

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное агентство по образованию
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Кафедра радиотехники

Детектирование радиосигналов при наличии шума

Лабораторная работа
по курсам
Радиотехнические цепи и сигналы,
Аналоговая электроника,
Нелинейные преобразования и прием радиосигналов

Составитель *Ю.П. Озерский*

Москва 2008

Детектирование радиосигналов при наличии шума:
Лабораторная работа по курсам: *Радиотехнические цепи и сигналы, Аналоговая электроника, Нелинейные преобразования и прием радиосигналов* / Сост. Ю.П. Озерский – М.: МФТИ, 2008. – 40 с.

Данная работа позволяет ознакомиться с видами непрерывных случайных помех, возникающих в радиоустройствах или воздействующих на них извне, а также с результатами преобразования таких помех линейными цепями. Наблюдаются осциллограммы входных и выходных помех, их частотные спектры, корреляционные функции. Измеряются параметры помех и их характеристики. Рассматриваются способы моделирования помех на компьютере. Эта часть работы предназначена для студентов 2-го курса ФРТК, слушающих лекционный курс *Радиотехнические цепи и сигналы*, и студентов младших курсов других факультетов, изучающих радиоэлектронику.

Изучаются также результаты амплитудного детектирования суммы полезного гармонического радиосигнала и широкополосного шума при использовании диодного и синхронного детекторов. Эта часть работы предназначена для студентов 3-го курса ФРТК, слушающих курсы *Аналоговая электроника* и *Нелинейные преобразования и прием радиосигналов*, а также студентов младших курсов других факультетов, знакомящихся со свойствами нелинейных операций и цепей.

УДК 621.37

© Московский физико-технический институт
(государственный университет), 2008

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
Цель работы	4
Основные понятия и термины	4
Моделирование непрерывных шумов на компьютере	8
ЗАДАНИЕ	13
1. Исследование моделей шумов	13
1.1. Модель гауссова шума	13
1.2. Модель релеевского шума	18
1.3. Модель шума генератора сигнала <i>AGTNT</i>	23
1.4. Модель равномерного шума <i>RND</i>	24
1.5. Модель квазигауссова шума	24
2. Прохождение белого гауссова шума через интегрирующую <i>RC</i> -цепь	25
3. Прохождение белого гауссова шума через колебательный <i>LC</i> -контур.....	27
4. Линейное амплитудное детектирование суммы гармонического радиосигнала и белого гауссова шума	31
4.1. Свойства идеального линейного амплитудного детектирования.....	32
4.2. Детектирование с использованием последовательного диодного детектора...	34
4.3. Детектирование с использованием синхронного амплитудного детектора	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	39

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы

Данная работа позволяет изучить:

- свойства белого гауссова шума, а также свойства цветных гауссовых и негауссовых шумов,
- результаты воздействия белого гауссова шума на интегрирующую RC -цепь,
- результаты воздействия белого гауссова шума на колебательный LC -контур,
- свойства операции и устройств линейного амплитудного детектирования суммы полезного гармонического радиосигнала и мешающего белого гауссова шума.

Работа выполняется на персональном компьютере с использованием программы схемотехнического моделирования *Micro-Cap* (сокращенно *MC*).

Основные понятия и термины

В радиотехнике к мешающим шумам обычно относят широкий класс непрерывных, случайных сигналов $n(t)$, поступающих на любое устройство извне или образующихся в нем независимо от полезного сигнала $s(t)$. К таким шумам, например, относят:

- тепловой шум в виде напряжения на любом резистивном двухполюснике (резисторе, диоде), вызываемого хаотическим тепловым движением электронов в проводящих средах,
- шум, проявляющийся в случайных флуктуациях выходного тока ряда радиотехнических усилительных элементов (электронных вакуумных ламп или транзисторов),

- случайные напряжения, наводимые в антеннах электромагнитными волнами из космоса, грозами, другими электрическими разрядами в атмосфере земли,

- переотражения полезного радиосигнала от зданий, гор, водной поверхности и других предметов.

В настоящей работе рассматриваются только шумы, свойства которых неизменны во времени, то есть шумы, являющиеся стационарными, эргодическими, случайными временными процессами.

Простейшими характеристиками подобных процессов являются:

- одномерная плотность распределения $p(n)$,
- функция распределения $F(n) = \int_{-\infty}^n p(\lambda) d\lambda$,
- двусторонняя спектральная плотность мощности $W(f)$ с размерностью (единица мощности)/Герц (или плотность $W(\omega)$ с размерностью (единица мощности) · с/радиан),
- односторонняя спектральная плотность мощности $2W(f)$ с размерностью (единица мощности)/Герц,
- корреляционная функция $R(\tau)$ с размерностью мощности (АВ, А²/Ом, В²/Ом, Ватт), являющаяся обратным преобразованием Фурье функции $W(\omega)$ (напомним, что функция $W(\omega)$ является прямым преобразованием Фурье функции $R(\tau)$).

Шум, у которого:

- $W(f) = 0.5N_0 = \text{const}$ в полосе частот $(-\infty, +\infty)$,
- $R(\tau) = 0.5N_0\delta(\tau)$,

и при этом имеем $R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} W(f) df = \sigma^2$,

- $p(n) = [1/(\sqrt{2\pi}\sigma)] \exp(-0.5n^2/\sigma^2)$ – гауссова (нормальная) функция, среднее значение (первый момент) равно нулю, второй момент и дисперсия равны σ^2 , среднеквадратичное значение равно σ ,

$$- F(n) = [1/(\sqrt{2\pi}\sigma)] \int_{-\infty}^n \exp(-0.5\lambda^2/\sigma^2) d\lambda,$$

где функция $\Phi(z) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^z \exp(-0.5\lambda^2) d\lambda$ известна как

интеграл вероятности, табулированные значения которого приводятся в математических справочниках, называют *белым гауссовым (нормальным) шумом* (БГШ).

Шумы с неравномерными по частоте плотностями $W(f)$ называют *цветными*.

У цветного шума с конечной мощностью σ^2 величину $\Delta f_{en} = \sigma^2 / W_{\max}(f)$, где $W_{\max}(f)$ – максимальное значение функции $W(f)$, называют эффективной полосой частотного спектра.

Корреляционная функция $R(\tau)$ цветного шума является непрерывной кривой, абсолютные значения которой убывают от максимального значения $R(0)$ до нуля. При этом величину $\tau_c = [\int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) d\tau] / R(0)$ называют интервалом корреляции, а функцию $r(\tau) = R(\tau) / R(0)$ называют коэффициентом корреляции шума.

Шумы с плотностью распределения, отличающейся от гауссовой кривой, называют *негауссовыми*.

Некоторые из них имеют уточняющие названия.

Так, шум, у которого:

- $p(n) = (n/\sigma) \exp(-0.5n^2/\sigma^2)$ при $n > 0$ и
- $p(n) = 0$ при $n < 0$ (функция Релея), среднее значение равно $\sigma\sqrt{0.5\pi} \approx 1.25\sigma$, второй момент равен $2\sigma^2$, дисперсия равна $(2 - 0.5\pi)\sigma^2$, называют *релеевским шумом*.

Шум, у которого в диапазоне $n = (0, 1)$ $p(n) = 1$, среднее значение равно 0.5, второй момент равен 1/3, дисперсия равна 1/12, называют *равномерным шумом* (RND).

Известны и многие другие шумы с самыми разнообразными функциями $p(n)$ и $W(f)$.

Белый гауссов шум является чисто математической и идеализированной моделью случайного процесса. Он не встречается в окружающем нас материальном мире, не может быть сформирован реальными генераторами сигналов или смоделирован на компьютере. Это объясняется следующим.

Во-первых, у белого гауссова шума с конечной мощностью σ^2 величина спектральной плотности мощности N_0 оказывается равной нулю (см. выражение (2)). Если же этот шум имеет конечное значение спектральной плотности N_0 , то из-за бесконечной полосы его частотного спектра мощность σ^2 равна бесконечности. Все реальные шумы имеют ограниченную мощность, спектральную плотность мощности и полосу частотного спектра.

Во-вторых, мгновенные значения белого гауссова шума теоретически принимают бесконечные значения $(\infty, -\infty)$, то есть мгновенная мощность шума в эти моменты также бесконечна. Мгновенные значения реальных шумов всегда ограничены некоторым амплитудным коридором с конечными верхней и нижней границами этого коридора.

В-третьих, у белого гауссова шума отсутствует корреляция (связь) между мгновенными значениями, разделенными сколь угодно малыми промежутками времени (см. выражение (1)), то есть скорость изменения мгновенных значений этого шума может быть равной бесконечности. Все реальные шумы имеют конечную скорость изменения мгновенных значений и затухающую во времени к нулю корреляционную функцию, то есть являются непрерывными аналоговыми процессами.

Кроме того, любые случайные процессы наблюдаются только на конечных отрезках времени и представляют собою отдельные конкретные реализации соответствующих случайных функций.

Вместе с тем если предположить, что белый гауссов шум с ненулевой величиной N_0 и бесконечной мощностью σ^2 поступает на вход реального линейного четырехполюсника, АЧХ которого обладает конечной эффективной спектральной полосой пропускания Δf_n , то мощность выходного сигнала четырехполюсника $p_n = N_0 \Delta f_n$ оказывается ограниченной. Очевидно, что тот же результат получается при воздействии на данный четырехполюсник любого цветного шума, имеющего такую же постоянную плотность мощности, что и белый гауссов шум, лишь в районе полосы пропускания четырехполюсника. Поэтому при исследовании реальных устройств белый гауссов шум широко используют в качестве удобной расчетной модели широкополосных случайных процессов. Кроме того, согласно центральной предельной теореме сумма большого числа независимых помех имеет функцию $p(n)$, близкую к нормальной, поэтому многие комплексные помехи имеют именно гауссову плотность распределения.

Таким образом, все реальные шумы являются цветными шумами и в качестве реальной модели белого гауссова шума приходится использовать цветные гауссовы шумы, у которых спектральная плотность мощности равномерна в как можно более широкой полосе частот. Лабораторными источниками таких шумов являются, например, широкополосные усилители с большим коэффициентом усиления, на входе которых помещен резистор, диод, газоразрядный прибор или другой “шумящий” элемент. Кроме того, любые шумы с заданными параметрами можно смоделировать на компьютере.

Моделирование непрерывных шумов на компьютере

С учетом вышесказанного отметим сначала некоторые особенности, связанные с моделированием непрерывных шумов на компьютере.

При моделировании реального широкополосного цветного гауссова шума необходимо задать и обеспечить:

- определенную длительность временного отрезка ΔT существования образца шума,
- желаемый частотный диапазон относительного постоянства односторонней спектральной плотности мощности $2W(f)$ или допустимый интервал корреляции шума,
- желаемый амплитудный коридор (А, В), в котором располагаются мгновенные значения формируемого шума,
- гауссову одномерную плотность распределения $p(n)$ шума внутри установленного амплитудного коридора.

Известно, что любой аналоговый сигнал (в том числе и шум $n(t)$), выводимый из цифрового компьютера, образуется путем преобразования первоначально формируемой дискретной (решетчатой) функции $n(k\Delta t)$ в аналоговую функцию $n(t)$. Для этого с шагом временного квантования (временной дискретизации) Δt генерируется последовательность случайных чисел $n(k\Delta t)$, где $k = 0, 1, 2, \dots, \Delta T / \Delta t$, определяющая последовательность мгновенных значений формируемого шума в этих временных точках, а временные промежутки между соседними значениями решетчатой функции заполняют отрезками некоторых непрерывных функций.

При этом программно вводимая величина Δt определяет значение верхней граничной частоты спектра шума.

К сожалению, в программе *МС* имеется только операция *RND* формирования случайных чисел, равномерно распределенных в интервале (0, 1). Однако теория говорит, что такой равномерно вероятный закон можно преобразовать в любой другой закон с помощью следующей формулы преобразования (см., например [1], стр. 83–85):

$$y = F_y^{(-1)}(RND), \quad (3)$$

где $F_y(y)$ – функция распределения случайной величины y , имеющей желаемую плотность распределения $p_y(y)$.

Для случая гауссова шума из (3) получается следующая формула преобразования [1]:

$$n(k\Delta t) = \sigma \sqrt{-2 \ln(RND_{1k})} [\sin(2\pi RND_{2k})], \quad (4)$$

где RND_{1k} и RND_{2k} – независимые числа с равновероятным распределением в интервале (0, 1).

Формирование гауссова шума с использованием операции (4) осуществляется в данной работе одним из исследуемых генераторов, который назван в описании генератором гауссова шума. При этом моделируемый шум располагается внутри амплитудного коридора $(-m\sigma, +m\sigma)$, где величина $m\sigma$ равна максимальному числу, с которым оперирует используемый компьютер.

В других случаях величина $m\sigma$ может быть задана программно. Например, часто ограничиваются коридором $(-3\sigma, +3\sigma)$, когда считают вероятность выхода шума за пределы данного коридора, равную для белого гауссова шума 0.0027, пренебрежимо малой величиной. Такой усеченный по мгновенным значениям в указанном амплитудном коридоре шум в описании назван *квазигауссовым шумом*, а создающий его генератор назван генератором квазигауссова шума.

Для случая моделирования релеевского шума из выражения (3) получается расчетная формула:

$$n(k\Delta t) = \sigma \sqrt{-2 \ln(RND_{1k})}. \quad (5)$$

Генератор, реализующий операцию (5), далее называется генератором релеевского шума.

При преобразовании любой решетчатой функции $n(k\Delta t)$ в непрерывную функцию $n(t)$ на каждом промежутке времени $(k\Delta t, (k+1)\Delta t)$ в известных компьютерных программах выполняют одну из следующих операций:

– значение $n(k\Delta t)$ поддерживают постоянным (ступенчатая аппроксимация функции $n(t)$), такая операция применяется, например, в генераторах сигналов *AGENT B-230*, встроенных в компьютеры лаборатории кафедры,

– значения $n(k\Delta t)$ и $n((k+1)\Delta t)$ соединяют отрезком прямой линии (линейная аппроксимация функции $n(t)$),

– значения $n(k\Delta t)$ и $n((k+1)\Delta t)$ соединяют отрезком какой-либо не прямой линии (нелинейная аппроксимация функции $n(t)$).

Исследования показывают, что в двух последних случаях (в частности используемых в программе *МС*) спектр формируемого шума равномерен в более широком диапазоне частот. Это объясняется тем, что при ступенчатой аппроксимации значения функции $n(t)$ на каждом отрезке Δt полностью коррелированы, а при линейной и нелинейной аппроксимации корреляция ослаблена и корреляционная функция шума оказывается более узкой, чем в первом случае.

При исследованиях в данной работе использованы также следующие операции программы *МС*, производимые над детерминированными и случайными сигналами.

Avg(n) – вычисление и графический вывод на экран кривой текущего среднего значения исследуемого сигнала.

Rms(n) – вычисление и графический вывод на экран кривой текущего значения величины корня квадратного из среднего квадрата (среднеквадратичного значения) сигнала.

Abs(n) – вычисление и графический вывод на экран кривой текущего абсолютного значения сигнала.

FFT(n) – быстрое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) временного отрезка исследуемого сигнала ΔT и графический вывод его дискретного амплитудного спектра.

Напомним, что строгое выражение для ДПФ имеет следующий вид:

$$G(j2\pi mf_1) = [1/(N\Delta t_{\text{кв}})] \sum_{k=0}^{N-1} n(k\Delta t_{\text{кв}}) \exp(-j2\pi km/N), \quad (6)$$

где $\Delta t_{\text{кв}} = \Delta T / N$ – шаг временного квантования исследуемого отрезка непрерывного сигнала, $N = 2^q$ – выбранное число точек отсчета. При этом решетчатая функция (6) явля-

ется дискретным комплексным спектром периодического сигнала $n(t \pm l\Delta T)$, который на каждом своем периоде ΔT совпадает исследуемым отрезком шума $n(t)$. Данная функция имеет размерность Вольты, а частота первой гармоники названного спектра равна $f_1 = 1/\Delta T$. Вместе с тем в ряде литературных источников и моделирующих программ множитель $[1/(N\Delta t_{\text{кв}})]$ в формуле (6) опускают.

Программа *MC* выводит на экран дисплея правую половину (для частот $f > 0$) двухстороннего амплитудного спектра исследуемого сигнала, дискретные значения которого пропорциональны модулям слагаемых ДПФ (6).

Поскольку такой спектр дает хорошее наглядное представление о частотных свойствах исследуемого шума, то использование более сложной и медленной операции $AS(n)$, также имеющейся в арсенале программы *MC*, в результате проведения которой на экран выводятся квадраты модулей слагаемых функции (6), имеющие больший амплитудный разброс, признано менее рациональным.

Вместе с тем из-за неполной определенности в знании точного значения коэффициента пропорциональности между величинами вычисляемых и выводимых на экран слагаемых выражения (6) параметры названных спектров для проведения численных расчетов в работе не используются.

$AC(n)$ – вычисление и вывод на экран дискретной корреляционной функции $R(\tau)$ исследуемого временного отрезка сигнала. При этом величина $R(0)$ пропорциональна энергии E исследуемого отрезка сигнала. В случае белого гауссова шума с мощностью σ^2 имеем $E = \sigma^2 \Delta T$.

Histograms (в режиме *Monte Carlo*) – расчет и вывод на экран гистограммы одномерной плотности распределения мгновенных значений исследуемого случайного сигнала.

ЗАДАНИЕ

1. Исследование моделей шумов

1.1. Модель гауссова шума

1.1.1. Для исследования осциллограмм гауссова шума, формируемого в соответствии с выражением (4), его амплитудного частотного спектра и корреляционной функции при работе с любой версией программы *MC* вызвать файл *Lab06_1.cir*.

Убедиться, что параметры исследуемой схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 1 настоящего описания.

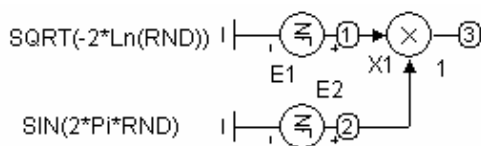


Рис. 1. Схема генератора гауссова шума

Здесь величина параметра σ шума задается значением коэффициента передачи перемножителя напряжений $X1$.

В режиме *Transient*, проверив, что установлены параметры: *Time Range* = 0.5m, *Maximum Time Step* = 0.0001m, для временной развертки шума *X Range* = 0.5 m, *Y Range* = (5, -5), для спектра *X Range* = 8meg, *Y Range* = 800 (или 1000), (число точек отсчета *DSP N* = 16394), для корреляционной функции *X Range* = 2u, *Y Range* = 600u, вывести на экран ЭВМ осциллограмму шумового напряжения, его амплитудный спектр и корреляционную функцию.

Наблюдая осциллограмму шума, убедиться, что его выбросы с амплитудами, большими 3σ , встречаются сравнительно редко. Используя электронную лупу, изучить тонкую структуру шума.

Измерить вычисляемую компьютером величину σ .

Наблюдая амплитудный спектр, оценить диапазон частот, в котором спектр шума практически равномерен и в котором шум может считаться белым.

Наблюдая корреляционную функцию, измерить величину $R(0)$. Убедиться, что порядок величин $R(0)$ и энергии E исследуемого отрезка шума совпадают. Оценить величину интервала корреляции шума (считая этот интервал равным временному отрезку, на котором значение корреляционной функции уменьшается в три раза) и сопоставить его с выбранным шагом временного квантования Δt .

1.1.2. Для изучения гистограммы плотности распределения $p(n)$ гауссова шума произвести следующие операции.

При работе с версиями *MC*, в которых отсутствует операция *High_Y* построения гистограммы плотности распределения амплитуд временных выборок исследуемого сигнала (например, *MCDemo v. 7* и *v. 8*), вызвать на экран ЭВМ файл *Lab06_2.cir*.

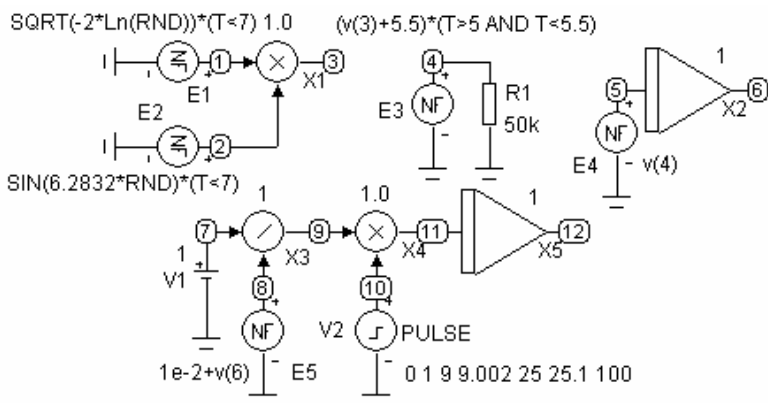


Рис. 2. Схема формирования гистограммы БГШ с использованием операции *Rise_Time*

Убедиться, что параметры исследуемой схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 2 настоящего описания. Ознакомиться с этой схемой.

В названных версиях программы *MC* в режиме *Histograms* доступна лишь операция *Rise_Time*($v(N_0)$, 1, 1, L , H) построения гистограммы плотности распределения длительности переднего фронта случайного импульсного сигнала, снимаемого в точке схемы $v(N_0)$. Названная длительность измеряется между моментами пересечения этим сигналом нижнего (L) и верхнего (H) амплитудных порогов.

Схема, представленная на рис. 2, сначала образует последовательность выборок суммы мгновенных значений шума и постоянного напряжения, равного 5.5, то есть АИМ сигнал, а затем преобразует этот АИМ сигнал в последовательность импульсов с линейными передними фронтами, длительности которых между амплитудными порогами $L = 0.001$ и $H = 1$ равны амплитудам названного АИМ сигнала.

Выбрать режим *Transient*, убедиться, что установлены следующие параметры этого режима: *Time Range* = 20, *Maximum Time Step* = 1, временных разверток – шума (узел (3)) *X Range* = 20, *Y Range* = (5, -5), амплитудных выборок (узел $v(4)$) *X Range* = 20, *Y Range* = 11, выходного напряжения 1-го интегратора (узел (6)) *X Range* = 20, *Y Range* = 11, выходного напряжения делителя (узел (9)) *X Range* = 20, *Y Range* = 0.5, выходного напряжения 2-го интегратора (узел (12)) *X Range* = 20, *Y Range* = 1. Нажать кнопку *Run*.

По окончании набора статистики изучить вид выведенных осциллограмм, иллюстрирующих работу изучаемой схемы и позволяющих понять принципы ее построения и выбора параметров.

Далее включить режим *Monte Carlo*, проверить, что в окне *Options* установлены: закон изменения параметра *Uniform*, число испытаний (500 или 1000), *Status ON*. Нажать кнопку *OK*. При этом заметим, что в режиме *Monte Carlo* предусмотрено также задание характера и диапазона вариации параметра какого-либо элемента исследуемой схемы.

В данном и последующих пунктах задания формально введено независимое изменение сопротивления нагрузки генератора шума в диапазоне 1% ($R1\ DEV = 1\%$, см. стр. *Text*), что практически не влияет на измеряемые характеристики исследуемых шумов.

Перейти в окно *Histograms*. Если открывается строка *Rise_Time* ($v(12)$, 1,1, 0.001, 1), то, щелкнув по ней мышью, вывести гистограмму на экран ЭВМ. Если названной строки нет, то создать ее следующей последовательностью операций. Щелкнуть мышью по кнопке *Add Histogram*, откроется окно *Properties*. В нем нажать кнопку *Get* под строкой *What To Plot*. Откроется окно *Get Performance Function*. В этом окне установить параметры: *Expression* $v(12)$, *Boolean* = 1, *N* = 1, *Low* = 0.001, *High* = 1, закрыть окна нажатием их кнопок *OK*.

Далее из строки *Histograms* перейти на строку *Rise_Time* ($v(12)$, 1,1, 0.001, 1) и, щелкнув по ней мышью, вывести гистограмму, содержащую 11 колонок, на экран дисплея. При этом ширина каждой колонки равна $\sigma = 1$ (с учетом установки при формировании выборок шума постоянно-го смещения величиной 5.5).

Изучить вид полученной гистограммы и сравнить высоту ее колонок с теоретически рассчитанными значениями для идеальной гауссовой кривой, приведенными в Таблице 1.

Т а б л и ц а 1

№ колонки	1, 11	2, 10	3, 9	4, 8	5, 7	6
высота %	5e-4	5e-3	0.6	6.06	24.3	38.3

Записать значения следующих параметров гистограммы: *Low* (минимальное значение выборки), *Mean* (среднее значение), *High* (максимальное значение), *Sigma* (средне-

квадратичное значение выборок). Оценить близость значений *Mean* к числу 5.5, а *Sigma* к единице.

При сравнении помнить о наличии случайного разброса данных, характерного для измерений параметров случайных процессов. Чтобы убедиться в этом, вывести еще одну или две гистограммы и сравнить высоты их колонок.

При работе с версиями *MC*, в которых имеется прямая операция *High_Y* построения гистограммы плотности распределения амплитуд временных выборок исследуемого сигнала (например, *MCDemo* v. 6, *MCProfessional* v. 8), вызвать файл *Lab06_3.cir*.

Убедиться, что параметры схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 3 данного описания.

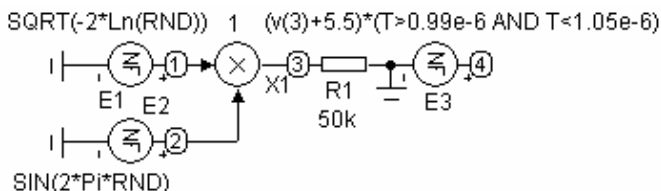


Рис. 3. Схема формирования гистограммы БГШ с использованием операции *High_Y*

Выбрать режим *Transient*, проверить, что установлены параметры: *Time Range* = 3u, *Maximum Time Step* = 0.1u, временной развертки шума *X Range* = 3u, *Y Range* = (5, -5), временной развертки выборок *X Range* = 3u, *Y Range* = 11. Нажать кнопку *Run*. По окончании набора статистики изучить вид выведенных временных осциллограмм напряжений в схеме.

Включить режим *Monte Carlo*, открыть окно *Options* и проверить, что установлены: закон изменения параметра *Uniform*, число испытаний 500, *Status ON*. Нажать кнопку *OK*. При этом заметим, что в режиме *Monte Carlo* предусмотрено также задание характера и диапазона вариации параметра

какого-либо элемента исследуемой схемы. В данном и последующих пунктах формально установлено независимое изменение сопротивления нагрузки генератора шума в диапазоне 1% ($R1\ DEV=1\%$, см. стр. *Text*), что практически не влияет на наблюдаемые и измеряемые характеристики исследуемых шумов.

Перейти в окно *Histograms*. Если открывается строка *High_Y(v(4),1)*, то, щелкнув по ней мышью, вывести эту гистограмму на экран ЭВМ. Если названной строки нет, то создать ее последовательностью команд: *Histograms* \rightarrow *Add Histogram* (с параметрами *Expression v(4)*, *Function High_Y*, *Intervals 11*, что соответствует ширине каждой колонки $\sigma=1$ при установленном на схеме с учетом постоянного смещения 5.5 амплитудного коридора $(0, 11\sigma) = (0, 11)$)).

Записать значения следующих параметров гистограммы: *Low* (минимальное значение выборки), *Mean* (среднее значение), *High* (максимальное значение), *Sigma* (средне-квадратичное значение выборок). Оценить близость значений *Mean* к числу 5.5, а *Sigma* к единице.

Изучить вид полученной гистограммы и сравнить высоту ее колонок с теоретически рассчитанными значениями для идеальной гауссовой кривой, приведенными в Таблице 1.

При сравнении помнить о наличии случайного разброса данных, характерного для всех измерений параметров случайных процессов. Чтобы убедиться в этом, вывести еще одну или две гистограммы и сравнить величины их колонок.

1.2. Модель релеевского шума

1.2.1. Для исследования осциллограмм релеевского шума, его амплитудного частотного спектра и корреляционной функции при работе с любой версией программы *MC* вызвать файл *Lab06_4.cir*.

Убедиться, что параметры схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 4 описания.

$$1 * \text{SQRT}(-2 * \text{Ln}(\text{RND}))$$

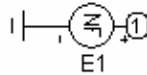


Рис. 4. Схема генератора релеевского шума

Здесь величина σ для шума задается множителем перед символом *SQRT*.

В режиме *Transient*, проверив, что установлены параметры: *Time Range* = 0.5m, *Maximum Time Step* = 0.0001m, для временной развертки шума *X Range* = 0.5 m, *Y Range* = = 5, для спектра *X Range* = 8meg, *Y Range* = 500, (число точек отсчета *DSP N* = 16394), для корреляционной функции *X Range* = 2u, *Y Range* = 200u, вывести на экран дисплея осциллограмму шумового напряжения, его амплитудный спектр и корреляционную функцию.

Наблюдая осциллограмму шума, убедиться, что его мгновенные значения только положительны. Используя электронную лупу, изучить тонкую структуру шума. Измерить среднее значение и величину мощности шума.

Сравнить осциллограммы релеевского и гауссова шумов при равных значениях σ .

Наблюдая амплитудный спектр, оценить его верхнюю частоту.

Наблюдая корреляционную функцию, измерить величину $R(0)$ и сопоставить ее с величиной энергии исследуемого отрезка шума. Оценить порядок интервала корреляции шума (считая этот интервал равным временному отрезку, на котором значение корреляционной функции уменьшается в три раза), и сопоставить его с установленным шагом временного квантования Δt .

1.2.2. Для изучения гистограммы плотности релеевского шума произвести следующие операции.

При работе с версиями *MC*, в которых отсутствует операция *High_Y* построения гистограммы плотности распределения амплитуд временных выборок исследуемого сигнала (*MCDemo v. 7* и *v. 8*) вызвать файл *Lab06_5.cir*.

Убедиться, что параметры схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы, приведенной на рис. 5 настоящего описания.

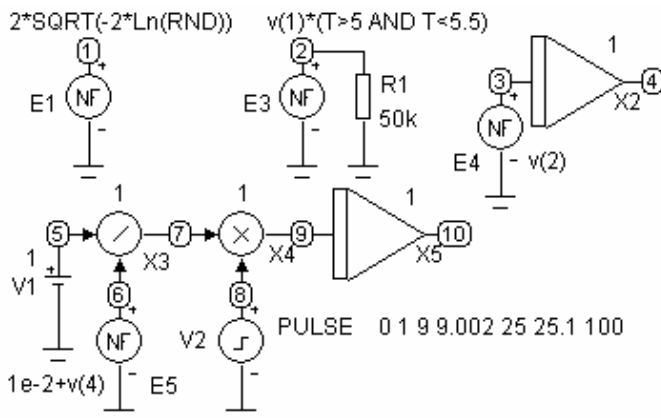


Рис. 5. Схема формирования гистограммы РШ с использованием операции *Rise_Time*

Выбрать режим *Transient*, проверить, что установлены следующие параметры этого режима: *Time Range* = 20, *Maximum Time Step* = 1, временных разверток – шума (узел (1)) *X Range* = 20, *Y Range* = 11, амплитудных выборок (узел (2)) *X Range* = 20, *Y Range* = 11, выходного напряжения 1-го интегратора (узел (4)) *X Range* = 20, *Y Range* = 11, выходного напряжения делителя (узел (7)) *X Range* = 20, *Y Range* = 0.5, выходного напряжения 2-го интегратора (узел (10)) *X Range* = 20, *Y Range* = 1. Нажать кнопку *Run*.

Далее выбрать режим *Monte Carlo*, проверить, что в окне *Options* установлены: закон изменения параметра *Uni-*

form, число испытаний (500 или 1000), *Status ON*. Нажать кнопку *OK*. При этом заметим, что в режиме *Monte Carlo* предусмотрено также задание характера и диапазона вариации параметра какого-либо элемента исследуемой схемы.

В данном и последующих пунктах задания нами формально введено независимое изменение сопротивления нагрузки генератора шума в диапазоне 1% ($R1\ DEV = 1\%$, см. стр. *Text*), что практически не влияет на измеряемые характеристики исследуемых шумов.

Перейти в окно *Histograms*. Если открывается строка *Rise_Time*($v(10)$, 1,1, 0.001, 1), то, щелкнув по ней мышью, вывести эту гистограмму на экран дисплея. Если названной строки нет, то создать ее следующей последовательностью операций. Щелкнуть мышью по кнопке *Add Histogram*, откроется окно *Properties*. В нем нажать кнопку *Get* под строкой *What To Plot*. Откроется окно *Get Performance Function*. В этом окне установить параметры: *Expression* $v(10)$, *Boolean* = 1, *N* = 1, *Low* = 0.001, *High* = 1, закрыть окна нажатием их кнопок *OK*.

Далее из строки *Histograms* перейти на строку *Rise_Time*($v(10)$, 1,1, 0.001, 1) и, щелкнув по ней мышью, вывести эту гистограмму, содержащую 11 колонок, на экран дисплея.

Изучить вид полученной гистограммы и при домашней подготовке к сдаче зачета сравнить высоту ее колонок с теоретически рассчитанными значениями для идеальной релееской кривой со значением $\sigma = 2$.

При работе с версиями *MC*, в которых имеется прямая операция *High_Y* построения гистограммы плотности распределения амплитуд временных выборок исследуемого сигнала (например, *MCDemo v. 6*, *MCProfessional v. 8*) вызвать файл *Lab06_6.cir*.

Убедиться, что параметры схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 6 данного описания.

Выбрать режим *Transient*, проверить, что установлены параметры: *Time Range* = $3u$, *Maximum Time Step* = $0.1u$, вре-

менной развертки шума $X\ Range = 3u$, $Y\ Range = 11$, временной развертки выборок $X\ Range = 3u$, $Y\ Range = 11$. Нажать кнопку *Run*. По окончании набора статистики изучить вид выведенных осциллограмм напряжений в схеме.

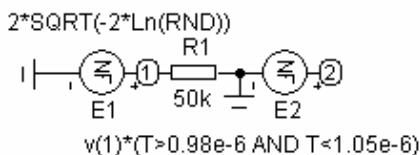


Рис. 6. Схема формирования гистограммы РШ с использованием операции *High_Y*

Выбрать режим *Monte Carlo*, открыть окно *Options* и проверить, что установлены: закон изменения параметра *Uniform*, число испытаний 500, *Status ON*. Нажать кнопку *OK*. При этом заметим, что в режиме *Monte Carlo* предусмотрено также задание характера и диапазона вариации параметра какого-либо элемента исследуемой схемы. В данном и последующих пунктах формально установлено независимое изменение сопротивления нагрузки генератора шума в диапазоне 1% ($R1\ DEV = 1\%$, см. стр. *Text*), что практически не влияет на наблюдаемые и измеряемые характеристики исследуемых шумов.

Перейти в окно *Histograms*. Если открывается строка *High_Y(v(2),1)*, то, щелкнув по ней мышью, вывести эту гистограмму на экран дисплея. Если названной строки нет, то создать ее последовательностью команд: *Histograms* → *Add Histogram* (с параметрами *Expression v(2)*, *Function High_Y*, *Intervals 11*, что соответствует ширине каждой колонки, равной единице для амплитудного коридора (0, 11)).

Записать значения следующих параметров гистограммы: *Low* (минимальное значение выборки), *Mean* (среднее значение), *High* (максимальное значение), *Sigma* (средне-

квадратичное значение выборок). Оценить близость значения *Mean* к числу 2.5.

Изучить вид полученной гистограммы и сравнить высоту ее колонок с теоретически рассчитанными дома значениями для идеальной релеевской кривой с $\sigma = 2$.

При сравнении помнить о наличии случайного разброса данных, характерного для всех измерений параметров случайных процессов. Чтобы убедиться в этом, вывести еще одну или две гистограммы и сравнить величины их колонок.

1.3. Модель шума генератора *AGENT*

Используя генератор сигналов *AGENT B-230*, встроенный в компьютеры рабочих мест лаборатории кафедры радиотехники, вывести на экран дисплея и изучить напряжение шума, создаваемого этим генератором. Параметры шума установить следующие: амплитуду порядка 1 В, уровень = 0, частоту временного квантования не более 100 Гц (малое значение последнего параметра предотвращает возможные искажения формы шума из-за наличия паразитных емкостей в выходных кабелях экспериментальной установки).

Для наблюдения шума использовать осциллограф *BORDO*, также встроенный в компьютеры рабочих мест студентов.

Обратить внимание на тонкую структуру данного шума и сопоставить ее с тонкой структурой БПШ, исследованного в п.1.

Далее перевести названный осциллограф в режим анализатора спектра (например, командами *Окно*, *Новое*) и в окнах *Выбор и настройка каналов* и *Тип* установить форму представления сигнала БПФ. В разделе *Свойства преобразования* задать следующие параметры: размер 2 в степени (число точек преобразования Фурье) – 1024, тип спектра – амплитудный, окно – прямоугольное, параметр окна – плавающее, усреднение – по 200 циклам.

Сравнить форму огибающей спектра данного шума с формой огибающей спектра БГШ, исследованного в п. 1.

Затем перевести осциллограф в режим гистограммирования (например, командами *Окно. Новое*) и в окна *Выбор и настройка каналов* и *Тип* установить форму представления сигнала *Амплитудное распределение*. В разделе *Свойства преобразования* задать следующие параметры: *Знач. бит* – 10, *шкала* – относительная, *Пост. обработка* – плавающая за 200 циклов, *Тип* – Усреднение.

Сравнить форму гистограммы данного шума с формой гистограммы БГШ, исследованного в п. 1.

1.4. Модель равномерного шума *RND*

Самостоятельно составить схемы и провести исследования свойств шума *RND*, формируемого источником *Noise* программы *MC*, подобные описанным в п. 1.2.

1.5. Модель квазигауссова шума

Самостоятельно составить схемы и провести исследования, подобные описанным в п. 1.1, модели квазигауссова шума, формируемого предложенным автором описания упрощенным генератором этого шума, схема которого дана на рис. 7.

$$1*(1-Abs(RND-0.5))*Tan((RND-0.5)*2.6)$$

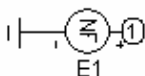


Рис. 7. Генератор квазигауссова шума

Измерить основные параметры такого шума и сравнить их с полученными в п. 1.

2. Прохождение шума через интегрирующую RC-цепь

Напомним, что при действии на входе интегрирующей цепи 1-го порядка напряжения в виде БГШ напряжение на выходе цепи является цветным гауссовым шумом со следующими характеристиками:

$2W(f) = N_0 / [1 + (2\pi fT)^2]$ ($B^2 / \text{ОмГц}$ или $B^2 / \text{Гц}$), где $T = RC$ – постоянная времени цепи;

$R(\tau) = \sigma_{out}^2 \exp(-|\tau|/T)$ ($B^2 / \text{Ом}$ или B^2), где σ_{out}^2 – мощность выходного шума цепи, равная $N_0 \Delta f_n$, $\Delta f_n = 1/(4T) = 0.5\pi f_B$ – эффективная (шумовая) полоса цепи, $f_B = 1/(2\pi T)$ – верхняя граничная частота цепи;

$\tau_c = T$ – время корреляции (за которое для данной цепи корреляционная функция уменьшается от максимального значения $R(0)$ в e раз) [2].

2.1. Для сопоставления вида амплитудных спектров входного и выходного напряжений исследуемой цепи независимо от используемой версии программы *MC* вызвать файл *Lab06_8A.cir*.

Убедиться, что параметры схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы, приведенной на рис. 8 настоящего описания.

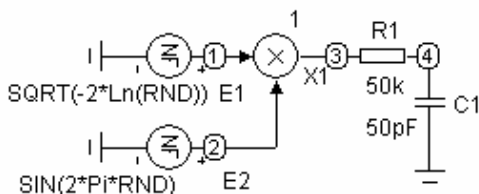


Рис. 8. Схема исследования прохождения шума через интегрирующую цепь

В режиме *Transient*, проверив, что установлены параметры: $Time\ Range = 0.5m$, $Maximum\ Time\ Step = 0.0001m$, для временной развертки шума $X\ Range = 0.5\ m$, $Y\ Range = (6, -6)$, для спектра $X\ Range = 1meg$, $Y\ Range = 800$ (или 1000), (для версии *MC6D* число точек отсчета $DSP\ N = 16394$), для корреляционной функции $X\ Range = 10u$, $Y\ Range = 30u$, число испытаний в режиме *Monte Carlo* (для усреднения кривых) три, вывести на экран дисплея моделируемое шумовое напряжение, амплитудные спектры входного и выходного напряжений цепи и корреляционную функцию выходного напряжения интегрирующей *RC*-цепи.

Сравнить формы огибающих выведенных амплитудных спектров, усредненных по трем независимым реализациям входного шума. Оценить верхнюю граничную частоту спектра выходного шума и сопоставить ее с величиной постоянной времени исследуемой цепи.

Ознакомиться с видом корреляционной функции входного шума. Измерить и оценить разброс величин $R(0)$ всех трех функций $R(\tau)$ в процентах, отражающий случайные отличия в энергии отдельных реализаций входного шума.

2.2. Для сопоставления вида входного и выходного напряжений изучаемой *RC*-цепи как случайных функций времени и изучения корреляционной функции выходного напряжения цепи независимо от используемой версии программы *MC* вызвать файл *Lab06_8B.cir*. Убедиться, что параметры схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 8 настоящего описания.

В режиме *Transient* при параметрах: $Time\ Range = 0.5m$, $Maximum\ Time\ Step = 0.0001m$, для временной развертки входного шума $X\ Range = 0.5\ m$, $Y\ Range = (6, -6)$, для выходного шума $X\ Range = 0.5\ m$, $Y\ Range = (1, -1)$, для корреляционной функции $X\ Range = 10u$, $Y\ Range = 15u$ – вывести на экран ЭВМ при выключенном режиме *Monte Carlo* и

изучить осциллограммы одной реализации входного и выходного напряжений (шумов) цепи.

Сравнить вид этих шумов и измерить их среднеквадратичные значения σ и σ_{out} . Убедиться, что выходной шум также преимущественно расположен в амплитудном коридоре $(-3\sigma_{out}, 3\sigma_{out})$, что характерно для гауссова процесса.

Вычислить величину энергии выходного сигнала цепи $E_{out} = \sigma_{out}^2 \Delta T$ и сравнить ее со значением энергии входного шума E .

Вычислить величину эффективной (шумовой) полосы RC -цепи $\Delta f_n = 1/(4RC) = 1/(4T)$ и оценить теоретические значения односторонних спектральных плотностей мощности входного шума N_0 и выходного шума $N_{on} = \sigma_n^2 / \Delta f_n$.

Оценить теоретически эффективную полосу входного шума $\Delta f_{en} = \sigma^2 / N_0 = \Delta f_n (\sigma / \sigma_{out})^2$.

Оценить величину интервала корреляции τ_{c_out} выходного шума (по критерию уменьшения в e раз на этом интервале значения функции $R(\tau)$).

Сравнить вычисленное значение этого интервала с теоретической величиной $T = RC$ и с интервалом корреляции входного шума, измеренным при выполнении п. 2.1.

3. Прохождение шума через колебательный LC -контур

Напомним, что при питании параллельного LC -контура высокой добротности током в виде БГШ напряжение на контуре оказывается узкополосным случайным квазигармоническим колебанием $v(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$, где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – угловая резонансная частота контура. При этом амплитуда (огibaющая $A(t) > 0$) и начальная фаза $\varphi(t)$ являются случайными функциями, медленно изменяющимися во времени

по сравнению с детерминированной функцией $\cos \omega_0 t$. Плотности распределения вероятностей этих функций имеют вид:

$p(A) = (A/\sigma^2) \exp(-0.5A^2/\sigma^2)$ в диапазоне $(0, \infty)$ (распределение Релея) и $p(\varphi) = (1/2\pi)$ в диапазоне $(-\pi, +\pi)$ (равномерное или равновероятное распределение), где σ – среднеквадратичное (действующее) значение напряжения $v(t)$.

Для распределения Релея имеем:

- среднее значение $Avg(A) = \sqrt{0.5\pi}\sigma \approx 1.25\sigma$,
- средний квадрат $[Rms(A)]^2 = 2\sigma^2$.

Заметим также, что мгновенные значения огибающей $A(t)$ могут быть связаны с мгновенными значениями напряжения $v(t)$ выражением

$$A(t) = Avg[Abs(v(t))]\pi/2 \quad (7)$$

при условии, что усреднение по времени проводится за каждый текущий период колебания $T = 1/f_0$. Тогда имеем $\sigma = Rms[v(t)]$. Если же усреднение ведется за время, большее интервала корреляции функции $A(t)$, то выражение (7) определяет среднее значение огибающей, равное $Avg(A)$.

Напомним, что для колебательного LC-контура справедливы следующие соотношения:

- нормированная АЧХ $K(a) = 1/\sqrt{1+a^2}$,

где $a = Q(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}) \approx 2Q\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$ – обобщенная расстройка,

- полоса пропускания $\Delta f_{0.7} = f_0/Q$,
- эффективная (шумовая) полоса
 $\Delta f_n = 0.5\pi f_0/Q = 0.5\pi \Delta f_{0.7}$,
- корреляционная функция

$$R(\tau) = R(0) \exp(-\alpha|\tau|) \cos \omega_0 t,$$

где $\alpha = \pi f_0/Q$ – коэффициент затухания и $R(0) = N_0 \Delta f_n$,

– интервал корреляции $\tau_c = 1/\alpha = Q/\pi f_0 = \tau_k$,

где τ_k – постоянная времени контура и в нашем случае за время τ_c огибающая функции корреляции уменьшается в e раз.

3.1. Для сопоставления амплитудных спектров входного тока колебательного контура и вызванного им напряжения на контуре независимо от рабочей версии программы *MC* вызвать файл *Lab06_9A.cir*.

Убедиться, что параметры схемы эксперимента в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 9 настоящего описания. Ознакомиться со схемой, показанной на рис. 9. В этой схеме входной ток контура, пропорциональный напряжению $v(3)$, равен $i_0(t) = v(3)/R_1 = v(3) * 5e-4$, где сопротивление $R_1 = 2$ кОм играет роль эквивалентного сопротивления контура (это следует из пересчета генератора шумового напряжения в эквивалентный генератор шумового тока).

Вычислить величины резонансной частоты, полосы пропускания, шумовой полосы, добротности и постоянной времени контура, используя его параметры, приведенные на рис. 9.

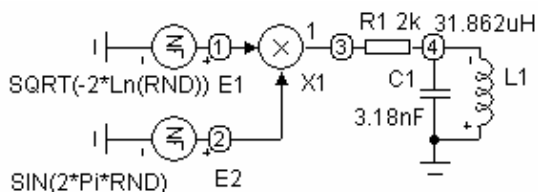


Рис. 9. Схема исследования колебательного контура

В режиме *Transient* при значениях параметров: *Time Range* = 0.5m, *Maximum Time Step* = 0.0001m, для временной развертки тока (то есть установив переменную $v(3) * 5e-4$ и

$X\ Range = 0.5m$, $Y\ Range = (3m, -3m)$, либо используя пропорциональную ей переменную $v(3)$ и $X\ Range = 0.5\ m$, $Y\ Range = (6, -6)$, для спектра тока (то есть установив переменную $FFT(v(3)*5e-4)$ и $X\ Range = 1meg$, $Y\ Range = 0.4$, либо аналогично используя переменную $FFT(v(3))$ и $X\ Range = 0.5m$, $Y\ Range = 600$ (или 1000), для спектра напряжения на контуре $FFT(v(4))$ и $X\ Range = 1meg$, $Y\ Range = 600$ (число точек отсчета $DSP\ N = 16394$), число испытаний в режиме *Monte Carlo* три – вывести на экран дисплея и сопоставить форму огибающих упомянутых спектров, усредненных по трем независимым реализациям случайного входного тока.

По выходному спектру оценить порядок величины полосы пропускания АЧХ контура.

3.2. Для исследования свойств выходного напряжения на контуре как функции времени и наблюдения корреляционной функции напряжения независимо от рабочей версии программы *MC* вызвать файл *Lab06_9B.cir*.

Убедиться, что схема эксперимента и ее параметры в этом файле идентичны приведенным на рис. 9 описания.

В режиме *Transient* при значениях параметров: $Time\ Range = 0.5m$, $Maximum\ Time\ Step = 0.0001m$, для временной развертки входного тока (то есть установив переменную $v(3)*5e-4$ и $X\ Range = 0.5m$, $Y\ Range = (3m, -3m)$, либо используя пропорциональную ей переменную $v(3)$ и $X\ Range = 0.5\ m$, $Y\ Range = (6, -6)$), для выходного напряжения на контуре $X\ Range = 0.5m$, $Y\ Range = (0.4, -0.4)$, для корреляционной функции напряжения на контуре $X\ Range = 30u$, $Y\ Range = (6u, -6u)$ – вывести на экран ЭВМ при выключенном режиме *Monte Carlo* и изучить осциллограммы одной реализации входного тока (или напряжения $v(3)$), напряжения на контуре и его корреляционной функции.

Сравнить вид осциллограмм тока (или напряжения $v(3)$) и напряжения на контуре. Убедиться, что напряжение на контуре имеет вид случайного квазигармонического коле-

бания. Измерить его действующее значение σ , совпадающее в данном случае с величиной $Rms(v(4))$.

Мысленно провести кривую огибающей напряжения на контуре. Вычислить ее постоянную составляющую $A_n = Avg(v(4)) \approx 1.25\sigma$. По осциллограмме корреляционной функции оценить интервал корреляции τ_{c_out} и сравнить его с постоянной времени контура.

Обратить внимание на тонкую структуру корреляционной функции напряжения на колебательном контуре.

4. Линейное амплитудное детектирование суммы гармонического радиосигнала и шума

Напомним, что при питании параллельного колебательного LC -контура током в виде суммы гармонического сигнала и белого гауссова шума случайная огибающая напряжения на контуре распределена по закон Релея–Райса

$$p(A, A_m) = (A/\sigma^2) \exp[-0.5(A^2 + A_m^2)/\sigma^2] I_0(AA_m/\sigma^2),$$

где A_m – амплитуда гармонического напряжения на контуре в отсутствие шума, σ – среднеквадратичное значение шумовой составляющей напряжения на контуре, I_0 – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Видно, что при наличии только шумовой составляющей входного тока закон Релея–Райса переходит в упомянутый выше закон Релея.

Идеальным линейным амплитудным детектированием называют операцию преобразования напряжения полезного амплитудно-модулированного радиосигнала на колебательном RC -контуре в напряжение видеосигнала, имеющего форму огибающей напряжения на контуре. Блок, точно выполняющий эту операцию, называют *идеальным линейным амплитудным детектором*. Данная операция детектирования (более правильно называемая демодуляцией) в принципе является нелинейной. При этом реальные амплитудные детек-

торы (диодный и синхронный), которые также исследуются в данной работе, часто имеют коэффициенты передачи, отличающиеся от единицы, и искажают преобразуемый сигнал. Поэтому первоначально целесообразно ознакомиться со свойствами идеального линейного детектирования.

4.1. Идеальное линейное амплитудное детектирование

Для исследования операции идеального линейного детектирования гармонического сигнала в отсутствие шума независимо от рабочей версии программы *МС* вызвать файл *Lab06_10.cir*.

Убедиться, что параметры исследуемой схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 10 настоящего описания.

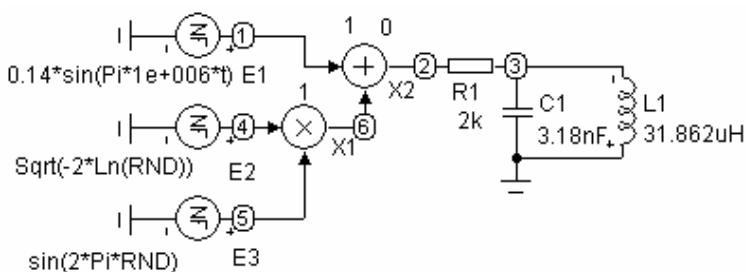


Рис. 10. Схема исследования идеального линейного детектирования

4.1.1. Для изучения случая детектирования полезного радиосигнала в отсутствие шума установить значения коэффициентов передачи сумматора $X2$ равными 1 и 0.

В режиме *Transient* при параметрах: *Time Range* = 0.5m, *Maximum Time Step* = 0.0001m, временной развертки напряжений *X Range* = 0.5m, *Y Range* = (0.5, -0.5) – вывести на экран дисплея и наблюдать осциллограммы входного напряжения $v(2)$, напряжения на контуре $v(3)$ и выходного на-

пряжения идеального детектора, вычисленного с использованием выражения (7).

Измерить и записать величины амплитуды напряжения на контуре A_m и постоянного выходного напряжения детектора $A_s = \text{Avg}(A_{ds}(v(3))) * 1.57$. Убедиться, что выполняется равенство $A_s / A_m \approx 1$.

4.1.2. Для изучения случая детектирования белого гауссова шума установить значения коэффициентов передачи сумматора $X2$, равными 0 и 1.

Вывести на экран дисплея и изучить только осциллограммы напряжения на контуре $v(3)$ и выходного напряжения идеального детектора, вычисленного с использованием выражения (7).

Измерить и записать среднюю величину выходного напряжения детектора $A_n = \text{Avg}(A_{ds}(v(3))) * 1.57$.

4.1.3. Для изучения случая детектирования суммы гармонического сигнала и белого гауссова шума при отношении сигнала к шуму порядка единицы установить значения коэффициентов передачи сумматора $X2$, равными 1 и 1.

Вывести на экран дисплея и изучить только осциллограммы напряжения на контуре $v(3)$ и выходного напряжения идеального детектора, вычисленного с использованием выражения (7).

Измерить среднюю величину выходного напряжения идеального детектора $A_{ld} = \text{Avg}(A_{ds}(v(3))) * 1.57$.

Далее вычислить:

– приращение выходного напряжения детектора при появлении полезного гармонического сигнала на фоне шума

$$\Delta A = A_{ld} - A_n,$$

– отношение $\Delta A / A_s = k_{\Pi}$.

Убедиться, что выполняется условие $k_{\Pi} < 1$.

Напомним, что коэффициент k_{Π} в теории детектирования называют коэффициентом подавления сигнала шумом в линейном амплитудном детекторе.

Понятно, что при отсутствии шума, то есть при входном отношении сигнала к шуму по действующим значениям, равном бесконечности, имеем $k_{\Pi} = 1$. С уменьшением названного отношения величина k_{Π} падает и в пределе стремится к нулю. При отношении сигнала к шуму, равном единице, теоретическое значение коэффициента подавления равно $k_{\Pi} = 0.39$.

Описанное явление называют явлением подавления полезного сигнала помехой (в виде шума или другого гармонического сигнала иной частоты см. в частности [4]). Оно проявляется как при приеме импульсных радиосигналов, так и при приеме непрерывных амплитудно-модулированных радиосигналов.

4.2. Детектирование с использованием последовательного диодного детектора

Для исследования свойств диодного амплитудного детектора при любой версии *MC* вызвать файл *Lab06_11.cir*.

Убедиться, что параметры исследуемой схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 11 настоящего описания.

Ознакомиться со схемой эксперимента, приведенной на рис. 11.

В этой схеме между колебательным *LC*-контуром и последовательным диодным детектором установлен идеальный усилитель напряжения *X3*, потому что диодные детекторы являются линейными детекторами только при больших входных сигналах. Роль такого усилителя в реальных устройствах обычно выполняет усилитель промежуточной частоты радиоприемника.

В данном случае постоянная времени интегрирующей RC -цепи детектора выбрана достаточно малой, чтобы иметь возможность наблюдения огибающей напряжения на контуре. Среднее значение выходного напряжения детектора вычисляется программно по формуле (7).

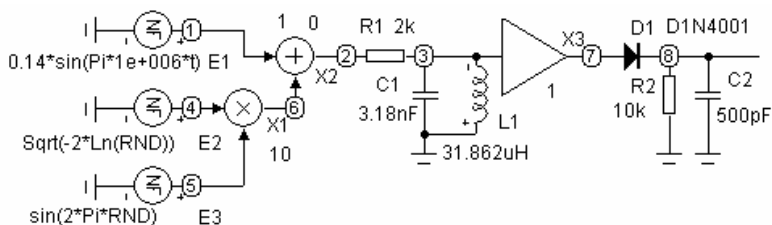


Рис. 11. Схема исследования диодного детектора

4.2.1. Для изучения случая детектирования гармонического радиосигнала в отсутствие шума установить значения коэффициентов передачи сумматора $X2$, равными 1 и 0.

В режиме *Transient* при параметрах: *Time Range* = 0.5m, *Maximum Time Step* = 0.0001m и при включенном режиме автоматической установки масштаба по осям ординат вывести на экран и поочередно наблюдать осциллограммы напряжений в узлах 3 и 8 при значениях коэффициента усиления идеального усилителя: 1, 5, 10, 20 и 40.

При каждом значении этого коэффициента усиления оценить и записать величины амплитуды гармонического напряжения на контуре A_m и постоянного (среднего) значения выходного напряжения детектора A_s . Вычислить и записать получающиеся величины коэффициента передачи детектора, равного отношению A_s / A_m .

Сравнить полученные результаты и объяснить причины зависимости величины этого коэффициента от амплитуды напряжения на входе детектора. Оценить примерную величину зоны нечувствительности к входному напряжению исследуемого детектора при данном диоде.

4.2.2. Для изучения случая детектирования только входного белого гауссова шума установить значения коэффициентов передачи сумматора X_2 , равными 0 и 1.

При тех же величинах коэффициента усиления дополнительного усилителя, что и в п. 4.2.1, измерить и записать:

а) среднеквадратичные значения входного и выходного шумов и сравнить их между собой,

б) среднее значение выходного шума A_n .

4.2.3. Для изучения случая детектирования суммы гармонического радиосигнала и белого гауссова шума при отношении сигнала к шуму около единицы установить значения коэффициентов передачи сумматора X_2 , равными 1 и 1.

При тех же величинах коэффициента усиления дополнительного усилителя, что и в п.п. 4.2.1 и 4.2.2, измерить и записать средние значения выходного напряжения детектора A_{ld} . Вычислить разности между полученными средними в настоящем и предыдущем пунктах $\Delta A = A_{ld} - A_n$ и оценить величины коэффициентов подавления сигнала в данном детекторе $k_{\Pi} = \Delta A / A_s$.

Сравнить полученные результаты с величиной коэффициента подавления при идеальном линейном детектировании (см. п. 4.1).

4.3. Детектирование с использованием синхронного амплитудного детектора

Напомним, что при синхронном амплитудном детектировании в отличие от идеального амплитудного и диодного детектирования выполняется принцип суперпозиции результатов детектирования нескольких входных сигналов. В случае синхронного детектирования БГШ шумовая составляющая выходного напряжения детектора также является гауссовым процессом с нулевым средним значением, а полезная

составляющая является постоянной величиной, пропорциональной амплитуде входного гармонического радиосигнала. Ввиду этого подавления полезного сигнала шумом в синхронном амплитудном детекторе (САД) не происходит. При этом мощность выходной шумовой составляющей САД с коэффициентом передачи, равном единице до фильтра нижних частот (ФНЧ), который обычно ставят на выходе САД, оказывается равной мощности входной составляющей данного детектора. С учетом наличия ФНЧ величина мощности выходного шума определяется эффективной полосой ФНЧ.

Для исследования свойств синхронного детектирования независимо от версии программы *МС* вызвать файл *Lab06_12.cir*.

Убедиться, что параметры исследуемой схемы в вызванном файле совпадают с параметрами схемы на рис. 12 настоящего описания.

Ознакомиться с приведенной схемой эксперимента.

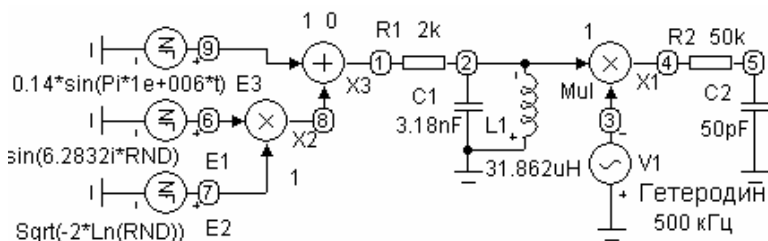


Рис. 12. Схема исследования синхронного амплитудного детектора

4.3.1. Для исследования случая синхронного детектирования гармонического сигнала в отсутствие шума установить значения коэффициентов передачи сумматора *X3*, равными 1 и 0.

В режиме *Transient* при параметрах: *Time Range* = 0.5m, *Maximum Time Step* = 0.0001m – вывести и наблюдать временные осциллограммы напряжений в узлах с 1 по 5. Рекомендуемые параметры этих разверток следующие: *X Range* =

$= 0.5m$, *Y Range* для $v(1)$ и $v(2)$ порядка $(0.5, -0.5)$, для $v(3)$ порядка $(100, -100)$, для $v(4)$ порядка $(30, -15)$, для $v(5)$ порядка $(25, -15)$.

Наблюдая эти осциллограммы, ознакомиться с работой синхронного детектора.

Используя электронную лупу, измерить амплитуду напряжения на контуре A_m и постоянное (среднее) выходное напряжение детектора A_s при постоянной времени ФНЧ, равной 2.5 мкс. Оценить величину коэффициента передачи данного детектора. Указать элемент его схемы, путем изменения величины только одного параметра которого можно в широких пределах регулировать значение коэффициента передачи данного амплитудного детектора, равного A_s / A_m .

4.3.2. Для исследования случая синхронного детектирования только шума установить значения коэффициентов передачи сумматора ХЗ, равными 0 и 1.

Вывести на экран дисплея и наблюдать только осциллограммы в узлах 2 и 5 с их сопутствующими параметрами: $Avg(v(N_0))$ и $Rms(v(N_0))$.

При постоянной времени ФНЧ САД 2.5 мкс измерить и записать среднее значение выходного напряжения детектора A_n .

4.3.3. Для исследования случая синхронного детектирования суммы гармонического сигнала и шума при отношении сигнала к шуму порядка единицы установить значения коэффициентов передачи сумматора ХЗ, равными 1 и 1.

Вывести на экран осциллограммы напряжений только в узлах 2 и 5 с их упомянутыми выше сопутствующими параметрами.

При постоянной времени ФНЧ САД в 2.5 мкс измерить среднее значение выходного напряжения детектора A_{ld} . Вычислить коэффициент $k_{\Pi} = \Delta A / A_s$ для данного детектора (где

$\Delta A = A_{ld} - A_n$). Убедиться, что подавление полезного сигнала шумом в синхронном амплитудном детекторе отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учебное пособие / *В.А. Васин, И.Б. Власов, Ю.М. Егоров* и др.; Под ред. И.Б. Федорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 672 с.
2. *Куклев Л.П., Ларин А.Л.* Прохождение сигнала и шума через радиоцепи: Лабораторная работа. – М.: МФТИ, 1994. – 47 с.
3. *Ларин А.Л.* Аналоговая электроника. – М.: МФТИ, 2007. – 228 с.
4. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники. 3-е изд. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
5. *Озерский Ю.П.* Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: МФТИ, 2007. – 172 с.

