t_{уст}$.

Очевидно, что выбор $\Delta\omega_{ш} < \Delta\omega_s$ не имеет смысла, т.к. в этом случае информация, содержащаяся в сигнале, теряется.

6. Влияние шумов усилителя

Всякая реальная линейная система обладает собственными шумами. Это означает, если на её вход поступает шум со спектральной плотностью $G_{вх}(\omega)$, то мощность шума на выходе будет:

$$P_{N_{полн.вых}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty |K^2(\omega)| G_{вх}(\omega) d\omega + P_{N_{реал.вых}}, \quad (6.1)$$

где $P_{N_{реал.вых}}$ — мощность шума самой линейной системы на её выходе в отсутствие шума внешнего источника.

Количественно шумовые свойства линейной системы, четырехполосника или усилителя характеризуют коэффициентом шума или фактором шума F.

Коэффициент шума равен отношению полной мощности шумов на выходе реального устройства $P_{N_{реал.вых}}$ к выходной мощности шумов такого же идеального (не шумящего) устройства $P_{N_{ид.вых}}$ при условии, что единственный источник входного шума в обоих случаях — тепловой шум сопротивления $R_{согл}$, находящегося при температуре $T_0 = 290$ К, подключенного к входу усилителя, и согласованного с входным сопротивлением усилителя (см. Большая Советская Энциклопедия):

$$F = P_{N.\text{реал.вых}} / P_{N.\text{ид.вых}} \quad (6.2)$$

(Если к входу усилителя подключено сопротивление R , шум которого определяется формулой Найквиста, то его можно рассматривать как источник напряжения с внутренним сопротивлением R . Сопротивление, в частности, считается согласованным с усилителем, если в усилитель передается максимальная мощность. Это возможно, когда внутреннее сопротивление источника равно входному сопротивлению усилителя.)

Если коэффициент передачи устройства K , а шум белый, то $P_{N.\text{ид.вых}} = K^2 P_{N.\text{ид.вх}}$, где $P_{N.\text{ид.вх}}$ – мощность шума согласованного сопротивления, подключенного на входе.

Формулу (6.2) можно переписать в виде

$$F = P_{N.\text{реал.вх}} / P_{N.\text{ид.вх}}, \quad (6.3)$$

где $P_{N.\text{реал.вх}} = P_{N.\text{реал.вых}} / K^2$ – мощность шума устройства, приведенная к его входу.

При подключении на вход устройства источника сигнала мощностью $P_{S\text{вх}}$, внутреннее сопротивление которого согласовано с входным сопротивлением, коэффициент шума может быть записан следующим образом:

$$F = \frac{P_{S\text{вх}} / P_{N.\text{ид.вх}}}{P_{S\text{вых}} / P_{N.\text{реал.вых}}}. \quad (6.4)$$

Из последнего выражения можно заключить, что коэффициент шума – это число, которое показывает, во сколько раз линейная система ухудшает отношение сигнал/шум:

$$F = \frac{(S/N)_{\text{вх}}}{(S/N)_{\text{вых}}}, \quad (6.5)$$

где S/N – это либо отношение мощностей сигнала и шума, либо отношение напряжения сигнала к корню из среднего квадрата напряжения шума.

Всегда $F > 1$. Чем ближе F к единице, тем лучше шумовые свойства системы. Фактор шума часто измеряют в децибелах:

$$F(\text{дБ}) = 10 \lg \frac{(S/N)_{\text{вх}}}{(S/N)_{\text{вых}}}, \quad (6.6)$$

если S/N отношение мощностей, или

$$F(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{(S/N)_{\text{вх}}}{(S/N)_{\text{вых}}}, \quad (6.7)$$

если S/N отношение напряжений.

Для идеальной не шумящей системы $F = 0$ дБ. Если отношение сигнал/шум по мощности уменьшается в 2 раза, то $F = 3$ дБ.

С точки зрения шумовых свойств схема регистрации светового сигнала может быть изображена в виде, показанном на рис. 6.1. Здесь фотоприемник представлен генератором – $S_{\text{Фп}}$ с амплитудой сигнала – $U_{S\text{Фп}}$ и генератором шума – $N_{\text{Фп}}$ со средней квадратичной амплитудой – $\sqrt{\Delta U_{N\text{Фп}}^2}$, а усилитель – генератором шумов усилителя, приведенных к его входу – N_{yc} со средней квадратичной амплитудой – $\sqrt{\Delta U_{N\text{yc}}^2}$.

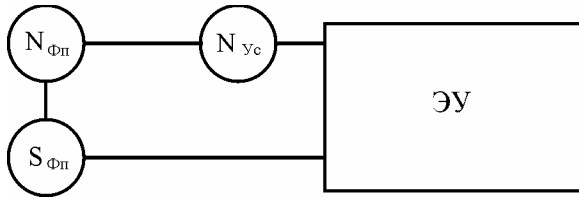


Рис. 6.1. Шумовая схема измерения световых потоков. (Внутреннее сопротивление фотоприемника и входное сопротивление усилителя на схеме не показаны)

Шумы фотоприемника и усилителя статистически независимы. Сам усилитель считается не шумящим.

Из рис. 6.1 следует, что если на выходе самого фотоприемника

$$S/N = \frac{U_{S\text{Фп}}}{\sqrt{U_{N\text{Фп}}^2}}, \text{ то на входе усилителя } - S/N = \frac{U_{S\text{Фп}}}{\sqrt{U_{N\text{Фп}}^2 + U_{N\text{yc}}^2}}, \text{ т.е.}$$

отношение сигнал/шум ухудшается при подключении фотоприемника к усилителю до значения:

$$F = (1 + \overline{U_{N_{yc}}^2} / \overline{U_{N_{фп}}^2}). \quad (6.8)$$

Если внутреннее сопротивление фотоприемника значительно меньше входного сопротивления усилителя, то можно уменьшить фактор шума.

В случае не слишком широкополосных сигналов с успехом может быть применен трансформаторный метод согласования. В этом методе (рис. 6.2) между приемником и усилителем включен не шумящий трансформатор – Тр.

На вторичной обмотке трансформатора напряжение сигнала и шума фотоприемника будут соответственно иметь значения $nU_{Sфп}$ и $n\sqrt{\Delta U_{Nфп}^2}$, где $n = W_2/W_1$ – коэффициент трансформации, и на входе усилителя отношение сигнал/шум станет равным

$$S / N = \frac{U_{Sфп}}{\sqrt{U_{Nфп}^2 + U_{N_{yc}}^2 / n^2}}. \quad (6.9)$$

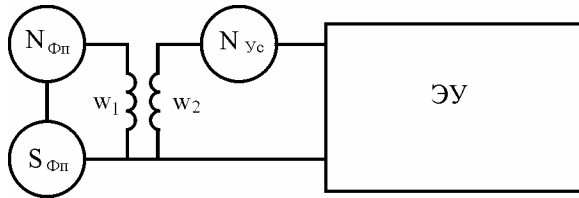


Рис. 6.2. Схема согласования по шуму. (Внутреннее сопротивление фотоприемника и входное сопротивление усилителя на схеме не показаны)

Если $n \gg 1$, то влияние шумов усилителя существенно снижается.

7. Особенности методов измерения световых потоков

В измерениях используются два метода регистрации слабых световых потоков.

Один из них – регистрация сигнала на постоянном токе или регистрация числа импульсов при счете фотонов. Этот метод эффективен там, где доля теплового излучения фона, незначительна. В этом методе световой поток направляется на фотоприемник и производится отсчет постоянного напряжения или числа импульсов на его выходе.

При работе в длинноволновом участке спектрального диапазона вклад фона может оказаться значительным. Фон создает неконтролируемые изменения светового потока на фотоприемнике, которые невозможно отличить от изменений сигнала. Поэтому в этой области используют модуляционный метод регистрации.

В модуляционном методе исследуемый световой поток модулируется с некоторой тактовой частотой. Т.к. фоновое излучение не модулировано, то его вклад в сигнал устраняется. Измерение ведется на переменном токе, с последующим детектированием. В этом случае также устраняется дрейф фотоприемника и схемы. Однако при этом электронные схемы сложнее. Требование к их линейности и стабильности должны быть более высокими. Кроме этого имеются принципиальные особенности, связанные с детектированием переменных сигналов в присутствии шума.

8. Детектирование переменных сигналов при наличии шума

В измерительных устройствах оптических сигналов применяются либо амплитудные диодные, либо синхронные детекторы.

А. Диодное детектирование

Принцип работы амплитудного детектора поясним на примере схемы рис. 8.1а, где представлен диодный детектор, состоящий из диода D , включенного последовательно с резистором R , к которому подключены генератор сигнала S и генератор шума N .

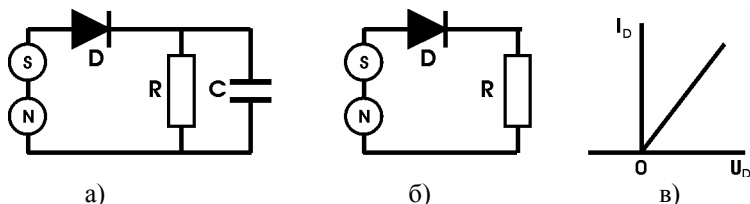


Рис. 8.1. Схема амплитудного диодного детектора:

- а) – с интегрирующей цепочкой,
- б) – без интегрирующей цепочки,
- в) – линеаризованная характеристика диода

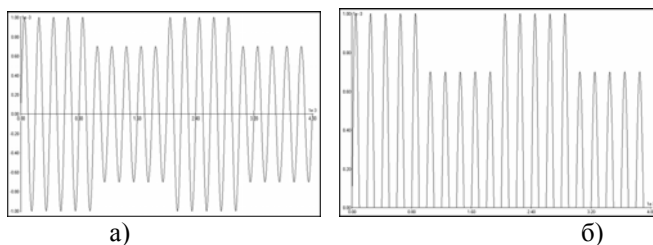


Рис. 8.2. а) – исходный сигнал, б) – сигнал на выходе детектора

Пусть шумы отсутствуют, а с генератора сигнала поступает гармоническое импульсно-модулированное колебание (рис. 8.2а).

При больших амплитудах входного сигнала характеристику диода можно линеаризовать и представить в виде изображенном на рис. 8.1в.

В этом случае во время положительных значений входного напряжения диод открыт. Его сопротивление r_d мало ($r_d \ll R$), и входной сигнал практически полностью передается на резистор R .

При отрицательных значениях входного напряжения диод закрыт, и напряжение на резисторе R отсутствует.

Когда колебание модулировано, то амплитуды положительных полувольт повторяют модулирующее колебание.

Если параллельно резистору R подключена емкость C , то процесс несколько видоизменится. Во время положительной полуволны конденсатор будет заряжаться с постоянной времени $\tau_3 = r_d C$, когда напряжение на

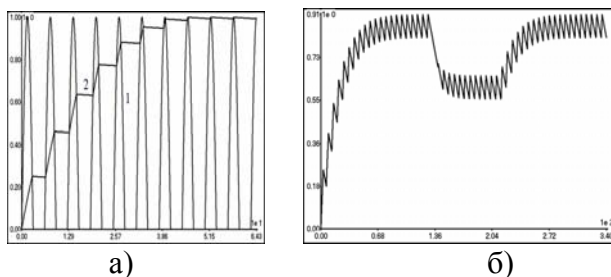


Рис. 8.3. а) – сигнал на выходе детектора для не модулированного колебания: 1 – в отсутствие емкости C , 2 – при ее наличии.
б) – сигнал на выходе детектора с емкостью C при импульсно модулированном колебании

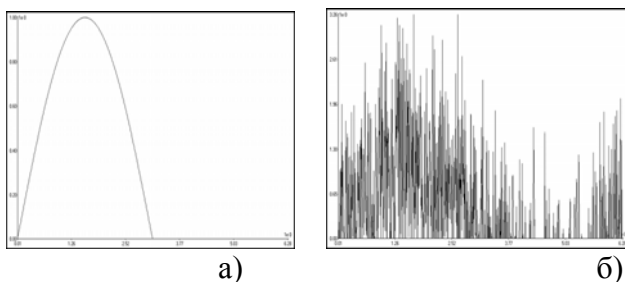


Рис. 8.4. а) – сигнал без шума, и – б) с шумом $S/N = 1$ на выходе детектора без емкости C .

Представлен один период несущей

нем будет меньше входного сигнала, и разряжаться в противном случае с постоянной времени $\tau_p = RC$ (рис. 8.3а).

Если на вход детектора поступает колебание, модулированное по амплитуде, и τ_p много меньше периода огибающей, то на выходе детектора появляется низкочастотная составляющая с периодом, равным периоду огибающей (рис. 8.3б).

Для сигнала с шумом картина несколько видоизменится (рис. 8.4). Если отношение сигнал/шум достаточно велико, то во время положительной полуволны сигнала уровень общего напряжения может быть отрицательным. Значит, диод на это время может быть заперт. И наоборот.

Во время отрицательной полуволны сигнала уровень общего напряжения может быть положительным, и диод на это время будет открыт. Таким образом, процессом детектирования управляет не только сигнал, но и шум. В результате произойдет относительное уменьшение амплитуды огибающей в сигнале, т.е. ее подавление, на выходе детектора (рис. 8.5).

Иными словами, при линейном диодном детектировании отношение сигнал/шум на выходе ухудшается. Аналогичное явление наблюдается и при квадратичном детектировании, т.е. когда амплитуда входного сигнала порядка 25 мВ. Теоретические расчеты подтверждают сделанное заключение. На рис. 8.6 кривые 1 и 2 показывают изменение отношения сигнал/шум при диодном детектировании. Из представленных зависимостей следует существенный вывод: чтобы при диодном детектировании получить на выходе удовлетворительное отношение сигнал/шум, необходимо его заметно улучшать до детектора.

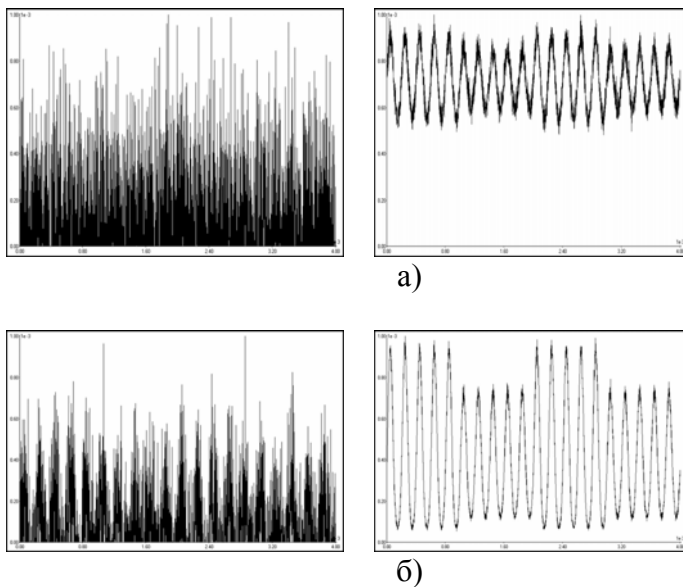


Рис. 8.5. Сигнал на выходе детектора. Емкость C отсутствует.
 а) – $S/N = 1$: 1 – входной сигнал, 2 – сигнал на выходе (усреднение по 1000 периодам огибающей);
 б) – $S/N = 5$: 1 – входной сигнал, 2 – сигнал на выходе (усреднение 1 периоду огибающей)

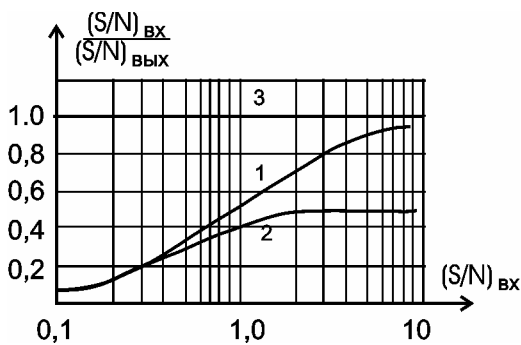


Рис. 8.6. Изменение отношения сигнал/шум при детектировании:
 1 – линейный, 2 – квадратичный и 3 – синхронный детекторы

От указанного недостатка свободен синхронный детектор.

Б. Синхронное детектирование

Принцип работы синхронного детектора заключается в том, что входной сигнал $U_{\text{вх}}(t)$ подается на вход электронной схемы, коэффициент пропускания которой $K(t)$ изменяется во времени синхронно с входным сигналом. Тогда выходной сигнал $U_{\text{вых}}(t)$ будет иметь вид $U_{\text{вых}}(t) = K(t)U_{\text{вх}}(t)$.

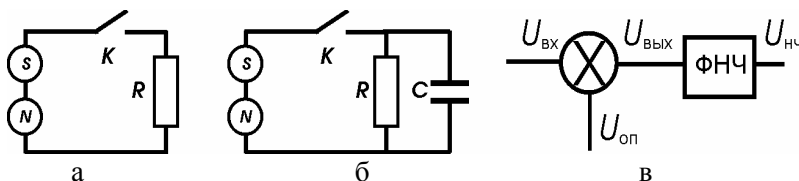


Рис. 8.7. Схемы синхронных детекторов: а, б – релейная, в – на перемножителе

Наиболее наглядно процессы в таком устройстве можно пояснить на примере релейного синхронного детектора, который представляет собой электронный ключ K , расположенный между источником сигнала S и шума N и нагрузкой R (рис. 8.7а).

Для синусоидального входного напряжения в отсутствие шума сигнал на резисторе R зависит от его фазы φ относительно момента переключения ключа (рис. 8.8).

Из рис. 8.8а видно, что при замкнутом ключе сигнал проходит без искажений, в то время как при разомкнутом он на выход не проходит. Т.е. в режиме пропускания синхронный детектор работает в линейном режиме, и моменты пропускания определяются только управляющим сигналом. В этом его принципиальное отличие от амплитудного диодного детектора.

С включением емкости на выходе детектора (рис. 8.7б) выходное напряжение усредняется, и его величина пропорциональна амплитуде входного сигнала. Процесс в этом случае аналогичен процессу, изображенному на рис. 8.3.

При наличии сигнала и шума в силу линейности процесса детектирования в смысле, отмеченном выше, анализ показывает, что отношение сигнал/шум на выходе детектора не изменится – прямая 3 на рис. 8.6.

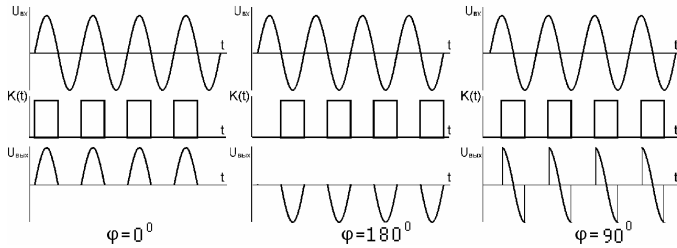


Рис. 8.8. Входной и выходной сигналы в релейном синхронном детекторе без емкости

Результирующее отношение сигнал/шум на выходе синхронного детектора будет определяться только постоянной времени выходной цепи, а поскольку она может быть сделана сколь угодно большой, т.е. полоса пропускания будет малой, то эффективность выделения сигнала из шума в синхронном детекторе высокая. При этом не надо забывать, что полоса пропускания этой цепи не должна быть уже спектра сигнала (см. пункт 5).

Синхронное детектирование можно выполнить в устройствах, содержащих перемножители сигналов (рис. 8.7в). Перемножитель – схема, на выходе которой напряжение пропорционально произведению напряжений сигналов, поданных на его два входа: $U_{\text{вых}}(t) = A U_{\text{вх}}(t) U_{\text{оп}}(t)$.

Пусть $U_{\text{вх}}(t) = U_0(t)\cos(\omega t)$, где $U_0(t)$ – медленная функция времени, а $U_{\text{оп}}(t) = U_p\cos(\omega t + \varphi)$. Тогда на выходе перемножителя напряжение будет иметь вид:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{2} U_0(t) U_p \{ \cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi \},$$

а на выходе фильтра низких частот – ФНЧ

$$U_{\text{нч}}(t) = \frac{1}{2} U_0(t) U_p \cos \varphi.$$

Таким образом, в этой схеме выделяется огибающая сигнала, величина напряжения которой зависит от косинуса сдвига фаз напряжений на входах перемножителя.

В. Стробоскопический метод

Этот метод с успехом применяется, когда необходимо улучшить отношение сигнал/шум в последовательности импульсов с большой

скважностью. В некотором роде он аналогичен методу синхронного детектирования (см. рис. 8.7).

Суть метода состоит в том, что импульсы длительностью τ , следующие с периодом $T \gg \tau$, направляются на электронный ключ. Электронный ключ пропускает сигнал синхронно с поступающими импульсами на время τ и не пропускает во все другое время периода.

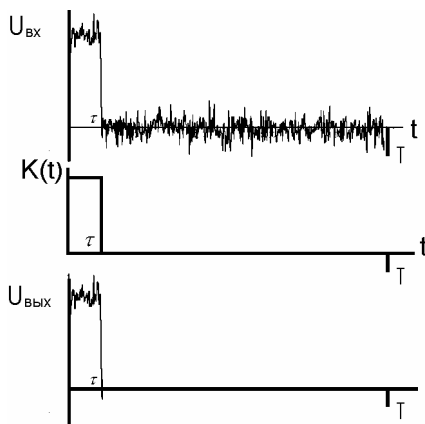


Рис. 8.9. Выделение импульсного сигнала из шума

Если одновременно с напряжением сигнала на входе ключа действует напряжение шума, то на накопительную схему, стоящую после ключа, шум воздействует только во время прохождения сигнального импульса. В результате уровень шума уменьшается в $(T/\tau)^{1,2}$ раз, а сигнал проходит без изменения. Тем самым отношение сигнал/шум улучшается во столько же раз.

9. Порядок выполнения работы

Работа с программой Lab-12D

Запустить файл **Lab-12D.exe**.

Управление работой осуществляется через меню в открывшемся окне.

Опции подменю «Файл»:

Упражнения

Открыть файл

Открыть файл Bordo

Открыть дополнительно

Привести к одному началу

Усреднение

Сохранить данные

Очистить экран

В опции «Упражнения» в подменю выводятся основные упражнения работы.

В опции «Открыть файл» открывается файл, сохраненный в текстовом формате, для просмотра нужного графика.

Опция «Открыть дополнительно» используется для просмотра нескольких графиков на одном экране. При этом масштабирование новых графиков производится по первому графику, выведенному на экран опцией «Открыть файл»

Опция «Усреднение» служит для усреднения различных реализаций процесса, сохраненных в файлах.

Опция «Привести к одному началу» используется, когда надо совместить начала всех выделенных реализаций одного процесса и сохраненных в отдельных файлах, чтобы вывести их на один экран.

Опция «Сохранить данные» сохраняет в текстовом формате данные, полученные в том или ином упражнении.

Опция «Очистить экран» очищает экран и устанавливает начальные параметры программы.

В подменю, выведенное через окошко «Упражнения», выполняются все упражнения работы.

В опции «Равномерный процесс» создается массив с равномерным распределением плотности вероятности, в опции «Нормальный процесс» – массив с гауссовым распределением, а в опции «Релеевский процесс» – массив с распределением Релея.

Равномерный процесс
Нормальный процесс
Релеевский процесс
Центральная теорема
Интегратор ▶
Контур
Амплитудный детектор
Синхронный детектор
ПЗС-матрица
Фотоумножитель ▶
Стробоскопия

В опции «Центральна теорема» проверяется выполнение Центральной предельной теоремы от количества усреднений различных реализаций процесса с равномерным распределением на итоговое распределение.

Опция «Интегратор» служит для наблюдения прохождения через интегрирующую цепочку случайного сигнала с различным распределением. Постоянная времени цепочки задается в открывающемся окне количеством интервалов выборок начального случайного процесса. В данной работе интервал между выборками равен 1.

Опция «Контур» служит для наблюдения прохождения случайного сигнала с нормальным распределением и амплитудно-модулированного колебания через колебательный контур.

В опциях «Амплитудный детектор» и «Синхронный детектор» вызываются упражнения по наблюдению прохождения случайного сигнала с нормальным распределением и амплитудно-модулированного колебания через соответствующие детекторы.

В опции «ПЗС-матрица» вызывается упражнение по выделению изображения на фоне шума в матричных видеоприемниках.

В опции «Фотоумножитель» представляются амплитудное распределение импульсов и распределение интервалов времени между импульсами в ФЭУ.

В опции «Стробоскопия» исследуется влияние временного выделения импульсного сигнала на отношение сигнал/шум при больших скважностях.

Через другие опции основного меню в соответствующих упражнениях для выведенных на экран процессов вычисляются:

«Распределение» – плотность вероятности случайного процесса;

«Корреляционная функция» – корреляционная функция процесса;

«Моменты» – среднее значение и дисперсия процесса;

«Убрать постоянную» – вычитает среднее значение выведенного графика;

«Спектр» – спектр сигнала, представленного на графике.

Опция «Растяжение» позволяет растянуть по оси X выведенный на экран график. Область растяжения задается либо рамкой, либо через элементы начала и конца фрагмента.

Рамка создается мышкой при нажатии левой кнопки в начале области выделения и ее отпуске в конце области после перемещения мыши в нужное место.

Граница области растяжения также может быть отмечена через элементы начала и конца фрагмента, который необходимо увеличить. В этом случае эти элементы надо найти на графике заранее до включения опции «Растяжение», подводя вертикальную линию курсора, помещенного на график при нажатой левой кнопки мыши, в начало и конец области растяжения.

Опция «Восстановить» восстанавливает график после его растяжения.

Замечание. Ввод параметров, которые задаются при выполнении различных опций, производится в окнах на панели с правой стороны экрана. После введения соответствующего числа в то или иное окно необходимо обязательно передать его в компьютер нажатием клавиши 'Enter'.

10. Упражнения

Упражнение 1. Вывести на экран случайный сигнал с равномерным или гауссовым распределением. В каждом случае просмотреть вид распределения, среднее значение и среднее квадратичное отклонение.

Внутри одного гауссова распределения опцией выделить несколько фрагментов одинаковой длины (по числу выборок). Опция «Растяжение» и «По элементам». Сохранить каждый из этих фрагментов в отдельном файле и привести их к одному началу (опция «Привести к одному началу») и сохранить отдельно каждый. Затем, последовательно выводя их на экран (опция «Открыть файл» и опция «Открыть дополнительно»), убедиться в их неповторимости. Провести усреднение по реализации

ям сохраненных фрагментов (Опция «Усреднение»). Для усредненного сигнала определить среднюю величину и среднеквадратичное отклонение мгновенных значений процесса и изучить влияние числа реализаций на эти величины при усреднении. Определить закон изменения.

Упражнение 2. Убедиться в справедливости центральной предельной теоремы. Для этого в опции «Центральна теорема» проследить изменение равномерного распределения случайного процесса в гауссово при усреднении по различному количеству реализаций.

Упражнение 3. Исследовать прохождение сигнала через интегрирующую цепь. Используя соответствующие опции, необходимо изучить влияние постоянной времени на распределение мгновенных значений сигнала при равномерном и гауссовом распределениях. Для равномерного распределения убедиться в выполнении центральной предельной теоремы.

Изучить зависимость протяженности интервала корреляции и ширины спектра сигнала на выходе цепи от величины постоянной времени.

Примечание: Если постоянная времени установлена < 10 , то на экран выводится входной сигнал.

Упражнение 4. Исследовать прохождение сигнала и гауссова шума через колебательный контур с различной добротностью при разных отношениях сигнал/шум на входе. При этом для немодулированного сигнала (глубина модуляции = 0) при различных добротностях измерить величину амплитуды сигнала на контуре в отсутствие шума (отношение сигнал/шум > 100 на входе) и среднего квадрата напряжения шума (отношение сигнал/шум ≤ 0.01 на входе) в отсутствие сигнала. Для каждого значения добротности вычислить сигнал/шум. Построить график отношения сигнал/шум в зависимости от добротности контура.

Примечание: Эффективная добротность – число периодов колебания переходной характеристики контура, на котором величина переходной характеристики контура уменьшается в e раз.

Если эффективная добротность установлена < 1 , то на экран выводится входной сигнал.

Упражнение 5. Исследовать корреляционную функцию (характер и измерить ее протяженность), спектр шума (измерить ширину спектра) и измерить средний квадрат напряжения шума на контуре при различных

добротностях. Построить график зависимости среднего квадрата напряжения шума от добротности.

Упражнение 6. Исследовать прохождение сигнала и гауссова шума через амплитудный детектор с различной постоянной времени интегрирующей цепи на выходе при разных отношениях сигнал/шум (отношение сигнал/шум изменять в пределах от 100 до 0.1). Обратить влияние на подавление модулирующего сигнала при малых отношениях сигнал/шум.

Примечание: Если постоянная времени установлена < 10 , то на экран выводится входной сигнал, прошедший через детектор без емкости.

Упражнение 7. Исследовать работу синхронного детектора. Для этого при отношении сигнал/шум, равным 100, пронаблюдать форму сигнала на выходе при постоянной времени цепи на выходе, равной нулю. Для разных значений фазы опорного напряжения измерить среднее значение напряжения на выходе и убедиться в том, что оно изменяется, как $\cos(\varphi)$. В этом же режиме исследовать выделение огибающей и подавление несущей при разной постоянной времени.

Примечание: Если постоянная времени установлена < 10 , то на экран выводится входной сигнал, прошедший через детектор без емкости.

Упражнение 8. Изучить выделение сигнала из шума при синхронном детектировании.

Примечание: Если постоянная времени установлена < 10 , то на экран выводится входной сигнал, прошедший через детектор без емкости.

Обратить влияние на отсутствие подавления модулирующего сигнала при малых отношениях сигнал/шум.

Упражнение 9. Изучить качественно зависимость выделения сигнала из шума в видеоизображении при увеличении количества принятых кадров. Для этого открыть опцию «ПЗС-матрица». На экране отразится изображение спектра без шума. Затем установить отношение сигнал/шум, равное 1, и число кадров усреднения, равное 1. Последовательно увеличивая число кадров усреднения, пронаблюдать выделение спектра на фоне шума. Отметить число кадров, при котором будет наблюдаться удовлетворительное отношение сигнал/шум.

Упражнение 10. Ознакомиться с примерами дифференциальной амплитудной характеристики ФЭУ – амплитудным распределением импульсов и распределением интервалов времени между импульсами на аноде ФЭУ. Отметить наличие одноэлектронного импульса на амплитудной характеристике.

Упражнение 11. Построить зависимость отношения сигнал/шум при стробоскопической регистрации импульсного сигнала с большой скважностью от величины скважности.

Литература

1. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976.
2. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. – М.: Мир, 1986.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Советское радио, 1966.
4. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М.: Гос. Тех. изд., 1957.
5. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. – М.: Едиториал УРСС, 2005.
6. Манаев Е.И. Основы радиотехники. – М.: Радио и связь, 1990.
7. Воронов Е.В. Случайные сигналы и шумы. – М.: МФТИ, 2012.
8. Бонч-Бруевич А.М. Радиоэлектроника в экспериментальной физике. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1966.
9. Техника оптической связи. Фотоприемники.
– под ред. У. Тсанга. М.: Мир, 1988.
10. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов.
– под ред. Р. ДЖ. Киса. –М.: Радио и связь, 1985.
11. Стенин В.Я. Применение микросхем с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1989.