

УДК 621.396.96: 004.942 (045)

Соколов Г.Е., к.ф.-м.н.

## **ПОСТРОЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ОХРАННОГО РАДИОЛУЧЕВОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ**

Национальный авиационный университет

[gennadii\\_sokolov@mail.ru](mailto:gennadii_sokolov@mail.ru)

*Проводится моделирование на уровне функциональной схемы охранного радио-лучевого извещателя средствами MATLAB. Разработанная модель дает возможность оценить способность извещателя разделить полезный сигнал и помеху*

**Ключевые слова:** моделирование систем, охранные извещатели, MATLAB

### **Введение**

Моделирование систем на уровне функциональных схем широко используется в практике проектирования [1]. В настоящей работе проводится моделирование на уровне функционально схемы средствами MATLAB охранного радио-лучевого извещателя. Подобные извещатели широко применяются в системах охранной сигнализации. Целью разработки модели является получение возможностей теоретического исследования влияния параметров обработки сигнала в извещателе на эффективность обнаружения им нарушителя в условиях атмосферных помех.

### **Постановка задачи**

Разработка компьютерной модели охранного емкостного извещателя осуществляется согласно методике, представленной в [2-4], в процессе выполнения следующих этапов:

1. Выбор извещателя-прототипа.
2. Построение и анализ структурной схемы извещателя – прототипа и обработки сигнала в структурных единицах этой схемы.
3. Построение функциональной модели извещателя на основе его структурной схемы.
4. Построение математической модели обработки сигнала в извещателе.
5. Разработка структурной схемы компьютерной программы, реализующей математическую модель.

6. Составление и отладка компьютерной программы на выбранном языке программирования.

7. Тестирование программы.

### **Разработка компьютерной модели**

1. В качестве прототипа выбрана "Система обнаружения вторжения" (патент США N 3877002, кл. G 08 B 13/24 1975. Устройство предназначено для блокирования протяженных (до 300 м) рубежей охраны и выдачи сигнала тревоги при пересечении человеком блокированного рубежа. В то же время, устройство не выдает сигнал тревоги при пересечении защищаемого рубежа мелкими животными. Так же устройство не выдает сигнал тревоги при сильных метеопомехах в виде осадков и тумана.

2. Принцип работы устройства заключается в слежении за скоростью изменения коэффициента затухания электромагнитных волн СВЧ диапазона в зоне охраны и сравнении ее с заданным порогом. При превышении пороговой величины устройство выдает сигнал тревоги. В редких случаях быстрого изменения затухания из-за метеоусловий устройство выдает ложную тревогу.

Работа радиолокатора-прототипа поясняется структурной схемой, показанной на рис.1.

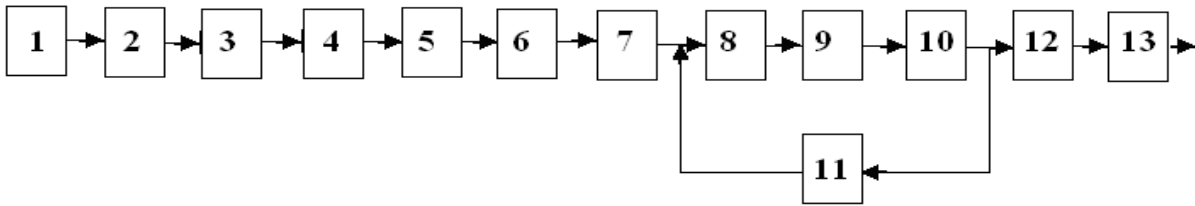


Рис. 1. Функциональная схема радиолокатора – прототипа

1. Модулятор. 2. Генератор СВЧ. 3. Передающая СВЧ антенна. 4. Электромагнитные волны в зоне охраны. 5. Приемная СВЧ антенна. 6. СВЧ детектор. 7. Предусилитель. 8. Резонансный усилитель частоты модуляции. 9. Амплитудный детектор огибающей. 10. Фильтр полезного сигнала. 11. Схема автоматической регулировки усиления. 12. Пороговая схема. 13. Исполнительная релейная схема.

Модулятор (1) вырабатывает модуляционный импульсный сигнал в форме "квадратная волна" со скважностью два для управления генератором. Генератор (2) содержит СВЧ активный генераторный элемент (лавинно-пролетный диод, который генерирует радиоимпульсы с несущей на СВЧ. Эти импульсы подаются на передающую СВЧ антенну (3) и излучаются к приемной антенне вдоль земли в виде электромагнитных волн (4) в секторе, определяемом диаграммой направленности антенны.

Приемная антенна (5) принимает электромагнитные волны в секторе, определяемом диаграммой направленности антенны. Очевидно, что принимаемая мощность существенно зависит от подстилающей поверхности (это неотъемлемый недостаток радиолучевых охранных локаторов). При пересечении нарушителем зоны распространения радиоволн принимаемая приемной антенной мощность радиоволн уменьшается, а затем восстанавливается.

Антенна нагружена на СВЧ детектор (6) с диодом Шоттки. На выходе СВЧ детектора выделяет сигнал на частоте модуляции. Огибающая амплитуды модуляционного сигнала содержит полезный сигнал об изменении мощности принимаемых радиоволн во времени из-за нарушителя или метеоусловий.

Приемный блок (7-11) содержит последовательно соединенные: входной усилитель-фильтр частоты модуляции с регулируемым коэффициентом усиления, охваченный цепью АРУ, амплитудный

детектор огибающей, фильтр полезного сигнала с полосой пропускания 0,05-10,0 Гц и порогово-исполнительную релейную схему. В нем Предусилитель (7) осуществляет усиление сигнала по амплитуде до уровня стабильной работы узла АРУ. Усилитель (8) осуществляет фильтрацию сигнала на частоте модуляции (тем уменьшая влияние радиопомех) и регулировку коэффициента усиления по амплитуде системой АРУ. Амплитудный детектор огибающей импульсного сигнала (9) формирует полезный сигнал, пропорциональный мощности принимаемых СВЧ радиоволн.

Фильтр полезного сигнала (10) формирует временную характеристику петли АРУ. Постоянная времени цепи АРУ (11) выбрана так, чтобы нижняя полоса пропускания приемного усилительного тракта ограничивалась по минимуму частотой 0,01-0,03 Гц. Таким образом, полоса пропускания полезного сигнала, поступающего на вход схемы, ограничена пределами 0,03-10 Гц. Это соответствует максимальной и минимальной частотам спектра полезного сигнала при движении человека в зоне обнаружения с максимальной и минимальной скоростями. Амплитуда полезного сигнала сравнивается с заданным пороговым уровнем, выставляемым в пороговой схеме (12). При превышении амплитудой полезного сигнала порогового уровня исполнительная схема (13) выдает сигнал тревоги. В данном примере сигнал тревоги выдается переключателем контактов реле, подключаемых к внешним сигнализационным аппаратам охраны.

Принципиальным является то, что АРУ не успевает реагировать на медленные сигналы. Это изменения принимаемой мощности, вызванные погодными условиями и подстилающей поверхностью, не приводят к изменению выходного напряжения усилителя. Таким образом, АРУ кардинально повышает помехозащищенность системы обнаружения вторжения.

3. Построение функциональной модели извещателя.

3.1. Первым шагом построения функциональной модели является упрощение структурной схемы планируемой модели радиолокатора с целью облегчить процесс моделирования. Для этого необходимо оставить в модели основные блоки, определяющие работу радиолокатора и его помехоустойчивость, но избавиться от блоков, играющих второстепенную роль, например блока 13, просто согласующего форматы выходного сигнала извещателя и принимающей его аппаратуры.

Упрощенная структурная схема показана на рис. 2.

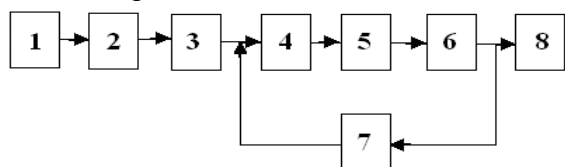


Рис. 2. Упрощенная структурная схема модели извещателя

1. Модулятор. 2. СВЧ тракт. 3. Предусилитель. 4. Усилитель. 5. Амплитудный детектор огибающей. 6. Фильтр полезного сигнала. 7. Узел автоматической регулировки уровня. 8. Решающее устройство.

Обоснуем сделанные в схеме 2 по сравнению со схемой 1 упрощения.

а) СВЧ генератор, Передающая СВЧ антенна, Пространство распространения радиоволн, заполненное метеосадками и нарушителями, Приемная СВЧ антенна, СВЧ детектор составляют СВЧ тракт. При этом Генераторный СВЧ диод преобразует электрический сигнал в радиоволновой, а детекторный СВЧ диод Шоттки

преобразует радиоволновой сигнал в электрический. Таким образом, на входе и выходе блока 2 присутствуют электрические сигналы, работа СВЧ тракта описывается коэффициентом передачи.

$$K_U(t) = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$$

б) Двухступенчатый усилитель (блоки 3 и 4) выполняет 3 различные функции:

- фильтрация сигнала на частоте модуляции;
- усиление сигнала по амплитуде;
- регулировка коэффициента усиления по амплитуде системой АРУ.

При моделировании первые две функции: фильтрацию и усиление на некую базовую величину коэффициента усиления, возлагается на блок 3. Регулировка коэффициента усиления по амплитуде системой АРУ возлагается на блок 4.

в) Решающее устройство выносит решение о наличии нарушителя или его отсутствии. Наиболее простая его форма – это пороговое устройство. Вопрос о том, куда передается решение, при моделировании не рассматривается.

3.2 Блок 1(модулятор) схемы рис.2 моделируется генератором прямоугольных импульсов единичной амплитуды, скважностью 2 и частотой 1 кГц.

3.3 Блок 2 (СВЧ тракт) моделируется нормированным коэффициентом передачи:

$$K_U(t) < 1.$$

Вид функции задается входными данными.

3.4. Блок 3 (предусилитель) моделируется фильтром с полосой пропускания 10 кГц. Ширина полоса пропускания выбрана с целью недопущения существенных искажений импульсного сигнала.

Фильтр моделировался с помощью матобеспечения пакета MATLAB.

3.5 Блок 4 (усилитель) моделируется коэффициентом передачи

$$K_U = K_0 \times K_{APV},$$

где  $K_0$  - константа, заданная аппаратно, а  $K_{APY}$  - коэффициент передачи по напряжению узла АРУ (структурного элемента 7).

3.6 Блок 5 (амплитудный детектор огибающей) моделируется вычислением среднего значения входного сигнала за отрезок времени 0,25 секунды с умножением среднего на величину скважности.

3.7 Блок 6 (фильтр полезного сигнала с частотой отсечки  $f_{отсечки} = 10$  Гц) моделируется коэффициентом передачи

$$K_{ФНЧ} = \begin{cases} 0, & \text{если } t < t \\ 1, & \text{если } t > t \end{cases}$$

Это коэффициент передачи линии задержки на время  $t$ . Такой упрощенный вид коэффициента передачи выбран с учетом того, что входной сигнал ФНЧ имеет характерные частоты менее 1 Гц. Этот сигнал будет пропущен без затухания, но с задержкой на время  $(2...3)/f_{отсечки}$ , т.е. 0,2...0,3 секунды.

3.8 Блок 7 (АРУ) моделируется на основе дискретности процесса обработки сигнала. Выбирается временной интервал  $T$ , на котором принимается решение о наличии или отсутствии нарушителя (резкое падение величины коэффициента передачи СВЧ тракта). Этот интервал делится на временные подинтервалы, длительностью  $\Delta T$ , на которых коэффициент передачи по напряжению узла АРУ и усилителя (блок 4) являются постоянными, меняясь от подинтервала к следующему за ним подинтервалу. Для этого же подинтервала рассчитываются выходные напряжения блока 5 и блока 6. Последовательный расчет выходного напряжения фильтра полезного сигнала  $U_{ФНЧ}(t)$  на подинтервалах дает его значения на всем отрезке моделирования.

3.9 Блок 8 (решающее устройство) моделируется пороговым устройством, которое сравнивает максимальный уровень сигнала фильтра полезного сигнала  $\max\{U_{ФНЧ}(t)\}$  с заданным порогом. Величина порога задается во входных данных.

4. Построение математической модели обработки сигнала в извещателе.

4.1. Задание исходных цифровых параметров для моделирования:

$T=10$  с. – длительность времени моделирования.

$\Delta T=0,25$  с.- длительность единичного интервала моделирования.

$dt = 10$  мкс. – временной промежуток между моментами моделирования.

$T1 = 1$  мс. – период сигнала генератора.

$Q = 2$  – скважность сигнала генератора.

$U0=1$  – амплитуда сигнала генератора.

$M=0$ , при этом  $(M+1) * \Delta T$  с. – задержка интегратора.

$R1=0,8$ ;  $R2=0,2$ ,  $R1+R2=1$ ; параметры, задающие характеристики блока АРУ.

$P=0,7$ . Задается порог порогового устройства.

4.2. Задание временных параметров цифрового моделирования:

$$dt=10^{-6}; \quad t = 0, dt, 2dt, 3dt, \dots, T.$$

$$N=T/\Delta T.$$

4.3. Вычисление выходного напряжения генератора при  $t < T/Q$

$$U_r(t) = U0 \begin{cases} 1, & \text{при } nT1 < t < nT1 + T1/Q \\ 0, & \text{при } nT1 + T1/Q < t < T1 + nT1 \end{cases}$$

4.4. Вычисление коэффициента передачи СВЧ тракта.

Коэффициент передачи СВЧ тракта задается произвольной функцией времени, например:

$$K_{СВЧ}(t) = A1 + A2 \exp(-0,5t),$$

где  $0 < t < T$ ,  $A1 + A2 = 1$

4.5. Вычисление выходного сигнала СВЧ тракта:

$$U_{СВЧ}(t) = U_r(t) * K_{СВЧ}(t).$$

4.6. Задание АЧХ предусилителя:

$$K(w) = \begin{cases} Q, & \text{в полосе пропускания} \\ 0, & \text{вне полосы пропускания} \end{cases}$$

4.7. Вычисление выходного сигнала предусилителя:

$$U_{\text{ПРЕДУС.}}(t) = \text{Re}[\text{ОБПФ}(\text{БПФ}(U_{\text{СВЧ}})K(w))].$$

4.8. Задание начального коэффициента усилителя:

$$K_{\text{АРУ}}(1) = 1.$$

4.9. Вычисление выходного сигнала усилителя на первом единичном интервале моделирования:

$$U_{\text{УС}} = U_{\text{ПРЕДУС}} K_{\text{АРУ}}(1).$$

4.10. Вычисление выходного сигнала детектора на  $i$ -том единичном интервале моделирования длительностью  $\Delta T$ :

$$U_{\text{ВЫХ.ДЕТ}} = K \times \int_{i\Delta T}^{(i+1)\Delta T} U_{\text{УС}} dt,$$

где  $K=1/\Delta T$ .

4.11. Запоминание выходного сигнала детектора на  $i$ -том единичном интервале моделирования в массиве

$$L[i]=U_{\text{ВЫХ.ДЕТ}}(i)$$

4.12. Вычисление скорректированного значения коэффициента усиления усилителя

$$K_{\text{АРУ}}(t) = \begin{cases} 1, \text{при } i < M \\ R1 + R2 / L(i - M), \text{при } i > M \end{cases}$$

4.13. Заменяя в п.4.8  $K_{\text{АРУ}}(1)$  на  $K_{\text{АРУ}}(i)$  повторяем вычисления, пока проведем моделирование на всем интервале моделирования:  
 $0 \leq t \leq T$ , или  $1 \leq i \leq N$ .

4.14. В массиве  $L(i)$  записана временная функция изменения выходного сигнала фильтра полезного сигнала на всем интервале моделирования. Если хотя бы один элемент массива меньше порогового значения  $P$ , то это признак начавшегося пожара. Поэтому производится сравнение минимального значения из всего массива  $L(i)$  с порогом  $P$ .

Если  $\min \{ L(i) \} > P$ , на дисплей выводится «Дежурный режим»;

если  $\min \{ L(i) \} < P$ , на дисплей выводится «Тревога»

5. Структурная схема компьютерной программы, реализующей математическую модель, приведена на рис.3.

6. Программа, реализующая приведенную выше структурную схему, составлена в кодах пакета MatLab и отлажена

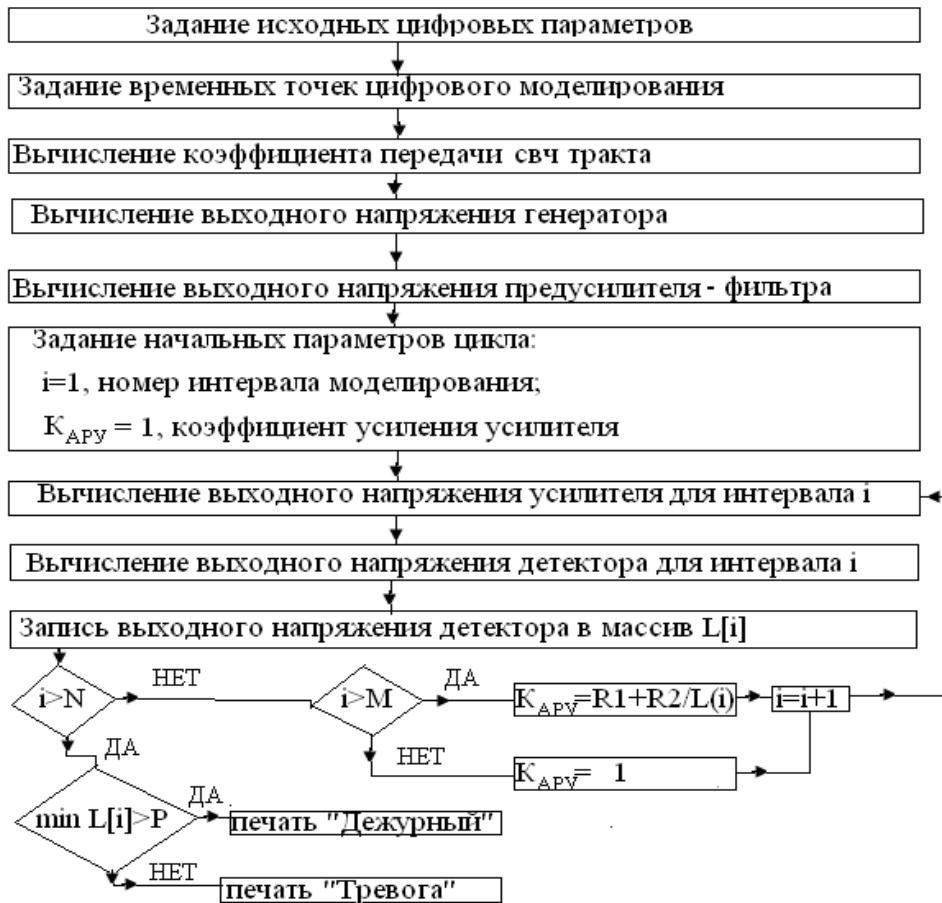


Рис. 3. Структурная схема компьютерной программы

### **Исследование радиолучевого извещателя на основе разработанной компьютерной модели**

Охранный радиолокатор обнаружения вторжения работает как система слежения за состоянием затухания электромагнитных волн СВЧ диапазона в зоне охраны. Эффективность работы этой системы слежения определяет основные характеристики извещателя.

Если система слишком медленно реагирует на изменение затухания в среде, то решение о наличии нарушителя принимается при любом медленном увеличении затухания – от изменения состава газовой среды, от общей запыленности среды и т.д. Вероятность ложной тревоги становится недопустимо большой.

Если система слишком быстро реагирует на изменение затухания в среде, то при наличии медленно движущегося нарушителя система АРУ сразу восстанавли-

ливает уровень сигнала на входе решающего устройства. В этом случае решение о наличии нарушителя не принимается. Вероятность пропуска цели становится недопустимо большой.

Качество системы слежения определяется параметрами фильтра полезного сигнала ( $M$  – параметром времени задержки) и величинами коэффициентов корректировки коэффициента усиления блока АРУ  $R1$  и  $R2$ . Все исследования, представленные ниже, проводились при постоянной настройке системы обнаружения:  $M=0$ ;  $R1=0.7$ ;  $R2=0.3$ . Порог порогового узла установлен  $P=0.7$ .

Моделирование работы радиолучевого извещателя проводилось для трех основных режимов его работы.

Режим №1. В зоне охраны отсутствует нарушитель, отсутствуют радиопомехи, но меняются метеоусловия (т.е. затухание в среде).

Режим №2. В зоне охраны перемещается нарушитель, метеоусловия не меняются во времени, отсутствуют радиопомехи.

Режим №3. В зоне охраны перемещается нарушитель, метеоусловия не меняются во времени, на радиолучевой извещатель воздействуют сильные широкополосные радиопомехи.

На рис. 4 приведены типичные результаты моделирования работы извещателя в режиме №1. На нем кривой 1 показано уменьшение в 4 раза коэффициента передачи СВЧ тракта за 10 секунд из-за метеоусловий. Кривая 2 отражает изменение коэффициента усиления усилителя (блок 4), вызванное работой АРУ. Кривая 3 показывает выходное напряжение фильтра полезного сигнала, нормированное к единице в исходном состоянии. Оценивая это напряжение, решающий блок выносит решение об отсутствии нарушителя.

На рис.5 приведены типичные результаты моделирования работы извеща-

теля в режиме №2. На нем кривой 1 показано уменьшение в 2 раза коэффициента передачи СВЧ тракта за 5 секунд (нарушитель пересекает зону охраны со скоростью 1 м/с). Кривая 3 показывает выходное напряжение фильтра полезного сигнала, нормированное к единице в исходном состоянии. Оценивая это напряжение, решающий блок выносит решение о наличии нарушителя.

На рис. 6 и 7 приведены типичные результаты моделирования работы извещателя в режиме №3. На рис.7 кривой 1 показано уменьшение в 2 раза коэффициента передачи СВЧ тракта за 5 секунды (нарушитель пересекает зону охраны со скоростью 1 м/с). Кривая 3 показывает выходное напряжение фильтра полезного сигнала, нормированное к единице в исходном состоянии. Оценивая это напряжение, решающий блок выносит правильное решение о наличии нарушителя, несмотря на значительные радиопомехи, показанные на рис. 6.

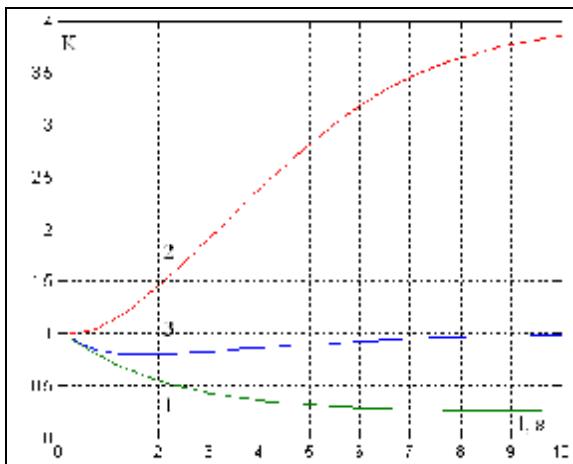


Рис. 4 Сигнал на входе решающего устройства при метеопомехах на входе извещателя

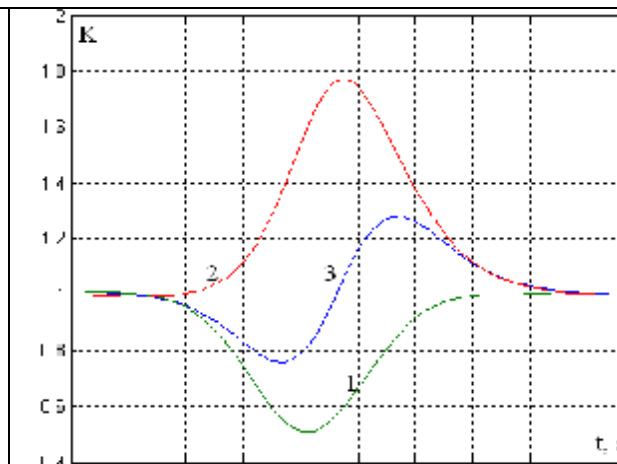


Рис. 5 Сигнал на входе решающего устройства при появлении нарушителя и отсутствии помех

--	--

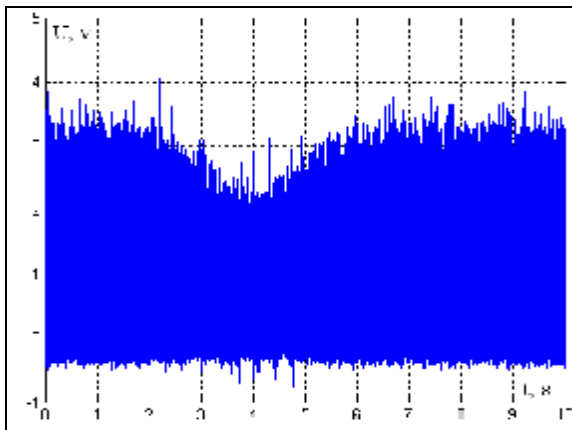


Рис. 6 Сигнал на выходе усилителя-фильтра при радиопомехах и нарушителе в зоне охраны

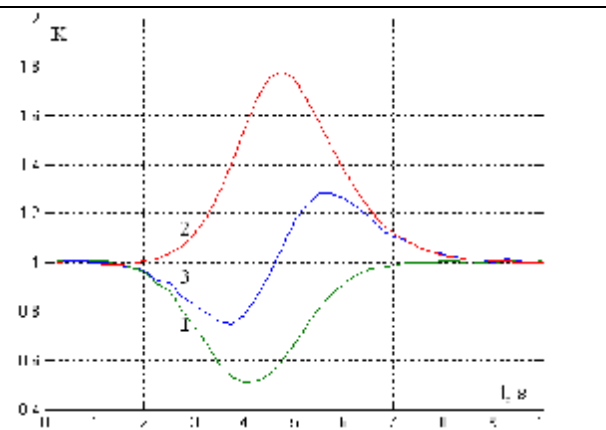


Рис. 7 Сигнал на входе решающего устройства при радиопомехах и нарушителе в зоне охраны

### Выводы

Анализ результатов моделирования показывает следующее:

1. При увеличении затухания вдвое за 2,5 сек блоки обработки сигналов правильно реагируют на изменение среды. Имеет место ситуация «Правильное обнаружение». При увеличении затухания вдвое за 1,3 сек блоки обработки сигналов неправильно реагируют на изменение среды. Имеет место ситуация «Ложная тревога». Таким образом, быстрое изменение затухания среды радиолокатор не отличает от нарушителя.

2. Человека - нарушителя радиолокатор надежно обнаруживает при скоростях перемещения (0,8 – 4) м/с. Животное - нарушителя, радиолокатор принимает за человека при больших скоростях перемещения (2 – 4) м/с, т.е. имеет место ситуация «Ложная тревога».

3. При всех величинах дисперсии радиопомех состояние системы обнаружения вторжения «Дежурный режим» или «Тревога» не менялось. Таким образом, исследуемый радиолокатор надежно защищен от гауссовых радиопомех.

### Список литературы

1. Борисов Ю.П., Цветнов В.В. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.

2. Sokolov, G. E. Building a computer model of an optoelectronic burglar alarm detector/ Electronic and Control Systems. № 4(38), 2013. p.142-148.

3. Sokolov G.E. Building a Computer Model of an Optoelectronic Fire Smoke Alarm Detector/ Electronic and Control Systems.-№1(39).-2014. С.77- 84.

4. Соколов Г.Е. Построение компьютерной модели охранного емкостного извещателя/ Проблемы информатизации и управления.-№1(53).-2016. – С.65-71.

Статью представлено в редакцию 15.11.2016