



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

**Е.Б. Биктеева,  
К.Н. Матюхин**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ  
И ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ТРАНСПОРТНОГО  
РАДИООБОРУДОВАНИЯ**

**Учебно-методическое пособие  
по выполнению лабораторных работ**

**для студентов  
специальности 25.05.03  
всех форм обучения**

**Москва  
2019**



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)»**

---

**Кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного  
оборудования воздушного транспорта**

**Е.Б. Биктеева, К.Н. Матюхин**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ  
И ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ТРАНСПОРТНОГО  
РАДИООБОРУДОВАНИЯ**

**Учебно-методическое пособие  
по выполнению лабораторных работ**

*для студентов  
специальности 25.05.03  
всех форм обучения*

Москва  
2019

ББК 0561-082

Б-60

Рецензент:

*Стукалов С.Б.* – канд. техн. наук, доцент

**Биктеева Е.Б.**

Б-60 Моделирование систем и процессов в задачах эксплуатации транспортного радиооборудования: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ./ Е.Б. Биктеева, К.Н. Матюхин. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 48 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Моделирование систем и процессов в задачах эксплуатации транспортного радиооборудования» по учебному плану для студентов специальности 25.05.03 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 19.06.2019 г. и методического совета 19.06.2019 г.

*В авторской редакции.*

Подписано в печать 08.07.2019 г.

Формат 60x84/16 Печ.л. 3 Усл. печ. л. 3,49

Заказ 505/ Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА  
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Отпечатано ООО «МИР»

394033, г. Воронеж, Ленинский пр-т 119А, лит. Я, оф. 215

Тел.: 8 (958) 649-53-31 Email: 89586495331@mail.ru

© Московский государственный  
технический университет ГА, 2019

## Содержание

Стр.

<b>Лабораторная работа №1.</b> Исследование возможностей применения программного пакета MathCAD для математического моделирования.....	4
<b>Лабораторная работа №2</b> Моделирование типовой радиотехнической цепи методом комплексной огибающей .....	9
<b>Лабораторная работа №3.</b> Моделирование системы фазовой автоподстройки частоты методом информационного параметра.....	15
<b>Лабораторная работа №4.</b> Моделирование нелинейного радиотехнического звена методом несущей частоты.....	23
<b>Лабораторная работа № 5.</b> Исследование системы Simulink для моделирования радиотехнических сигналов и устройств.....	28
<b>Лабораторная работа №6.</b> Моделирование случайных процессов.....	33
<b>Лабораторная работа №7.</b> Исследование помехоустойчивости оптимального приема манипулированных сигналов методом статистического моделирования.....	40
<b>Лабораторная работа №8.</b> Использование программного пакета MATLAB для математического моделирования радиосигналов.....	44

## Лабораторная работа №1.

### Исследование возможностей применения программного пакета MathCAD для математического моделирования

**Цель работы** - Исследование возможностей применения программного пакета MathCAD для математического моделирования на примере моделирования случайных величин и обработки результатов моделирования.

Приобретение навыков по математическому моделированию и исследованию случайных процессов на ПК.

Закрепление знаний о методах моделирования и обработке результатов случайных процессов для решения радиотехнических задач.

Приобретение навыков оформления результатов исследования на ПК.

**Время** - 4 часа.

#### 1. Основные теоретические сведения

Принципы составления программ для моделирования случайных величин.

Изучить и запомнить встроенные функции и ключевые слова для анализа и обработки случайных величин, моделируемых в лабораторной работе. Например, для случайных величин (СВ) с равномерным законом распределения:

$\text{rnd}(x)$  –случайная величина, имеющая равномерное распределение на интервале 0 и  $x$ ,

$\text{runif}(m, a, b)$  – вектор  $m$  случайных чисел, имеющих равномерное распределение ( $b$  и  $a$  – границы интервала  $a < b$ )?

$\text{dunif}(x, \min, \max)$  – плотность вероятности для равномерного распределения,

$\text{mean}(A)$  – среднее элементов массива  $A$ ,

$\text{stdev}(A)$  – среднеквадратичное отклонение элементов массива  $A$ ,

$\text{var}(A)$  – дисперсия элементов массива  $A$ ,

$\text{hist}(\text{int}, A)$  – вектор с числами точек из массива  $A$ , попавших в соответствующий интервал с границами, заданными вектором  $\text{int}$  (служит для построения гистограмм).

Теоретическая плотность распределения: для экспоненциального закона –  $w(x) = \text{dexp}(x, \lambda)$ ; для релеевского закона –  $(x/\sigma)\text{exp}[-x^2/(2\sigma^2)]$ .

Вспомнить алгоритм формирования случайных величин, использующий метод нелинейного преобразования.

#### Общая характеристика методов моделирования.

Рассмотрим обобщенный метод моделирования на примере моделирования случайных величин (СВ) с равномерным законом распределения на произвольном интервале ( $a, b$ ).

а) найти функцию распределения

$$z = Q(y) = \begin{cases} 0 & y < a \\ \frac{y-a}{b-a} & a \leq y \leq d; \\ 1 & y > b \end{cases}$$

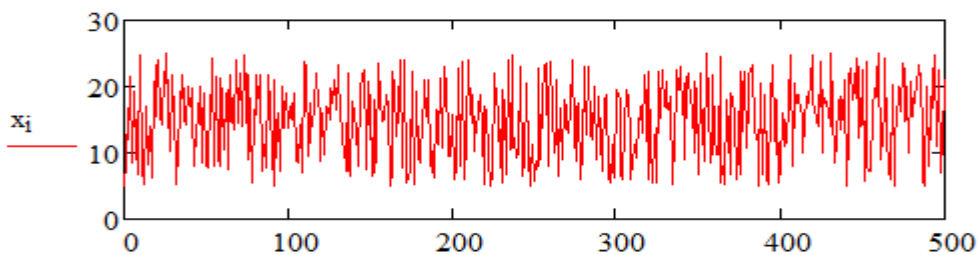
б) найти обратную функцию  $y = Q^{-1}(z) = a + (b - a)z;$

в) сформировать СВ  $\xi_i;$

г) вычислить СВ  $x_i:$   $x_i = a + (b - a)\xi_i.$

Начало программы:

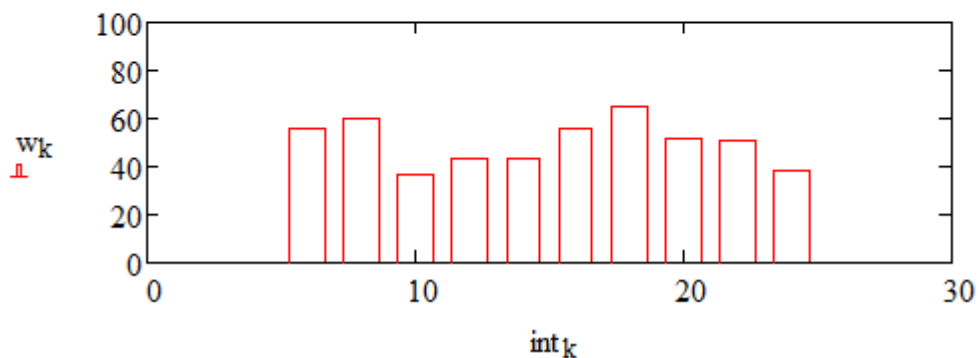
```
i := 0.. 500      a := 5      b := 25       $\xi_i := \text{rnd}(1)$        $x_i := a + (b - a) \cdot \xi_i$ 
mean(x) = 14.856      среднее значение
var(x) = 33.101      дисперсия
```



Построение гистограмм:

```
j := 0.. 10      k := 0.. 9       $A_j := x_i$ 
niz := floor(min(x))      verh := ceil(max(x))       $\Delta := \frac{(\text{verh} - \text{niz})}{10}$ 

int_j := niz +  $\Delta \cdot j$       w := hist(int, x)      int := int + 0.5  $\cdot \Delta$ 
```



Сравнение с теоретическими параметрами:  $x := 0..15$

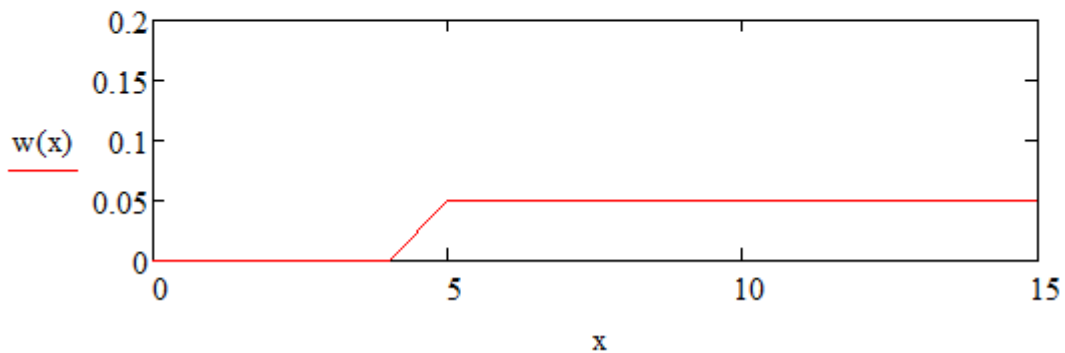
$w(x) := \text{dunif}(x, a, b)$  теоретическая плотность распределения

$\int_0^{30} w(x) dx = 1$  проверка достаточности интервала

$m1 := \int_0^{30} x \cdot w(x) dx$  среднее значение  $m1 = 14.998$

$m2 := \int_0^{30} x^2 \cdot w(x) dx$  средний квадрат  $m2 = 258.311$

$D := m2 - m1^2$  дисперсия  $D = 33.375$



Учет изменения статистических характеристик во времени (усреднение в группах по 100 дискрет случайного вектора A)

Дано:

число дискрет в A - 500;

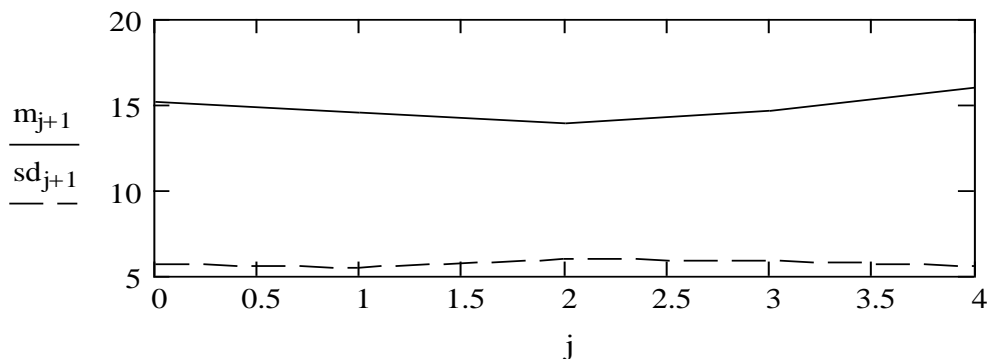
число дискрет в группе (число строк матрицы M со столбцами группами) - 10;

число групп (число столбцов матрицы M) - 5.

$j := 0..4$



$j := 0..4$		- среднее значение	- стандартное отклонение
$i := 0..99$	$M_{i,0} := A_i$	$m_1 := \text{mean}(M^{(0)})$	$sd_1 := \text{stdev}(M^{(0)})$
$i := 100..199$		$m_1 = 15.119$	$sd_1 = 5.658$
	$M_{i-100,1} := A_i$	$m_2 := \text{mean}(M^{(1)})$	$sd_2 := \text{stdev}(M^{(1)})$
$i := 200..299$		$m_2 = 14.566$	$sd_2 = 5.487$
	$M_{i-200,2} := A_i$	$m_3 := \text{mean}(M^{(2)})$	$sd_3 := \text{stdev}(M^{(2)})$
$i := 300..399$		$m_3 = 13.934$	$sd_3 = 5.944$
	$M_{i-300,3} := A_i$	$m_4 := \text{mean}(M^{(3)})$	$sd_4 := \text{stdev}(M^{(3)})$
$i := 400..499$		$m_4 = 14.636$	$sd_4 = 5.905$
	$M_{i-400,4} := A_i$	$m_5 := \text{mean}(M^{(4)})$	$sd_5 := \text{stdev}(M^{(4)})$
		$m_5 = 15.961$	$sd_5 = 5.552$



Конец программы.

## 2. Порядок выполнения работы

### 2.1. При подготовке к лабораторной работе

На этапе подготовки к лабораторной работе студенты должны, используя литературу [1-4] и материалы лекций углубить свои знания.

Студенты на предстоящую лабораторную работу, используя литературу [1-4], а также среду MathCAD в соответствии с индивидуальным заданием на лабораторную работу, готовят компьютерную программу для проведения расчетов.

### 2.2. Во время проведения лабораторной работы

Преподаватель перед проведением лабораторной работы проводит контрольный опрос студентов и определяет степень их готовности к лабораторной работе. Затем преподаватель контролирует работу студентов при выполнении заданий и отвечает на возникающие у студентов вопросы.

При выполнении лабораторной работы студенты должны:

Получить допуск к выполнению лабораторной работы.

Ознакомится с рабочим местом исследователя, получить индивидуальное задание у преподавателя.

Выполнить моделирование случайной величины с заданным законом распределения, используя метод нелинейного преобразования.

Составить программу моделирования, содержащую переменные величины.

Произвести набор и отладку программы, после чего выполнить экспериментальную часть работы.

Определить среднее и дисперсию сигнала, построить гистограммы и законы распределения по библиотечным функциям MathCAD (теоретические законы), проверить достаточность интервала интегрирования:

Варианты

а) – экспоненциальный закон распределения:  $\lambda = 0,5; 0,7; 1; 1,2; 1,5;$

б) – релеевский закон распределения:  $\sigma = 0,5; 0,7; 1; 1,2; 1,5.$

Определить среднее и среднеквадратическое значение сигнала по всей выборке дискретов и по группам (например, в 100 дискрет). Построить графики изменения во времени среднего и среднеквадратического значения.

Оформить отчет.

Защитить результаты лабораторной работы.

Отчет о выполненной лабораторной работе должен быть оформлен каждым студентом индивидуально.

### 3. Содержание отчета

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

1. Краткие теоретические сведения
2. Индивидуальное задание на выполнение лабораторной работы.
3. Основные расчетные соотношения.
4. Листинг программы для проведения расчетов.
5. Результаты выполнения экспериментальной части лабораторного задания,
6. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите известные вам законы распределения СВ.
2. Поясните мультипликативный метод формирования базовой СВ.
3. Какой смысл вложен в понятие плотность распределения?
4. Поясните суть первого начального момента СВ.
5. Поясните суть второго начального момента СВ. Что характеризует величина, равная корню квадратному из второго начального момента?
6. Как проводится выбор диапазона значений по осям при построении двумерных графиков?
7. Каким образом проводится построение двух и более функций на одном графике?

8. Как определяется достаточность интервала при теоретической плотности распределения.
9. Какой показатель обработки данных характеризует учет изменения статистических характеристик во времени.
10. Приведите график плотности распределения СВ с экспоненциальным законом.
11. Приведите график плотности распределения СВ с релеевским законом.
12. Приведите график плотности распределения СВ с равномерным законом.

### Литература

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учеб для вузов. – М.: Высш. шк, 2009.
2. Дьяконов В. Mathcad 2000. Учебный курс. Санкт-Петербург.: Питер. 2000. 586 с.
3. Прохладин Г.Н. Моделирование систем и процессов. Часть 1. М.: МГТУ ГА. 2009.
4. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 3 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
5. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 4 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.

## Лабораторная работа №2

### Моделирование типовой радиотехнической цепи методом комплексной огибающей

**Цель работы** – изучение метода математического моделирования воздействия детерминированного сигнала на типовую радиотехническую цепь – «полосовой фильтр – амплитудный детектор – фильтр низких частот» (ПФ–АД–ФНЧ).

Закрепление знаний о методе комплексной огибающей, как одного из основных методов моделирования узкополосных линейных радиоустройств на ПК.

Развитие навыков работы с ПК и применения программного обеспечения MathCAD для решения радиотехнических задач.

Приобретение навыков оформления результатов исследования на ПК.

**Время** - 4 часа.

### 1. Основные теоретические сведения

#### Общая характеристика методов моделирования

Процесс решения задачи моделирования определяется объектом моделирования и оценкой качества его функционирования. В рамках данной лабораторной работы критерий качества функционирования радиоцепи ПФ–АД–ФНЧ оценивается его сквозной переходной характеристикой. По определению, сквозной переходной характеристикой типовой радиоцепи ПФ–

АД–ФНЧ называется зависимость выходного напряжения от времени при действии на входе радиосигнала в виде высокочастотной функции включения

$$u(t) = 1(t) \cdot \cos(\omega t),$$

$$\text{где } 1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}.$$

Вследствие этого, для оценки динамических свойств радиозвена ПФ–АД–ФНЧ определяется его сквозная переходная характеристика, которая при линейной детекторной характеристике АД связана со сквозной комплексной частотной характеристикой этого радиозвена преобразованием Фурье. Сквозная характеристика находится путем математического моделирования процесса функционирования радиозвена ПФ–АД–ФНЧ.

На первом этапе составляется функциональная схема объекта моделирования, которая приведена на рис. 1.

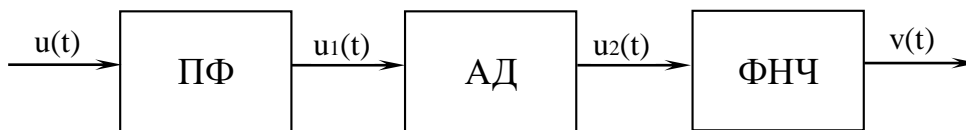


Рис. 1.

На вход полосового фильтра, настроенного на частоту  $\omega_0$  и имеющего ширину полосы пропускания по уровню  $0,7 \Delta\omega$ , поступает АМ-сигнал

$$u(t) = U(t)\cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

несущая частота которого в общем случае  $\omega \neq \omega_0$ , т.е. имеет место расстройка  $\Omega_p = \omega - \omega_0 \neq 0$ . В огибающей входного сигнала, содержащей полезную информацию, при прохождении линейных инерционных звеньев возникают частотные искажения. Такими звеньями в данной радицепи являются ПФ и ФНЧ, в которых эти искажения полностью определяются комплексными частотными характеристиками соответственно ПФ и ФНЧ. Амплитудный детектор является, как правило, безынерционным нелинейным звеном, однако в целях упрощения представляется линейной детекторной характеристикой, которая обеспечивает выделение огибающей высокочастотного сигнала  $u_1(t)$  практически без искажений.

Вследствие этого моделирование преобразований сигнала в элементах ПФ и АД осуществляется методом комплексной огибающей, согласно которому радиосигнал (1) можно записать в виде

$$u(t) = 1(t)\cos(\omega_0 t + \Omega_p t) = C(t) \cdot \cos(\omega_0 t) + S(t) \cdot \sin(\omega_0 t),$$

где  $C(t) = 1(t) \cdot \cos(\Omega p t)$ ,  $S(t) = -1(t) \cdot \sin(\Omega p t)$  – низкочастотные огибающие квадратурных составляющих сигнала  $u(t)$  относительно частоты разложения  $\omega_0$ .

Для прохождения низкочастотной огибающей входного сигнала через ПФ, передаточную функцию последнего необходимо представить в виде НЧ-эквивалента. Считается, что низкочастотным эквивалентом полосового фильтра называется фильтр низких частот, с помощью которого закон изменения огибающей высокочастотного сигнала преобразуется таким же образом, каким этот закон преобразуется в полосовом фильтре.

Передаточная функция НЧ-эквивалента для полосового фильтра в виде одиночного параллельного резонансного контура имеет вид

$$K_{\text{пф}}(p) = \frac{K_0}{1 + pT},$$

где  $K_0$  – резонансный коэффициент передачи (принято  $K_0 = 1$ );  $T = 2/\omega_0 \cdot \delta$  – постоянная времени ПФ;  $\delta$  – эквивалентное затухание резонансного контура ( $\delta \ll 1$ ). Тогда на выходе ПФ имеет место радиосигнал

$$u_1(t) = U_1(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_1) = C_1(t) \cdot \cos(\omega_0 t) + S_1(t) \cdot \sin(\omega_0 t),$$

огибающие квадратурных составляющих которого можно получить с помощью НЧ-эквивалента

$$C_1(p) = K_{\text{пф}}(p) \cdot C(p); \quad S_1(p) = K_{\text{пф}}(p) \cdot S(p).$$

Данное уравнение описывает преобразование  $C(t)$ ,  $S(t)$  в НЧ-эквиваленте в символической форме.

Процесс выделения огибающей  $u_2(t)$  (линейное детектирование) описывается с помощью оператора преобразования

$$u_2(t) = \sqrt{C_1^2(t) + S_1^2(t)}.$$

При квадратичном детектировании огибающей можно применить оператор преобразования

$$u_2(t) = C_1^2(t) + S_1^2(t).$$

Процесс прохождения огибающей  $u_2(t)$  через ФНЧ описывается с помощью оператора преобразования

$$V(p) = K_{\text{ф}}(p) \cdot U_2(p),$$

где  $K_{\text{ф}}(p) = K_{\text{ф}0}/(1 + pT_{\text{ф}})$  – передаточная функция ФНЧ (принято  $K_{\text{ф}0} = 1$ );  $T_{\text{ф}}$  – постоянная времени ФНЧ (обычно  $T_{\text{ф}} > T$ ).

Приведенные формулы являются математическим описанием модели типовой радиосцепи ПФ–АД–ФНЧ для определения сквозной переходной характеристики  $v(t)$ . Причем данная модель адекватна оригиналу при выполнении условия  $\Omega p < \Delta\omega \ll \omega_0$ .

Эквивалентные значения входной величины в дискретных отсчетах представляются как

$$C(t) \rightarrow C[n] = \cos(\Omega p \cdot \Delta t \cdot n); \quad S(t) \rightarrow S[n] = -\sin(\Omega p \cdot \Delta t \cdot n), \quad (2)$$

де  $n = t/\Delta t$ ,  $t \geq 0$ ,  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени,  $n$  – номер шага (отсчета).

Применив нормировку к (2) получим

$$C[n] = \cos(Q \cdot \alpha \cdot n); \quad S[n] = -\sin(Q \cdot \alpha \cdot n),$$

где  $Q = \Omega p T$  – нормированная расстройка,  $\alpha = \Delta t / T$  – нормированный шаг дискретизации.

При моделировании НЧ-эквивалентов ПФ и ФНЧ целесообразно применить метод дискретной аппроксимации Рагаззини-Бергена, при этом алгоритм моделирования имеет вид рекуррентной формулы

$$v_{n+1} = a1 \cdot v_n + b0 \cdot u_{n+1} + b1 \cdot u_n$$

где  $u_n$  – дискретный аналог входного воздействия,  $v_n$  – дискретный аналог реакции на выходе модели. Причем глубина рекуррентной формулы определяется количеством коэффициентов при входных и выходных переменных.

Для модели ПФ коэффициенты рассчитываются по соотношениям

$$a1 = e^{-\alpha}; \quad b1 = 1 - \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha}); \quad b1 = \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha}) - e^{-\alpha}.$$

При рекуррентном вычислении следует задаться начальными условиями  $v_0 = 0$ ,  $u_0 = 0$ , и отдельно произвести расчет первого значения  $v_1$ .

Коэффициенты модели ФНЧ рассчитываются аналогично с учетом, если  $T_f \neq T$ , то  $\alpha_f = \alpha / D$ .

Шаг дискретизации выбирается из условия  $\alpha \leq 0,2$ .

Для того, чтобы убедиться в адекватности цифровой модели оригиналу, можно использовать следующие соотношения в установившемся режиме:

при  $\Omega p = 0 \rightarrow v_{уст} = v_N \approx 1$ ;

при  $\Omega p = 0,5 \Delta \omega$  ( $Q = 1$ )  $\rightarrow v_{уст} = v_N \approx 0,707$  ( $N$  – число отсчетов).

## 2. Порядок выполнения работы

### 2.1. При подготовке к лабораторной работе

На этапе подготовки к лабораторной работе студенты должны, используя литературу [1-5] и материалы лекций углубить свои знания.

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо вспомнить материалы предшествующих учебных дисциплин (радиотехнические цепи и сигналы, радиоприемные устройства, усилительные устройства, радиоизмерения и т.д.), и изучить материалы данной дисциплины по следующим вопросам:

Основные характеристики и свойства типовой радиотехнической цепи ПФ–АД–ФНЧ.

Математическое описание прохождения АМ-сигнала через элементы радиозвена ПФ–АД–ФНЧ.

Определение и свойства сквозной переходной характеристики радиосети ПФ–АД–ФНЧ.

Метод комплексной огибающей как основа для приближенного математического описания узкополосных линейных радиоустройств.

Методы дискретной аппроксимации непрерывных линейных инерционных систем. Метод рекуррентных разностных уравнений.

Студенты на предстоящую лабораторную работу, используя литературу [1-4], а также среду MathCAD в соответствии с индивидуальным заданием на лабораторную работу, готовят компьютерную программу для проведения расчетом.

## 2.2. Во время проведения лабораторной работы

Преподаватель перед проведением лабораторной работы проводит контрольный опрос студентов и определяет степень их готовности к лабораторной работе. Затем преподаватель контролирует работу студентов при выполнении заданий и отвечает на возникающие у студентов вопросы.

### **При выполнении лабораторной работы студенты должны:**

Ознакомиться с описанием лабораторной работы.

Изучить вопросы, указанные в п. 2 настоящего описания.

Ознакомиться с алгоритмом составления рекуррентных разностных уравнений в программном обеспечении MathCAD.

Составить листинг программы моделирования для ПК с учетом применения программного обеспечения MathCAD.

Получить допуск к выполнению лабораторной работы.

Написать программу моделирования типовой радицепи ПФ–АД–ФНЧ на ПК, содержащую переменную исследователя.

Ознакомиться с рабочим местом исследователя, получить индивидуальное задание у преподавателя, провести набор и отладку программы.

Выполнить экспериментальную часть работы с использованием цифровой модели. Построить временные диаграммы квадратур входного сигнала и построить временные диаграммы сигналов на выходах полосового фильтра, а также АД (линейное детектирование) и ФНЧ (квадратур и результирующее значение). Проверить влияние вариаций параметров на изменение сквозной переходной характеристики.

Варианты:  $Q$  – из ряда: 0; 0,5; 1; 1,5; 2;  $D$  – из ряда: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3;

$\alpha$  – из ряда: 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25.

Отчет о выполненной лабораторной работе должен быть оформлен каждым студентом индивидуально, с указанием состава подгруппы.

## **3. Содержание отчета**

1. Краткие теоретические сведения
2. Индивидуальное задание на выполнение лабораторной работы.
3. Основные расчетные соотношения.
4. Листинг программы для проведения расчетов.
5. Результаты выполнения экспериментальной части лабораторного задания.
6. Краткие теоретические сведения.

## 7. Выводы по работе.

**Контрольные вопросы**

1. При каких допущениях справедлива замена полосового фильтра его низкочастотным эквивалентом при использовании метода комплексной огибающей?
2. Какие допущения положены в основу цифровой модели типовой радиосцепи ПФ–АД–ФНЧ?
3. Как определяется требуемое время установления при определении сквозной переходной характеристики радиосцепи?
4. Как влияют на форму сквозной переходной характеристики:
  - расстройка входного сигнала относительно резонансной частоты полосового фильтра,
  - отношение постоянных времени ПФ и ФНЧ,
  - тип амплитудного детектора (линейный или квадратичный детектор огибающей),
  - шаг дискретизации по времени при моделировании радиосцепи на ПК?
5. Какие проявляются преимущества в использовании нормированных переменных типа  $\alpha$ ,  $Q$ ,  $D$  при проведении эксперимента на модели?
6. Перечислите факторы, влияющие на форму сквозной переходной характеристики модели радиосцепи ПФ–АД–ФНЧ.
7. Поясните суть метода дискретной аппроксимации непрерывной динамической системы и его применения при цифровом моделировании.
8. Какие факторы определяют глубину рекуррентного алгоритма цифровой модели линейной инерционной системы?
9. Поясните, почему при использовании рекуррентных алгоритмов цифрового моделирования радиоустройств применение операции переадресации вместо массива переменной дает значительную экономию оперативной памяти и машинного времени?
10. Какие факторы ограничивают увеличение шага дискретизации по времени при цифровом моделировании радиосистем?

**Литература**

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учеб для вузов. – М.: Высш. шк, 2009.
2. Дьяконов В. Mathcad 2000. Учебный курс. Санкт-Петербург.: Питер. 2000. 586 с.
3. Прохладин Г.Н. Моделирование систем и процессов. Часть 1. М.: МГТУ ГА. 2009.
4. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 3 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
5. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 4 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.





коэффициентом деления (в диапазоне  $N1 \dots N2$ ). На вход петли ФАПЧ подается высокостабильный сигнал с кварцевого генератора (ГОЧ). С выхода ГУН частота делится на коэффициент деления, задаваемый кодом, поступающим на входные шины ДПКД. Полученная в результате частота подается на фазовый дискриминатор и сравнивается с частотой ГОЧ. Разность частот, пройдя фильтр нижних частот (ФНЧ), сформируется в постоянное напряжение, которое скорректирует частоту ГУН. Причем коррекция частоты проводится таким образом, чтобы снизить разбаланс частоты ГОЧ с поделенной частотой ГУН.

Режим работы петли ФАПЧ, когда частоты, поступающие на входы фазового детектора, становятся синхронными (равными), называются режимом синхронизации. Причем, если система входит в режим синхронизации, то она считается устойчивой и имеет затухающий процесс установления. Длительность переходного процесса определяется как время, протекающее от момента приложения на вход единичного скачка до момента, после которого отклонение от положения равновесия переходной характеристики не превышает заданной допустимой ошибки.

Система ФАПЧ представляется следующими полосовыми характеристиками: полосой пропускания; полосой захвата; полосой удержания. Область начальных отстроек ГУН, в которых обеспечивается режим синхронизации, называется полосой удержания. Под полосой захвата понимают область начальных отстроек ГУН, в которой при любых начальных условиях устанавливается режим синхронизации (или удержания). Полосой пропускания принято считать значение частоты функции передачи системы ФАПЧ, когда ее значение составляет 0,707 от коэффициента передачи системы на частоте 1 Гц. Причем полоса пропускания определяет инерционность системы, поэтому от нее зависит быстродействие системы и время установления (переходного процесса).

Согласно [3] результирующее значение спектральной плотности мощности шума на выходе системы ФАПЧ определится выражением

$$S_{\text{ВЫХ}}(\omega) = S_{\text{ВН}}(\omega)[W(j\omega)N]^2 + S_{\text{ВНУТ}}(\omega)[1 - W(j\omega)]^2, \quad (1)$$

где  $S_{\text{ВНУТ}}(\omega)$  и  $S_{\text{ВН}}(\omega)$  – соответственно спектральные плотности фазовых шумов от внешних и внутренних источников,  $W(j\omega) = K(j\omega)/[1 + K(j\omega)]$  – функция передачи замкнутой системы ФАПЧ,  $K(j\omega)$  берется из (1) заменой  $p = j\omega$ ,  $N$  – коэффициент деления ДПКД.

Считается, что внутренние шумы практически определяются флуктуационными возмущениями ГУН, а внешние шумы – как источниками, находящимися вне петли и приведенными к источнику опорного генератора -  $S_{\text{ГОЧ}}(j\omega)$ , так и источниками флуктуаций внутри петли, такие как возмущения в ДПКД, ЧФД и ФНЧ. Причем высокостабильные кварцевые генераторы

выпускаются только для ряда фиксированных частот, а поскольку частота сравнения может быть любой, то перед фазовым дискриминатором ставят делитель с фиксированным коэффициентом деления (ДФКД). Следует отметить, что фазовые шумы  $S_{ДФКД}(j\omega)$ ,  $S_{ДФКД}(j\omega)$ ,  $S_{ФНЧ}(j\omega)$  не превышают -150 дБ/Гц, и поэтому ими, как правило, пренебрегают. Вследствие этого, основными источниками внешних и внутренних шумовых воздействий являются соответственно флуктуационные возмущения ГОЧ и ГУН. Внешние воздействия будут определяться соотношением

$$S_{ВН}(j\omega) = \frac{S_{ГОЧ}(j\omega)}{R^2} + S_{ДФКД}(j\omega) - S_{ДФКД}(j\omega) + \frac{S_{ФД}(j\omega) + S_{ФНЧ}(j\omega)}{K_{ДФД}^2}, \quad (2)$$

Выберем управляемый и опорный автогенераторы с выходными частотами соответственно  $f_{ГУН} = 10^3$  МГц,  $f_{ГОЧ} = 10$  МГц и шумовыми характеристиками

$$S_{ГУН}(v) = 10^{0,7} \left( \frac{2\pi T_0}{v} \right)^3 + 10^{-3} \left( \frac{2\pi T_0}{v} \right)^2 + 10^{-15,5}, \quad (3)$$

$$S_{ГОЧ}(v) = 10^{-7,82} \left( \frac{2\pi T_0}{v} \right)^3 + 10^{-9,86} \left( \frac{2\pi T_0}{v} \right)^2 + 10^{-12,7} \frac{2\pi T_0}{v} + 10^{-16,8}, \quad (4)$$

где  $v = \omega T_0$  - нормированная частота относительно периода повторения.

Учитывая (4), получим нормированное значение спектральной плотности шумов внешнего воздействия

$$S_{ВН}(v) = S_{ФД}(v) + \frac{S_{ГОЧ}(v)}{(R)^2} = 10^{-14,7} \frac{2\pi T_0}{v} + 10^{-16,0} + \\ + \frac{10^{-7,82} \left( \frac{2\pi T_0}{v} \right)^3 + 10^{-9,86} \left( \frac{2\pi T_0}{v} \right)^2 + 10^{-12,7} \frac{2\pi T_0}{v} + 10^{-16,8}}{(R)^2}, \quad (5)$$

Выберем период дискретизации ФД равным  $T_0 = 10^{-7}$  с. Тогда  $R=1$ , а  $N=100$ . Для заданных величин результаты моделирования представлены на рис. 2, где обозначены кривые: 1 – результирующая характеристика  $S_{ВЫХ}(v)$ ; 2 – модуль передаточной функции замкнутого кольца ФАПЧ  $|W(jv)|^2$ ; 3 – модуль

передаточной функции  $|1 - W(jv)|^2$ ; 4 – спектральная плотность шумов  $S_{ГУН}(v)$ ; 5 – спектральная плотность шумов  $S_{ВН}(v)N^2$ ; 6 – спектральная плотность шумов  $S_{ГУН}(v)|1 - W(jv)|^2$ .

Полученная шумовая характеристика на выходе петли ФАП отображает известные законы фильтрации данной системы. Так до полосы пропускания петли система прозрачна для внешних шумовых составляющих, а за полосой пропускания спектральную характеристику ГУН с учетом подавления составляющих коэффициентом усиления системы  $K_0$ .

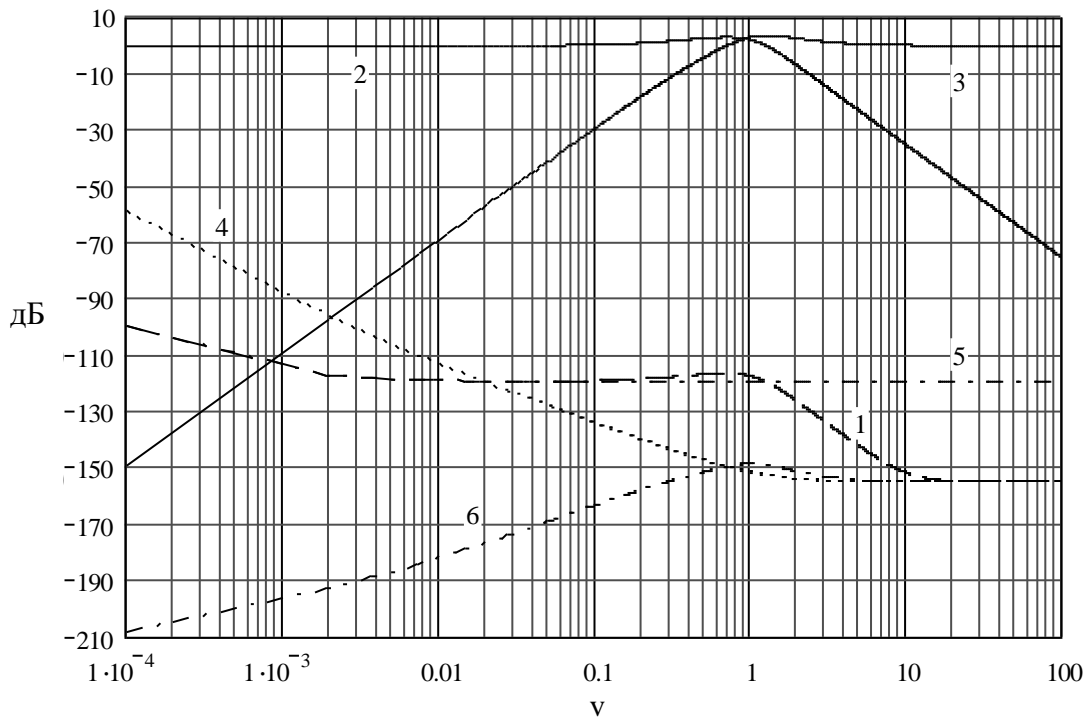


Рис. 2.

Полученные характеристики отображают известные законы фильтрации систем автоматического регулирования. Так внешние воздействия на систему ФАПЧ (от ГОЧ) проходят на выход с коэффициентом умножения петли (относительное умножение на  $N$ ). То есть для внешних воздействий петля ФАПЧ является фильтром низких частот. Для внутренних возмущений петля является фильтром высоких частот. Таким образом, за полосой пропускания частотная характеристика системы будет определяться спектральными характеристиками управляемого генератора.

2. Моделирование процесса установления системы фазовой автоподстройки с астатизмом второго порядка, изображенной на рис. 3.

При моделировании используем метод решения дифференциальных уравнений для стационарной системы.

Функция передачи разомкнутой системы ФАПЧ равна

$$K(p) = \frac{K_0(1 + pT_1)}{p^2(1 + pT_2)}, \quad (6)$$

где  $K_0$  – коэффициент усиления разомкнутой петли ФАПЧ,  $T_1$  и  $T_2$  – постоянные интегрирования ФНЧ. Как следует из (6), на частоте 1 Гц выражения в скобках числителя и знаменателя можно приравнять единице, так как  $1 \gg pT_1$  и  $1 \gg pT_2$ . Поэтому начальный участок асимптоты частотной характеристики будет иметь наклон 40 дБ/дек, так как будет определяться соотношением  $1/p^2$ . Выражение в скобках числителя является форсирующим звеном, и на частотной выходной характеристике петли ФАПЧ определяет точку излома асимптоты с 40 дБ/дек на 20 дБ/дек на частоте  $1/T_1$ . Причем излом должен быть до пересечения частотной характеристики с единичным усилением системы. Такое положение является непременным условием устойчивости системы, определяемые требованиями классической устойчивости систем автоматического регулирования. Выражение в скобках знаменателя является интегрирующим звеном, и определяет точку излома асимптоты с 20 дБ/дек на 40 дБ/дек на частоте  $1/T_2$  на участке частотной характеристики после пересечения этой характеристикой единичного усиления.

Причем расстояния точек излома по оси частот от пересечения частотной характеристики с единичным усилением будут определять запасы устойчивости по амплитуде и фазе.

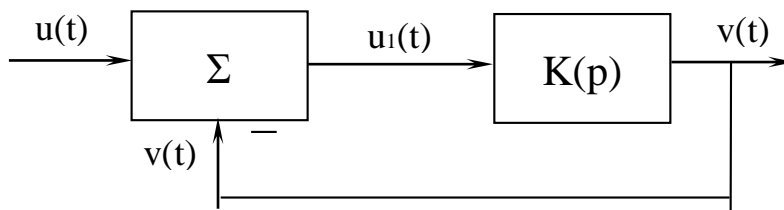


Рис. 3.

Представив (6) как отношение выходного и входного сигналов, а оператор Лапласа ( $p$ ), как производную по времени, запишем систему уравнений замкнутой системы

$$\frac{v(t)}{u_1(t)} = \frac{K_0 \left( 1 + \frac{1}{dt} T_1 \right)}{\frac{1}{dt^2} \left( 1 + \frac{1}{dt} T_2 \right)}$$

$$u_1(t) = u(t) - v(t).$$

Подставив второе уравнение в первое, получим дифференциальное уравнение третьего порядка

$$\frac{d^3 v(t)}{dt^3} T_2 + \frac{d^2 v(t)}{dt^2} = K_0 u(t) - K_0 v(t) + \frac{u(t)}{dt} T_1 K_0 - \frac{v(t)}{dt} T_1 K_0. \quad (7)$$

Используя правило, при котором дифференциальному уравнению для дискретного аналога системы соответствует уравнение в конечных разностях порядка  $m$ , составим систему разностных уравнений

$$\nabla^3 v[n] = \nabla^2 v[n] - \nabla^2 v[n-1] = v[n] - 3v[n-1] + 3v[n-2] - v[n-3]$$

$$\nabla^2 v[n] = \nabla v[n] - \nabla v[n-1] = v[n] - 2v[n-1] + v[n-2] \quad (8)$$

$$\nabla v[n] = v[n] - v[n-1].$$

Заменяя в (7) производные уравнениями в конечных разностях (8), получим в программном обеспечении MathCAD

$$v_{n+3} = a1 \cdot v_{n+2} + a2 \cdot v_{n+1} + a3 \cdot v_n + b0 \cdot u_{n+3} + b1 \cdot u_{n+2}$$

$$\text{где } a1 = \frac{3T_2 + 2 + K_0 T_1}{c}; \quad a2 = \frac{-(3T_2 + 1)}{c}; \quad a3 = \frac{T_2}{c}; \quad b0 = \frac{K_0(1 + T_1)}{c}; \quad b1 = \frac{-K_0 T_1}{c};$$

$$c = T_2 + 1 + K_0(1 + T_1).$$

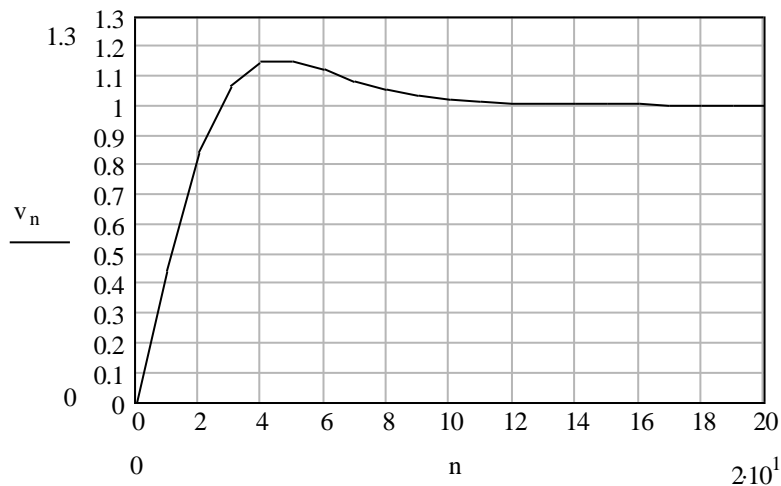


Рис. 4.

По приведенным соотношениям в MathCAD был построен график переходного процесса от скачка входного напряжения  $u(t) = 1$  при  $t > 0$  (рис. 4). При этом были приняты параметры [3]:  $K_0 = 0,29$ ;  $T_1 = 3,44$ ;  $T_2 = 0,59$ .

Заметим, что система устойчива, так как входит в режим синхронизации, а переходной процесс имеет затухающий характер.

Данный способ анализа воздействий на систему достаточно простой и экономичный, однако позволяет определять выходные величины только для целочисленных отсчетов.

Для получения отсчетов в промежутке целочисленных значений используются: явное и неявное преобразование Эйлера, а также билинейное преобразование [4]. В этом случае в (6) оператор Лапласа заменяется соответственно на переменные:  $p = (z - 1)/\Delta t$ ;  $p = (z - 1)/z \cdot \Delta t$ ;  $p = 2(z - 1)/(z + 1)\Delta t$ . Далее проводятся операции для получения дробно-рационального уравнения, от которого находят рекуррентно-разностное выражение. При воздействии на полученное соотношение единичного скачка получают реакцию, которая описывает переходной процесс.

Рекуррентное уравнение представляется как

$$v[n] = B1 \cdot v[n - 1] + B2 \cdot v[n - 2] + B3 \cdot v[n - 3] + A2 \cdot u[n - 2] + A3 \cdot u[n - 3]. \quad (9)$$

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. На этапе подготовки к лабораторной работе студенты должны, используя литературу [1-5] и материалы лекций углубить свои знания. При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо вспомнить материалы предшествующих учебных дисциплин (радиотехнические цепи сигналы, радиоавтоматика и т.д.), и изучить материалы данной дисциплины по следующим вопросам:

Методы анализа спектральных и динамических характеристик радиоустройств.

Систему команд и операторов MathCAD, необходимых для моделирования спектральных и динамических характеристик радиоустройств, а также рекуррентно-разностных уравнений.

Принципы составления программ для моделирования спектральных и динамических характеристик.

Изучить и запомнить встроенные функции и ключевые слова для анализа спектральных и динамических характеристик, моделируемых в лабораторной работе.

Вспомнить алгоритмы численного интегрирования, использующие билинейное преобразование и преобразование Эйлера.

Используя явное преобразование Эйлера, определить коэффициенты для рекуррентного уравнения системы ФАПЧ с астатизмом второго порядка, в результате чего находятся значения на выходе системы при входных воздействиях.

Студенты на предстоящую лабораторную работу, используя литературу [1-5], а также среду MathCAD в соответствии с индивидуальным заданием на лабораторную работу, готовят компьютерную программу для проведения расчетов.

2.2. Во время проведения лабораторной работы

Преподаватель перед проведением лабораторной работы проводит контрольный опрос студентов и определяет степень их готовности к лабораторной работе. Затем преподаватель контролирует работу студентов при выполнении заданий и отвечает на возникающие у студентов вопросы.

При выполнении лабораторной работы студенты должны:

Ознакомиться с описанием лабораторной работы.

Изучить вопросы, указанные в п. 2 настоящего описания.

Ознакомиться с алгоритмом составления рекуррентных разностных уравнений в программном обеспечении MathCAD.

Составить листинг программы моделирования для ПК с учетом применения программного обеспечения MathCAD.

Выполнить моделирование спектральных характеристик петли ФАПЧ, используя нормированную псевдочастоту  $\nu = \omega \cdot T_0$ , где  $\omega$  – угловая частота,  $T_0$  – период частоты сравнения фазового дискриминатора.

Определить полосу пропускания, показатель колебательности, уровень шумов. Смоделировать переходной процесс петли ФАПЧ, используя преобразование Эйлера.

Определить величину перерегулирования и длительность переходного процесса.

Варианты

а) –  $R = 1$ ,  $N = 100$ , явное преобразование Эйлера;

б) –  $R = 10$ ,  $N = 1000$ , явное преобразование Эйлера.

Оформить отчет.

Защитить результаты лабораторной работы.

Отчет о выполненной лабораторной работе должен быть оформлен каждым студентом индивидуально.

### 3. Содержание отчета

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

1. Индивидуальное задание на выполнение лабораторной работы.
2. Основные расчетные соотношения.
3. Листинг программы для проведения расчетов.
4. Выполнить моделирование спектральных и динамических характеристик радиоустройств.
5. Составить программу моделирования, содержащую переменные величины.
6. Произвести набор и отладку программы, после чего выполнить экспериментальную часть работы.
7. Краткие теоретические сведения.
8. Выводы по работе.



### **Контрольные вопросы**

1. Какой смысл вложен в понятие псевдочастота? Какое преимущество дает анализ с использованием псевдочастоты?
2. Поясните влияние параметров системы ФАПЧ на характер выходной частотной характеристики.
3. Чем характеризуется устойчивость системы ФАПЧ?
4. В какую характеристику заключен информационный параметр системы ФАПЧ?
5. Как определяется выходная спектральная характеристика системы ФАПЧ?
6. Какие соотношения необходимо выдерживать между полосой пропускания и частотой сравнения петли ФАПЧ для обеспечения устойчивости?
7. Поясните суть понятий запаса по амплитуде и запаса по фазе? С какой целью закладываются данные параметры?
8. Что заложено в понятие быстродействие системы ФАПЧ?
9. Какое воздействие используется для определения длительности переходного процесса?
10. Приведите алгоритм вычисления переходного процесса.
11. Какие преобразования используются для построения переходного процесса петли ФАПЧ на ПК?
12. Какие возмущения подавляются до полосы пропускания, а какие после полосы пропускания петли ФАПЧ?
13. Какое основное фильтрующее преимущество петли ФАПЧ?

### **Литература**

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учеб для вузов. – М.: Высш. шк, 2009.
2. Дьяконов В. Mathcad 2000. Учебный курс. Санкт-Петербург.: Питер. 2000. 586 с.
3. Прохладин Г.Н. Моделирование систем и процессов. Часть 1. М.: МГТУ ГА. 2009.
4. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 3 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
5. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 4 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.

### **Лабораторная работа №4.**

#### **Моделирование нелинейного радиотехнического звена методом несущей частоты**

**Цель работы** - Изучение метода математического моделирования воздействия детерминированного сигнала на нелинейное радиотехническое звено – «амплитудный детектор» (АД).

Закрепление знаний о методе несущей, как одного из основных методов моделирования нелинейных радиоустройств на ПК.

Развитие навыков работы с ПК и применения программного обеспечения MathCAD для решения радиотехнических задач.

Приобретение навыков оформления результатов исследования на ПК.

**Время** – 4 часа.

## 1. Основные теоретические сведения

### Общая характеристика методов моделирования.

Процесс решения задачи моделирования определяется объектом моделирования и оценкой качества его функционирования. В рамках данной лабораторной работы критерий качества функционирования радиозвена «амплитудного детектора» оценивается его демодуляционной характеристикой. По определению, демодуляционной характеристикой типового радиозвена – амплитудного детектора называется зависимость выходного напряжения от времени при действии на входе радиосигнала в виде высокочастотной амплитудно-модулированной функции

$$u(t) = U(t) \cdot [1 + m \cdot \sin(\Omega \cdot t)] \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi),$$

где  $U(t)$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  – амплитуда, частота и фаза колебаний несущей,  $\Omega$  – частота огибающей,  $m$  – индекс модуляции.

Демодуляционная характеристика находится путем математического моделирования процесса функционирования данного радиозвена. На рис. 1 приведена широко известная схема диодного детектора, которая относится к классу динамических нелинейных звеньев.

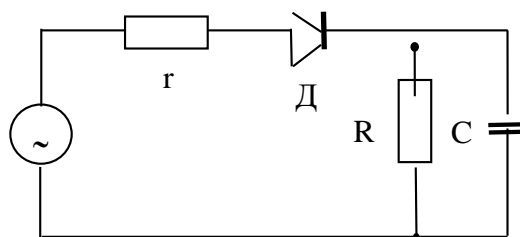


Рис. 1.

На первом этапе составляется функциональная схема объекта моделирования, которая приведена на рис. 2. Функциональная схема представляется последовательно соединенными нелинейным безинерционным звеном (НБЗ) и линейным инерционным звеном (ЛИЗ).

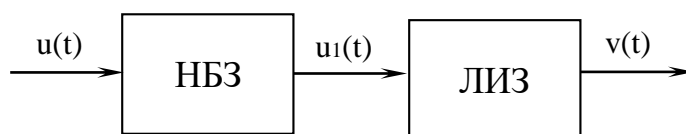


Рис. 2.

Высокочастотный сигнал, промодулированный низкочастотным синусоидальным колебанием, от источника тока подается на вход диода (НБЗ), который пропускает только положительную полуволну (рис. 3). При этом используется линейно-ломанная аппроксимация функции передачи детектора. Далее, полученный на выходе диода сигнал, поступает на формирующий фильтр (ЛИЗ), содержащий R и C элементы.

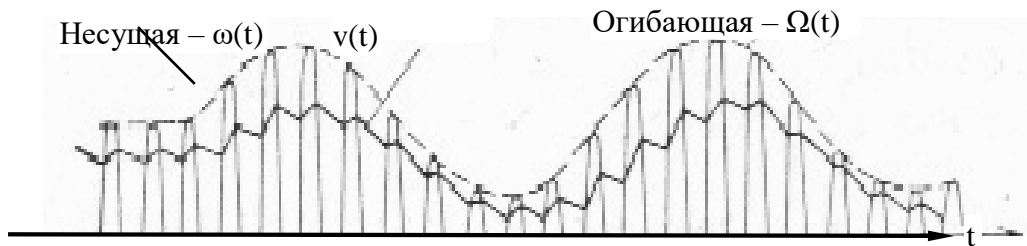


Рис. 3.

Для определения сигнала на выходе фильтра представим его эквивалентное сопротивление

$$Z = \frac{R \cdot \frac{1}{pC}}{R + \frac{1}{pC}} = \frac{R}{pT + 1}.$$

Тогда

$$v(t) = \frac{u(t)}{r + \frac{R}{pT + 1}} \cdot \frac{R}{pT + 1} = \frac{u(t)}{\frac{r}{R}(pT + 1) + 1},$$

где  $T = RC$  — постоянная времени детектора,  $r$  — суммарное сопротивление диода и источника тока.

Тогда коэффициент передачи звена составит

$$K(p) = \frac{v(t)}{u(t)} = \frac{\beta}{pT + 1 + \beta},$$

где  $\beta = R/r$  — отношение сопротивлений нагрузки и источника сигнала.

Решение приведенного уравнения методом конечных разностей дает

$$v[n] = a_1 \cdot v[n-1] + b_0 \cdot u[n],$$

$$\text{где } a_1 = T/(1 + T + \beta), \quad b_0 = \beta/(1 + T + \beta).$$

Показатель  $\beta$  следует выбирать, чтобы сопротивление  $R$  не шунтировало сопротивление источника сигнала  $r \ll R$ . При выборе постоянной времени  $T$  необходимо, чтобы она была мала по сравнению с периодом модуляции. В

противном случае изменение выпрямленного напряжения на нагрузке может отставать от изменения огибающей входного сигнала (рис. 4).

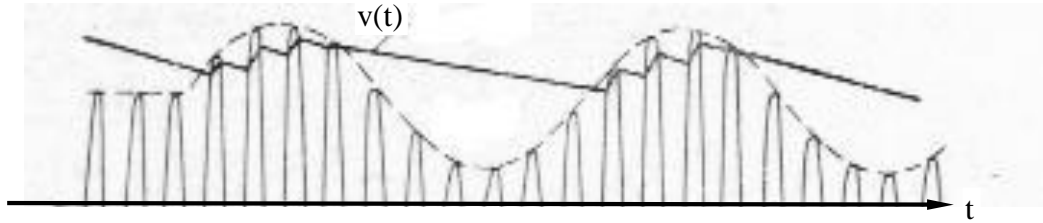


Рис. 4.

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. На этапе подготовки к лабораторной работе студенты должны, используя литературу [1-5] и материалы лекций углубить свои знания. При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо вспомнить материалы предшествующих учебных дисциплин (радиотехнические цепи сигналы, радиоавтоматика и т.д.), и изучить материалы данной дисциплины по следующим вопросам:

Основные характеристики и свойства нелинейного радиотехнического звена – амплитудного детектора.

Математическое описание прохождения АМ-сигнала через элементы звена – амплитудного детектора.

Выявление свойств демодуляционной характеристики радиозвена – амплитудного детектора.

Метод несущей частоты как основа для приближенного математического описания нелинейных радиоустройств.

Методы дискретной аппроксимации непрерывных нелинейных инерционных систем. Метод рекуррентных разностных уравнений.

Студенты на предстоящую лабораторную работу, используя литературу [1-4], а также среду MathCAD в соответствии с индивидуальным заданием на лабораторную работу, готовят компьютерную программу для проведения расчетов.

### 2.2. Во время проведения лабораторной работы

Преподаватель перед проведением лабораторной работы проводит контрольный опрос студентов и определяет степень их готовности к лабораторной работе. Затем преподаватель контролирует работу студентов при выполнении заданий и отвечает на возникающие у студентов вопросы.

#### **При выполнении лабораторной работы студенты должны:**

Изучить вопросы, указанные в п. 2 настоящего описания.

Ознакомиться с алгоритмом составления рекуррентных разностных уравнений в программном обеспечении MathCAD.

Составить листинг программы моделирования для ПК с учетом применения программного обеспечения MathCAD.

Написать программу моделирования типового радиозвена амплитудного детектора на ПК.

Выполнить экспериментальную часть работы с использованием цифровой модели. Построить временные диаграммы входного сигнала и построить временные диаграммы сигнала на выходе АД (линейное детектирование). Проверить влияние вариаций параметров на изменение характеристики детектирования.

Варианты

Вид характеристики огибающей:

пилообразная характеристика –

треугольная характеристика –

$Q$  – из ряда: 0; 0,5; 1; 1,5; 2;

$D$  – из ряда: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3;

$\alpha$  – из ряда: 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25.

Оформить отчет.

Защитить результаты лабораторной работы.

Отчет о выполненной лабораторной работе должен быть оформлен каждым студентом индивидуально.

### 3. Содержание отчета

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

1. Индивидуальное задание на выполнение лабораторной работы.
2. Основные расчетные соотношения.
3. Листинг программы для проведения расчетов.
4. Выполнить моделирование спектральных и динамических характеристик радиоустройств.
5. Составить программу моделирования, содержащую переменные величины.
6. Произвести набор и отладку программы, после чего выполнить экспериментальную часть работы.
7. Краткие теоретические сведения.
8. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Назовите известные Вам методы математического моделирования РТУ и С. Укажите преимущества и недостатки этих методов
2. В каких случаях применимо моделирование РТУ и С методом несущей частоты?
3. Как определяются коэффициенты рекуррентного уравнения при использовании метода конечных разностей?

4. Поясните влияние нагрузочного сопротивления  $R$  на показатели выходного сигнала.
5. Какое влияние оказывает постоянная времени  $T$  на форму выходного сигнала?
6. Как влияет на форму выходного сигнала отношение несущей частоты к частоте огибающей?
7. Какую роль выполняет диодный радиоэлемент в структуре амплитудного детектора?
8. Поясните особенности математического моделирования амплитудного детектирования при воздействии на входе больших и малых сигналов?
9. Поясните основной недостаток при использовании рекуррентных алгоритмов цифрового моделирования радиоустройств.
10. Какие факторы ограничивают увеличение шага дискретизации по времени при цифровом моделировании радиосистем методом несущей?

### Литература

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учеб для вузов. – М.: Высш. шк, 2009.
2. Дьяконов В. Mathcad 2000. Учебный курс. Санкт-Петербург.: Питер. 2000. 586 с.
3. Прохладин Г.Н. Моделирование систем и процессов. Часть 1. М.: МГТУ ГА. 2009.
4. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 3 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
5. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 4 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.

### Лабораторная работа №5.

#### Исследование системы Simulink для моделирования радиотехнических сигналов и устройств

**Цель работы** - Изучение метода математического моделирования воздействия детерминированного сигнала на нелинейное радиотехническое звено – «амплитудный детектор» (АД).

Закрепление знаний о методе несущей, как одного из основных методов моделирования нелинейных радиоустройств на ПК.

Развитие навыков работы с ПК и применения программного обеспечения MathCAD для решения радиотехнических задач.

Приобретение навыков оформления результатов исследования на ПК.

**Время** – 4 часа.

## 1. Основные теоретические сведения

### Общая характеристика методов моделирования.

Система SIMULINK - это расширение системы MATLAB, которое реализует имитационное моделирование систем различного назначения, обладает удобной визуализацией построения моделей и вывода результатов. Может работать как самостоятельно приложение, используя собственные библиотеки сигналов и устройств, так и используя данные, полученные в системе MATLAB.

Для запуска системы SIMULINK необходимо предварительно выполнить запуск системы MATLAB.

После открытия командного окна системы MATLAB нужно запустить систему SIMULINK. Это можно сделать несколькими способами:

- нажать кнопку (Simulink) на панели инструментов системы MATLAB;
- в строке командного окна MATLAB напечатать Simulink и нажать клавише Enter.

Библиотека системы SIMULINK содержит следующие разделы:

- Continuous - блоки аналоговых элементов;
- Discontinuous - блоки нелинейных элементов;
- Discrete - блоки дискретных элементов;
- Look-Up Tables - блоки таблиц;
- Math Operations - блоки элементов, определяющих математические операции;
- Model Verification - блоки проверки свойств сигналов;
- Model-Wide Utilities - раздел дополнительных улит;
- Ports&Subsystems - порты и подсистемы;
- Signal Attributes - блоки задания свойств сигналов;
- Signal Routing - блоки маршрутизации сигнала;
- Sinks - блоки приема и отображения сигналов;
- Sources - блоки источников сигнала;
- User-Defined Function - функции, определяемые пользователем.

Для создания модели в среде SIMULINK необходимо последовательно выполнить ряд действий.

1. Создать новый файл модели с помощью команды File/New/Model.

2. Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки. Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу мыши, “перетащить” блок в созданное окно. Клавишу мыши нужно держать нажатой. Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу мыши), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре.

3. Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные по умолчанию. Для этого необходимо дважды щелкнуть левой

клавишей мыши, указав курсором на изображение блока. Откроется окно параметров данного блока. При вводе числового значения параметра следует иметь в виду, что в качестве десятичного разделителя должна использоваться точка, а не запятая. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой ОК. Можно также, не закрывая окна, воспользоваться кнопкой Apply для сохранения изменений

4. После установке на схеме всех блоков требуется выполнить их соединение. Для этого необходимо указать курсором на “выход” блока, а затем нажать и, не отпуская левую кнопку мыши, провести линию ко входу другого блока. После чего отпустить клавишу. Если соединение не создано, то линия связи будет пунктирной и иметь красный цвет. В случае правильного соединения линия связи будет сплошной. Для создания линии связи можно также выделить блок-источник сигнала, затем нажать клавишу Ctrl на клавиатуре и выделить блок-приемник. Для создания точки разветвления в соединительной линии нужно подвести курсор к предполагаемому узлу и, нажав правую кнопку мыши, протянуть линию. Для удаления линии требуется выделить ее, а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре.

5. После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню File/Save As..., в окне системы и указав папку и имя файла. При последующем редактировании схемы можно пользоваться пунктом меню File/Save. При повторных запусках программы Simulink загрузка схемы осуществляется с помощью меню File/Open... в окне обозревателя библиотеки блоков или из командного окна системы MATLAB.

Запуск моделирования выполняется с помощью выбора пункта меню Simulation/Start. Процесс моделирования можно завершить досрочно, выбрав пункт меню Simulation/Stop. Моделирование также можно остановить (Simulation/Pause) и затем продолжить (Simulation/Continue).

Для завершения работы необходимо сохранить модель в файле, закрыть окно модели, окно обозревателя библиотеки блоков, а также командное окно системы MATLAB.

Ниже приведены некоторые блоки для моделирования сигналов, их преобразований и анализа характеристик.

#### **Блоки библиотеки Sources.**

Constant (источник постоянного сигнала) - задает постоянный по уровню сигнал.

Sine Wave (источник синусоидального сигнала) - формирует синусоидальный сигнал с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением.

Ramp (источник линейно изменяющегося сигнала) - формирует линейный сигнал.

Step (генератор ступенчатого сигнала) - формирует ступенчатый сигнал.

Signal Generator (генератор сигналов) - формирует один из четырех видов периодических сигналов:

- sine - синусоидальный сигнал,



- square - меандр (прямоугольный сигнал),
- sawtooth - пилообразный сигнал,
- random - случайный сигнал.

Uniform Random Number (источник случайного сигнала с равномерным распределением) - формирование случайного сигнала с равномерным распределением.

Random Number (источник случайного сигнала с нормальным распределением) - формирование случайного сигнала с равномерным распределением уровня сигнала.

Pulse Generator (источник импульсного сигнала) - формирование прямоугольных импульсов.

Chirp Signal (генератор сигнала линейно изменяющейся частоты) - формирование синусоидальных колебаний, частота которых линейно изменяется.

Band-Limited White Noise (генератор белого шума) - создает сигнал заданной мощности, равномерно распределенной по частоте.

Clock (источник времени) - формирует сигнал, величина которого на каждом шаге равна текущему времени моделирования.

From File (блок считывания данных из файла) - получение данных их внешнего файла.

Repeating Sequence (источник периодического сигнала) - формирование заданного пользователем периодического сигнала.

Signal Builder (конструктор сигналов) - создание кусочно-линейных сигналов произвольной формы с помощью графического интерфейса с пользователем (GUI - интерфейса).

### **Блоки библиотеки Sinks.**

Scope (осциллограф) - построение графиков исследуемых сигналов в функции времени. Позволяет наблюдать за изменениями сигналов в процессе моделирования.

Display (цифровой дисплей) - отождествляет значение сигналов в виде числа.

### **Блоки библиотеки Continuous.**

Derivative (блок вычисления производной) - выполняется численное дифференцирование входного сигнала.

Integrator интегратор) - интегрирование входного сигнала.

Transport Delay (блок фиксированной задержки сигнала) - обеспечивает задержку входного сигнала на заданное время.

### **Блоки библиотеки Math Operations**

Sum (сумматор) - выполняет вычисление суммы текущих значений сигналов.

Product (блок умножения и деления) - выполняет вычисление произведения текущих значений сигналов.

Sign (блок определения знака сигнала) - определяет знак входного сигнала.

Dot Product (блок скалярного произведения) - выполняет вычисление скалярного произведения двух векторов.

Math Function (математическая функция) - выполняет вычисление заданной математической функции входного сигнала  $u$ .

Trigonometric Function (тригонометрическая функция) - выполняет вычисление выбранной тригонометрической функции.

Min Max (блок вычисления максимального или минимального значения) - определяет максимальное или минимальное значение из всех сигналов, поступающих на его выходы.

Relational Operator (блок выполнения операций отношения) - блок сравнивает текущие значения входных сигналов.

### **Блоки библиотеки Additional Sinks**

Auto Correlator (автокоррелятор) – вычисляет автокорреляционную функцию сигнала.

Cross-Correlator (взаимный коррелятор) – вычисляет взаимную корреляционную функцию между двумя сигналами, поданными на его вход.

Power Spectral Density (анализатор энергетического спектра мощности) – вычисляет спектральную плотность мощности сигнала.

## **2. Порядок выполнения работы**

2.1. На этапе подготовки к лабораторной работе студенты должны, используя литературу [1-5] и материалы лекций углубить свои знания. При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо вспомнить материалы предшествующих учебных дисциплин и изучить материал данной дисциплины по следующим вопросам:

Основные блоки в системе SIMULINK [1].

Спектральные и энергетические характеристики периодических сигналов [2].

Студенты на предстоящую лабораторную работу, используя литературу [1-2], а также среду SIMULINK в соответствии с индивидуальным заданием на лабораторную работу, готовят компьютерную программу для проведения расчетов.

2.2. Во время проведения лабораторной работы

Преподаватель перед проведением лабораторной работы проводит контрольный опрос студентов и определяет степень их готовности к лабораторной работе. Затем преподаватель контролирует работу студентов при выполнении заданий и отвечает на возникающие у студентов вопросы.

### **При выполнении лабораторной работы студенты должны:**

Получить у преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы.

Рассмотреть источники сигналов в системе SIMULINK и их параметры, доступные для установки. Подключить поочередно блоки семейства Sources, приведенные к осциллографу Scope. Зарисовать полученные осциллограммы.

Рассмотреть блоки математических операций Math. Выполнить указанные преподавателем математические преобразования над сигналами и зарисовать осциллограмму результата.

Рассмотреть блоки библиотеки Simulink Extras семейства Additional Sinks для анализа спектральных и корреляционных характеристик сигналов. Получить корреляционную функцию и энергетический спектр указанных преподавателем сигналов.

### 3. Содержание отчета

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

1. Индивидуальное задание на выполнение лабораторной работы.
2. Основные расчетные соотношения.
3. Листинг программы для проведения расчетов.
4. Обзор рассмотренных блоков SIMULINK.
5. Схемы соединения блоков, используемые в работе.
6. Результаты выполнения имитационного моделирования.
7. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Какие источники сигналов входят в библиотеку источников SIMULINK?
2. Какие преобразования можно осуществлять над сигналами?
3. Какие есть блоки для исследования спектральных характеристик сигналов?
4. Как можно в системе SIMULINK определить корреляционную функцию сигнала?
5. Как можно задать собственные сигналы в системе SIMULINK?

### Литература

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учеб для вузов. – М.: Высш. шк, 2009.
2. Дьяконов В. Mathcad 2000. Учебный курс. Санкт-Петербург.: Питер. 2000. 586 с.
3. Прохладин Г.Н. Моделирование систем и процессов. Часть 1. М.: МГТУ ГА. 2009.
4. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 3 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
5. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 4 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.
6. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004.

## Лабораторная работа №6.

### Моделирование случайных процессов

**Цель работы** - Приобретение навыков по математическому моделированию и исследованию случайных процессов (СП) на персональном компьютере (ПК).

Закрепление знаний о методах моделирования и обработке результатов СП для решения радиотехнических задач.

Моделирование СП методом скользящего суммирования и рекуррентным методом.

Приобретение навыков оформления результатов исследования на ПК.

**Время** – 4 часа.

## 1. Основные теоретические сведения

### Общая характеристика методов моделирования.

Случайным процессом называется семейство случайных величин  $X(t, \omega)$ , заданных на одном и том же пространстве событий  $\Omega$ , зависящих от параметра  $t \in T$ . При фиксированном значении  $t = t_0$  случайный процесс  $X(t, \omega)$  обращается в случайную величину  $X(t_0, \omega)$ , называемую сечением СП. Таким образом, СП  $X(t)$  представляет собой совокупность всех сечений при различных значениях, а понятие случайного процесса является обобщением понятия системы СВ, когда этих величин – бесконечное множество.

В отличие от СВ математическое ожидание и дисперсия не являются исчерпывающими характеристиками СП. В частности, зная математическое ожидание и дисперсию, ничего нельзя сказать о зависимости двух (и более) сечений СП. Для определения связи между различными сечениями СП используется корреляционная функция.

Корреляционной функцией СП  $X(t)$  называется неслучайная функция двух аргументов  $R_x(t_1, t_2)$ , которая при каждой паре значений  $t_1$  и  $t_2$  равна корреляционному моменту соответствующих сечений  $X(t_1)$  и  $X(t_2)$ . Причем считается, что корреляционная функция при одинаковых значениях аргументов равна дисперсии СП. Это свойство позволяет считать математическое ожидание и корреляционную функцию главными характеристиками СП; необходимость в дисперсии отпадает.

Принцип моделирования СП на ПК аналогичен принципу моделирования случайных величин (СВ). Модель СП с заданными: одномерной плотностью распределения вероятностей  $q(y)$  и корреляционной функцией  $R_y(\tau)$  получается из базовой модели СП. В качестве базовой модели используется модель стационарного нормального «белого» шума. Известно, распределение двух независимых СВ, одна из которых распределена по закону Рэлея, а другая – по закону арксинуса, является нормальным [2]. Тогда величина  $Y = \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln(X_1)} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot X_2)$  имеет нормальный закон распределения с параметрами: математическое ожидание  $m_y = 0$  и дисперсия –  $D_y = \sigma^2$ . Причем  $X_1$  и  $X_2$  две независимые равномерно распределенные на интервале  $(0,1)$  СВ.

Другой способ основан на центральной предельной теореме теории вероятностей, в соответствии с которой распределение суммы достаточно большого числа независимых величин, распределенных по любому закону и

имеющих конечную дисперсию, неограниченно приближается к нормальному закону.

Следовательно, СВ  $Y$  с нормальным законом распределения можно получить с помощью преобразования

$$y = \sum_{i=1}^s x_i,$$

где  $x_i, i = 1, 2, \dots, s$  – числа датчика случайных чисел с равномерным законом распределения в интервале  $(0, 1)$ .

Для получения СВ  $Z$  с нормальным законом распределения и параметрами  $m_z = a, \sigma_z = \sigma$  полученные выше числа  $y$  надо преобразовать следующим образом

$$z = \frac{(y - n/2) \cdot \sigma}{\sqrt{n/12}} + a.$$

Достаточным считается число слагаемых  $n = 8 \dots 12$ . Удобным является значение  $n = 12$ , поскольку выражение принимает вид

$$z = (y - 6) \cdot \sigma + a.$$

В лабораторной работе используется последний вариант формирования «белого» шума.

Известны два основных метода моделирования стационарных гауссовских СП: метод скользящего суммирования и метод рекуррентных алгоритмов [3]. В основу этих методов положено линейное преобразование стационарной последовательности  $z[i]$  независимых гауссовских, случайных чисел с параметрами  $m_z = 0, D_z = 1$  (нормальный дискретный «белый» шум) в дискретные реализации  $\xi[i]$  СП с заданными корреляционно-спектральными характеристиками.

При методе скользящего суммирования дискретные значения моделируемого процесса  $\xi[i]$  формируются в виде скользящей суммы значений  $z[i]$  с весовыми коэффициентами  $c_k$ , то есть используются только входные величины СП. Применение рекуррентного алгоритма предусматривает использование, как входных значений СП, так и некоторых выходных значений.

В работе рассматриваются оба метода моделирования гауссовского, стационарного СП, причем с их визуальным сравнением полученных, выходных диаграмм. В качестве корреляционной характеристики используется экспоненциальная функция вида

$$R(\tau) = \exp(-\omega_0 \cdot |\tau|).$$

В этом случае коэффициенты  $c_k$  определяются по формуле

$$c_k = \sqrt{2 \cdot \omega_0 \cdot \Delta t} \cdot \exp(-\omega_0 \cdot \Delta t \cdot k).$$

Параметр  $q$ , ограничивающий число весовых коэффициентов  $c_k$  при использовании метода скользящего суммирования, можно выбрать из условия

$$\left| 1 - \frac{1}{D} \sum_{k=-q}^q c_k^2 \right| < \varepsilon,$$

где  $D$  – дисперсия модулирования случайного процесса,  $\varepsilon$  – погрешность моделирования. Данное условие основано на том, что сумма квадратов весовых коэффициентов  $c_k$  должна быть равна дисперсии модулируемого СП.

Тогда алгоритм моделирования СП методом скользящего суммирования имеет вид

$$\xi[i] = \sqrt{2 \cdot \gamma} \cdot \sum_{k=0}^{2q} \exp(-\gamma \cdot k) \cdot x[i-k], \quad \gamma = \omega_o \cdot \Delta t.$$

Следует отметить, если при моделировании гауссовского СП  $\xi[i]$  известно, что этот процесс является результатом воздействия «белого шума на линейную систему с известной импульсной характеристикой  $h(t)$ , то заданную систему следует использовать как формирующий фильтр. В этом случае весовые коэффициенты  $c_k$  алгоритма моделирования будут определяться через дискретные значения импульсной характеристики по формуле

$$c_k = \sqrt{\Delta t} \cdot h(k).$$

Рекуррентный алгоритм моделирования СП определяется выражением

$$\xi[i] = \sqrt{1 - \rho^2} \cdot x[i] + \rho \cdot \xi[i-1],$$

где  $\rho = \exp(-\gamma)$ ,  $\gamma = \omega_o \cdot \Delta t$ .

Алгоритм моделирования стационарных негауссовских СП, как правило, основан на нелинейном преобразовании нормального СП. Общий подход к решению этой задачи может быть следующим:

- находят такое нелинейное безынерционное преобразование  $b = f(a)$ , которое преобразует гауссовский процесс  $u(t)$  в процесс  $\xi[i]$  с заданным законом распределения  $W(\xi)$ ,

- определяют по найденной функции  $b = f(a)$  зависимость корреляционной функции  $R(\tau)$  полученного процесса  $\xi[i]$  и корреляционной функции  $R_o(\tau)$  исходного гауссовского процесса  $u(t)$ :  $R(\tau) = \varphi[R_o(\tau)]$ ,

- получают корреляционную функцию исходного гауссовского процесса  $R_o(\tau) = \varphi^{-1}[R(\tau)]$ , где  $\varphi^{-1}$  – функция обратная  $\varphi$ ,

- находят алгоритм для моделирования гауссовского процесса  $u(t)$  с требуемой корреляционной функцией  $R_o(\tau)$ .

Некоторые частные виды СП можно формировать с помощью нелинейного безынерционного преобразования  $b = f(a_1, a_2)$ , где  $a_1(t), a_2(t)$  – два независимых стационарных СП с параметрами  $(0, \sigma_o^2)$ .

Известно [3], что релейский процесс  $\xi(t)$  выражается через два независимых, стационарных, гауссовских СП  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  с параметрами  $(0, 1)$

$$\xi(t) = \sigma_o \sqrt{u_1^2(t) + u_2^2(t)}$$

или в дискретных отсчетах

$$\xi[n] = \sigma_0 \sqrt{u_1^2[n] + u_2^2[n]}.$$

В этом случае при моделировании релеевского СП с экспоненциальной корреляционной функцией  $R(\tau) = \exp(-\omega_0 \cdot |\tau|)$  получим

$$u_1[i] = \sqrt{1 - \rho^2} \cdot y_1[i] + \rho \cdot u_1[i-1],$$

$$u_2[i] = \sqrt{1 - \rho^2} \cdot y_2[i] + \rho \cdot u_2[i-1],$$

где  $\rho = \exp(-\gamma/2)$ ,  $\gamma = \omega_0 \cdot \Delta t$ ,  $u_1[t]$  и  $u_2[t]$  – независимые значения нормированного дискретного «белого» шума.

Для показательного закона распределения моделирование СП с экспоненциальной корреляционной функцией имеет следующий алгоритм

$$\xi[n] = \sigma_0^2 \cdot (u_1^2[n] + u_2^2[n]),$$

причем все исходные величины такие же, как и для релеевского закона распределения.

Этапы моделирования:

– формирование двух независимых, гауссовских, случайных чисел

$$y_{1i} := \sigma \cdot \left( \sum_n x_{1n,i} - 6 \right) + m \quad y_{2i} := \sigma \cdot \left( \sum_n x_{2n,i} - 6 \right) + m$$

(«белого» шума) с параметрами

$$i := 12..5 \cdot 10^2 \quad \sigma := 1.0 \quad m := 0 \quad n := 1..12 \quad x_{1n,i} := \text{md}(1) \quad x_{2n,i} := \text{md}(1),$$

– определение необходимого числа коэффициентов  $c_k$  при погрешности моделирования  $\varepsilon = 0,01$ ;  $D = 1$ ;  $l = 15$ :

$$\gamma := .1 \quad c_1 := \sqrt{2 \cdot \gamma} \cdot e^{-\gamma \cdot 1} \quad \left| 1 - \frac{1}{D} \cdot \left[ \sum_{k=0}^l (c_k)^2 \right] \right| < \varepsilon$$

– моделирование стационарного, гауссовского СП с экспоненциальной корреляционной функцией методом скользящего суммирования:

$$N := 12 \quad u_{1i} := \sqrt{2 \cdot \gamma} \cdot \sum_{k=0}^N e^{(-\gamma \cdot k)} \cdot y_{1i-k},$$

– моделирование стационарного, гауссовского СП с экспоненциальной корреляционной функцией рекуррентным методом, приняв  $u_{11} = 0$ :

$$\gamma := .1 \quad u_{1i} := \sqrt{1 - e^{-\gamma^2}} \cdot y_{1i} + e^{-\gamma} \cdot u_{1i-1},$$

– построение диаграмм двух методов моделирования,

– моделирование релейского (по заданию) СП, приняв

$$u_{21_{11}} := 0 \quad u_{22_{11}} := 0 \quad \rho := e^{\frac{-\gamma}{2}} ;$$

$$u_{2_i} := \sqrt{2 \cdot \gamma} \cdot \sum_{k=0}^N e^{(-\gamma \cdot k)} \cdot y_{2_{i-k}} \quad u_{21_i} := \sqrt{1 - \rho^2} \cdot u_{1_i} + \rho \cdot u_{21_{i-1}}$$

$$u_{22_i} := \sqrt{1 - \rho^2} \cdot u_{2_i} + \rho \cdot u_{22_{i-1}} \quad u_i := \sigma \cdot \sqrt{(u_{21_i})^2 + (u_{22_i})^2}$$

– моделирование показательного (по заданию) СП используя выражение

$$u_i := \sigma^2 \cdot [(u_{21_i})^2 + (u_{22_i})^2] ;$$

– построение гистограммы смоделированного по заданию СП.

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. На этапе подготовки к лабораторной работе студенты должны, используя литературу [1-5] и материалы лекций углубить свои знания. При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо вспомнить материалы предшествующих учебных дисциплин и изучить материал данной дисциплины по следующим вопросам:

Основные положения по вхождению в программную оболочку MathCAD.

Систему команд и операторов MathCAD, необходимых для моделирования и анализа СП.

Принципы составления алгоритмов для моделирования СП.

Изучить и запомнить встроенные функции и ключевые слова для анализа и обработки СП, моделируемых в лабораторной работе. Например, для СП с нормальным законом распределения:

`rnd(x)` – случайная величина, имеющая равномерное распределение на интервале 0 и x,

`runif(m, a, b)` – вектор m случайных чисел, имеющих равномерное распределение (b и a – границы интервала a < b)?

`dunif(x, min, max)` – плотность вероятности для равномерного распределения,

`mean(A)` – среднее элементов массива A,

`stdev(A)` – среднеквадратичное отклонение элементов массива A,

`var(A)` – дисперсия элементов массива A,

`hist(int, A)` – вектор с числами точек из массива A, попавших в соответствующий интервал с границами, заданными вектором int (служит для построения гистограмм).

Вспомнить алгоритм формирования негауссовских СП, порождаемых нормальным процессом, используя метод нелинейного преобразования.



## 2.2. Во время проведения лабораторной работы

Преподаватель перед проведением лабораторной работы проводит контрольный опрос студентов и определяет степень их готовности к лабораторной работе. Затем преподаватель контролирует работу студентов при выполнении заданий и отвечает на возникающие у студентов вопросы.

### **При выполнении лабораторной работы студенты должны:**

Получить у преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы.

Ознакомиться с рабочим местом исследователя, получить индивидуальное задание у преподавателя.

Выполнить моделирование гауссовского, СП методом скользящего суммирования и рекуррентным методом, а также негауссовского СП с заданным законом распределения, используя метод нелинейного преобразования.

Составить программу моделирования, содержащую переменные величины.

Произвести набор и отладку программы, после чего выполнить экспериментальную часть работы.

Построить гистограммы закона распределения по библиотечным функциям Mathcad.

Варианты

а) – показательный закон распределения:  $\gamma = 0,08; 0,1; 0,12; \sigma = 0,9; 1,0;$

б) – релеевский закон распределения:  $\gamma = 0,08; 0,1; 0,12; \sigma = 0,9; 1,0.$

## **3. Содержание отчета**

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

1. Индивидуальное задание на выполнение лабораторной работы.
2. Основные расчетные соотношения.
3. Листинг программы моделирования с необходимыми комментариями.
4. Результаты выполнения экспериментальной части лабораторного задания
5. Краткие теоретические сведения,
6. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение СП и в чем отличие СП от СВ.
2. Назовите основные характеристики СП.
3. Что такое корреляционная функция и что она характеризует?
4. Может ли корреляционная функция быть случайной функцией?
5. Поясните общий принцип моделирования СП.
6. Что является базовой моделью СП?
7. Какие алгоритмы формирования «белого» шума вам известны?
8. Поясните алгоритм моделирования СП методом скользящего суммирования.
9. По какому принципу определяется минимальное число коэффициентов суммирования при одноименном методе моделирования СП?
10. Поясните алгоритм моделирования СП рекуррентным методом.

11. В чем основное отличие в алгоритмах моделирования СП рекуррентного метода и скользящего суммирования?
12. Поясните алгоритм моделирования негауссовских СП.
13. Приведите график плотности распределения СП с гауссовским законом.
14. Приведите график плотности распределения СП с релеевским законом.
15. Приведите график плотности распределения СП с показательным законом.

### Литература

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учеб для вузов. – М.: Высш. шк, 2009.
2. Дьяконов В. Mathcad 2000. Учебный курс. Санкт-Петербург.: Питер. 2000. 586 с.
3. Прохладин Г.Н. Моделирование систем и процессов. Часть 1. М.: МГТУ ГА. 2009.
4. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 3 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
5. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 4 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.

## Лабораторная работа №7.

### Исследование помехоустойчивости оптимального приема манипулированных сигналов методом статистического моделирования

**Цель работы** - Изучение методики статистического моделирования для оценки помехоустойчивости приема ЧМн и ФМн сигналов.

Экспериментальное определение помехоустойчивости оптимального приема ЧМн и ФМн сигналов путем моделирования в системе MATLAB.

**Время** – 4 часа.

#### 1. Основные теоретические сведения

##### Общая характеристика методов моделирования.

Структурная схема оптимального приемника приведена на рис. 1.

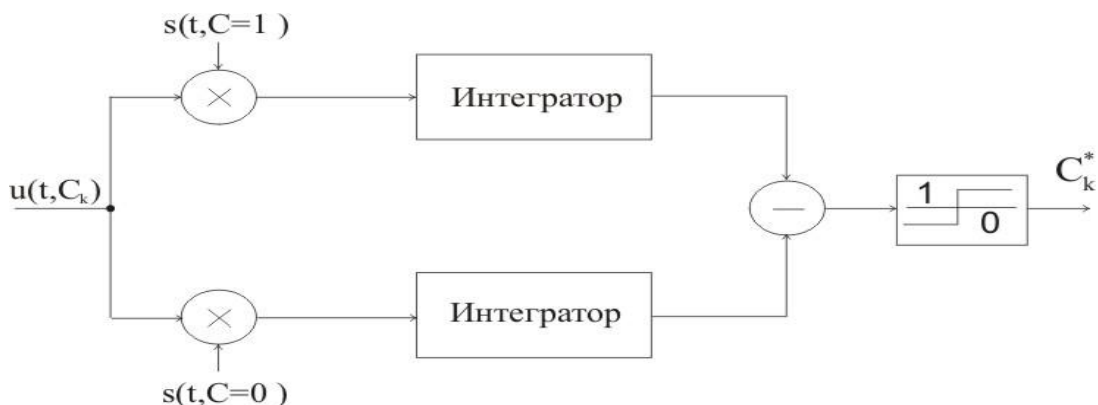


Рис. 1. Корреляционный приемник сигналов.

На вход приемника поступает аддитивная смесь принимаемого сигнала  $s(t, C_k)$  и помехи вида «белого шума»  $n(t)$ :

$$u(t, C_k) = s(t, C_k) + n(t), \quad (1)$$

где  $C_k$  – передаваемый информационный символ на  $k$ -ом тактовом интервале.

В корреляционном приемнике осуществляется вычисление коэффициента корреляции между принимаемой реализацией и опорными сигналами, соответствующими двум различным информационным символам. Решение о принятом информационном символе  $C_k^*$  принимается в пользу того символа, для которого напряжение на выходе интегратора, соответствующее коэффициенту корреляции, оказалось наибольшим.

Вероятность ошибки может быть определена экспериментально как отношение ошибочно принятых символов к общему числу переданных символов. Таким образом при моделировании необходимо сформировать последовательность информационных символов длиной  $N$  символов и вести учет ошибочно принятых символов.

Формирование передаваемых информационных символов для двухпозиционных сигналов осуществляется по следующему правилу:

$$C = \begin{cases} 1, & \text{если } a < 0.5; \\ -1, & \text{если } a \geq 0.5, \end{cases} \quad (1)$$

где  $a$  – случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $(0, 1)$ .

При моделировании белый шум заменяется последовательностью независимых гауссовых случайных величин, имеющих дисперсию

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{2\Delta t}, \quad (2)$$

где  $N_0$  – спектральная плотность белого шума;

$\Delta t$  – интервал между соседними отсчетами.

При заданном отношении сигнал/шум  $q$ , длительности тактового интервала  $T$ , числе отсчетов на тактовом интервале  $r$  и известной энергии сигнала  $E$  в системе MATLAB помеху можно задать следующим образом:

```
N0=2*E/q;
A=sqrt(N0/(2*T/r));
for j=1:r+1;
n(j)=A*randn;
end
```

После принятия решения формируется элемент вектора ошибки по следующему правилу:

$$g_i = \begin{cases} 0, & \text{если } C_i = C_i^*; \\ 1, & \text{если } C_i \neq C_i^*. \end{cases} \quad (3)$$

Вероятность ошибки подсчитывается по следующей формуле:

$$p_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_i, \quad (4)$$

где  $N$  – количество переданных символов.

Для определения количества переданных символов при котором оценка вероятности ошибки с вероятностью  $\beta$  находится в доверительном интервале  $(-\alpha, \alpha)$  можно воспользоваться границами Чернова:

$$N \geq \frac{1}{\alpha^2} \ln \frac{2}{1-\beta}.$$

Расчеты показывают, что для обеспечения вероятности ошибки  $p_{\text{ош}}=10^{-3}$ , находящейся с вероятностью  $\beta=0,99$  в доверительном интервале  $(-0,1; 0,1)$ , необходимо набрать статистику из  $N=530000$  символов.

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. На этапе подготовки к лабораторной работе студенты должны, используя литературу [1-5] и материалы лекций углубить свои знания. При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо вспомнить материалы предшествующих учебных дисциплин и изучить материал данной дисциплины по следующим вопросам:

Основные команды системы MATLAB [1].

Математическое описание сигналов с частотной (ЧМн) и фазовой (ФМн) манипуляцией [2].

Оптимальный прием сигналов. [2].

### 2.2. Во время проведения лабораторной работы

Преподаватель перед проведением лабораторной работы проводит контрольный опрос студентов и определяет степень их готовности к лабораторной работе. Затем преподаватель контролирует работу студентов при выполнении заданий и отвечает на возникающие у студентов вопросы.

При выполнении лабораторной работы студенты должны:

Получить у преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы и исходные данные: длительность тактового интервала  $T$ , числе отсчетов на тактовом интервале  $r$ , частота сигнала  $\omega$ , количество символов в последовательности  $N$ .

Путем моделирования работы корреляционного приемника определить помехоустойчивость приема ЧМн и ФМн сигналов для значений отношения сигнал/шум  $q=[0 \ 1 \ 5 \ 10 \ 15 \ 20]$ .

Рекомендуется следующая последовательность моделирования.

1) Задать исходные данные, вектор отсчетов времени и опорные сигналы приемника.

2) Сгенерировать значение передаваемого информационного символа в соответствии с (1).

- 3) Сформировать передаваемый сигнал (ФМн или ЧМн).
  - 4) Сгенерировать белый шум (пример программы см. выше).
  - 5) Сформировать сумму передаваемого сигнала и шума.
  - 6) Вычислить коэффициенты корреляции принимаемой реализации и опорных сигналов.
  - 7) Сравнить вычисленные коэффициенты корреляции и принять решение о принятом символе.
  - 8) Сравнить значения принятого и переданного символов, сформировать значение элемента вектора ошибки (3).
  - 9) Повторить пункты 2...8 для всех N передаваемых символов.
  - 10) Рассчитать вероятность ошибки по формуле (4).
- Выполнив данную последовательность вычислений для всех значений вектора  $q$  построить зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум  $p_e(q)$ .
- 6.3. Сравнить результаты моделирования с результатами лабораторной работы №5

### **3. Содержание отчета**

Отчет должен включать в себя следующие пункты:

1. Индивидуальное задание на выполнение лабораторной работы.
2. Основные расчетные соотношения.
3. Текст программы моделирования с комментариями.
4. Краткие теоретические сведения.
5. Результаты выполнения экспериментальной части лабораторного задания.
6. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните как происходит оценка информационного символа в приемнике.
2. Поясните методику оценки вероятности ошибки.
3. По каким критериям определяется число испытаний?
4. Как происходит моделирование белого шума?
5. Чему равен интервал корреляции для белого шума в модели?

### **Литература**

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учеб для вузов. – М.: Высш. шк, 2009.
2. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
3. Прохладин Г.Н. Моделирование систем и процессов. Часть 1. М.: МГТУ ГА. 2009.
4. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 3 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
5. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 4 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.

## Лабораторная работа №8.

### Использование программного пакета MATLAB для математического моделирования радиосигналов

**Цель работы** - Исследование возможностей применения программного пакета MATLAB для математического моделирования сигналов и помех.

Методика моделирования радиосигналов и оценка помехоустойчивости в системе MATLAB.

Развитие навыков работы с компьютером и применение системы MATLAB для решения радиотехнических задач.

**Время** – 4 часа.

#### 1. Основные теоретические сведения

##### Общая характеристика методов моделирования.

Рабочая среда MATLAB 6.x содержит следующие элементы:

- 1) панель инструментов с кнопками и раскрывающимся списком;
- 2) окно с вкладками Launch Pad и Workspace, из которого можно получить доступ к различным модулям ToolBox и к содержимому рабочей среды;
- 3) окно с вкладками Command History и Current Directory, предназначенное для просмотра и повторного вызова ранее введенных команд, а также для установки текущего каталога;
- 4) командное окно, в которое вводятся команды;
- 5) строку состояния.

В MATLAB можно использовать скаляры, векторы и матрицы. Для ввода скаляра достаточно присвоить его значение какой-то переменной, например  $x=2$

Введя данное выражение в командную строку и нажав Enter сразу будет выдано значение переменной, чтобы этого избежать после задания переменной ставится символ «;».

Заметим, что MATLAB различает заглавные и прописные буквы, так что  $x$  и  $X$  — это разные переменные. Для ввода массивов (векторов или матриц) их элементы заключают в квадратные скобки. Так для ввода вектора-строки размером  $1 \times 3$ , используется следующая команда, в которой элементы строки отделяются пробелами или запятыми:  $x=[2\ 3\ 5]$

В этом случае вектор  $x$  будет содержать 3 элемента. Чтобы обратиться к конкретному элементу, необходимо указать имя вектора и в скобках номер элемента (нумерация элементов вектора начинается с единицы). Например команда  $x(3)$  выдаст значение третьего элемента вектора  $x$ , т.е. число 5.

При вводе вектора-столбца элементы разделяют точкой с запятой, например:  $x=[2; 3; 5]$

При вводе матрицу можно рассматривать как вектор-столбец, каждый элемент которого является вектор-строкой, например:  $x=[1\ 2\ 5; 3\ 5\ 7]$

Доступ к элементам матриц осуществляется при помощи двух индексов — номеров строки и столбца, заключенных в круглые скобки, например команда  $x(1,2)$  выдаст элемент первой строки и второго столбца матрицы  $x$ .

Работа из командной строки MATLAB затрудняется, если требуется вводить много команд и часто их изменять. Самым удобным способом выполнения групп команд MATLAB является использование M-файлов, в которых можно набирать команды, выполнять их все сразу или частями, сохранять в файле и использовать в дальнейшем. Для работы с M-файлами предназначен редактор M-файлов. Раскройте меню File основного окна MATLAB и в пункте New выберите подпункт M-file. Новый файл открывается в окне редактора M-файлов. Сохранив M-файл в директории work можно вызвать его введя в окно команд MATLAB имя M-файла.

Основные операторы, функции и команды MATLAB, необходимые для выполнения данной работы, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Обозначение	Комментарии
1	2
+	Сложение
-	Вычитание
*	Матричное умножение
.*	Поэлементное умножение массивов
^	Возведение в степень матрицы
.^	Поэлементное возведение массива в степень
/	Деление матриц
./	Поэлементное деление массивов
==	Равно
%	Комментарий
sqrt	Вычисление квадратного корня
erf(x)	Функция ошибки
$t=t_1:\Delta t:t_2$	Задание вектора $t$ с начальным значением $t_1$ , конечным и $t_2$ и шагом $\Delta t$ . Пример: $t=0:0.1:10$
rand	Генерация случайной величины, распределенной по равномерному закону в диапазоне $[-1 \dots 1]$
randn	Генерация случайной величины, распределенной по нормальному закону в диапазоне $[-1 \dots 1]$
$[m1,m2]=\max(g)$	Выбор максимального значения вектора $g$ . В переменную $m1$ записывается номер максимального элемента вектора $v$ , в $m2$ – его значение.

sum(g)	Вычисление суммы всех элементов вектора g
trapz(t,s)	Вычисление интеграла от функции s по переменной t методом трапеций
if Условие Инструкции 1 else Условие Инструкции 2 end	Условный оператор if. Пример: if a<0.5 c1=-1; else c1=1; end
for var=выражение Инструкции end	Организация цикла for...end. Пример: for i=1:5 a(i)=i^2; end
plot(t,s)	Построение двумерного графика s(t)
hold on	Построение последующих зависимостей на одном графике
grid on	Вывод сетки на графике

Пример программы задания синусоидального сигнала

```
T=10; % длительность сигнала
r=500; % число отсчетов сигнала
w=30*2*pi/T; % частота сигнала
n=T/r; % шаг дискретизации
t=0:n:T; % задание отсчетов времени
s=cos(w*t); % получение значений вектора сигнала
plot (t, s) % вывод графика сигнала
```

Для передачи последовательности бинарных информационных символов  $C_1, C_2, \dots, C_N$  могут использоваться ЧМн и ФМн сигналы. Запись ЧМн сигнала при передаче  $i$ -го информационного символа  $C_i$  имеет следующий вид:

$$s(t) = \begin{cases} \cos(\omega_1 t), & C_i = 1; \\ \cos(\omega_2 t), & C_i = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\omega$  – несущая частота сигнала.

Запись ФМн сигнала при передаче  $i$ -го информационного символа  $C_i$  имеет следующий вид:

$$s(t) = \begin{cases} \cos(\omega t), & C_i = 1; \\ \cos(\omega t + \pi), & C_i = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Помехоустойчивость оптимального приема манипулированных сигналов можно определить, вычислив минимальное евклидовое расстояние между



сигналами, которые соответствуют двум различным информационным символам:

$$d^2 = 2E[1 - \rho], \quad (3)$$

где  $E$  – энергия сигнала;

$$\rho = \int_0^T s(t, C=1) s(t, C=0) dt \text{ – коэффициент корреляции.}$$

Вероятность ошибки при заданном отношении сигнал/шум  $q$  вычисляется по следующей формуле [3]:

$$p_e = 1 - \Phi\left(\frac{d}{\sqrt{2N_0}}\right), \quad (4)$$

$$\text{где } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz \text{ – функция ошибки;}$$

$N_0=2E/q$  – спектральная плотность белого шума.

### **Порядок выполнения работы**

2.1. На этапе подготовки к лабораторной работе студенты должны, используя литературу [1-5] и материалы лекций углубить свои знания. При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо вспомнить материалы предшествующих учебных дисциплин и изучить материал данной дисциплины по следующим вопросам:

Основные команды системы MATLAB [1].

Математическое описание сигналов с частотной (ЧМн) и фазовой (ФМн) манипуляцией [2].

Методика расчета помехоустойчивости оптимального приема сигналов [2,3].

Во время проведения лабораторной работы

Преподаватель перед проведением лабораторной работы проводит контрольный опрос студентов и определяет степень их готовности к лабораторной работе. Затем преподаватель контролирует работу студентов при выполнении заданий и отвечает на возникающие у студентов вопросы.

**При выполнении лабораторной работы студенты должны:**

Создать М-файл, имя файла – фамилия студента. Построить эюры ЧМн и ФМн сигналов для последовательности информационных символов, задаваемой преподавателем. Параметры моделирования: шаг между двумя отсчетами по оси времени  $\Delta t=0.1$ , длительность тактового интервала  $T=10$ , число отсчетов сигнала за тактовый интервал  $r=300$ , число информационных символов  $N=5$ , частота сигналов и вектор информационных символов задаются преподавателем для каждой бригады.

Рассчитать значения минимального евклидоваго расстояния для ЧМн и ФМн сигналов.

Рассчитать вероятность ошибки оптимального приема ЧМн и ФМн сигналов для значений отношения сигнал/шум, заданных в виде вектора  $q=[0 \ 1 \ 5 \ 10 \ 15 \ 20]$ . Результаты представить в виде вектора  $p_e$  для ЧМн и ФМн сигналов, а также в виде зависимостей  $p_e=f(q)$ .

### 3. Содержание отчета

1. Индивидуальное задание на выполнение лабораторной работы.
2. Основные расчетные соотношения.
3. Текст программы моделирования с комментариями.
4. Краткие теоретические сведения.
5. Результаты выполнения экспериментальной части лабораторного задания.
6. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Какие значения коэффициентов взаимной корреляции для ЧМн и ФМн сигналов?
2. Какие из исследуемых сигналов обладают лучшей помехоустойчивостью?
3. Поясните методику определения вероятности ошибки.
4. Как изменяется помехоустойчивость оптимального приема ЧМн и ФМн сигналов с уменьшением отношения сигнал/шум?
5. Поясните почему при значении отношения сигнал/шум  $q=0$  вероятность ошибки  $p_e=0.5$ ?

### Литература

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. Учеб для вузов. – М.: Высш. шк, 2009.
2. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
3. Прохладин Г.Н. Моделирование систем и процессов. Часть 1. М.: МГТУ ГА. 2009.
4. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 3 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.
5. Кузнецов А.А., Сенин А.И. Моделирование радиотехнических систем. Учебное пособие. 4 часть. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2004.