



А.П. Дятлов, П.А. Дятлов, А.Н. Шостак

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ
И ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет»

А.П. Дятлов, П.А. Дятлов, А.Н. Шостак

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ
И ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ**

Учебное пособие

Ростов-на-Дону
Издательство Южного федерального университета
2015

ББК 32.884.1

УДК 621.391.24

Рецензенты:

кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Связь на железнодорожном транспорте» РГУПС *Кульбикаян Х.Ш.*;

доктор технических наук, профессор, начальник отдела Ростовского НИИ радиосвязи *Расщепляев Ю.С.*

Дятлов А.П., Дятлов П.А., Шостак А.Н. Анализ и моделирование формирователей и обнаружителей сигналов: учебное пособие. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – 61 с.

ISBN

В пособии рассмотрены вопросы анализа и моделирования формирователей и обнаружителей сигналов при проведении лабораторных и практических занятий.

Предназначается для студентов специальностей 210304 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и 210402 «Средства связи с подвижными объектами» дневной, заочной и дистанционной форм обучения, а также специалистов, повышающих квалификацию в центрах переподготовки кадров.

Табл. 18. Ил. 70. Библиогр.: 4 назв.

© ЮФУ, 2015

© А.П. Дятлов, 2015

© П.А. Дятлов, 2015

© А.Н. Шостак, 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Бурный прогресс науки и техники вызывает потребность широких слоев населения в непрерывном образовании, что делает актуальным развитие не только традиционных (контактных), но и дистанционных форм обучения.

В процессе дистанционного обучения для развития комплексного восприятия полученных знаний, навыков, умений и обеспечения индивидуализации перерабатываемого материала особую актуальность приобретают электронные междисциплинарные методические разработки, на основе которых возможно проведение лекционных и практических занятий, лабораторных и контрольных работ и курсового проектирования.

Данное учебное пособие предназначено для изучения методов анализа и моделирования формирователей и обнаружителей сигналов и основано на использовании междисциплинарных связей:

1) для специальности 210304 «Радиоэлектронные системы и комплексы» между такими курсами, как «Радиотехнические цепи и сигналы», «Радиолокационные и радионавигационные системы», «Прикладная информатика», «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоустройств и радиосистем»;

2) для специальности 210402 «Средства связи с подвижными объектами» между такими курсами, как «Теория электрической связи», «Основы теории систем связи с подвижными объектами», «Прикладная информатика», «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств», «Системы и сети связи с подвижными объектами».

В настоящее время имеется целый ряд учебных пособий [1–3], посвященных анализу обнаружителей сигналов. Однако указанные пособия предназначены в основном для контактного вида обучения. Основной проблемой при дистанционном обучении является процесс контроля и тестирования обучаемого студента и выполнение лабораторного практикума.

Для решения указанной проблемы дистанционного обучения предлагается учебное пособие, состоящее из краткого теоретического базиса, описаний к контрольным и лабораторным работам. Для моделирования формирователей и обнаружителей сигналов в процессе выполнения лабораторных работ предлагается использовать программу SystemVue 6.0 [4], ориентированную на персональные компьютеры, совместимые с IBM PC.

Данное учебное пособие обеспечивает процесс самостоятельного, но при этом управляемого и контролируемого усвоения студентами определенного объема знаний и умений по наиболее важным разделам базовых дисциплин. Возможность дистанционного осуществления как практических занятий, так и лабораторных работ сокращает сроки и стоимость обучения по сравнению с «кейсовой» технологией, что позволяет рекомендовать использование указаний не только для студентов дневной и заочной форм обучения, но и для специалистов, повышающих квалификацию в центрах переподготовки кадров.

В данной работе приводятся описания циклов лабораторных работ, посвященных анализу и моделированию когерентного, некогерентного, энергетического и автокорреляционного обнаружителей при приеме различных типов сигналов.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Наиболее простой разновидностью радиосистем первичной обработки информации (РСПОИ) являются радиосистемы обнаружения (РСО), которые находят применение в радиолокации, радионавигации, радиоконтроле, радиосвязи.

РСО должна обеспечивать обнаружение всех находящихся в заданной зоне обслуживания источников радиоизлучений (ИРИ), которые совместно с помехами могут быть описаны моделью радиообстановки (РО).

Эффективность РСО оценивается характеристиками помехоустойчивости. При энергетическом подходе для оценки помехоустойчивости используется отношение сигнал/помеха, а при статистическом подходе – вероятность правильного обнаружения $P_{по}$ и вероятность ложных тревог $P_{лт}$.

В радионавигации, радиолокации, связи и радиоконтроле обнаружение сигналов на фоне помехи является одной из основных задач первичной обработки информации. Обнаружение сигнала соответствует понятию решения о наличии сигнала (гипотеза H_1) или его отсутствии (гипотеза H_0) в результате наблюдения на интервале времени $[t_c + t_0 + T_c]$ случайного процесса $y_0(t)$, представляющего смесь сигнала $S(t, l, \vec{\alpha})$ и помехи $n(t)$, где t_0 – момент прихода сигнала; T_c – интервал наблюдения; l – информационный параметр сигнала; $\vec{\alpha}$ – вектор сопутствующих параметров. В общем случае описание радиотехнической обстановки (РО) применительно к условиям работы РСПОИ можно представить в виде многокомпонентного процесса $x(t)$, отображающего совокупность сигналов, естественных и искусственных помех, а также внутренних шумов.

Однако при использовании комбинации различных видов селекции в РСПОИ процесс $x(t)$ можно свести к двухкомпонентному, который представляет собой аддитивную смесь сигнала и помехи:

$$y(t) = S(t, l, \vec{\alpha}) + n(t), t_0 \leq t \leq t_0 + T_c.$$

Многообразие сигналов, подлежащих первичной обработке, может быть достаточно полно представлено совокупностью следующих 4 классов сигналов: простых импульсных (ПИС), сложных импульсных (СИС), гармонических (ГС) и шумовых (ШС) сигналов, которые позволяют отразить основные общие свойства сигнала, а именно: деление сигналов на импульсные и непрерывные, узкополосные и широкополосные, детерминированные и стохастические, одночас-

тотные и многочастотные. В зависимости от априорной информации, имеющейся при обнаружении, сигналы подразделяются на детерминированные, квазидетерминированные и шумовые (с неизвестной формой).

Детерминированные сигналы $S(t, l)$ – сигналы с полностью известными параметрами. Квазидетерминированные сигналы $S(t, l, \vec{\alpha})$ – сигналы с частично неизвестными параметрами. Шумовые сигналы $S(t, l, \vec{\alpha})$ – случайные гауссовы стационарные процессы с корреляционной функцией $R_c(\tau)$.

Наиболее распространенными разновидностями помех $n(t)$ являются некоррелированные гауссовы стационарные помехи (белый шум), которые адекватны внутренним шумам РСПОИ и внешним шумам естественного и искусственного происхождения.

В теории статистических решений показано, что при обнаружении сигнала на фоне белого шума оптимальное решающее правило основано на сравнении отношения правдоподобия $\Lambda(y_0)$ с некоторым нормированным порогом $U_{\text{пор}}$:

$$\Lambda(y_0) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}}.$$

Для выбора порога при отсутствии вероятностей наличия и отсутствия сигнала в процессе $y_0(t)$ используется критерий Неймана—Пирсона.

При обнаружении детерминированного сигнала $S(t, l)$ на фоне белого шума в результате анализа отношения правдоподобия $\Lambda(y_0)$ алгоритм оптимального обнаружителя соответствует вычислению корреляционного интеграла и сравнению его с порогом

$$Z_k = \frac{1}{T} \int_0^T S_{\text{оп}}(t, l) y_0(t) dt \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}},$$

где Z_k – эффект на выходе обнаружителя; T – постоянная интегрирования в обнаружителе; $S_{\text{оп}}(t, l)$ – копия сигнала.

Оптимальный обнаружитель получил название когерентного обнаружителя. Эти обнаружители находят применение при приеме когерентных детерминированных сигналов.

Следует отметить, что техническая реализация алгоритма обнаружения в виде корреляционного устройства является не единственно возможной. Корреляционный интеграл может быть реализован согласованным фильтром, им-

пульсная характеристика которого соответствует «зеркальному отражению» копии сигнала $h_{\text{сф}}(\tau - t) = S_{\text{оп}}(t, \lambda)$.

При обнаружении квазидетерминированного сигнала $S(t, l, \varphi_c)$ с неизвестной начальной фазой φ_c , распределенной равномерно на фоне белого шума, на основе анализа отношения правдоподобия $\Lambda(y_0)$ оптимальный алгоритм некогерентного обнаружения может быть представлен следующим образом:

$$Z_k = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}},$$

где $Z_{1(2)} = \frac{1}{T} \int_0^T S_{1(2)}(t) y_0(t) dt$; $S(t, l, \varphi_c) = U_{\text{мс}}(t) \cos [\omega_c t + \varphi(t) + \varphi_c]$; Z_k – эффект на выходе некогерентного обнаружителя (H_0); $Z_{1(2)}$ – квадратурные составляющие.

Оптимальный некогерентный обнаружитель, обеспечивающий обработку в соответствии с [3], называется когерентным обнаружителем с квадратурной обработкой.

Структурная схема оптимального обнаружителя может быть представлена также и в фильтровом варианте при использовании согласованного фильтра с импульсной характеристикой $h_{\text{сф}}(T - t) = S_{\text{оп}}(t, l, \varphi_c)$. Огибающая отклика согласованного фильтра Z_k инвариантна к неизвестной фазе φ_c и для ее выделения в состав обнаружителя необходимо ввести линейный детектор (ЛД):

$$Z_k = \frac{1}{T} \int_0^T |h_{\text{сф}}(T - t) y_0(t)| dt \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}}.$$

При обнаружении квазидетерминированного сигнала $S(t, l, \omega_c, \varphi_c)$ с известной шириной спектра Δf_c и неизвестными несущей частотой ω_c и начальной фазой φ_c , распределенными равномерно на фоне белого шума, оптимальный алгоритм обнаружения соответствует согласованной параллельной фильтрации:

$$Z_{k1} = \frac{1}{T} \int_0^T |h_{\text{сф}1}(T - t) y_0(t)| dt \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}};$$

$$Z_{ki} = \frac{1}{T} \int_0^T |h_{\text{сф}i}(T - t) y_0(t)| dt \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}};$$

$$Z_{kn} = \frac{1}{T} \int_0^T |h_{\text{сф}n}(T - t) y_0(t)| dt \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}},$$

где Z_{k1}, Z_{ki}, Z_{kn} – отклик на выходе 1 i, n каналов обнаружителя; $h_{сф1}(t), h_{сфи}(t), h_{сфn}(t)$ – импульсная реакция 1, i, n согласованных фильтров, отличающихся лишь средними частотами f_1, f_i, f_n ; n – количество каналов в обнаружителе, определяющееся из условия $n = \Delta f_n T$, где Δf_n – интервал неопределенности несущей частоты сигналов.

Наряду с использованием параллельной согласованной фильтрации при обнаружении сигнала $S(t, l, \omega_c, \varphi_c)$ возможно использование многоканального когерентного обнаружителя с квадратурными каналами. Однако этот вариант построения не получил применения из-за трудностей в воспроизведении опорного напряжения (копии сигналов).

С целью упрощения реализации обнаружителя при большом значении коэффициента фильтрации $K_\phi = \Delta f_n T > 1$ вместо оптимального алгоритма можно использовать квазиоптимальные авто-, взаимокорреляционные и энергетические алгоритмы, устойчивые к априорной неопределенности как по несущей частоте ω_c , виду модуляции, так и ширине спектра сигнала Δf_c .

При использовании авто-, взаимокорреляционных и энергетических алгоритмов может обеспечиваться как согласованный $\Delta f_c = \Delta f_n$, так и несогласованный прием ($\Delta f_c \leq \Delta f_n$), что позволяет уменьшить число каналов n в обнаружителе. Однако следует иметь в виду, что упрощение реализации достигается ценой ухудшения помехоустойчивости по сравнению со случаем когерентного приема, поскольку при этом происходит переход к некогерентной обработке сигналов.

Автокорреляционные и энергетические обнаружители находят широкое применение при приеме квазидетерминированных и шумовых сигналов в случае одноканальной РСПОИ, а взаимокорреляционные обнаружители используются при многоканальном построении РСПОИ. Анализ отношения правдоподобия показывает, что авто-, взаимокорреляционные и энергетические алгоритмы являются оптимальными при обнаружении сигналов неизвестной формы, т.е. когда неизвестны не только параметры, но и вид модуляции сигнала.

Алгоритмы обнаружения квазидетерминированного или шумового сигналов на фоне белого шума при известном интервале существования сигнала в случае авто-, взаимокорреляционного и энергетического обнаружителей имеют вид

$$Z_A = \frac{1}{T} \int_0^T y_0(t) y_0(t - \tau_1) dt \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}};$$

$$Z_{\text{Э}} = \frac{1}{T} \int_0^T y_0^2(t) dt \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}};$$

$$Z_B = \frac{1}{T} \int_0^T y_{01}(t) y_{02}(t - \Delta\tau) dt \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} U_{\text{пор}},$$

где $y_{01(2)}(t) = S(t, l, \vec{\alpha}) + n_{1(2)}(t)$; $Z_A, Z_B, Z_{\text{Э}}$ – эффект на выходе авто-, взаимокорреляционного и энергетического обнаружителей; $n_1(t), n_2(t)$ – помехи (белый шум) на входе каналов взаимокорреляционного обнаружителя, которые полагаются статистически независимыми; τ_1 – величина временного сдвига, вносимого линией задержки (ЛЗ) в автокорреляционный обнаружитель для декорреляции помехи $n(t)$; $\Delta\tau$ – временное рассогласование между процессами $y_{01}(t)$ и $y_{02}(t)$.

Для достижения максимальной помехоустойчивости авто- и взаимокорреляционного обнаружителей необходимо обеспечить высокую степень декорреляции помехи и незначительную декорреляцию сигнала, что обеспечивается при выполнении условия $\Delta f_c \ll \Delta f_n$.

Структуры обнаружителей приведены на рис. 1–4, где Γ – генератор сигнала; ГКС – генератор копии сигнала; ГОК – генератор опорного колебания; ГП – генератор помехи; ИК – извлечение корня квадратного; Кв – квадратор; КД – квадратичный детектор; ЛЗ – линия задержки; П – перемножитель; ПУ – пороговое устройство; ПФ – полосовой фильтр; РУ – решающее устройство; Сум – сумматор; УКО – устройство квадратичной обработки; ФНЧ – фильтр нижних частот.

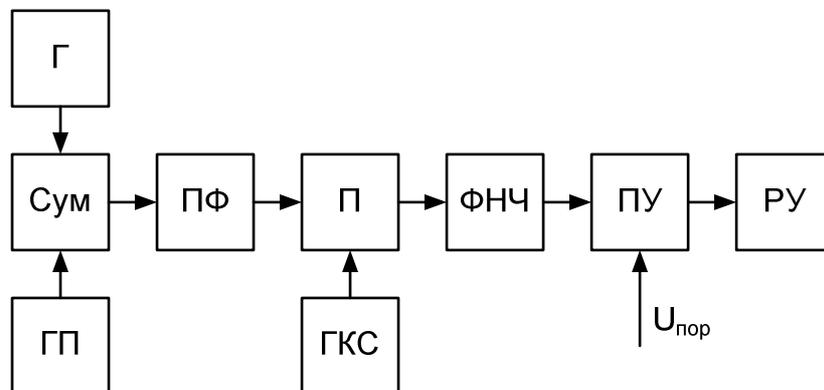


Рис. 1. Структурная схема когерентного обнаружителя (КО)

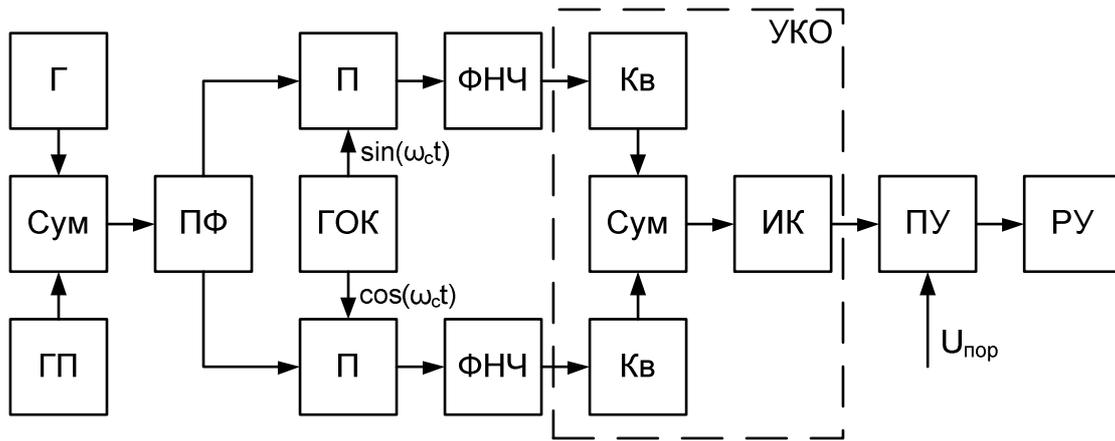


Рис. 2. Структурная схема некогерентного обнаружителя (НО)

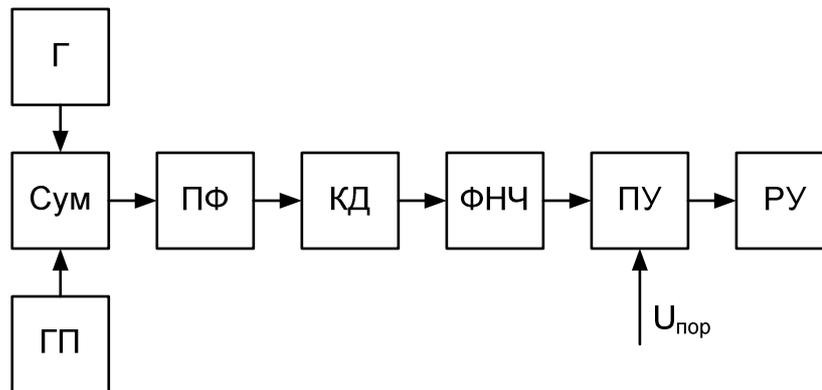


Рис. 3. Структурная схема энергетического обнаружителя (ЭО)

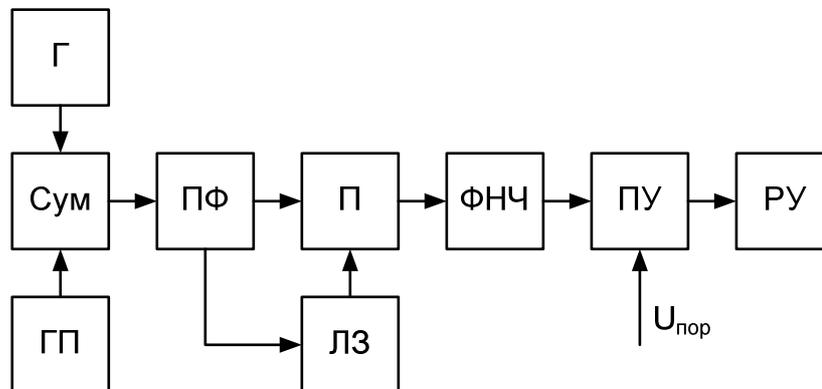


Рис. 4. Структурная схема автокорреляционного обнаружителя (АО)

При выполнении лабораторных работ №№ 1–4 необходимо выполнить следующие задания:

1. Провести анализ прохождения сигнала через функциональные узлы (ФУ) обнаружителя.
2. Провести анализ зависимости вероятности ложной тревоги (ЛТ) от порогового напряжения $P_{\text{ЛТ}} = f(U_{\text{пор}})$.
3. Провести анализ зависимости выходного отношения сигнал/шум (ОСШ) от входного отношения сигнал/шум $g_{\text{вых}} = f(g_{\text{вх}})$.

2. АНАЛИЗ ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛА ЧЕРЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ ОБНАРУЖИТЕЛЯ

Исходные данные: 1) несущая (средняя) частота сигнала и средняя частота помехи $f_s = f_n = 10$ МГц; 2) ширина спектра помехи $\Delta f_n = 4$ МГц; 3) ширина спектра ШС $\Delta f_{шс} = 2$ МГц; 4) девиация частоты ЛЧМ-импульса $\Delta f_{дев} = 2$ МГц; 5) длительность задержки в АО $\tau_{лз} = 1/\Delta f_n$; 6) длительность импульса $T_{и} = 1 \cdot 10^{-3}$ с (для ПИС и ЛЧМ); 7) длительность элемента $T_э = 1 \cdot 10^{-6}$ с (для ФМК); 8) время моделирования $T_m = 2 \cdot 10^{-3}$ с; 9) частота дискретизации $F_d = 200$ МГц.

Параметры обнаружителей: вид сигнала, постоянная интегрирования и их тип заданы в табл. 1.

Таблица 1

Параметры обнаружителя

Вид сигнала	Постоянная интегрирования обнаружителя	Тип обнаружителя
1.1 – ПИС		3.1 – КО
1.2 – ФМК (Меандр)	2.1 – $T = 1 \cdot 10^{-3}$ с	3.2 – НО
1.3 – ФМК (ПСП)	2.2 – $T = 1 \cdot 10^{-4}$ с	3.3 – ЭО
1.4 – ЛЧМ	2.3 – $T = 1 \cdot 10^{-5}$ с	3.4 – АО
1.5 – ШС		

На основе исходных данных и различных сочетаний параметров обнаружителей в табл. 2 представлены 20 вариантов заданий для лабораторных работ № 1–4.

Таблица 2

Варианты заданий для лабораторных работ №№ 1–4

Вариант	Параметры обнаружителя			
	Лаб. раб. №1	Лаб. раб. №2	Лаб. раб. №3	Лаб. раб. №4
1	1.1 2.2 3.3	1.2 2.3 3.4	1.4 2.1 3.1	1.5 2.2 3.2
2	1.2 2.3 3.4	1.4 2.1 3.1	1.5 2.2 3.2	1.1 2.3 3.3
3	1.4 2.1 3.1	1.5 2.2 3.2	1.1 2.3 3.3	1.2 2.1 3.4
4	1.5 2.2 3.2	1.1 2.3 3.3	1.2 2.1 3.4	1.4 2.2 3.1
5	1.1 2.3 3.3	1.3 2.1 3.4	1.4 2.2 3.1	1.5 2.3 3.2

Вариант	Параметры обнаружителя											
	Лаб. раб. №1			Лаб. раб. №2			Лаб. раб. №3			Лаб. раб. №4		
6	1.3	2.1	3.4	1.4	2.2	3.1	1.5	2.3	3.2	1.1	2.1	3.3
7	1.4	2.2	3.1	1.5	2.3	3.2	1.1	2.1	3.3	1.3	2.2	3.4
8	1.5	2.3	3.2	1.1	2.1	3.3	1.3	2.2	3.4	1.4	2.3	3.1
9	1.1	2.1	3.3	1.2	2.2	3.4	1.4	2.3	3.1	1.5	2.1	3.2
10	1.2	2.2	3.4	1.4	2.3	3.1	1.5	2.1	3.2	1.1	2.2	3.3
11	1.4	2.3	3.1	1.5	2.1	3.2	1.1	2.2	3.3	1.2	2.3	3.4
12	1.5	2.1	3.2	1.1	2.2	3.3	1.2	2.3	3.4	1.4	2.1	3.1
13	1.1	2.2	3.3	1.3	2.3	3.4	1.4	2.1	3.1	1.5	2.2	3.2
14	1.3	2.3	3.4	1.4	2.1	3.1	1.5	2.2	3.2	1.1	2.3	3.3
15	1.4	2.1	3.1	1.5	2.2	3.2	1.1	2.3	3.3	1.3	2.1	3.4
16	1.5	2.2	3.2	1.1	2.3	3.3	1.3	2.1	3.4	1.4	2.2	3.1
17	1.1	2.3	3.3	1.2	2.1	3.4	1.4	2.2	3.1	1.5	2.3	3.2
18	1.2	2.1	3.4	1.4	2.2	3.1	1.5	2.3	3.2	1.1	2.1	3.3
19	1.4	2.2	3.1	1.5	2.3	3.2	1.1	2.1	3.3	1.2	2.2	3.4
20	1.5	2.3	3.2	1.1	2.1	3.3	1.2	2.2	3.4	1.4	2.3	3.1

2.1. Прохождение сигналов через когерентный обнаружитель

2.1.1. Прохождение простого импульсного сигнала через когерентный обнаружитель

Функциональная схема когерентного обнаружителя (КО) с подключенными генератором простого импульсного сигнала (ПИС) и анализаторами данных представлена на рис. 5, где приняты следующие обозначения: Функциональные узлы (ФУ) 0-2 – генератор ПИС; ФУ 4 – генератор помехи (ГП) (на первом этапе не подключается); ФУ 5-7 – КО; ФУ 8-10 – генератор копии ПИС; ФУ 11, 12 – анализаторы данных.

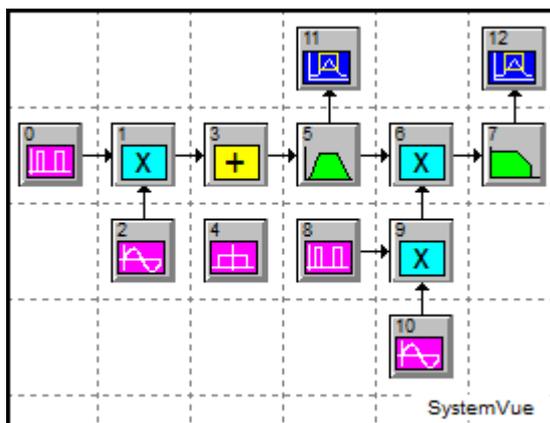


Рис. 5. Функциональная схема когерентного обнаружителя (КО)

Параметры элементов генератора ПИС представлены в табл. 3, а параметры элементов КО приводятся в табл. 4.

Таблица 3

Параметры элементов генератора простого импульсного сигнала

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
0, 8		Pulse Train	Source/Periodic	Amplitude = 1; Frequency = $F_{\text{п}} = 1/2T_{\text{и}}$; Pulse Width = $T_{\text{и}}$
1, 9		Multiplier	Multiplier	
2, 10		Sinusoid	Source/Periodic	Amplitude = 1; Frequency = f_s

Таблица 4

Параметры элементов когерентного обнаружителя

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
3		Adder	Adder	
4		Unif Noise	Source/(Noise/PN)	Constant Parameter – Density in 1 Ohm; Density = N_{n}
5		Band Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Bandpass; BP Filter Order = 3; Low Cutoff = $F_{\text{н}} = f_s - \Delta f_{\text{n}}/2$; Hi Cutoff = $F_{\text{в}} = f_s + \Delta f_{\text{n}}/2$

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
6		Multiplier	Multiplier	
7		Low Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Lowpass; No. of Poles = 3; Low Cutoff = $F_B = 1/T$
11, 12		Analysis	Sink/Analysis	

На рис. 6–11 представлен пример моделирования прохождения ПИС через ФУ КО для $T_{\text{и}} = 500$ мкс и $\Delta f_{\text{н}} = 3$ МГц.

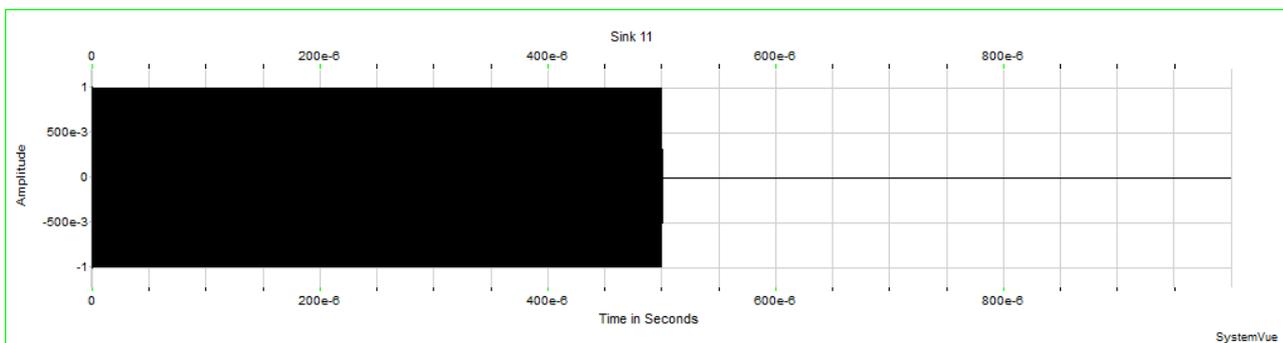


Рис. 6. ПИС на входе КО

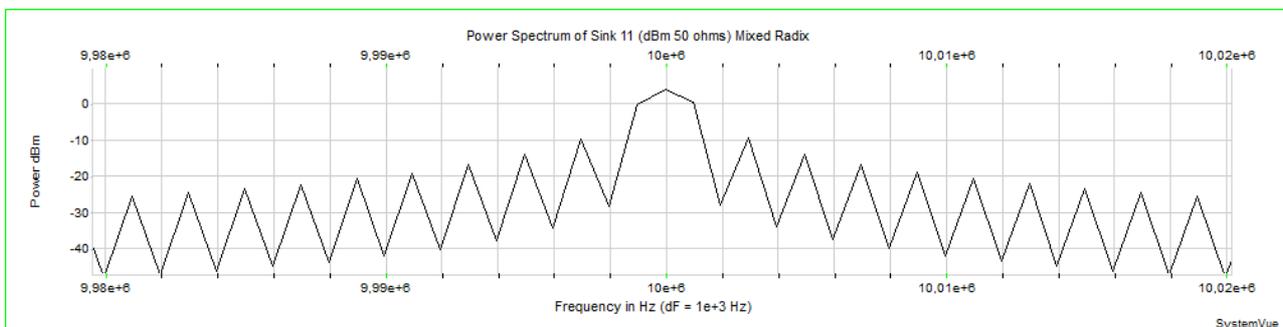


Рис. 7. Спектр мощности ПИС

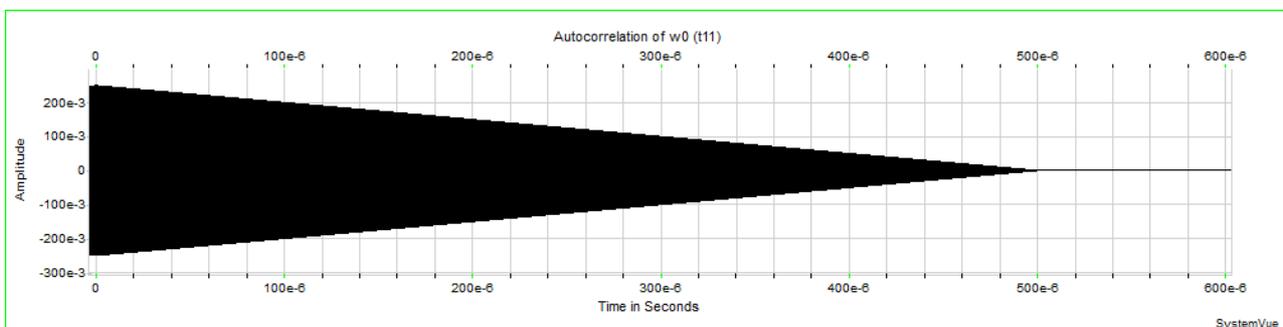


Рис. 8. Автокорреляционная функция ПИС

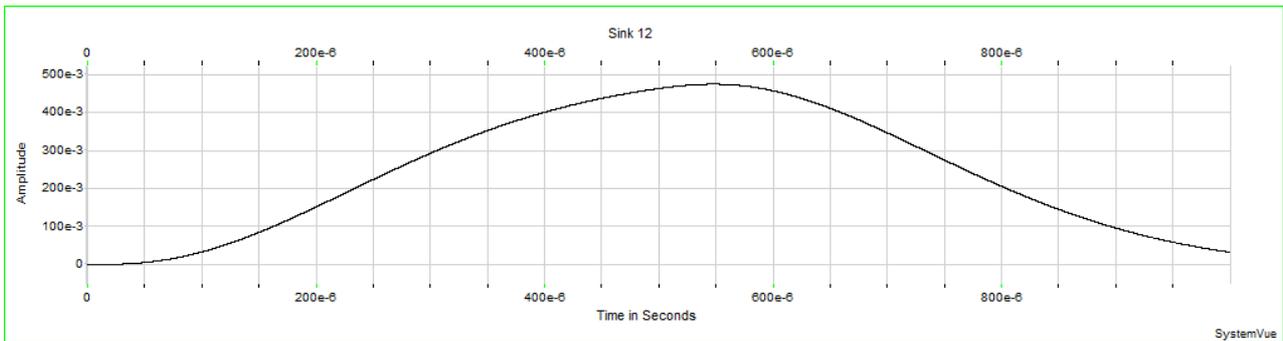


Рис. 9. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-3}$ с

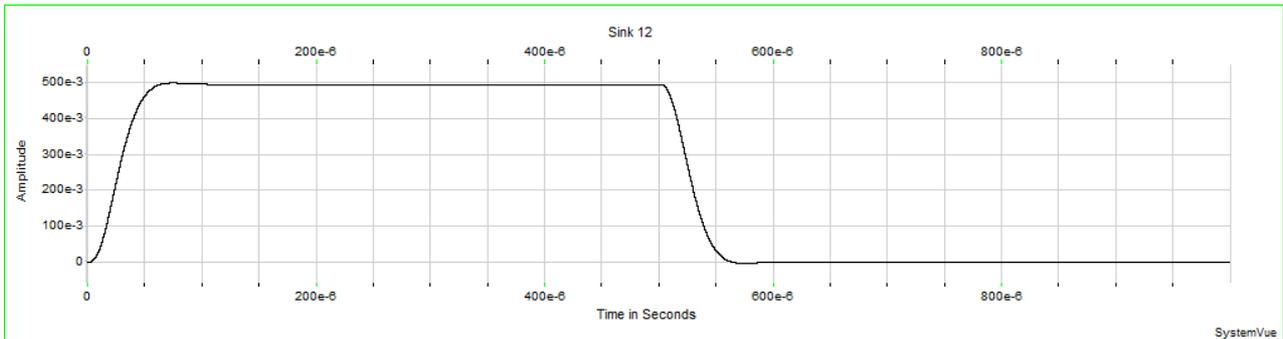


Рис. 10. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-4}$ с

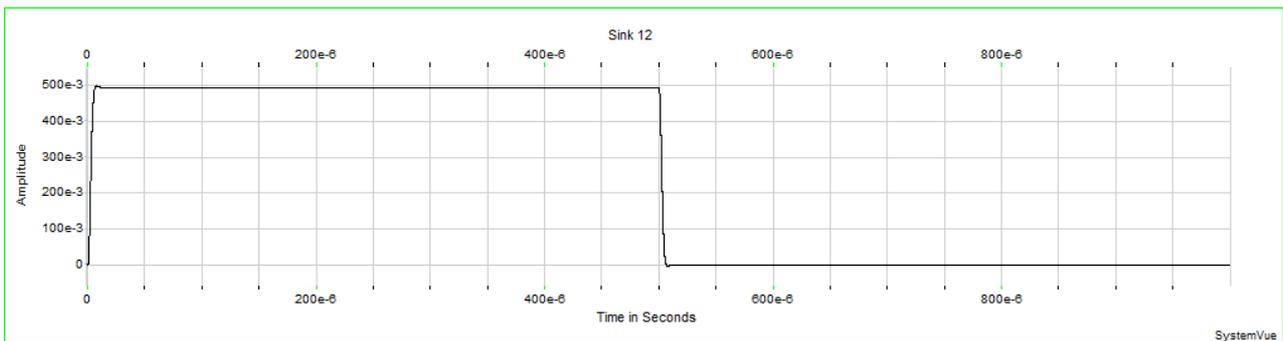


Рис. 11. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-5}$ с

2.1.2. Прохождение линейно-частотно-модулированного импульса через когерентный обнаружитель

Функциональная схема КО с подключенными генератором линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) импульса и анализаторами данных, представлена на рис. 12, где приняты следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ЛЧМ-импульса; ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-7 – КО; ФУ 8-10 – генератор копии ЛЧМ-импульса; ФУ 11, 12 – анализаторы данных.

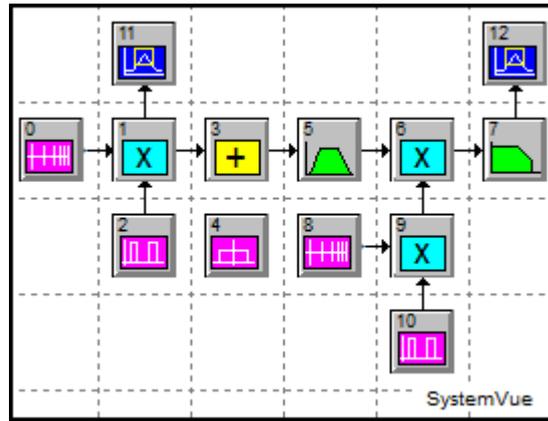


Рис. 12. Функциональная схема когерентного обнаружителя (КО)

Параметры элементов генератора ЛЧМ-импульса представлены в табл. 5, а параметры элементов КО приводятся в табл. 4.

Таблица 5

Параметры элементов генератора ЛЧМ-импульса

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
0, 8		Freq Sweep	Source/Periodic	Amplitude = 1; Start Frequency = $F_H = f_s - \Delta f_{\text{дев}}/2$; Stop Frequency = $F_B = f_s + \Delta f_{\text{дев}}/2$; Period = T_H
1, 9		Multiplier	Multiplier	
2, 10		Pulse Train	Source/Periodic	Amplitude = 1 Frequency = $F_H = 1/2T_H$; Pulse Width = T_H

На рис. 13–18 представлен пример моделирования прохождения ЛЧМ-импульса через ФУ КО для $T_H = 500$ мкс, $\Delta f_{\text{дев}} = 1,5$ МГц и $\Delta f_n = 3$ МГц.

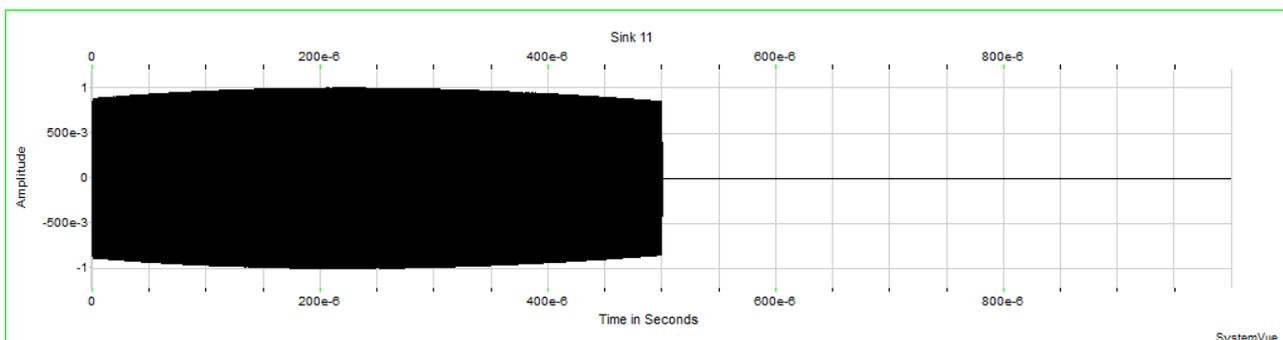


Рис. 13. ЛЧМ-импульс на входе КО

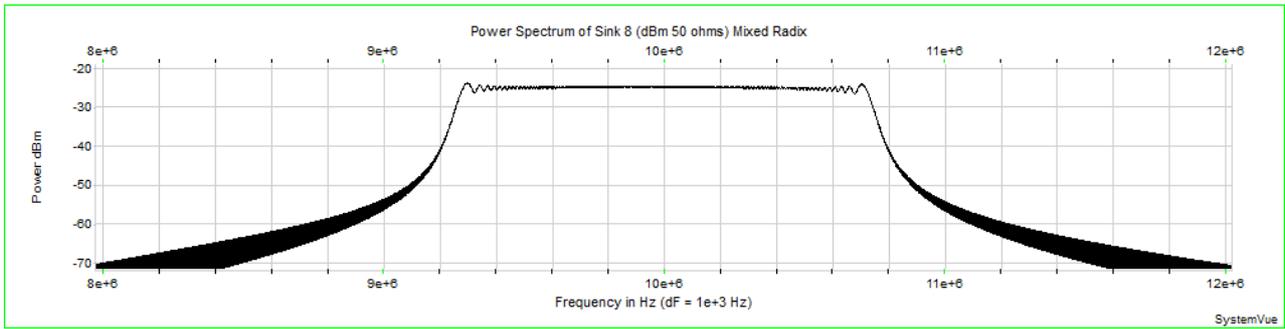


Рис. 14. Спектр мощности ЛЧМ-импульса

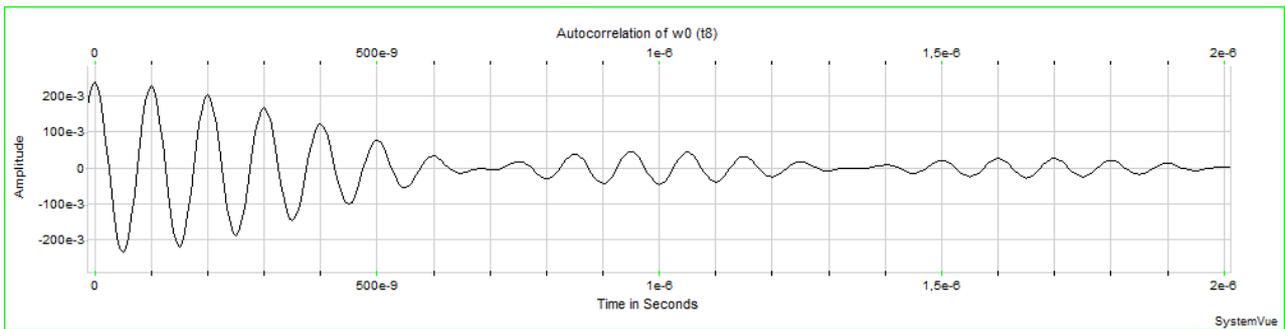


Рис. 15. Автокорреляционная функция ЛЧМ-импульса

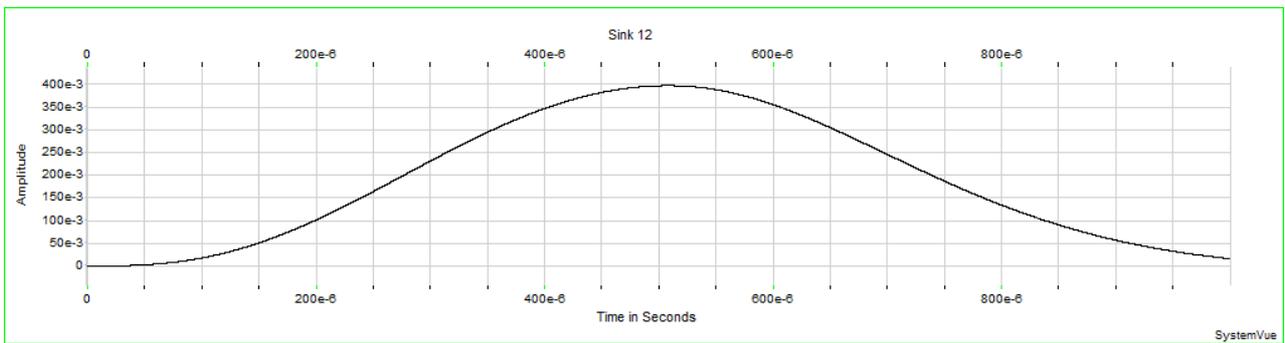
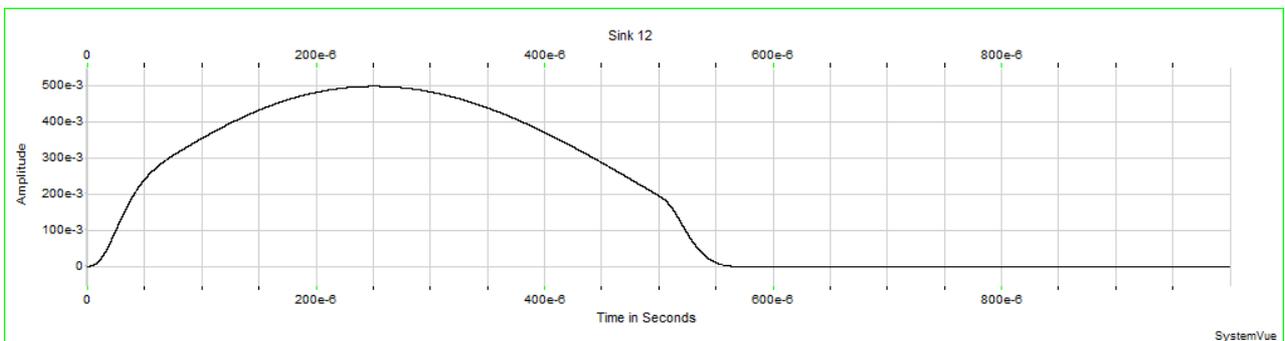
Рис. 16. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-3}$ сРис. 17. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-4}$ с



Рис. 18. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-5}$ с

2.1.3. Прохождение фазоманипулированной последовательности (меандр) через когерентный обнаружитель

Функциональная схема КО с подключенным генератором фазоманипулированной последовательности ФМК (меандр) и анализаторами данных представлена на рис. 19, где используются следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ФМК (меандр); ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-7 – КО; ФУ 8-10 – генератор копии ФМК (меандр); ФУ 11, 12 – анализаторы данных.

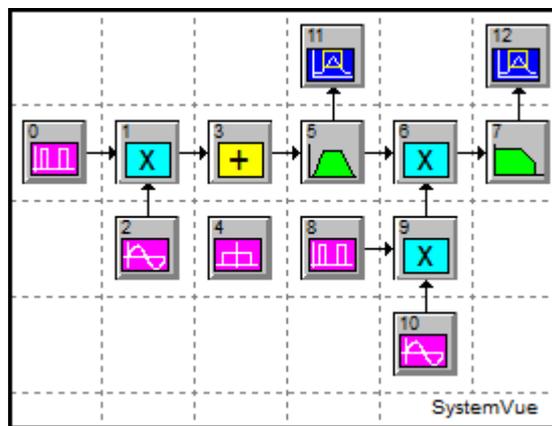


Рис. 19. Функциональная схема когерентного обнаружителя (КО)

Параметры элементов генератора ФМК (меандр) представлены в табл. 6, а параметры элементов КО приводятся в табл. 4.

Параметры элементов генератора ФМК (меандр)

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
0, 8		Pulse Train	Source/Periodic	Amplitude = 2; Offset = -1; Frequency = $F_{\Pi} = 1/2T_3$; Pulse Width = T_3
1, 9		Multiplier	Multiplier	
2, 10		Sinusoid	Source/Periodic	Amplitude = 1; Frequency = f_s

На рис. 19–24 представлен пример моделирования прохождения ФМК (меандр) через ФУ КО для $T_3 = 0,5$ мкс и Δf_n 3 МГц.

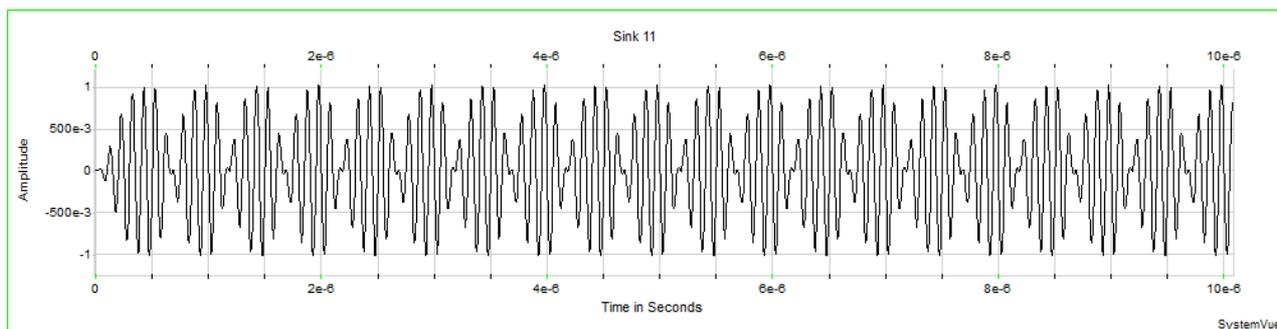


Рис. 19. ФМК (меандр) на входе КО в обычном и масштабированном виде

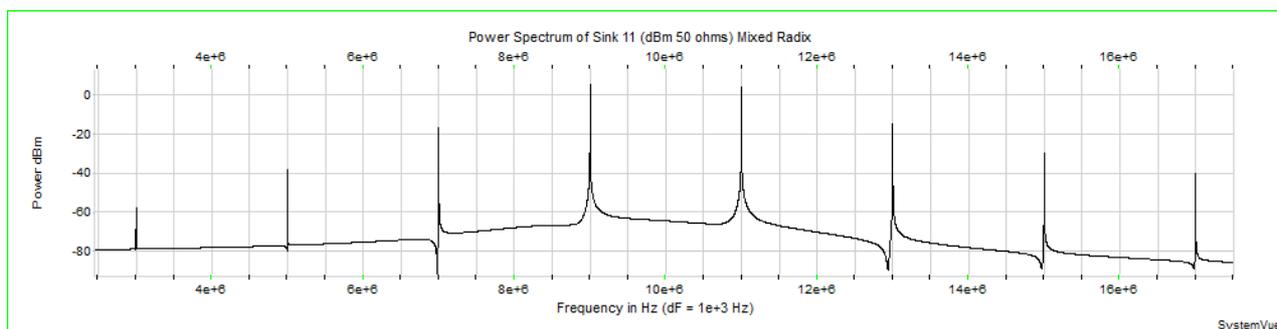


Рис. 20. Спектр мощности ФМК (меандр)

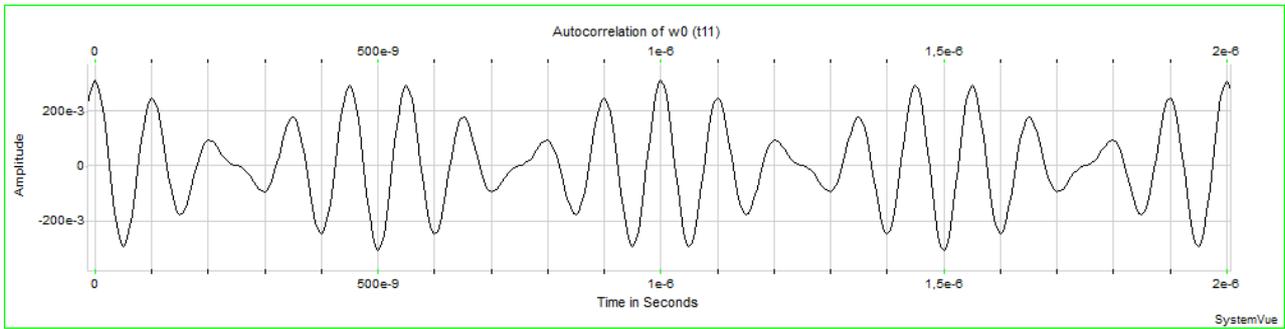


Рис. 21. Автокорреляционная функция ФМК (меандр)

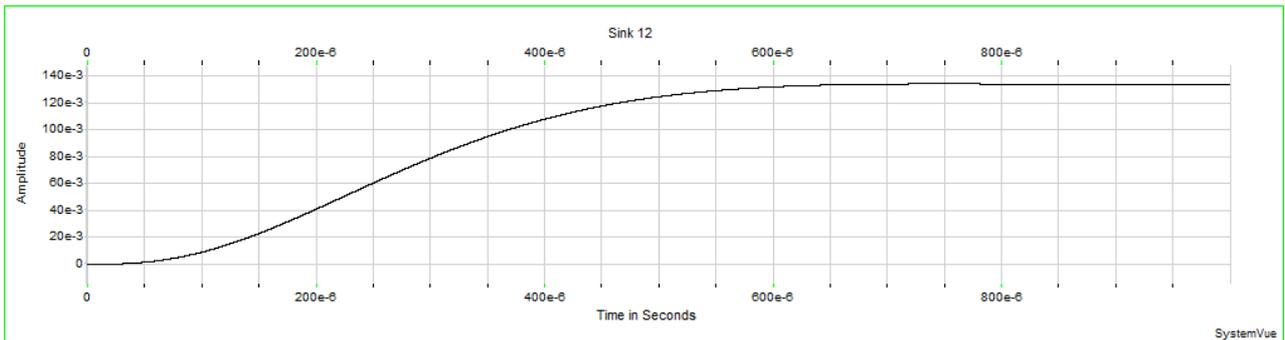


Рис. 22. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-3}$ с

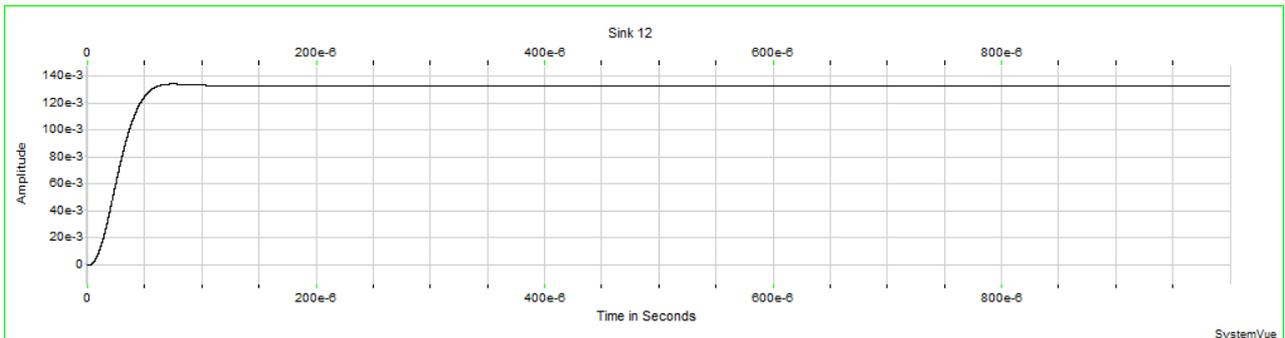


Рис. 23. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-4}$ с

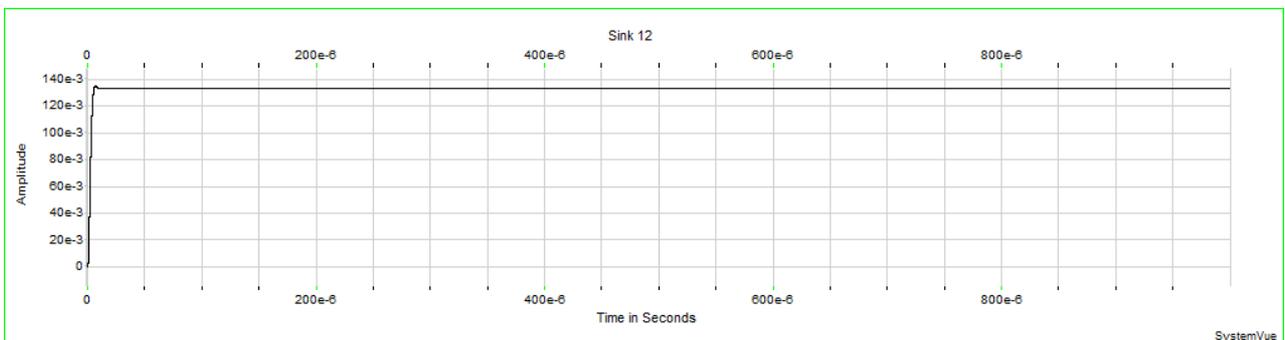


Рис. 24. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-5}$ с

2.1.4. Прохождение фазоманипулированного сигнала (ПСП) через когерентный обнаружитель

Функциональная схема КО с подключенным генератором сигнала фазоманипулированного псевдослучайной последовательностью (ФМК) (ПСП) и анализаторами данных представлена на рис. 25.

Функциональная схема на рис. 25 включает в себя: ФУ 0-2 – генератор ФМК (ПСП); ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-7 – КО; ФУ 0, 8, 9 – генератор копии ФМК (ПСП); ФУ 10, 11 – анализаторы данных.

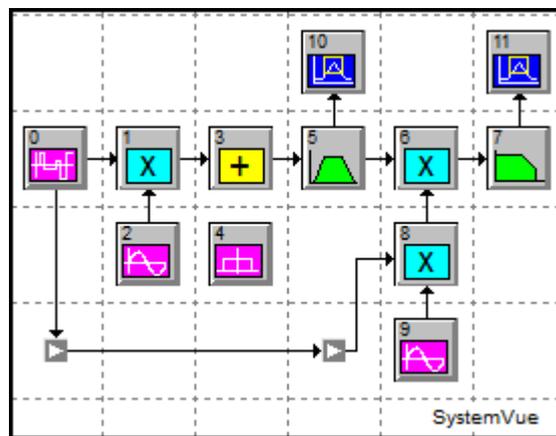


Рис. 25. Функциональная схема когерентного обнаружителя (КО)

Параметры элементов генератора ФМК (ПСП) представлены в табл. 7, а параметры элементов КО приводятся в табл. 4.

Таблица 7

Параметры элементов генератора ФМК (ПСП)

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
0		PN Seq	Source/(Noise/PN)	Amplitude = 1; Rate = $F_T = 1/T_T$; No. Levels = 2
1, 8		Multiplier	Multiplier	
2, 9		Sinusoid	Source/Periodic	Amplitude = 1; Frequency = f_s

На рис. 26–31 представлен пример моделирования прохождения ФМК (ПСП) через ФУ КО для $T_s = 0,5$ мкс и $\Delta f_n = 3$ МГц.

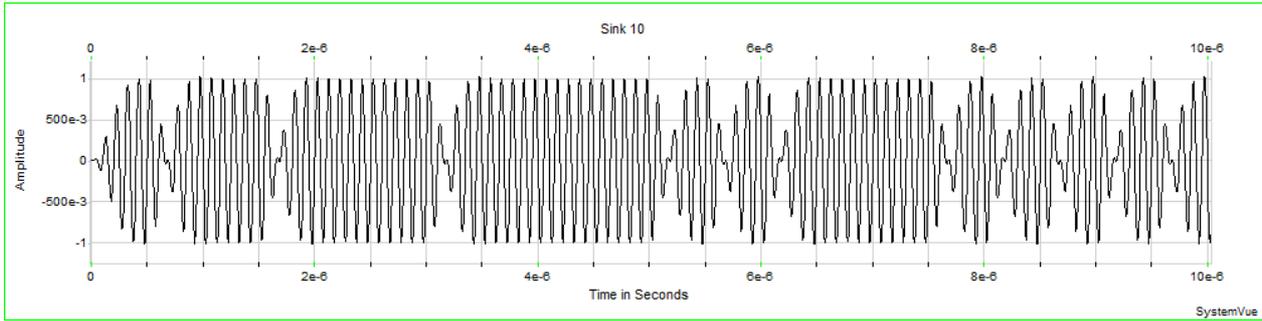


Рис. 26. ФМК (ПСП) на входе КО в обычном и масштабированном виде

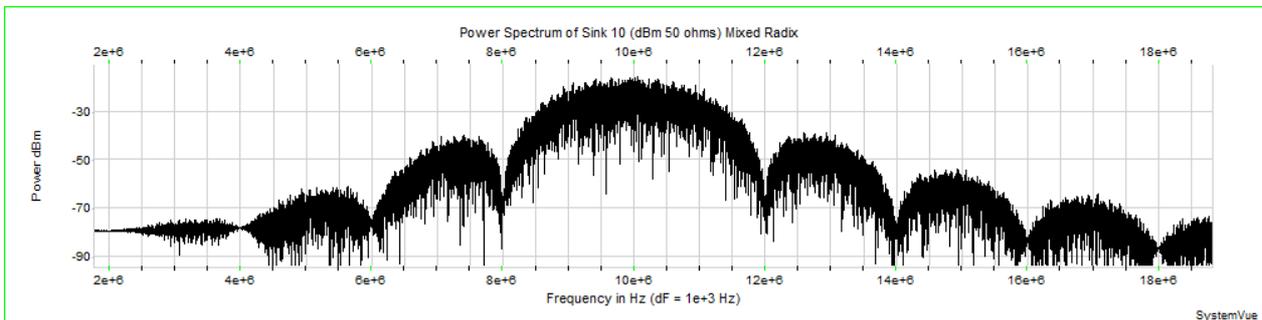


Рис. 27. Спектр мощности ФМК (ПСП)

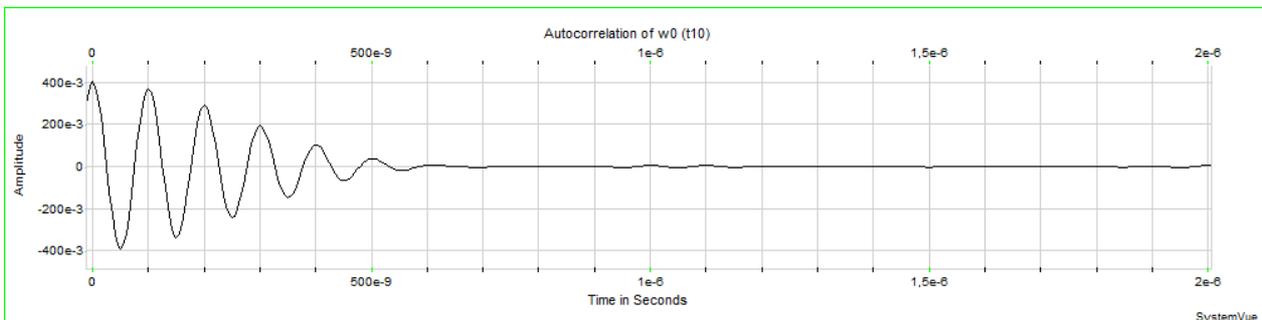


Рис. 28. Автокорреляционная функция ФМК (ПСП)

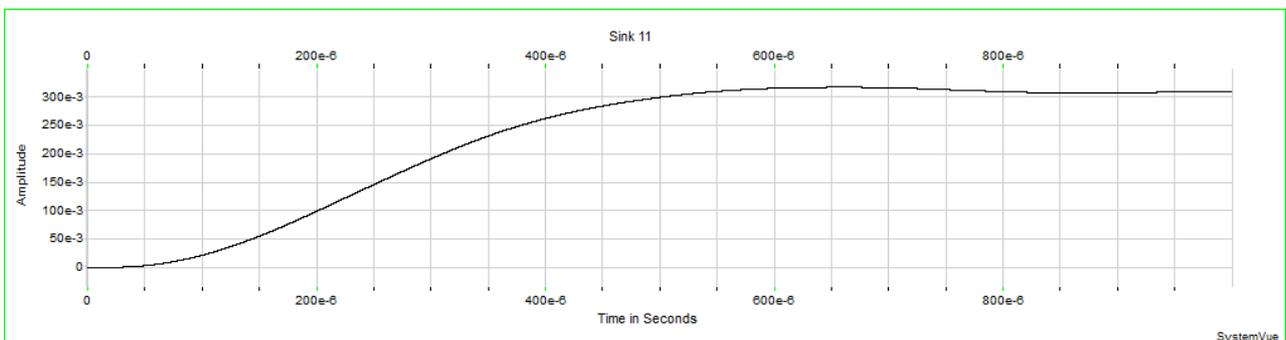


Рис. 29. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-3}$ с

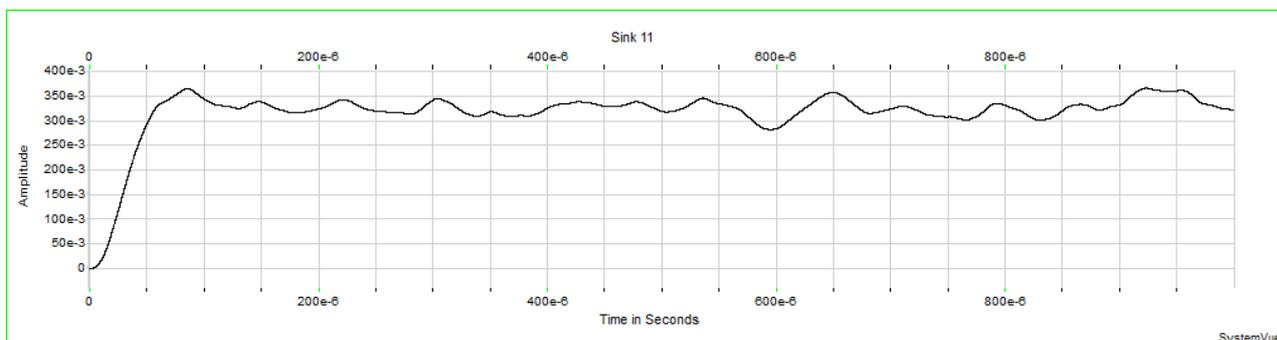


Рис. 30. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-4}$ с

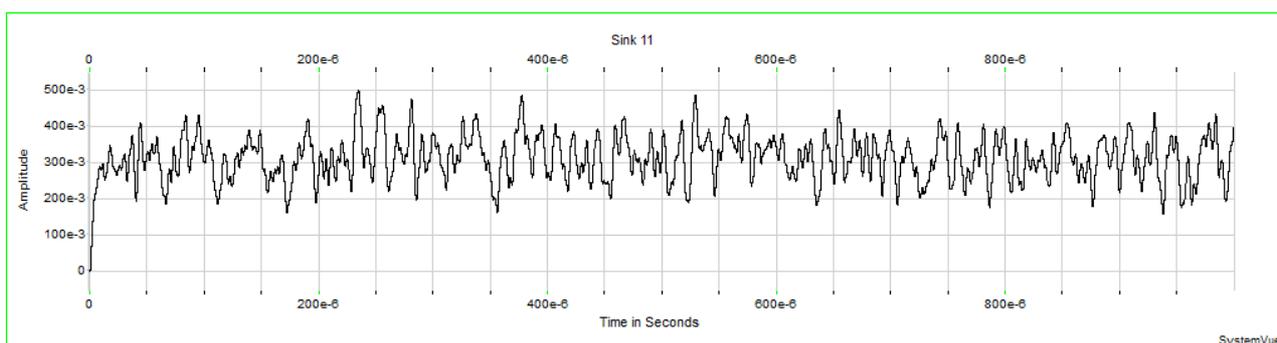


Рис. 31. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-5}$ с

2.1.5. Прохождение шумового сигнала через когерентный обнаружитель

Функциональная схема КО с подключенными генератором шумового сигнала (ШС) и анализаторами данных представлена на рис. 32, где приняты следующие обозначения: ФУ 0, 1 – генератор ШС; ФУ 3 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 4-6 – КО; ФУ 0, 7 – генератор копии ШС; ФУ 8, 9 – анализаторы данных.

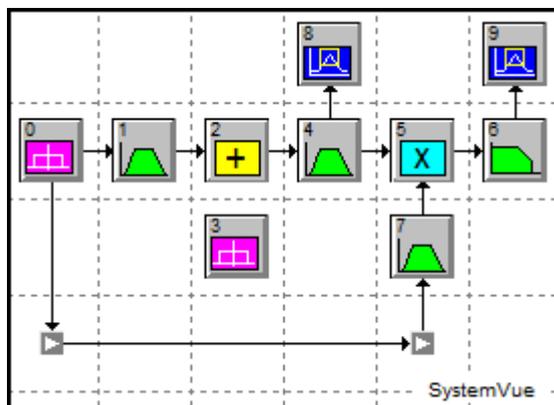


Рис. 32. Функциональная схема когерентного обнаружителя (КО)

Параметры элементов генератора ШС представлены в табл. 8, а параметры элементов КО приводятся в табл. 4.

Таблица 8

Параметры элементов генератора ШС

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
0		Unif Noise	Source/(Noise/PN)	Constant Parameter – Density in 1 Ohm; Density = $N_n = 10 \cdot 10^{-9}$
1, 7		Band Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Bandpass; BP Filter Order = 3; Low Cutoff = $F_H = \Delta f_s - \Delta f_{шс}/2$; Hi Cutoff = $F_B = \Delta f_s + \Delta f_{шс}/2$

На рис. 33–38 представлен пример моделирования прохождения ШС через ФУ КО для $\Delta f_{шс} = 1,5$ МГц и $\Delta f_n = 3$ МГц.

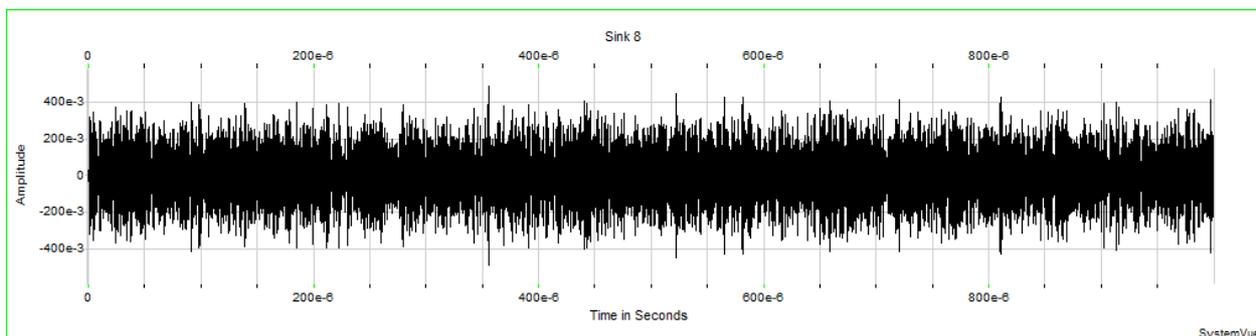


Рис. 33. ШС на входе КО

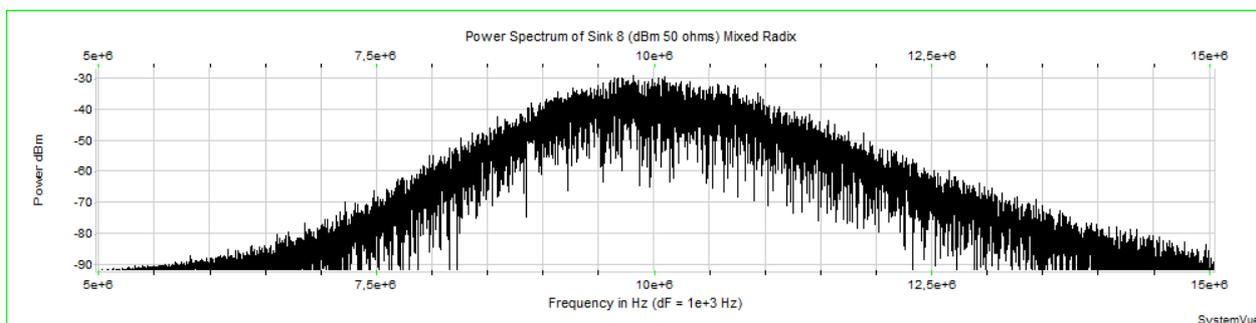


Рис. 34. Спектр мощности ШС

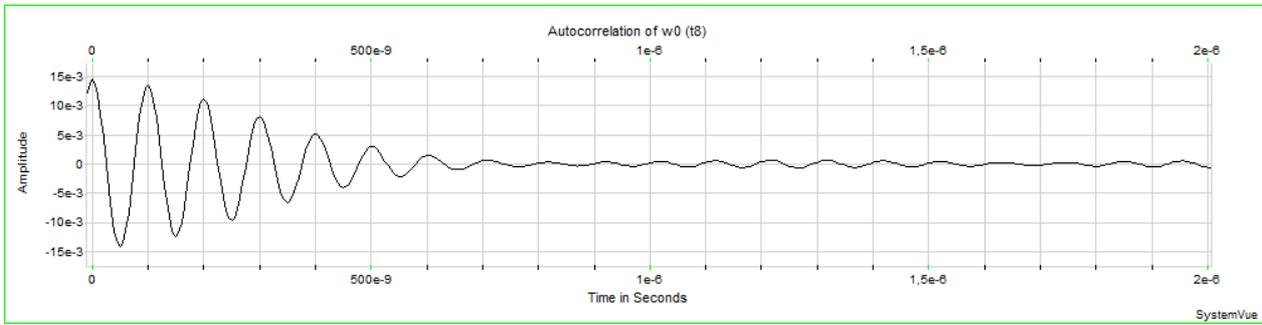
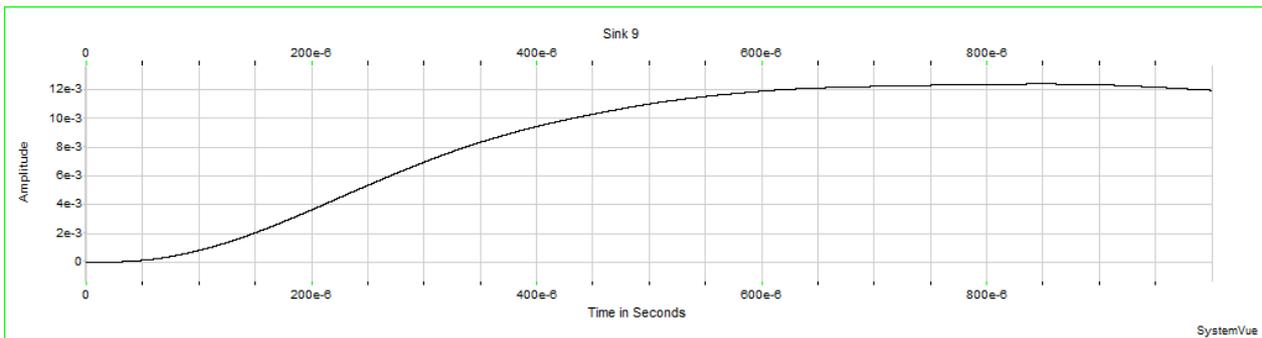
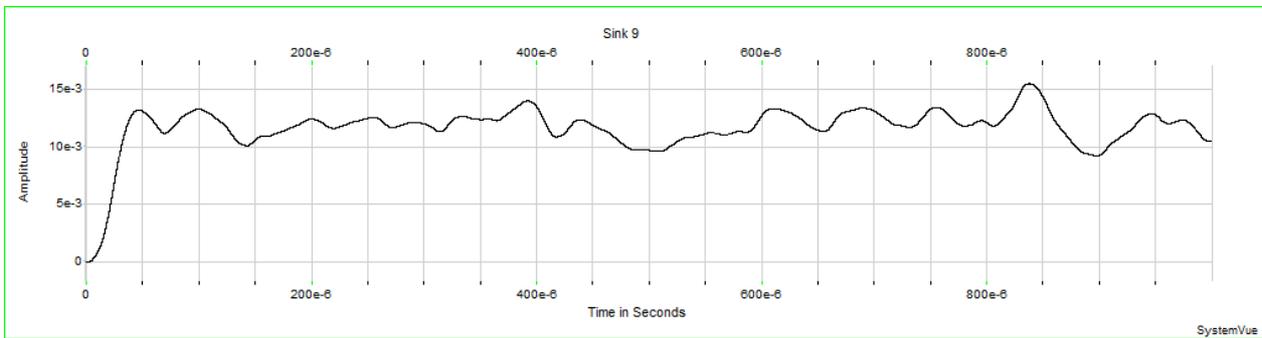
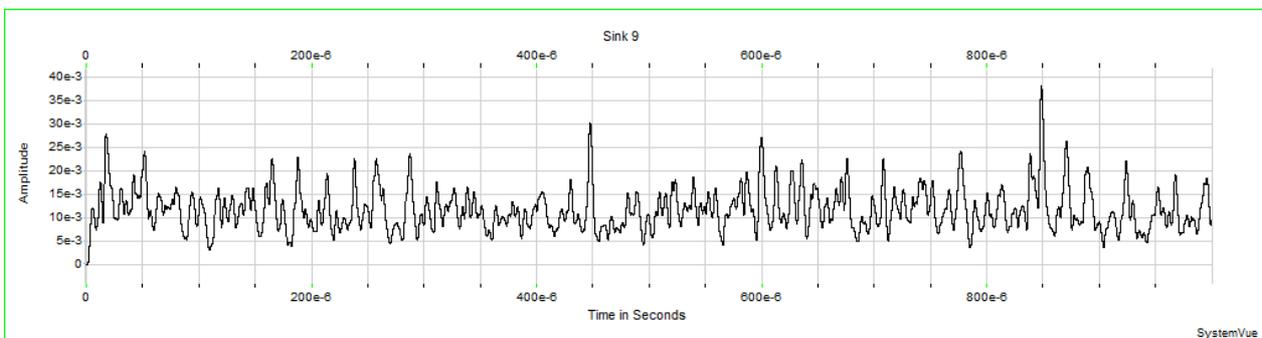


Рис. 35. Автокорреляционная функция ШС

Рис. 36. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-3}$ сРис. 37. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-4}$ сРис. 38. Сигнал на выходе обнаружителя при $T = 1 \cdot 10^{-5}$ с

2.2. Прохождение сигналов через некогерентный обнаружитель

2.2.1. Прохождение простого импульсного сигнала через некогерентный обнаружитель

Функциональная схема через некогерентного обнаружителя (НО) с подключенным генератором ПИС и анализаторами данных представлена на рис. 39, где приведены следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ПИС; ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-15 – НО; ФУ 8 – ГОК; ФУ 16, 17 – анализаторы данных.

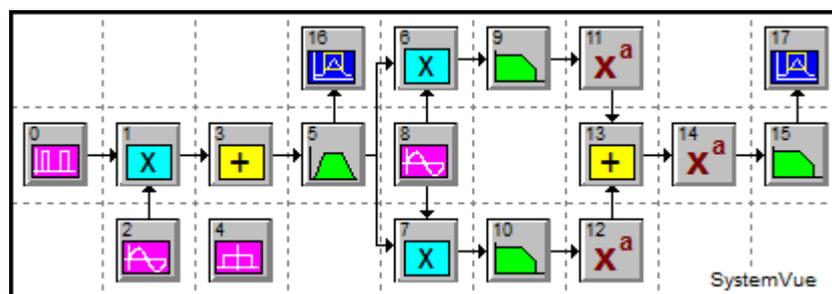


Рис. 39. Функциональная схема НО

Параметры элементов генератора ПИС представлены в табл. 3, а параметры элементов НО приводятся в табл. 9.

Таблица 9

Параметры элементов некогерентного обнаружителя (НО)

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
3, 13		Adder	Adder	
4		Unif Noise	Source/(Noise/PN)	Constant Parameter – Density in 1 Ohm; Density = N_n
5		Band Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Bandpass; BP Filter Order = 3; Low Cutoff = $F_H = f_s - \Delta f_n/2$; Hi Cutoff = $F_B = f_s + \Delta f_n/2$
8		Sinusoid	Source/Periodic	Amplitude = 1; Frequency = f_s
1, 6, 7		Multiplier	Multiplier	

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
9, 10		Low Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Lowpass; No. of Poles = 3; Low Cutoff = $F_B = \Delta f_n/2$
11,12		x^a	Function/Algebraic	Exponent = 2
14		x^a	Function/Algebraic	Exponent = 0,5
15		Low Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Lowpass; No. of Poles = 3; Low Cutoff = $F_B = 1/T$
16,17		Analysis	Sink/Analysis	

При моделировании прохождения ПИС через ФУ НО для $T_n = 500$ мкс и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ПИС через ФУ КО, которые приведены на рис. 6-11.

2.2.2. Прохождение линейно-частотно-модулированного импульса через некогерентный обнаружитель

Функциональная схема НО с подключенными генератором ЛЧМ-импульса и анализаторами данных представлена на рис. 40, где использованы следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ЛЧМ-импульса; ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-15 – НО; ФУ 8 – ГОК; ФУ 16, 17 – анализаторы данных.

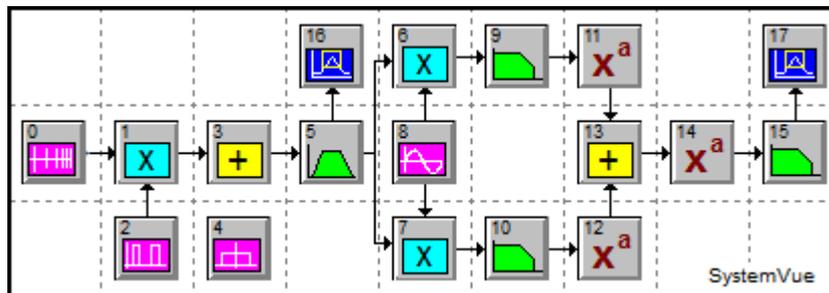


Рис. 40. Функциональная схема НО

Параметры элементов генератора ЛЧМ-импульса представлены в табл. 5, а параметры элементов НО приводятся в табл. 9.

При моделировании прохождения ЛЧМ-импульса через ФУ НО для $T_n = 500$ мкс, $\Delta f_{\text{дев}} = 1,5$ МГц и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты,

полученные при прохождении ЛЧМ-импульса через ФУ КО, которые приведены на рис. 13–18.

2.2.3. Прохождение фазоманипулированной последовательности (меандр) через когерентный обнаружитель

Функциональная схема НО с подключенными генератором ФМК (меандр) и анализаторами данных представлена на рис. 41, где использованы следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ФМК (меандр); ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-15 – НО; ФУ 8 – ГОК; ФУ 16, 17 – анализаторы данных.

Параметры элементов генератора ФМК (меандр) приводятся в табл. 6, а параметры элементов НО приводятся в табл. 9.

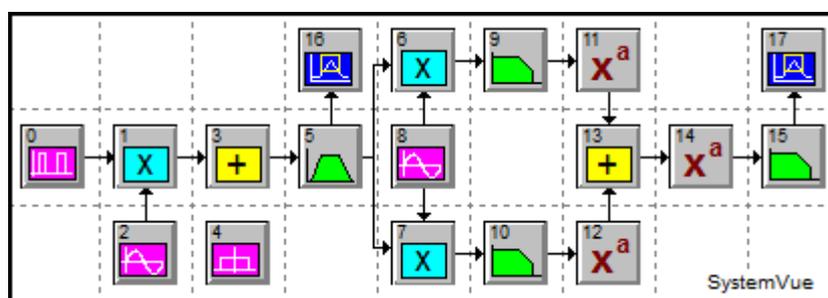


Рис. 41. Функциональная схема НО

При моделировании прохождения ФМК (меандр) через ФУ НО для $T_3 = 0,5$ мкс и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ФМК (меандр) через ФУ КО, которые приведены на рис. 19–24.

2.2.4. Прохождение фазоманипулированной последовательности (ПСП) через когерентный обнаружитель

Функциональная схема НО с подключенным генератором ФМК (ПСП) и анализаторами данных представлена на рис. 42, где использованы следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ФМК (ПСП); ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-15 – НО; ФУ 8 – ГОК; ФУ 16, 17 – анализаторы данных.

Параметры элементов генератора ФМК (ПСП) приводятся в табл. 7, а параметры элементов НО приводятся в табл. 9.

При моделировании прохождения ФМК (ПСП) через ФУ НО для $T_3 = 0,5$ мкс и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ФМК (ПСП) через ФУ КО, которые приведены на рис. 26–31.

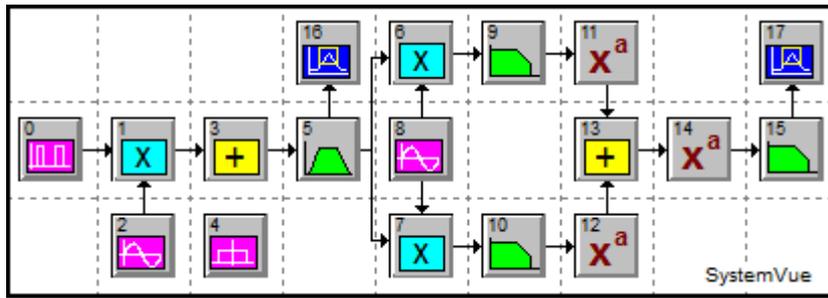


Рис. 42. Функциональная схема НО

2.2.5. Прохождение шумового сигнала через некогерентный обнаружитель

Функциональная схема НО с подключенными генератором ШС и анализаторами данных представлена на рис. 43, где использованы следующие обозначения: ФУ 0, 1 – генератор ШС; ФУ 3 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 4-14 – НО; ФУ 7 – ГОК; ФУ 15, 16 – анализаторы данных.

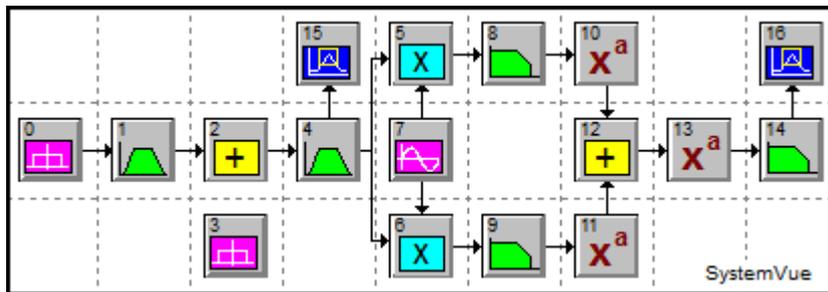


Рис. 43. Функциональная схема НО

Параметры элементов генератора ШС представлены в табл. 8, а параметры элементов НО приводятся в табл. 9.

При моделировании прохождения ШС через ФУ НО для $\Delta f_{\text{шс}} = 1,5$ МГц и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ШС через ФУ КО, которые приведены на рис. 33–38.

2.3. Прохождение сигналов через энергетический обнаружитель

2.3.1. Прохождение простого импульсного сигнала через энергетический обнаружитель

Функциональная схема энергетического обнаружителя (ЭО) с подключенным генератором ПИС и анализаторами данных представлена на рис. 44, где используются следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ПИС; ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-7 – ЭО; ФУ 8, 9 – анализаторы данных.

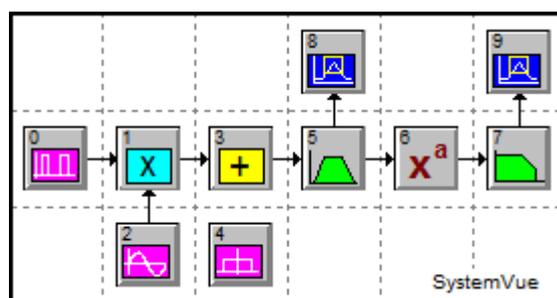


Рис. 44. Функциональная схема энергетического обнаружителя (ЭО)

Параметры элементов генератора ПИС представлены в табл. 3, а параметры элементов ЭО приводятся в табл. 10.

Таблица 10

Параметры элементов энергетического обнаружителя ЭО

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
3		Adder	Adder	
4		Unif Noise Source	(Noise/PN)	Constant Parameter – Density in 1 Ohm; Density = N_n
5		Band Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Bandpass; BP Filter Order = 3; Low Cutoff = $F_n = f_s - \Delta f_n/2$; Hi Cutoff = $F_b = f_s + \Delta f_n/2$
6		x^a	Function/Algebraic	Exponent = 2
7		Low Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Lowpass; No. of Poles = 3; Low Cutoff = $F_b = 1/T$
8, 9		Analysis	Sink/Analysis	

При моделировании прохождения ПИС через ФУ ЭО для $T_n = 500$ мкс и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ПИС через ФУ КО, которые приведены на рис. 6–11.

2.3.2. Прохождение линейно-частотно-модулированного импульса через энергетический обнаружитель

Функциональная схема ЭО с подключенными генератором ЛЧМ-импульса и анализаторами данных представлена на рис. 45, где использованы следующие

обозначения: ФУ 0-2 – генератор ЛЧМ-импульса; ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-7 – ЭО; ФУ 8, 9 – анализаторы данных.

Параметры элементов генератора ЛЧМ-импульса представлены в табл. 5, а параметры элементов ЭО приводятся в табл. 10.

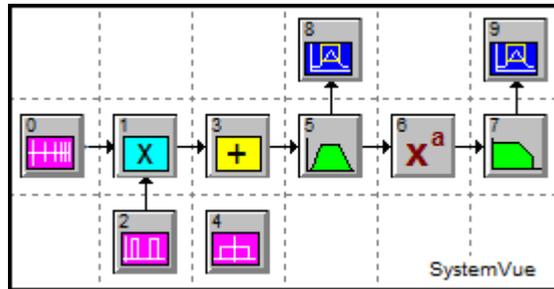


Рис. 45. Функциональная схема ЭО

При моделировании прохождения ЛЧМ через ФУ ЭО для $T_n = 500$ мкс, $\Delta f_{\text{дев}} = 1,5$ МГц и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ЛЧМ через ФУ КО, которые приведены на рис. 13–18.

2.3.3. Прохождение фазоманипулированной последовательности (меандр) через энергетический обнаружитель

Функциональная схема ЭО с подключенными генератором ФМК (меандр) и анализаторами данных представлена на рис. 46, где используются следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ФМК (меандр); ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-7 – ЭО; ФУ 8, 9 – анализаторы данных.

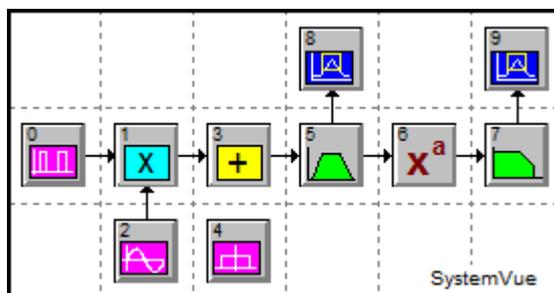


Рис. 46. Функциональная схема ЭО

Параметры элементов генератора ФМК (меандр) представлены в табл. 6, а параметры элементов ЭО приводятся в табл. 10.

При моделировании прохождения ФМК (меандр) через ФУ ЭО для $T_3 = 0,5$ мкс и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ФМК (меандр) через ФУ КО, которые приведены на рис. 19–24.

2.3.4. Прохождение фазоманипулированного сигнала (ПСП) через энергетический обнаружитель

Функциональная схема ЭО с подключенными генератором ФМК (ПСП) и анализаторами данных представлена на рис. 47, где используются следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ФМК (ПСП); ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-7 – ЭО; ФУ 8, 9 – анализаторы данных.

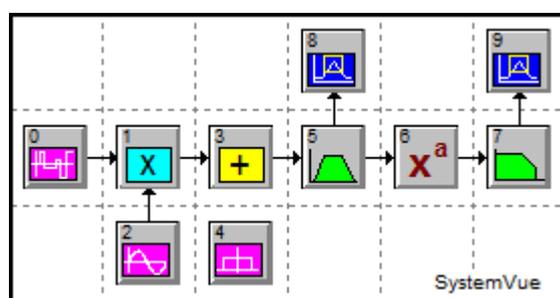


Рис. 47. Функциональная схема ЭО

Параметры элементов генератора ФМК (ПСП) представлены в табл. 7, а параметры элементов ЭО приводятся в табл. 10.

При моделировании прохождения ФМК (ПСП) через ФУ ЭО для $T_3 = 0,5$ мкс и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ФМК (ПСП) через ФУ КО, которые приведены на рис. 26–31.

2.3.5. Прохождение шумового сигнала через энергетический обнаружитель

Функциональная схема ЭО с подключенными генератором ШС и анализаторами данных представлена на рис. 48, где приняты следующие обозначения: ФУ 0, 1 – генератор ШС; ФУ 3 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 4-6 – ЭО; ФУ 7, 8 – анализаторы данных.

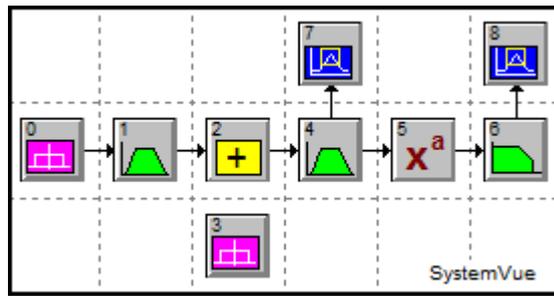


Рис. 48. Функциональная схема ЭО

Параметры элементов генератора ШС представлены в табл. 8, а параметры элементов ЭО приводятся в табл. 10.

При моделировании прохождения ШС через ФУ ЭО для $\Delta f_{шс} = 1,5$ МГц и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ШС через ФУ КО, которые приведены на рис. 33–38.

2.4. Прохождение сигналов через автокорреляционный обнаружитель

2.4.1. Прохождение простого импульсного сигнала через автокорреляционный обнаружитель

Функциональная схема автокорреляционного обнаружителя (АО) с подключенными генератором ПИС и анализаторами данных представлена на рис. 49, где используются следующие обозначения: ФУ 0-2 – генератор ПИС; ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-9 – АО; ФУ 10, 11 – анализаторы данных.

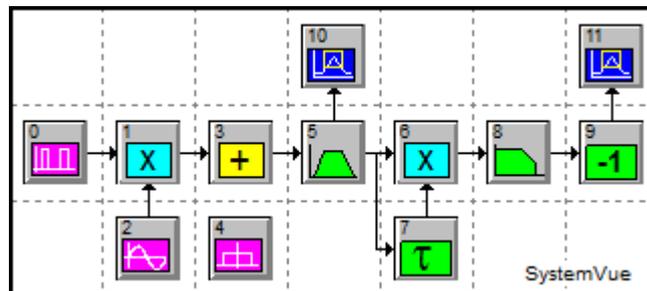


Рис. 49. Функциональная схема автокорреляционного обнаружителя (АО)

Параметры элементов генератора ПИС представлены в табл. 3, а параметры элементов АО приводятся в табл. 11.

Параметры элементов автокорреляционного обнаружителя (АО)

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
3		Adder	Adder	
4		Unif Noise	Source/(Noise/PN)	Constant Parameter – Density in 1 Ohm; Density = N_n
5		Band Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Bandpass; BP Filter Order = 3; Low Cutoff = $F_n = f_s - \Delta f_n/2$; Hi Cutoff = $F_b = f_s + \Delta f_n/2$
6		Multiplier	Multiplier	
7		Delay	Operator/ Delays	Delay Type – Non-Interpolating; Delay = $\tau_{лз} = 1/\Delta f_n$
8		Low Pass	Operator/Linear Sys Filters	Filter Type – Bessel; Filter Pass-Band – Lowpass; No. of Poles = 3; Low Cutoff = $F_b = 1/T$
9		Negate	Operator/(Gain/Scale)	
10,11		Analysis	Sink/Analysis	

При моделировании прохождения ПИС через ФУ АО для $T_n = 500$ мкс и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ПИС через ФУ КО, которые приведены на рис. 6–11.

2.4.2. Прохождение линейно-частотно-модулированного импульса через автокорреляционный обнаружитель

Функциональная схема АО с подключенными генератором ЛЧМ-импульса и анализаторами данных представлена на рис. 50, где ФУ 0-2 – генератор ЛЧМ-импульса; ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-9 – КО; ФУ 10, 11 – анализаторы данных.

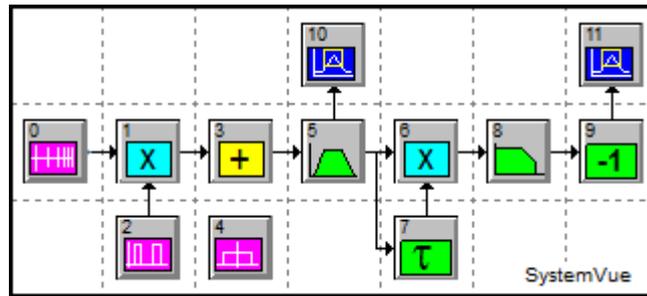


Рис. 50. Функциональная схема АО

Параметры элементов генератора ЛЧМ-импульса представлены в табл. 5, а параметры элементов АО приводятся в табл. 11.

При моделировании прохождения ЛЧМ через ФУ АО для $T_{\text{и}} = 500$ мкс, $\Delta f_{\text{дев}} = 1,5$ МГц и $\Delta f_{\text{н}} = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ЛЧМ через ФУ КО, которые приведены на рис. 13–18.

2.4.3. Прохождение фазоманипулированной последовательности (меандр) через автокорреляционный обнаружитель

Функциональная схема АО с подключенными генератором ФМК (меандр) и анализаторами данных представлена на рис. 51, где ФУ 0-2 – генератор ФМК (меандр); ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-9 – АО; ФУ 10, 11 – анализаторы данных.

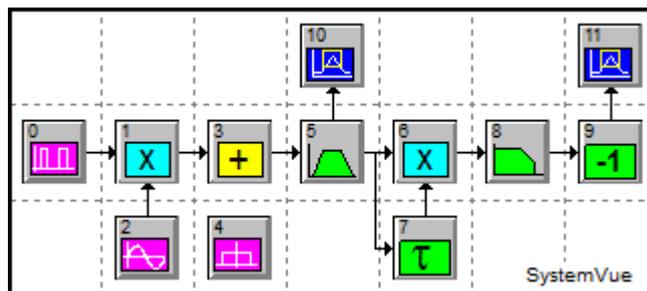


Рис. 51. Функциональная схема АО

Параметры элементов генератора ФМК (меандр) представлены в табл. 6, а параметры элементов АО приводятся в табл. 11.

При моделировании прохождения ФМК (меандр) через ФУ АО для $T_{\text{э}} = 0,5$ мкс и $\Delta f_{\text{н}} = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ФМК (меандр) через ФУ КО, которые приведены на рис. 19–24.

2.4.4. Прохождение фазоманипулированного сигнала (ПСП) через автокорреляционный обнаружитель

Функциональная схема АО с подключенным генератором ФМК (ПСП) и анализаторами данных представлена на рис. 52, где ФУ 0-2 – генератор ФМК (ПСП); ФУ 4 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 5-9 – АО; ФУ 10, 11 – анализаторы данных.

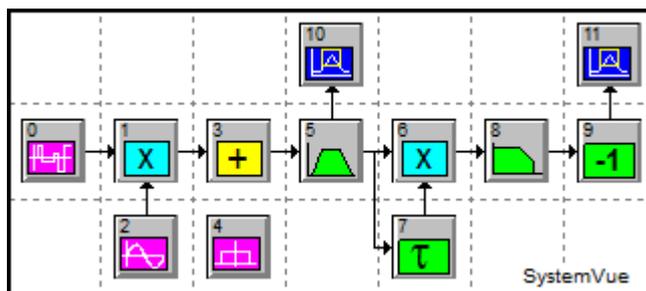


Рис. 52. Функциональная схема АО

Параметры элементов генератора ФМК (ПСП) представлены в табл. 7, а параметры элементов АО приводятся в табл. 11.

При моделировании прохождения ФМК (ПСП) через ФУ АО для $T_s = 0,5$ мкс и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ФМК (ПСП) через ФУ КО, которые приведены на рис. 26–31.

2.4.5. Прохождение шумового сигнала через энергетический обнаружитель

Функциональная схема АО с подключенным генератором ШС и анализаторами данных представлена на рис. 53, где ФУ 0, 1 – генератор ШС; ФУ 3 – ГП (на первом этапе не подключается); ФУ 4-8 – АО; ФУ 9, 10 – анализаторы данных.

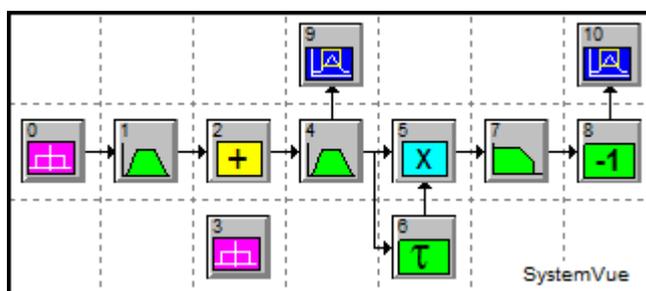


Рис. 53. Функциональная схема АО

Параметры элементов генератора ШС представлены в табл. 8, а параметры элементов АО приводятся в табл. 11.

При моделировании прохождения ШС через ФУ АО для $\Delta f_{\text{шс}} = 1,5$ МГц и $\Delta f_n = 3$ МГц получаются идентичные результаты, полученные при прохождении ШС через ФУ КО, которые приведены на рис. 33–38.

3. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ЛОЖНОЙ ТРЕВОГИ ОТ ПОРОГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ $P_{\text{лт}} = f(U_{\text{пор}})$

Для выполнения этого задания приняты исходные условия, одинаковые для всех вариантов:

1. Генератор сигнала ко входу схемы *не подключается*.
2. Несущая частота сигнала и средняя частота помехи $f_s = f_n = 10$ МГц.
3. Ширина спектра помехи $\Delta f_n = 4$ МГц.
4. Спектральная плотность мощности помехи $N_n = 10^{-9}$ Вт/Гц.
5. Ширина спектра ШС $\Delta f_{\text{шс}} = 2$ МГц.
6. Девиация частоты ЛЧМ-импульса $\Delta f_{\text{дев}} = 2$ МГц.
7. Длительность задержки в АО $\tau_{\text{лз}} = 1/\Delta f_n$.
8. Длительность импульса $T_{\text{и}} = 10^{-3}$ с (для ПИС и ЛЧМ).
9. Длительность элемента $T_{\text{э}} = 10^{-6}$ с (для ФМК).
10. Постоянная интегрирования обнаружителя $T = 10^{-5}$ с.
11. Время моделирования $T_{\text{м}} = 100 \cdot 10^{-3}$ с.
12. Частота дискретизации $F_{\text{д}} = 200$ МГц.

На этом этапе необходимо провести анализ помехоустойчивости обнаружителя и экспериментальным способом снять зависимость вероятности ложных тревог (ЛТ) от порогового напряжения $P_{\text{лт}} = f(U_{\text{пор}})$, а также определить значение порогового напряжения $U_{\text{пор}}$, при котором вероятность ложной тревоги $P_{\text{лт}} \approx 10^{-4}$. Вероятность ложной тревоги необходимо рассчитывать по следующей формуле:

$$P_{\text{лт}} = \frac{N_{\text{сч}}}{N_{\text{общ}}}; N_{\text{общ}} = \frac{T_{\text{м}}}{T},$$
 где $N_{\text{сч}}$ – количество посчитанных шумовых выбросов, превысивших пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$; $N_{\text{общ}}$ – общее количество шумовых выбросов на выходе обнаружителя.

Таким образом, для того чтобы вероятность ложной тревоги была $P_{\text{лт}} = 10^{-4}$, необходимо, чтобы $N_{\text{общ}} = 10^4$; $N_{\text{сч}} = 1$ и $T_{\text{м}} = 10^{-1}$ с.

Рассмотрим пример анализа зависимости вероятности ЛТ от порогового напряжения $P_{\text{лт}} = f(U_{\text{пор}})$ для некогерентного обнаружителя.

Функциональная схема НО с подключенным пороговым устройством (ПУ), счетчиком и анализаторами данных представлена на рис. 54, где ФУ 0 – ГП; ФУ 2-12 – НО; ФУ 13, 14 – ПУ; ФУ 15, 16 – счетчик шумовых выбросов; ФУ 17-19 – устройства взятия выборок; ФУ 20-23 – анализаторы данных.

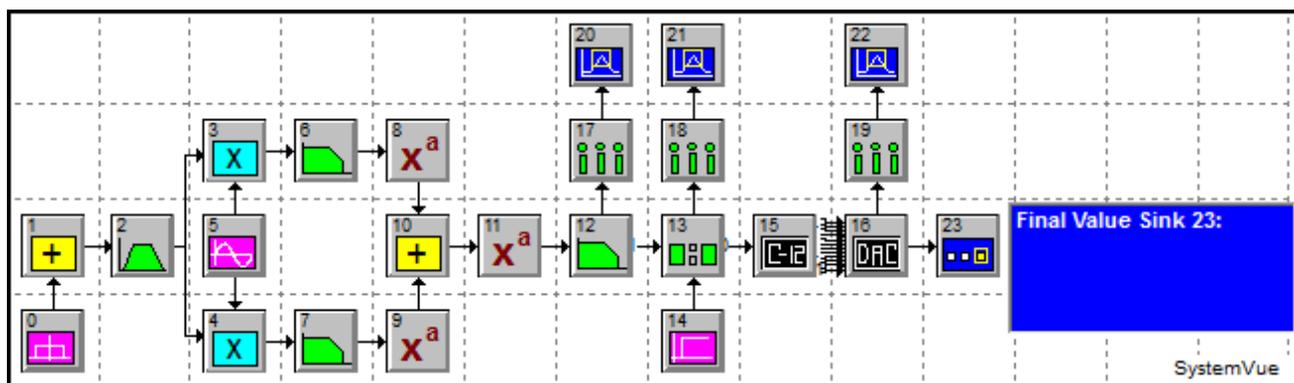


Рис. 54. Функциональная схема НО

Генератор сигнала не подключается к обнаружителю, так как при анализе вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$ подсчитываются только шумовые выбросы на выходе обнаружителя. Счетчик (ФУ15) 12-разрядный, поэтому максимальное отображаемое им число $2^{12} - 1 = 4095$ (в двоичном коде 1111 1111 1111, т.е. на всех 12-ти выходах будет напряжение логической единицы), при дальнейшем счете счетчик сбрасывается в 0 (в двоичном коде 0000 0000 0000, т.е. на всех 12-ти выходах будет напряжение логического нуля) и цикл счета повторяется. Чтобы преобразовать числа, выдаваемые счетчиком (ФУ15) из двоичной системы счисления в десятичную, в функциональной схеме используется цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) (ФУ16). Устройства взятия выборок (ФУ17–19) необходимы, чтобы уменьшать количество отображаемых отсчетов анализаторами данных (ФУ20–22), так как при увеличении времени моделирования до $T_{\text{м}} = 100 \cdot 10^{-3}$ с, увеличивается количество моделируемых отсчетов, что может привести к переполнению памяти компьютера и возникновению ошибки.

Параметры элементов НО представлены в табл. 9, а параметры элементов, необходимых для выполнения анализа зависимости $P_{\text{лт}} = f(U_{\text{пор}})$, приводятся в табл. 12.

Параметры элементов для выполнения анализа зависимости $P_{\text{ЛТ}} = f(U_{\text{пор}})$

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
13		Compare	Operator/Logic	Select Comparison – a > b; True Output = 1; False Output = 0
14		Step Fct	Source/Aperiodic	Amplitude = $U_{\text{пор}}$
15		Cntr-12	Logic/Counters	
16		DAC	Logic/Mixed Signal	Select Input Format – Unsigned Integer; No. Bits = 12; Min Output = 0; Max Output = 4095
17, 18, 19		Sampler	Operator/(Sample/Hold)	Sample Rate = 1e+6
20, 21, 22		Analysis	Sink/Analysis	
23		Final Value	Sink/Numeric	

Для проведения анализа вероятности ЛТ $P_{\text{ЛТ}}$ зафиксируем вначале математическое ожидание (МО) $m_{\text{шн}}$ и среднеквадратичное отклонение (СКО) $\sigma_{\text{шн}}$ шума на выходе обнаружителя. Полученный шум на выходе обнаружителя приводится на рис. 55.

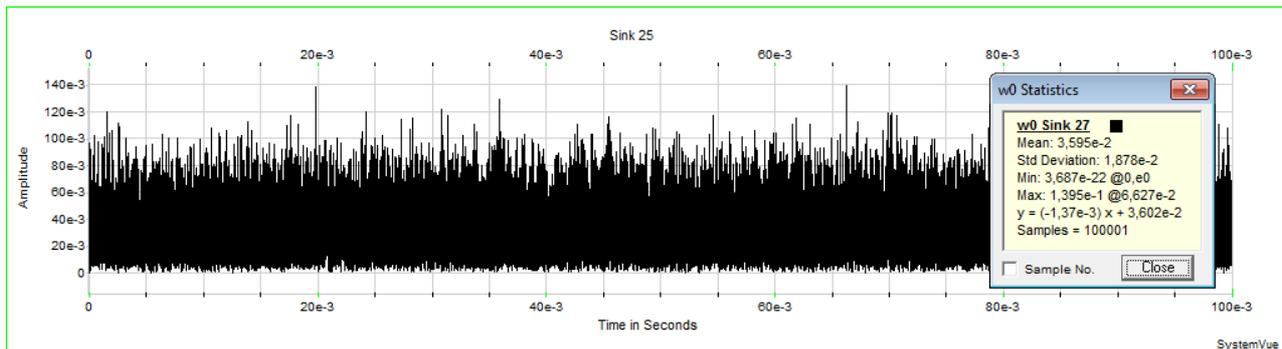


Рис. 55. Шум на выходе обнаружителя

Как видно из рис. 55, МО (Mean) шума $m_{\text{шн}} = 35,95$ мВ, а СКО (Std Deviation) $\sigma_{\text{шн}} = 18,78$ мВ.

Теперь можем установить начальное пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$ в генераторе постоянного напряжения (ФУ14), используя следующее выражение:

$$U_{\text{пор}} > m_{\text{шн}} + \sigma_{\text{шн}} = 35,95 \cdot 10^{-3} + 18,78 \cdot 10^{-3} = 54,73 \cdot 10^{-3} \text{ В,}$$

округляя до большего, получаем

$$U_{\text{пор}} = 55 \text{ мВ.}$$

После установки порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ в генераторе постоянного напряжения (ФУ14), можем провести моделирование. Полученные результаты моделирования представлены на рис. 56 – 59.

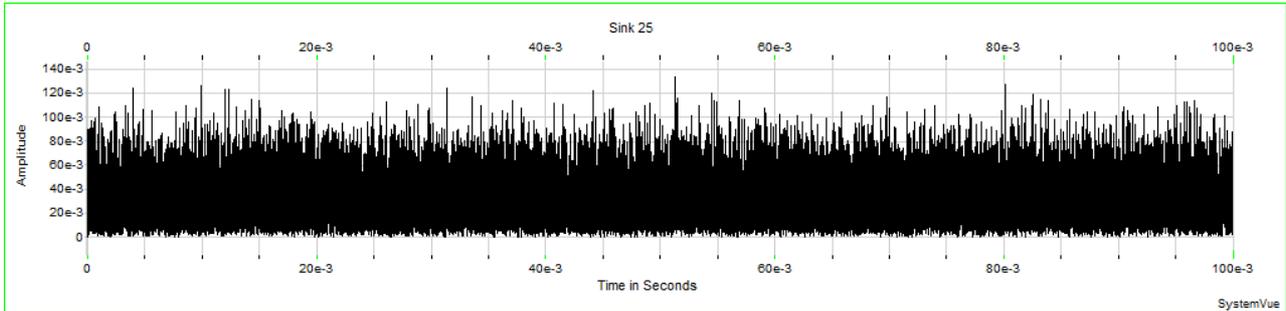


Рис. 56. Шум на выходе обнаружителя

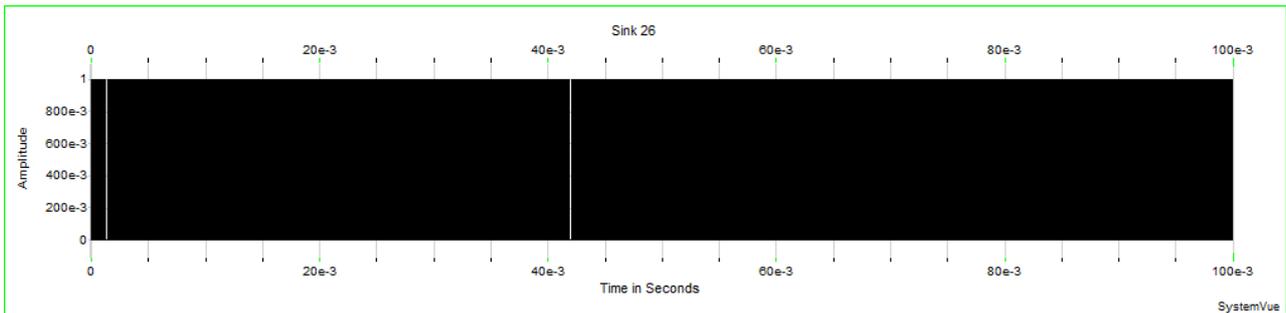


Рис. 57. Импульсы на выходе ПУ

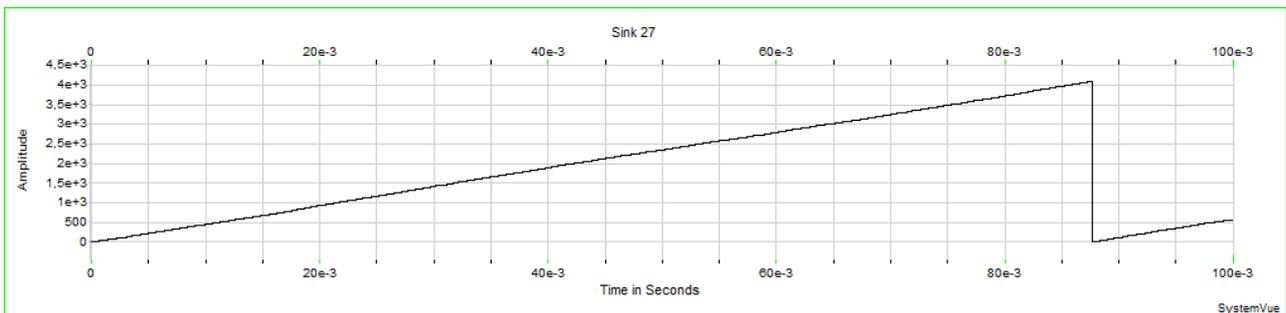


Рис. 58. Сигнал на выходе ЦАП

Final Value Sink 28:		
Loop N	Time	Value
1	20000001	100,000000000000e-3 5,7100000000000e+2

Рис. 59. Показания анализатора конечного значения

Как видно из рис. 58, 12-разрядный счетчик досчитал до значения 4095, после чего начал заново счет с нуля и, согласно рис. 59, досчитал еще до числа 571. Таким образом, общее количество посчитанных шумовых выбросов определяется как:

$$N_{\text{сч}} = 4095 + 571 - 1 = 4665.$$

Так как начальное состояние счетчика равно 1 (в двоичном коде 0000 0000 0001), то при расчете общего количества посчитанных шумовых выбросов $N_{\text{сч}}$ необходимо вычитать единицу.

Используя полученные данные, можем определить вероятность ЛТ $P_{\text{ЛТ}}$ при начальном пороговом напряжении $U_{\text{пор}} = 55$ мВ:

$$P_{\text{ЛТ}} = \frac{N_{\text{сч}}}{N_{\text{общ}}} = \frac{4665}{10000} = 0,46.$$

Для построения зависимости $P_{\text{ЛТ}} = f(U_{\text{пор}})$ необходимо иметь на графике не менее **пяти** точек.

Поэтому на следующем шаге увеличим пороговое напряжение до значения $U_{\text{пор}} = 75$ мВ. Полученные результаты моделирования приводятся на рис. 60–63.

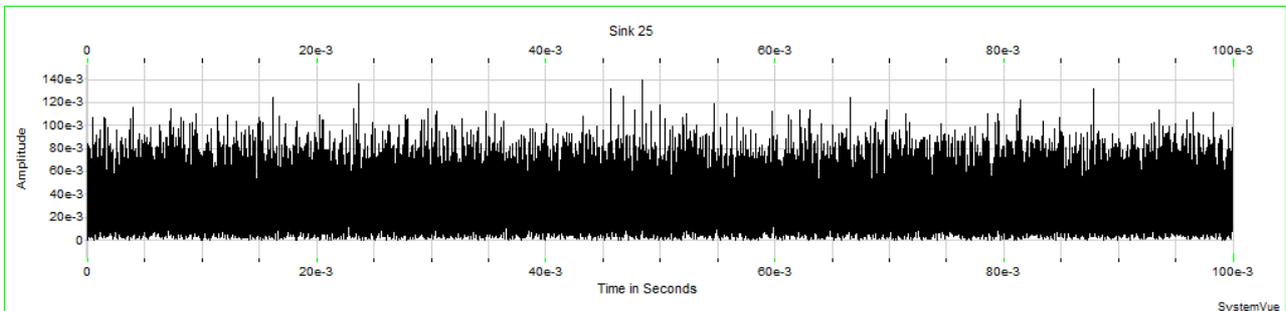


Рис. 60. Шум на выходе обнаружителя

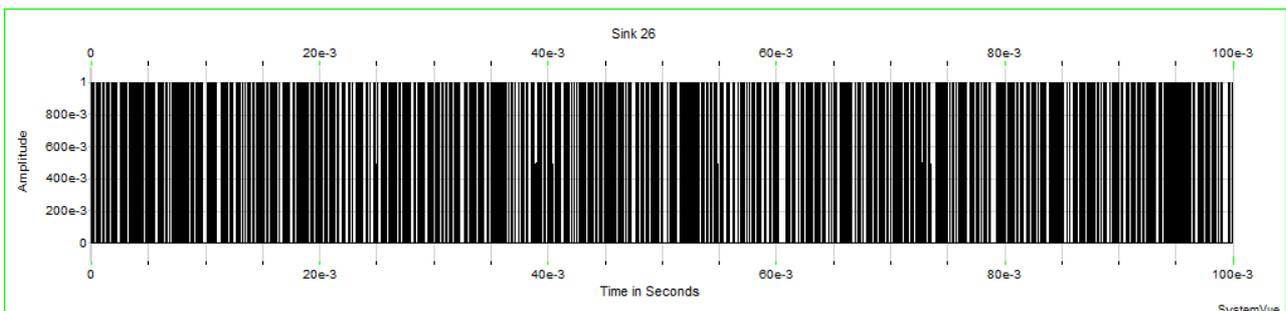


Рис. 61. Импульсы на выходе ПУ

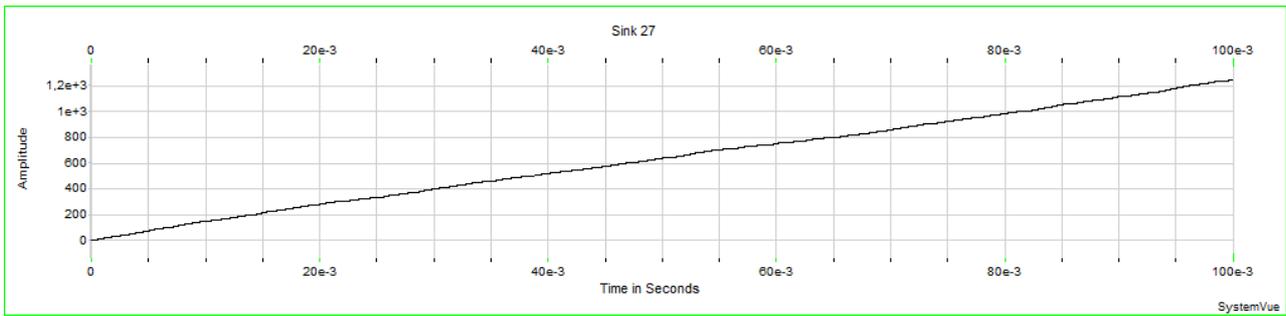


Рис. 62. Сигнал на выходе ЦАП

```
Final Value Sink 28:
Loop #   Time                               Value
1       200000001 100,000000000000e-3 1,24700000000000e+3
```

Рис. 63. Показания анализатора конечного значения

Как видно из рис. 61 и рис. 62, после увеличения порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ количество шумовых выбросов существенно уменьшилось и поэтому у счетчика не произошло сброса в ноль и, согласно рис. 63, он досчитал до числа 1247. Таким образом, общее количество посчитанных шумовых выбросов $N_{\text{сч}} = 1247 - 1 = 1246$.

Используя полученные данные, определим вероятность ЛТ $P_{\text{лт}}$ при пороговом напряжении $U_{\text{пор}} = 75$ мВ:

$$P_{\text{лт}} = \frac{N_{\text{сч}}}{N_{\text{общ}}} = \frac{1246}{10000} = 0,12.$$

Остальные результаты моделирования приводятся в табл. 13.

Таблица 13

Результаты анализа вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$

$U_{\text{пор}}$, мВ	$N_{\text{общ}}$	$N_{\text{сч}} - 1$	$P_{\text{лт}}$
55	10000	4665	$4,66 \cdot 10^{-1}$
75		1246	$1,24 \cdot 10^{-1}$
95		214	$2,14 \cdot 10^{-2}$
115		17	$1,7 \cdot 10^{-3}$
136		1	10^{-4}

Для корректной оценки полученных результатов, на одном графике необходимо построить теоретическую и практическую зависимости вероятности ЛТ от порогового напряжения $P_{\text{ЛТ}} = f(U_{\text{пор}})$.

Теоретическая зависимость вероятности ЛТ от порогового напряжения определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{ЛТ}} = e^{-\frac{g_{\text{пор}}^2}{2}}; \quad g_{\text{пор}} = \frac{U_{\text{пор}} - m_{\text{нн}}}{\sqrt{K_{\text{п}} \sigma_{\text{нн}}}},$$

где $g_{\text{пор}}$ – нормированный порог; $K_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности, учитывающий свойства нелинейного элемента (для ЭО и НО $K_{\text{п}} = 2$ для КО и АО $K_{\text{п}} = 1$).

Используя полученные результаты, построим теоретическую $P_{\text{ЛТ1}} = f(U_{\text{пор}})$ и экспериментальную $P_{\text{ЛТ2}} = f(U_{\text{пор}})$ зависимости вероятности ЛТ от порогового напряжения. Полученные зависимости $P_{\text{ЛТ1,2}} = f(U_{\text{пор}})$ представлены на рис. 64.

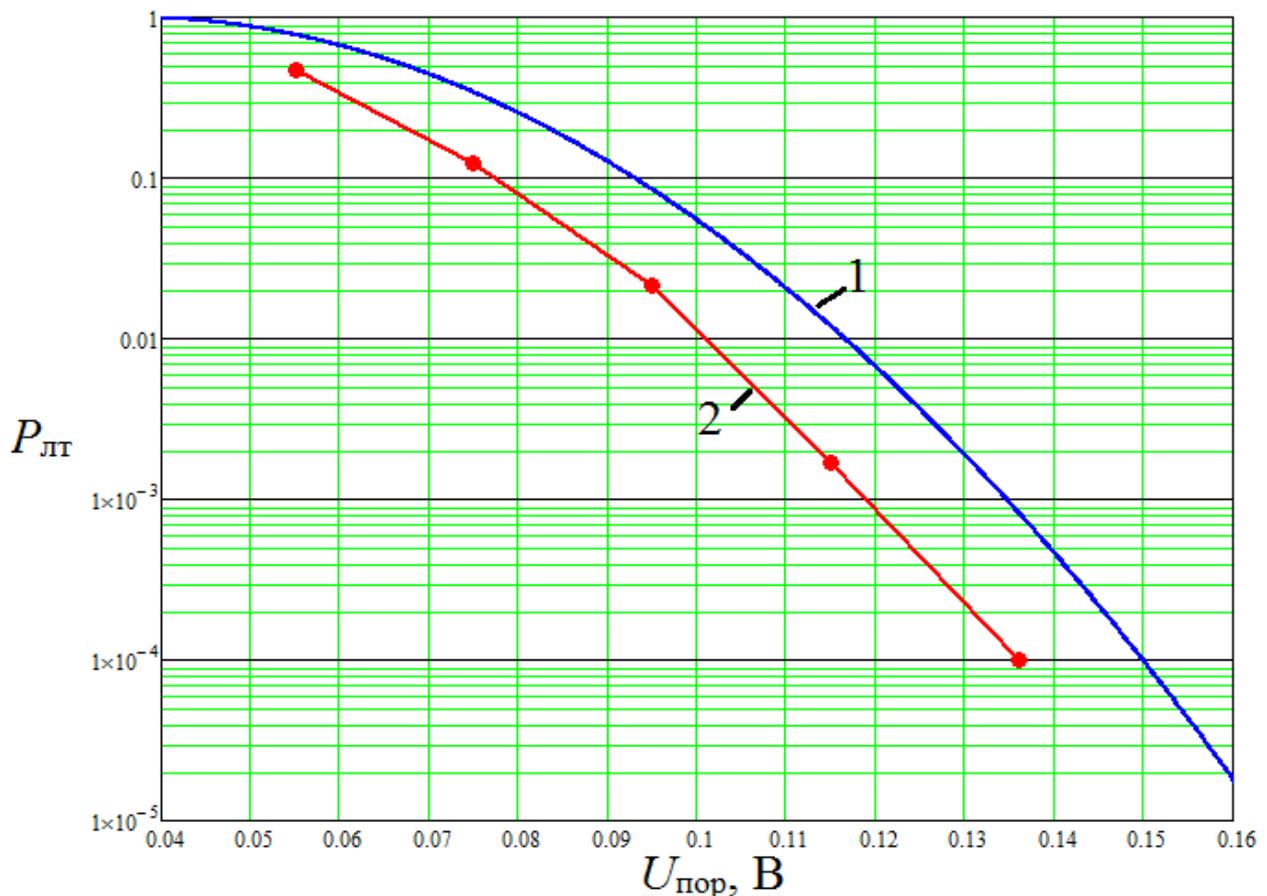


Рис. 64. Зависимости вероятности ЛТ от порогового напряжения

$$1 - P_{\text{ЛТ1}} = f(U_{\text{пор}}); \quad 2 - P_{\text{ЛТ2}} = f(U_{\text{пор}})$$

Таким образом, как видно из рис. 64, полученная экспериментальная зависимость $P_{лт2} = f(U_{пор})$ имеет допустимые отклонения от ожидаемой теоретической зависимости $P_{лт1} = f(U_{пор})$ и для достижения вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-4}$ необходимо, чтобы пороговое напряжение было $U_{пор} = 136$ мВ.

4. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНОГО ОСШ ОТ ВХОДНОГО ОСШ $g_{вых} = f(g_{вх})$

Для выполнения этого задания приняты исходные условия, одинаковые для всех вариантов:

1. Вместо генератора сигнала подключается генератор гармонического колебания с частотой $f_s = 10$ МГц.
2. Несущая частота сигнала и средняя частота помехи $f_s = f_n = 10$ МГц.
3. Ширина спектра помехи $\Delta f_n = 4$ МГц.
4. Ширина спектра ШС $\Delta f_{шс} = 2$ МГц.
5. Девиация частоты ЛЧМ-импульса $\Delta f_{дсв} = 2$ МГц.
6. Длительность задержки в АО $\tau_{лз} = 1/\Delta f_n$.
7. Длительность импульса $T_{и} = 10^{-3}$ с (для ПИС и ЛЧМ).
8. Длительность элемента $T_э = 10^{-6}$ с (для ФМК).
9. Постоянная интегрирования обнаружителя $T = 10^{-5}$ с.
10. Время моделирования $T_m = 100 \cdot 10^{-3}$ с.
11. Частота дискретизации $F_d = 200$ МГц.

На этом этапе анализа помехоустойчивости обнаружителя, необходимо экспериментальным способом снять зависимость выходного ОСШ от входного ОСШ $g_{вых} = f(g_{вх})$.

Рассмотрим пример анализа зависимости выходного ОСШ от входного ОСШ $g_{вых} = f(g_{вх})$ для некогерентного обнаружителя.

Функциональная схема НО с подключенным генератором гармонического колебания и анализаторами данных представлена на рис. 65, где ФУ 0 – генератор гармонического колебания; ФУ 2 – ГП; ФУ 3–13 – НО; ФУ 14, 15 – анализаторы данных.

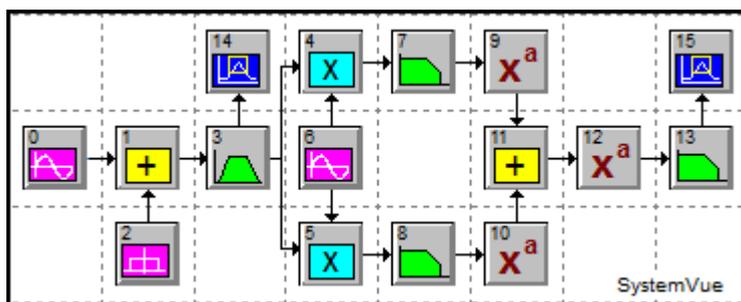


Рис. 65. Функциональная схема НО

Для того чтобы упростить проведение данного анализа, на вход обнаружителя подается простой гармонический сигнал с частотой $f_s = 10$ МГц.

Параметры элементов НО представлены в табл. 9, а параметры генератора гармонического колебания, необходимого для выполнения анализа зависимости $g_{\text{вых}} = f(g_{\text{вх}})$, приводятся в табл. 14.

Практическое значение выходного отношения сигнал/шум определяется из следующего соотношения:

$$g_{\text{вых}} = \frac{m_{\text{сн}} - m_{\text{нн}}}{\sqrt{\sigma_{\text{сн}}^2 + \sigma_{\text{нн}}^2}},$$

где $m_{\text{сн}}$ – МО выходного эффекта при воздействии на обнаружитель сигнала и помехи; $m_{\text{нн}}$ – МО выходного эффекта при воздействии на обнаружитель только помехи; $\sigma_{\text{сн}}$ – СКО выходного эффекта при воздействии на обнаружитель сигнала и помехи; $\sigma_{\text{нн}}$ – СКО выходного эффекта при воздействии на обнаружитель только помехи.

Таблица 14

Параметры генератора для выполнения анализа зависимости $g_{\text{вых}} = f(g_{\text{вх}})$

№	Элемент	Имя	Раздел библиотеки	Параметры
0		Sinusoid	Source/Periodic	Amplitude = U_m ; Frequency = f_s

Для получения необходимых статистических сведений ($m_{\text{сн}}$, $\sigma_{\text{сн}}$, $m_{\text{нн}}$, $\sigma_{\text{нн}}$) в моделирующем стенде, представленном на рис. 65, вначале устанавливается СКО помехи $\sigma_n = 1$ В на выходе ПФ (ФУЗ) путем подачи на вход обнаружителя только шумового процесса от ГП (ФУ2).

Для того чтобы СКО помехи на выходе ПФ (ФУ3) было $\sigma_n = 1$ В, необходимо установить в ГП (ФУ2) спектральную плотность мощности N_n на нагрузке 1 Ом, в соответствии со следующим выражением:

$$N_n = \frac{\sigma_n^2}{\Delta f_n}.$$

Подставляя все значения в формулу, получаем

$$N_n = \frac{\sigma_n^2}{\Delta f_n} = \frac{1^2}{4 \cdot 10^6} = 250 \cdot 10^{-9} \text{ Вт/Гц}.$$

После чего на функциональной схеме отключим генератор гармонического сигнала (ФУ0), чтобы установить значение СКО помехи $\sigma_n = 1$ В на выходе ПФ (ФУ3), а также отключим анализатор данных на выходе обнаружителя (ФУ15), чтобы не вызвать переполнения памяти в компьютере из-за большого количества отображаемых отсчетов.

Полученный шумовой процесс на выходе ПФ (ФУ3) с СКО (**Std Deviation**) $\sigma_n = 1,007$ В приводится на рис. 66.

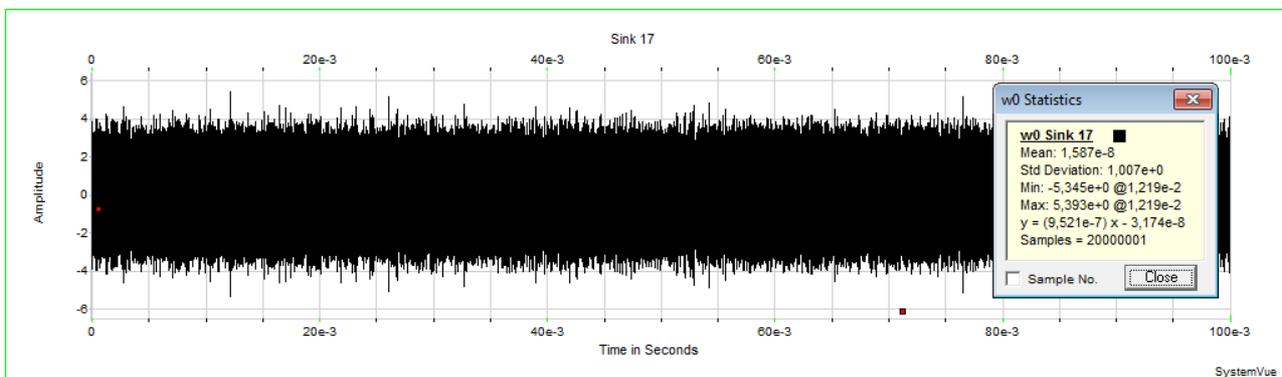


Рис. 66. Шумовой процесс на выходе ПФ (ФУ3)

После установления требуемого значения СКО шумового процесса на выходе ПФ параметры ГП в дальнейшем исследовании будут оставаться неизменными.

Вышеописанная настройка моделирующего стенда позволяет осуществлять простую регулировку входного ОСШ $g_{вх}$ путём изменения амплитуды U_m гармонического колебания в соответствии с выражением:

$$g_{\text{BX}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}\sigma_n}$$

Для оценки выходного отношения сигнал/шум $g_{\text{ВЫХ}}$ сначала необходимо определить МО m_{nn} и СКО σ_{nn} выходного эффекта, при воздействии на обнаружитель – только помехи. При этом нужно отключить анализатор данных на входе обнаружителя (ФУ14) и подключить анализатор данных на выходе обнаружителя (ФУ15), чтобы не вызвать переполнения памяти в компьютере из-за большого количества отображаемых отсчетов.

Полученная временная эпюра выходного эффекта приводится на рис. 67, где видно, что МО (**Mean**) $m_{\text{nn}} = 201,1 \cdot 10^{-3}$ В, а СКО (**Std Deviation**) $\sigma_{\text{nn}} = 105 \cdot 10^{-3}$ В.

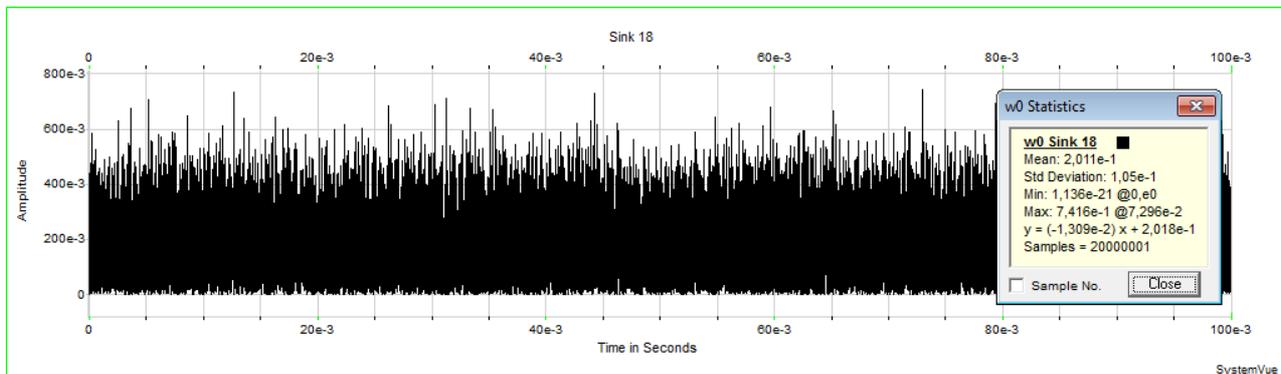


Рис. 67. Шумовой процесс на выходе обнаружителя

Для получения МО m_{sn} и СКО σ_{sn} выходного эффекта на вход устройства подается аддитивная смесь сигнала и помехи. Поэтому к функциональной схеме можем подключить генератор гармонического колебания (ФУ0) и установить в нем амплитуду $U_m = g_{\text{BX}} \sqrt{2}\sigma_n = 1,4142$ В, чтобы обеспечить входное отношение сигнал/шум $g_{\text{BX}} \approx 1$.

После осуществления вышеописанной настройки моделирующего стенда получаем временную эпюру сигнала на выходе обнаружителя, которая приводится на рис. 68, где видно, что при входном отношении сигнал/шум $g_{\text{BX}} \approx 1$ МО (**Mean**) $m_{\text{sn}} = 725,4 \cdot 10^{-3}$ В, а СКО (**Std Deviation**) $\sigma_{\text{sn}} = 155,8 \cdot 10^{-3}$ В.

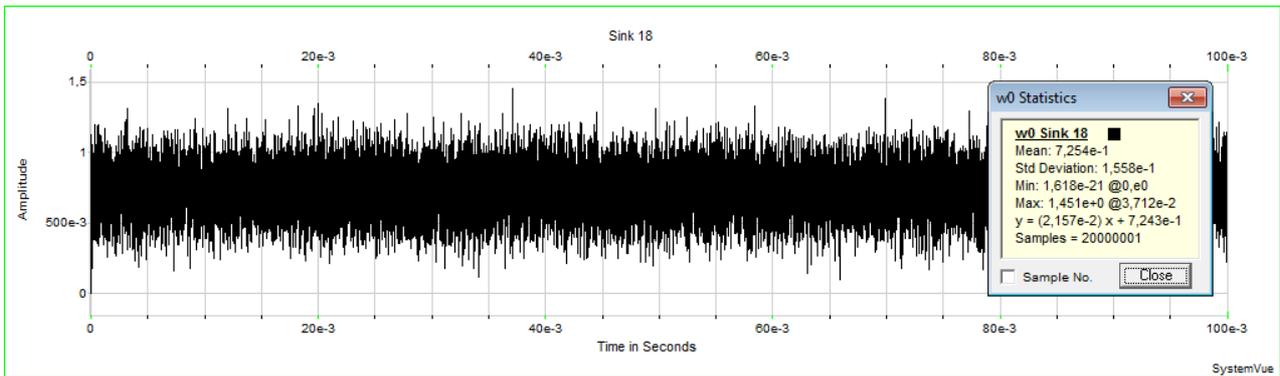


Рис. 68. Сигнал на выходе обнаружителя

Таким образом, после получения всех необходимых статистических сведений, можно определить практическое значение выходного ОСШ $g_{\text{ВЫХ}}$ при входном ОСШ $g_{\text{ВХ}} \approx 1$, используя следующее выражение:

$$g_{\text{ВЫХ}} = \frac{m_{\text{сн}} - m_{\text{нн}}}{\sqrt{\sigma_{\text{сн}}^2 + \sigma_{\text{нн}}^2}} = g_{\text{ВЫХ}} = \frac{725,4 \cdot 10^{-3} - 201,1 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{(155,8 \cdot 10^{-3})^2 + (105 \cdot 10^{-3})^2}} = 2,79.$$

Остальные практические значения выходного отношения сигнал/шум $g_{\text{ВЫХ}}$ приводятся в табл. 15.

Таблица 15

Результаты анализа выходного ОСШ $g_{\text{ВЫХ}}$

$g_{\text{ВХ}}$	$U_m, \text{В}$	$m_{\text{сн}}, \text{В}$	$\sigma_{\text{сн}}, \text{В}$	$g_{\text{ВЫХ}}$
0,5	0,7071	$391,5 \cdot 10^{-3}$	$148,5 \cdot 10^{-3}$	1,047
1	1,4142	$725,4 \cdot 10^{-3}$	$155,8 \cdot 10^{-3}$	2,791
1,5	2,1213	1,072	$158,4 \cdot 10^{-3}$	4,583
2	2,8284	1,423	$158,6 \cdot 10^{-3}$	6,424
2,5	3,5355	1,774	$160,2 \cdot 10^{-3}$	8,212
3	4,2426	2,126	$160 \cdot 10^{-3}$	10,058

Теоретическая зависимость выходного ОСШ от входного ОСШ определяется из следующего выражения:

$$g_{\text{ВЫХ}} = \frac{g_{\text{ВХ}}^2 \sqrt{\Delta f_n T}}{\sqrt{1 + 2g_{\text{ВХ}}^2}}.$$

Используя полученные результаты, построим теоретическую $g_{\text{ВЫХ1}} = f(g_{\text{ВХ}})$ и экспериментальную $g_{\text{ВЫХ2}} = f(g_{\text{ВХ}})$ зависимости выходного ОСШ от входного ОСШ.

Полученные зависимости $g_{\text{ВЫХ1,2}} = f(g_{\text{ВХ}})$ представлены на рис. 69.

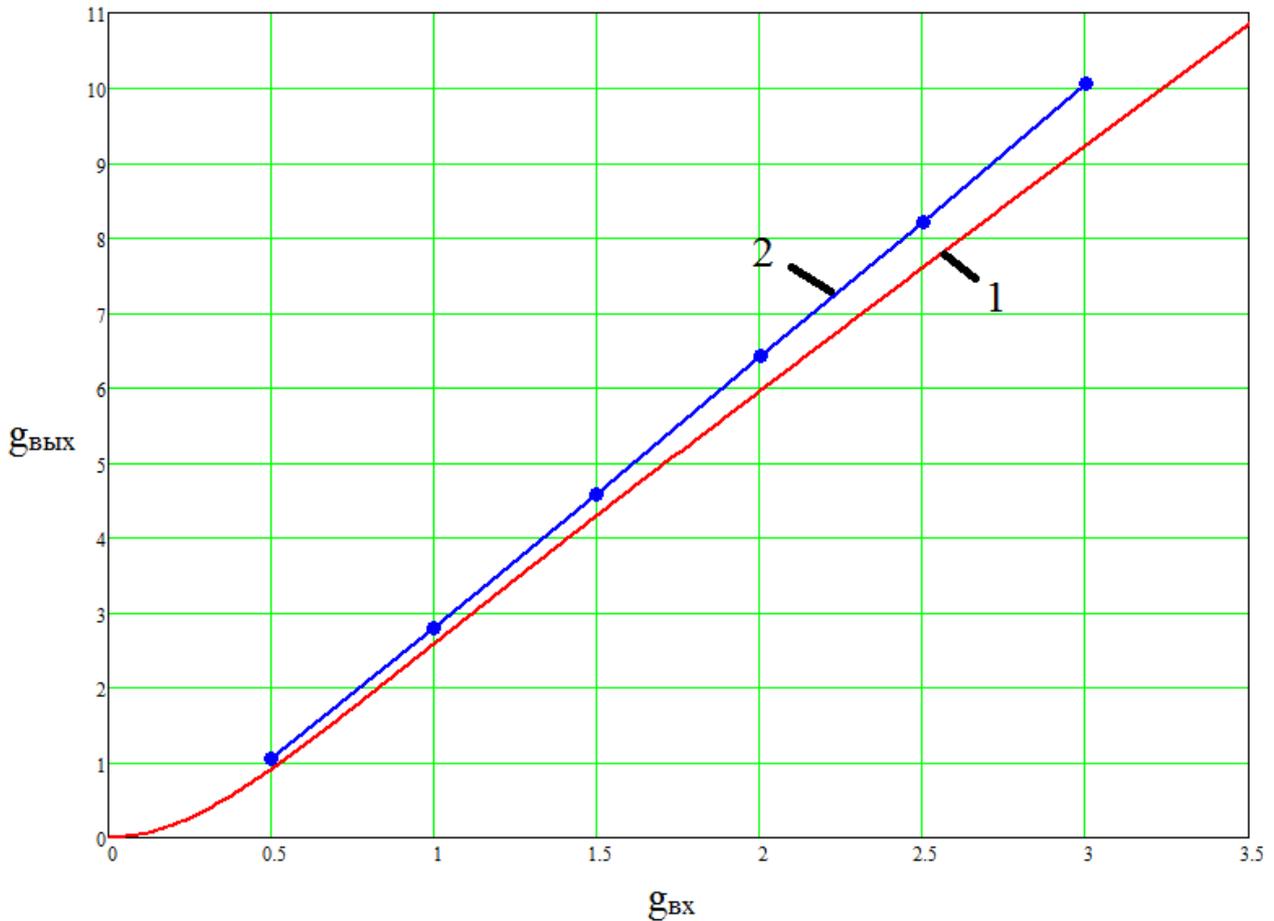


Рис. 69. Совмещённые зависимости $g_{\text{ВЫХ1,2}} = f(g_{\text{ВХ}})$

$$1 - g_{\text{ВЫХ1}} = f(g_{\text{ВХ}}); \quad 2 - g_{\text{ВЫХ2}} = f(g_{\text{ВХ}})$$

Как видно из рис. 69, полученная практическая зависимость $g_{\text{ВЫХ2}} = f(g_{\text{ВХ}})$ имеет незначительные отклонения от ожидаемой теоретической зависимости $g_{\text{ВЫХ1}} = f(g_{\text{ВХ}})$, следовательно, полученные результаты являются достоверными и корректно характеризуют свойства некогерентного обнаружителя.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ № 1–4 «АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ»

5.1. Наименования контрольных работ

Контрольная работа № 1 посвящена исследованию когерентного обнаружителя (КО); контрольная работа № 2 посвящена исследованию некогерентного обнаружителя (НО); контрольная работа № 3 посвящена исследованию энергетического обнаружителя (ЭО); контрольная работа № 4 посвящена исследованию автокорреляционного обнаружителя (АО).

5.2. Содержание контрольных работ

а) по заданным:

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1) типу обнаружителя: | КО – когерентный; ЭО – энергетический; АО – автокорреляционный; НО – некогерентный; |
| 2) виду и параметрам помехи: | квазибелый шум; N_n (В ² /Гц) – спектральная плотность; f_0 (Гц) – средняя частота; Δf_n (Гц) – ширина спектра; |
| 3) виду сигнала: | ГС – гармонический; ПИС – простой импульсный; ШС – шумовой; СИС – сложный импульсный сигнал; |
| 4) параметрам сигнала: | K_f – коэффициент, используемый при расчете средней частоты сигнала f_c (Гц); K_Δ – коэффициент, используемый при расчете ширины спектра сигнала Δf_c (Гц); K_ϕ – коэффициент фильтрации $\Delta f_n T$, где T (с) – постоянная интегрирования обнаружителя. |
| 5) характеристикам обнаружения: | $P_{по}$ – вероятность правильного обнаружения; $P_{лт}$ – вероятность ложных тревог; |

б) необходимо:

привести алгоритм и структуру обнаружителя;

рассчитать следующие параметры:

- 1) f_n (Гц), f_v (Гц) – нижнюю и верхнюю границы частотного диапазона обнаружителя;
- 2) σ_n^2 (Вт) – дисперсию помехи на входе обнаружителя;
- 3) среднюю частоту сигнала f_c (Гц) и ширину его спектра Δf_c (Гц);

- 4) длительность сигнала T_c (с), постоянную интегрирования T (с) и базу B для СИС;
- 5) время задержки τ (с), вносимого линией задержки, при анализе АО;
- 6) пороговое – $g_{\text{пор}}$, входное – $g_{\text{вх}}$ и выходное отношение сигнал/помеха по напряжению;
- 7) реальную чувствительность обнаружителя – P_c (Вт);

построить зависимости:

- 1) $g = f(g_{\text{вх}})$ при оценке g и $g_{\text{вх}}$ (в разгах и дБ);
- 2) $P_{\text{по}} = f(g_{\text{вых}}, P_{\text{лт}})$;

сделать заключения.

Варианты заданий для выполнения контрольных работ № 1–4 приведены в табл. 16;

в) С целью упрощения анализа варианты заданий на выполнение контрольных работ составлены при фиксации следующих исходных условий для всех вариантов:

- 1) ПФ имеет идеальную (прямоугольную) АЧХ;
- 2) $f_c = f_0 = 10^7$ Гц;
- 3) $N_n = 10^{-18}$ В²/Гц;
- 4) $K_{\phi} = \Delta f_n T = 10^2$;
- 5) для ГС и ПИС база равна $B = 1$, а для СИС и ШС база равна $B = 10$;
- 6) ФНЧ представляет собой идеальный интегратор в скользящем временном окне.

5.3. Варианты заданий к контрольным работам № 1–4

- | | | | |
|------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1.1 – ГС; | 2.1 – $P_{\text{по}} = 0,8$; | 3.1 – $P_{\text{лт}} = 10^{-2}$; | 4.1 – $\Delta f_n = 10^6$ Гц; |
| 1.2 – ПИС; | 2.2 – $P_{\text{по}} = 0,9$; | 3.2 – $P_{\text{лт}} = 10^{-6}$. | 4.2 – $\Delta f_n = 3 \cdot 10^5$ Гц; |
| 1.3 – СИС; | 2.3 – $P_{\text{по}} = 0,95$. | | 4.3 – $\Delta f_n = 10^5$ Гц. |
| 1.4 – ШС. | | | |

Таблица 16

Варианты заданий к контрольным работам № 1–4

Варианты	Параметры обнаружителя			
1	1.1	2.1	3.1	4.1
2	1.1	2.1	3.1	4.2
3	1.1	2.1	3.1	4.3
4	1.1	2.1	3.2	4.1

Варианты	Параметры обнаружителя			
5	1.1	2.1	3.2	4.2
6	1.1	2.1	3.2	4.3
7	1.2	2.2	3.1	4.1
8	1.2	2.2	3.1	4.2
9	1.2	2.2	3.1	4.3
10	1.2	2.2	3.2	4.1
11	1.2	2.2	3.2	4.2
12	1.2	2.2	3.2	4.3
13	1.3	2.3	3.1	4.1
14	1.3	2.3	3.1	4.2
15	1.3	2.3	3.1	4.3
16	1.3	2.3	3.2	4.1
17	1.3	2.3	3.2	4.2
18	1.3	2.3	3.2	4.3
19	1.4	2.1	3.1	4.1
20	1.4	2.1	3.1	4.2
21	1.4	2.1	3.1	4.3
22	1.4	2.1	3.2	4.1
23	1.4	2.1	3.2	4.2
24	1.4	2.1	3.2	4.3

5.4. Методические указания по выполнению контрольной работы №1 «Анализ характеристик помехоустойчивости обнаружителей»

1. Структура и алгоритм обнаружителя в соответствии с заданным вариантом заимствуется из разд. 1 данных методических указаний.

2. Границы частотного диапазона обнаружителей рассчитываются из соотношений:

$$f_{\text{н}} = f_0 - \Delta f_{\text{п}}/2; \quad f_{\text{в}} = f_0 + \Delta f_{\text{п}}/2.$$

3. Дисперсия помехи на входе обнаружителя равна: $\sigma_{\text{п}}^2 = N_{\text{п}} \Delta f_{\text{п}}$.

4. Средняя частота сигнала f_c и ширина его спектра Δf_c рассчитываются следующим образом:

$$f_c = f_0 - \Delta f_n / 2 + K_f \Delta f_c / 2; \quad K_f \in [1, \text{ent}(2\Delta f_n / \Delta f_c)]; \quad \Delta f_c = K_\Delta \Delta f_n; \quad K_\Delta \in [10^{-3}, 1],$$

где $\text{ent}[x]$ – целая часть x .

Для вариантов заданий, приведенных в подразд. 5.3, полагается, что $f_c = f_0 = 10^7$ Гц.

5. Расчет длительности существования сигналов T_c , постоянной интегрирования T и ширины спектра Δf_c осуществляется следующим образом:

$$T_c = K_\Phi / \Delta f_n;$$

$$T = T_c = \tau_{и}; \quad \Delta f_c = B / T_c.$$

6. Выбор времени задержки τ в случае анализа АО осуществляется из следующих соотношений: $\tau_{кн} \leq \tau \ll \tau_{кс}$; $f_c \tau = k$; $r_c(\tau) \geq 0,9$; $\tau_{кн} = 1 / \Delta f_n$, где $\tau_{кс}$, $\tau_{кн}$ – интервалы корреляции сигнала и помехи; k – целое число; $r_c(\tau)$ – коэффициент автокорреляции сигнала при выбранном значении времени задержки τ .

Для ГС, ПИС, СИС (ФМК, ЛЧМ) и ШС коэффициент автокорреляции описывается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \text{ГС} & - r_c(\tau) = (1 - |\tau|/T_c) \cos 2\pi f_c \tau; \quad \Delta f_c = 1/T_c; \\ \text{ПИС} & - r_c(\tau) = (1 - |\tau|/\tau_{и}) \cos 2\pi f_c \tau; \quad \Delta f_c = 1/\tau_{и}; \\ \text{ФМК} & - r_c(\tau) = (1 - |\tau|/T_3) \cos 2\pi f_c \tau; \quad \Delta f_c = 1/T_3; \\ \text{ЛЧМ} & - r_c(\tau) = (1 - |\tau|/\tau_{и}) \text{sinc} [\pi \Delta f_c \tau (1 - |\tau|/\tau_{и})] \cos 2\pi f_c \tau; \\ \text{ШС} & - r_c(\tau) = \text{sinc} [\pi \Delta f_c \tau] \cos 2\pi f_c \tau, \end{aligned}$$

где $\tau_{и}$ – длительность импульсного сигнала; T_3 – длительность кодовой посылки в случае ФМК-сигнала.

Для вариантов заданий, приведенных в подразд. 5.3, в качестве СИС можно использовать или ЛЧМ, или ФМК по своему усмотрению.

7. На основе использования соотношений для расчета отношения сигнал/помеха g , с учетом полученных в пп. 1–6 результатов, проводится расчет и строится зависимость $g = f(g_{вх})$ при изменении $g_{вх}$ от 10^{-2} до 10^2 при оценке g и $g_{вх}$ (в разгах и дБ).

8. В соответствии с соотношением $g_{пор} = F(P_{лт})$ для заданного типа обнаружителя по заданной вероятности $P_{лт}$ определяется величина порогового отношения сигнал/шум $g_{пор}$.

9. В соответствии с соотношением $P_{\text{по}} = F(g, P_{\text{лт}})$ для заданного типа обнаружителя проводится расчет и строится графическая зависимость при изменении g от 1 до 10^2 . Для наглядности рассмотрим пример обнаружения гармонического сигнала ЭО при $\Delta f_n T \gg 1$.

Используя соотношения для расчета характеристик ЭО, имеем:

$$P_{\text{лт}} = 1 - \Phi(g_{\text{пор}}); \quad g_{\text{пор}} = \text{arc } \Phi(1 - P_{\text{лт}});$$

$$P_{\text{по}} = \Phi \left[g - \frac{\text{arc } \Phi(1 - P_{\text{лт}})}{\sqrt{1 + 2g_{\text{вх}}^2}} \right];$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt; \quad g = \frac{g_{\text{вх}}^2 \sqrt{\Delta f_n T}}{\sqrt{1 + 2g_{\text{вх}}^2}},$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа.

Значения $P_{\text{по}}$ и $P_{\text{лт}}$ при различных значениях $\Phi(x)$ приведены в табл. 13.

Данный пример позволяет производить анализ не только ЭО, но и КО, и АО, поскольку для этих трех типов обнаружителей выходной эффект имеет при $\Delta f_n T \gg 1$ нормальный закон распределения.

При анализе характеристик помехоустойчивости НО необходимо учитывать, что выходной эффект после квадратурной обработки имеет распределение Релея-Райса.

Для наглядности рассмотрим пример обнаружения гармонического сигнала НО, используя следующие соотношения:

$$P_{\text{лт}} = \exp\left(-\frac{g_{\text{пор}}^2}{2}\right);$$

$$g_{\text{пор}} = \sqrt{2 \ln(1/P_{\text{лт}})};$$

$$P_{\text{по}} = \int_{g_{\text{пор}}}^{\infty} x \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + g^2}{2}\right) \cdot I_0(g, x) dx;$$

$$g = \sqrt{2} g_{\text{вх}} \sqrt{\Delta f_n T},$$

где $I_0(Z)$ – функция Бесселя нулевого порядка; x – нормированное напряжение.

Значения $P_{\text{лт}}$ и $P_{\text{по}}$ при различных значениях $g_{\text{пор}}$ и g приведены в табл. 18.

10. При наличии графических зависимостей $P_{\text{по}} = F(g, P_{\text{лт}})$ и $g = f(g_{\text{вх}})$ по заданной величине $P_{\text{по}}^*$ находим требуемое g^* , а затем и $g_{\text{вх}}^*$ (рис. 70).

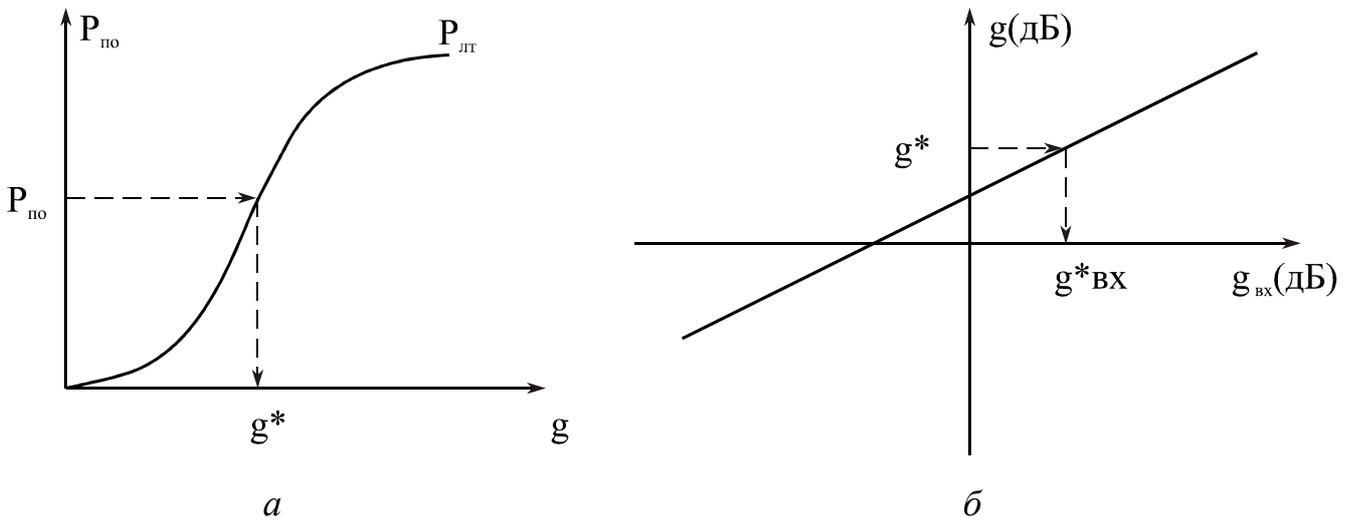


Рис. 70. Зависимости $P_{\text{по}} = F(g, P_{\text{лт}})$ и $g = f(g_{\text{вх}})$

Далее производится пересчет дБ в разы $g_{\text{вх(разы)}}^* = 20 \lg g_{\text{вх(дБ)}}^*$.

11. Реальная чувствительность обнаружителя равна: $P_c = \sigma_n^2 g_{\text{вх(разы)}}^2$.

12. В заключение подводятся итоги с перечислением заданных и полученных характеристик обнаружения.

Таблица 17

Расчет энергетических характеристик
помехоустойчивости КО, ЭО, АО при $\Delta f_n T \gg 1$

x	0	0,25	0,52	0,84	1,3	2,3	3,1	3,7	4,26	4,75	5,2
$1 - \Phi(x)$	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

$$P_{\text{по}} = \Phi(x_1);$$

$$P_{\text{лт}} = 1 - \Phi(x_2);$$

$$P_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{по}} = 1 - \Phi(x_1);$$

$$\Phi(-x) = 1 - \Phi(x);$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Пример:

$P_{\text{по}} = 0,9$; $P_{\text{лт}} = 10^{-5}$; когерентный обнаружитель;

$P_{\text{по}} = \Phi[g - g_{\text{пор}}]$; $\Delta g = g - g_{\text{пор}}$; $P_{\text{лт}} = 1 - \Phi(g_{\text{пор}})$;

$P_{\text{пр}} = 1 - \Phi(\Delta g)$.

Имеем: $g_{\text{пор}} = 4,26$; $\Delta g = 1,3$; $g = 5,56$.

Расчет энергетических характеристик помехоустойчивости НО
при приеме ГС, ПИС, СИС

$P_{\text{лт}} = e^{-g_{\text{пор}}^2/2}$										
$g_{\text{пор}}$	1	2	3	4	5	6	3,75	4,3	4,8	5,1
$P_{\text{лт}}$	0,6	0,13	$1 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
$P_{\text{по}} = Q(g, g_{\text{пор}}) = \int_{g_{\text{пор}}}^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2 + g^2}{2}\right) \cdot I_0(gx) dx$										
1) $g_{\text{пор}}=3$										
g	2	3	3,5	4	4,5	5,5				
$P_{\text{по}}$	0,21	0,54	0,74	0,87	0,95	0,996				
2) $g_{\text{пор}}=5$										
g	2	3	4	5	5,5	7	8			
$P_{\text{по}}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	0,18	0,54	0,72	0,95	0,997			

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коржик В.И., Финк Л.М. и др. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
2. Лезин Ю.С. Введение в теорию и технику РТС. – М.: Радио и связь, 1986. – 280 с.
3. Дятлов А.П., Дятлов П.А. Анализ и моделирование обнаружителей и демодуляторов связных сигналов: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 176 с.
4. Златин И.А. SystemView 6.0. Системное проектирование радиоэлектронных устройств. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 424 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
1. Краткие теоретические сведения.....	6
2. Анализ прохождения сигнала через функциональные узлы обнаружителя ..	12
2.1. Прохождение сигналов через когерентный обнаружитель.....	13
2.1.1. Прохождение простого импульсного сигнала через когерентный обнаружитель.....	13
2.1.2. Прохождение линейно-частотно-модулированного импульса через когерентный обнаружитель	16
2.1.3. Прохождение фазоманипулированной последовательности (меандр) через когерентный обнаружитель	19
2.1.4. Прохождение фазоманипулированного сигнала (ПСП) через когерентный обнаружитель	22
2.1.5. Прохождение шумового сигнала через когерентный обнаружитель.....	24
2.2. Прохождение сигналов через некогерентный обнаружитель.....	27
2.2.1. Прохождение простого импульсного сигнала через некогерентный обнаружитель	27
2.2.2. Прохождение линейно-частотно-модулированного импульса через некогерентный обнаружитель	28
2.2.3. Прохождение фазоманипулированной последовательности (меандр) через когерентный обнаружитель	29
2.2.4. Прохождение фазоманипулированной последовательности (ПСП) через когерентный обнаружитель	29
2.2.5. Прохождение шумового сигнала через некогерентный обнаружитель.....	30
2.3. Прохождение сигналов через энергетический обнаружитель.....	30
2.3.1. Прохождение простого импульсного сигнала через энергетический обнаружитель.....	30
2.3.2. Прохождение линейно-частотно-модулированного импульса через энергетический обнаружитель.....	31
2.3.3. Прохождение фазоманипулированной последовательности (меандр) через энергетический обнаружитель.....	32

2.3.4. Прохождение фазоманипулированного сигнала (ПСП) через энергетический обнаружитель.....	33
2.3.5. Прохождение шумового сигнала через энергетический обнаружитель.....	33
2.4. Прохождение сигналов через автокорреляционный обнаружитель	34
2.4.1. Прохождение простого импульсного сигнала через автокорреляционный обнаружитель	34
2.4.2. Прохождение линейно-частотно-модулированного импульса через автокорреляционный обнаружитель	35
2.4.3. Прохождение фазоманипулированной последовательности (меандр) через автокорреляционный обнаружитель	36
2.4.4. Прохождение фазоманипулированного сигнала (ПСП) через автокорреляционный обнаружитель	37
2.4.5. Прохождение шумового сигнала через энергетический обнаружитель.....	37
3. Анализ зависимости вероятности ложной тревоги от порогового напряжения $P_{лт} = f(U_{пор})$	38
4. Анализ зависимости выходного ОСШ от входного ОСШ $g_{вых} = f(g_{вх})$	45
5. Контрольные работы № 1–4 «Анализ характеристик помехоустойчивости обнаружителей»	51
5.1. Наименования контрольных работ.....	51
5.2. Содержание контрольных работ:.....	51
5.3. Варианты заданий к контрольным работам № 1–4	52
5.4. Методические указания по выполнению контрольной работы №1 «Анализ характеристик помехоустойчивости обнаружителей»	53
Библиографический список.....	58

Учебное издание

Дятлов Анатолий Павлович
Дятлов Павел Анатольевич
Шостак Александр Николаевич

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ
И ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ**

Учебное пособие

<i>Ответственный за выпуск</i>	<i>Дятлов А.П.</i>
<i>Редактор</i>	<i>Кочергина Т.Ф.</i>
<i>Корректор</i>	<i>Селезнева Н.И.</i>
<i>Компьютерная верстка</i>	<i>Дятлов П.А.</i>

Подписано в печать 2015 г.

Заказ № . Тираж 50 экз.

Формат 60×84¹/₁₆. Печ. л. – 3,3. Уч.-изд. л. – 3,7.

Издательство Южного федерального университета

344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1.

Тел. (8634) 247–58–51.

Отпечатано в Секторе обеспечения
полиграфической продукцией кампуса в г. Таганроге
отдела полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции

ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1.

Тел. (8634) 37–17–17, 37–16–55.