



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВПО «ГОСУНИВЕРСИТЕТ-УНПК»
УЧЕБНО-НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Приборостроение, метрология и сертификация»

В.В.Мишин

Методы обработки биомедицинских сигналов и данных

Методические указания к
выполнению лабораторных работ

Дисциплина – «Методы обработки биомедицинских
сигналов и данных»

Специальность 200402 «Инженерное дело в
медико-биологической практике»

Направление 653700 «Биомедицинская техника»,
направление 200300.62 «Биомедицинская инженерия»
форма обучения очная

Орёл 2012

Лист согласования

Автор:

Кандидат технических наук, доцент В.В.Мишин _____,
представитель кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация» ФГБОУ
ВПО «Госуниверситет-УНПК».

Рецензент:

доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация» ФГБОУ ВПО
«Госуниверситет-УНПК», кандидат технических наук, доцент
В.В. Марков _____

Методы обработки биомедицинских сигналов и данных. Методические
указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «МОБСиД» для
специальности 200402 «Инженерное дело в медико-биологической практике»,
направлений 653700 «Биомедицинская техника», 200300.62 «Биомедицинская
инженерия»

рассмотрены и одобрены:

на заседании кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

« ____ » _____ 201__ г., протокол № ____

заведующий кафедрой, д.т.н., профессор _____ Подмастерьев К.В.;

подпись

на заседании УМС учебно-научно-исследовательского института
информационных технологии

« ____ » _____ 201__ г., протокол № ____

председатель УМС, д.т.н., профессор _____ Подмастерьев К.В.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| 1 Общие положения | 3 |
| 2 Лабораторная работа 1 Обработка данных с применением программы EXCEL | 6 |
| 3 Лабораторная работа 2 Моделирование и обработка сигналов с применением MATHCAD | 8 |
| 4 Лабораторная работа 3 Виртуальные приборы. Работа в системе LabVIEW | 12 |
| 5 Лабораторная работа 4 Обработка сигналов и потоков данных в системе LabVIEW | 20 |
| 6 Литература | 30 |
| 7 Приложение А - форма отчета | 31 |
| 8 Приложение Б – теоретический материал | 32 |

1 Общие положения

1.1 Назначение и структура лабораторных работ

Лабораторные работы направлены на углубление и закрепление теоретических знаний по основным разделам дисциплины «**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ БИМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ И ДАННЫХ**», на получение практических навыков решения задач обработки сигналов и данных.

Лабораторный практикум содержит 4 лабораторные работы и охватывает наиболее важные вопросы по основным разделам теоретического курса, в частности: «Классификация источников данных», «Обработка и анализ сигналов», «Вычислительные системы анализа».

При выполнении работ используется ПЭВМ и специализированная программная среда MATHCAD. Предполагается, что студенты предварительно ознакомлены с основными концепциями компьютерной математики (дисциплина «Информатика»).

1.2 Подготовка к выполнению работ

Подготовка к выполнению лабораторной работы заключается в изучении теоретической части работы по рекомендуемой литературе и по конспектам лекций. В описании каждой работы даны вопросы для самопроверки. Краткие ответы на эти вопросы должны быть изложены письменно в отчете. Подготовка к работе осуществляется студентом самостоятельно (вне аудиторных занятий). Консультации проводятся преподавателем, ведущим лабораторные занятия в установленном порядке.

На лабораторные занятия студент должен явиться подготовленным с **оформленной теоретической частью отчета**. Форма контроля – проверка отчетов, **зачет** по теоретической части работы.

Студент, не сдавший зачет по теоретической части, к выполнению работы не допускается.

1.3 Порядок выполнения работ

Каждая работа рассчитана на 4 часа (кроме лабораторной работы №4 – выполняется за 8 часов). Таким образом, большинство работ выполняется за одно посещение лаборатории. Перед первым посещением лаборатории преподаватель разбивает академическую группу студентов на подгруппы, каждая из которых за одно занятие выполняет одну лабораторную работу согласно графику.

При проведении занятий первый час отводится зачету по теоретической части работы. За последующие два часа необходимо выполнить экспериментально – расчетную часть работы, сделать выводы, завершить

оформление отчета. Последний час лабораторных занятий отводится зачету по работе.

1.4 Оформление отчета по работе

Отчет по работе оформляется каждым студентом индивидуально на листах стандартного формата А4 (210x297), допускается использовать листы, извлеченные из ученических тетрадей. Форма титульного листа представлена в приложении А.

Схемы, графики, диаграммы и таблицы необходимо выполнять карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД, аккуратно, с помощью простейших чертежных инструментов (линейка, циркуль и т.п.). Все графики экспериментальных и теоретических зависимостей, диаграммы выполняются на координатной бумаге – «миллиметровке» и вклеиваются в отчет по лабораторной работе. Листинги программ допускается переписывать «от руки» с экрана. При этом необходимо использовать шрифт согласно ЕСКД.

Отчет по теоретической части работы должен содержать изложение цели работы и письменные ответы на вопросы для самопроверки. Ответы следует излагать кратко, по существу. Содержание отчета по экспериментально-расчетной части работы изложено в описании каждой работы.

Небрежно оформленные отчеты к рассмотрению не принимаются.

Лабораторная работа 1

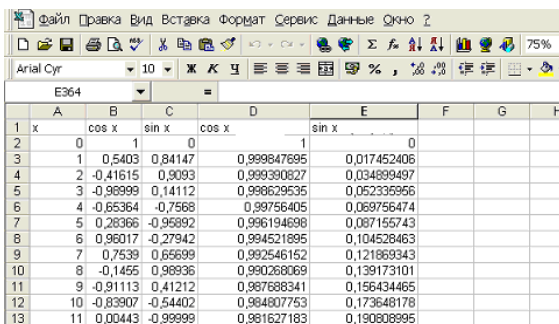
Обработка данных с применением программы EXCEL

Задание 1 - Знакомство с управляющими элементами программы

- 1 Запустить EXCEL.
- 2 Внимательно просмотреть названия и основные функции всех управляющих меню и виртуальных кнопок.
- 3 Осуществить ввод 10-15 произвольных числовых данных в ячейки таблицы, в произвольном порядке с помощью меню ФОРМАТ изменить параметры ячеек и параметры введенных данных (числовой, денежный и пр. форматы чисел, шрифт, автоподбор ширины и высоты столбца и т.д.).
- 4 Сохранить файл в каталоге МОИ ДОКУМЕНТЫ/.

Задание 2 – Создание последовательности данных

- 1 Создать новый файл (книгу EXCEL).
- 2 В ячейки A2-A362 внести последовательно (с использованием автозаполнения) числа от 0 до 360 (значения переменного x).
- 3 В ячейках B2 – B 362 и C2 – C 362 с применением средств авторасчета и автозаполнения программы рассчитать значения $\cos x$ и $\sin x$ соответственно.
- 4 В следующих столбцах рассчитать значения $\cos x$ и $\sin x$ соответственно с применением перевода аргумента x из размерности радиан в градусы.
- 5 В результате должна получиться таблица аналогичная рисунку 1.



| x | cos x | sin x | cos x | sin x |
|----|----------|----------|-------------|-------------|
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0,5403 | 0,84147 | 0,999847695 | 0,017452406 |
| 2 | -0,41615 | 0,9093 | 0,999390827 | 0,034699497 |
| 3 | -0,98999 | 0,14112 | 0,998629535 | 0,052335956 |
| 4 | -0,65364 | -0,7568 | 0,99756405 | 0,069756474 |
| 5 | 0,28366 | -0,95892 | 0,996194698 | 0,087155743 |
| 6 | 0,98017 | -0,27942 | 0,994521895 | 0,104528463 |
| 7 | 0,7539 | 0,65699 | 0,992546152 | 0,121869343 |
| 8 | -0,1455 | 0,98936 | 0,990268069 | 0,139173101 |
| 9 | -0,91113 | 0,41212 | 0,987688341 | 0,156434465 |
| 10 | -0,83907 | -0,54402 | 0,984807753 | 0,173648178 |
| 11 | 0,00443 | -0,99999 | 0,981627183 | 0,190808995 |

Рисунок 1 – Вид экрана после выполнения расчетов

- 6 Отобразить все проведенные расчеты (результаты) на различных диаграммах (в разных осях). Использовать мастер диаграмм. Заполнить все поля форматирования диаграммы.

7 Отобразить все проведенные расчеты (результаты) на одной диаграмме (в одних осях). Использовать мастер диаграмм. Заполнить все поля форматирования диаграммы.

8 Проверить логичность и правильность проведенных расчетов. Сделать выводы.

Задание 3 – Обработка сложных данных

1 В новом листе повторите этапы 2, 4 задания 2. В результате получите таблицу из 2-х столбцов, в первом записана переменная x , во втором – значение косинуса с аргументом в градусах.

2 В последующем столбце используя функцию $=\text{СЛЧИС}()-0,5$ задайте 360 значений случайного числа.

3 В последующем столбце сложите построчно значения косинуса переменной x с значением случайного числа для всех x .

4 Постройте используя мастер диаграмм отдельно диаграмму случайного числа и диаграмму косинусоиды с наложенным случайным воздействием.

5 Результат будет аналогичен представленному на рисунке 2

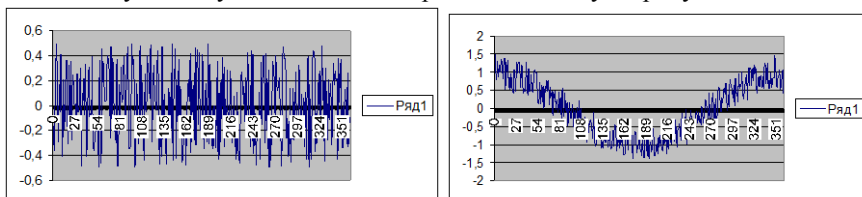


Рисунок 2 – Вид диаграмм

6 В отдельных ячейках определите для косинусоиды с шумом статистические характеристики (макс. зн., мин. зн., среднее значение, СКО, дисперсию, несмещенную дисперсию). Оцените коэффициент корреляции косинусоиды без шума с косинусоидой с шумом. Оцените коэффициент корреляции случайной составляющей с косинусоидой с шумом. Оцените коэффициент корреляции косинусоиды без шума с косинусоидой без шума (самой с собой). Сделайте выводы.

7 Сохраните все расчетные данные.

Задание 4 – Оценка уравнений регрессии

По заданию преподавателя.

Лабораторная работа 2.

Моделирование и обработка сигналов с применением MATHCAD

Задание 1. Моделирование сигналов

При решении широкого класса математических задач, связанных с проектированием приборов и устройств важное место занимает моделирование источников периодических сигналов с различными временными параметрами. В системе MATHCAD для моделирования таких сигналов используются тригонометрические функции $\sin(t)$, $\cos(t)$.

Пример построения синусоидального сигнала.

| | |
|--------------------|----------------------------|
| $t := 0..1000$ | Диапазон изменения времени |
| $T := 1$ | Период |
| $f := \frac{1}{T}$ | Частота |
| $A := 10$ | Амплитуда |
| $\phi := 0$ | Фаза |

$$x(t) := A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot \text{deg} + \phi \cdot \text{deg})$$

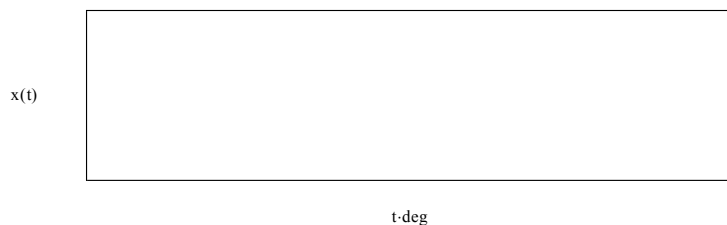


Рисунок 1 – Пример листинга документа MATHCAD для построения синусоидального сигнала с амплитудой 10 В, частотой 1Гц

Результат расчета можно сохранить в файл данных. Для этого необходимо функцию $x(t)$ преобразовать в вектор данных. Пример такого преобразования имеет вид

$$x_t := x(t)$$

```
WRITEPRN("c:\proba.dat") := x
```


При выполнении этих команд синусоидальный сигнал будет записан в файл proba.dat на диск C.

Сформируйте самостоятельно синусоидальный сигнал с 1) частотой 100 Гц, амплитудой 1 В; 2) частотой 0,1 Гц, амплитудой 0,5 В; начальной фазой 10 град.

Аналогично производится формирование выпрямленного двухполупериодным выпрямителем синусоидального сигнала. Для этого функция задается как

$$x(t) := |A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot \text{deg} + \phi \cdot \text{deg})|$$

Постройте диаграммы выпрямленных сигналов, сформированных выше.

Используя следующие выражения можно получить другие виды периодических сигналов:

1. $x(t) := \text{sign}(A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot \text{deg} + \phi \cdot \text{deg}))$ - прямоугольный сигнал;
2. $x(t) := \text{asin}(A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot \text{deg} + \phi \cdot \text{deg}))$ - приближенно треугольный;
3. $x(t) := \text{csch}(A \cdot \sec(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \cdot \text{deg} + \phi \cdot \text{deg}))$ - сигнал с отсечкой и т.д.

Постройте указанные сигналы теми же исходными данными на различных диаграммах.

Задание 2. Оценка динамических свойств устройства обработки сигнала

Линейные цепи часто принято описывать передаточной характеристикой $y(p)$, где p – переменная преобразования Лапласа. Передаточная характеристика цепи является наиболее обобщенной динамической характеристикой устройства. Модуль передаточной функции (характеристики) представляет собой амплитудо-частотную характеристику цепи, аргумент – фазочастотную характеристику.

Переходная функция, т.е. реакция цепи на единичный скачок на входе определяется как

$$h(t) := \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \left(\text{Re} \left(y(j\omega) \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\omega} \right) \right) d\omega$$

Интегрирование ведется по бесконечным пределам, однако амплитудо – частотные характеристики реальных устройств имеют достаточно быстрые спады, что позволяет ввести конечные пределы интегрирования (следующее значение частоты после спада АЧХ).

Пример динамического анализа линейной цепи.

$$y(p) := \frac{1}{p^2 + 0.9 \cdot p + 1} \quad \text{Передаточная функция}$$

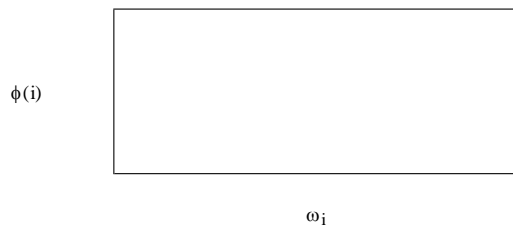
$$j := \sqrt{-1}$$

$$i := 0..20 \quad \omega_i := 0.315 \cdot 2 \cdot i \quad p_i := j \cdot \omega_i$$

$$H(i) := |y(p_i)| \quad \text{АЧХ}$$



$$\phi(i) := \arg(y(p_i)) \quad \text{ФЧХ}$$



Переходная характеристика

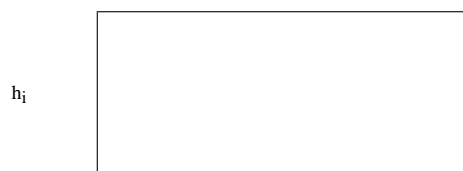
$$TOL := 0.01$$

$$i := 0..16$$

$$t_i := 0.5 \cdot i$$

$$h(t) := \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^5 \left(\operatorname{Re} \left(y(j \cdot \omega) \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\omega} \right) \right) d\omega$$

$$h_i := h(t_i)$$



t_i

По аналогии с примером постройте динамические характеристики для следующих динамических звеньев:

1. Аperiodическое звено

$$y(p) := \frac{1}{\tau \cdot p + 1} \quad \tau := 2 \quad \tau - \text{постоянная_времени}$$

2. Интегрирующее звено

$$y(p) := \frac{1}{\tau \cdot p} \quad \tau := 0.2 \quad \tau - \text{постоянная_времени}$$

3. Неустойчивое звено

$$y(p) := \frac{1}{\tau \cdot p - 1} \quad \tau := 0.8 \quad \tau - \text{постоянная_времени}$$

4. Колебательное звено

$$y(p) := \frac{1}{\tau \cdot p + 2.3 + 3.2 \cdot p^2} \quad \tau := 1.2$$

По результатам расчетов сделайте выводы о пригодности рассмотренных звеньев для обработки сигнала с верхней частотой 10 кГц.

Лабораторная работа 3. Виртуальные приборы. Работа в системе LabVIEW

5.1 Цель работы

Получение практических навыков работы в системе LabVIEW. Знакомство с основами моделирования приборных цепей на ЭВМ.

5.2 Теоретическая часть (самоподготовка)

По литературным источникам, например /5/, ознакомиться с основными концепциями построения системы LabVIEW.

5.3 Контрольные вопросы

- 1 Укажите назначение системы
- 2 Кратко опишите интерфейс пользователя системы. Укажите назначение основных панелей и виртуальных кнопок системы.
- 3 Что такое виртуальный прибор (инструмент) в системе? Как производится соединение в системе блоков виртуального прибора?
- 4 Что такое отладка VI?
- 5 Как отображается результат моделирования прибора в системе?

5.4 Экспериментальная часть

Задание 1. Создание VI

Цель: создать VI.

Представьте, что вы имеете датчики, которые считают температуру и объем. Вы создаете VI, чтобы моделировать определение температуры и объема.

Передняя панель

1. Откройте новую переднюю панель, выбирая File>>New. Если закрыты все VI, выберите New VI из диалогового окна LabVIEW.

Обратите внимание, если палитра средств управления не видима, выберите Windows>>Show Controls Средств управления, чтобы отобразить палитру. Вы также можете обращаться к палитре Средств управления, находящейся в открытой области лицевой панели.

2. Выберите Tank из Controls>> Vessels и поместите это на лицевую панель.
3. Напечатайте Volume в текстовом блоке метки и щелкните где-нибудь на лицевой панели.
4. Повторно масштабируйте индикатор резервуара, чтобы отобразить объем резервуара между 0.0 и 1000.0.
5. Поместите термометр из Controls>>Numeric на лицевой панели. Масштабируйте шкалу в пределах между 0 и 100.
6. Ваша передняя панель должна соответствовать рисунку 24.

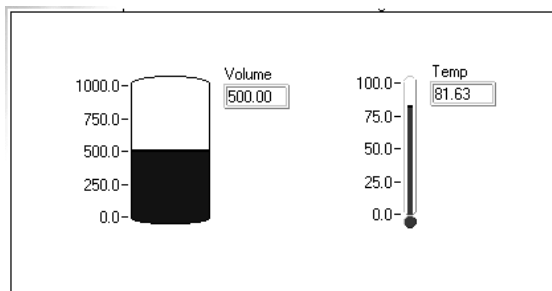


Рисунок 24 – Вид передней панели

7. Откройте блок-схему, выбрав Windows>>Show Diagram. Выберите объекты, перечисленные ниже из палитры Функций, и поместите их в блок-схему.
8. Поместите следующие объекты на блок-схеме.



Выберите монитор процессов Functions'Select a VI из каталога LabVIEW\Activity — который моделирует чтение напряжения температуры и объема с датчика или измерительного датчика.



Генератор случайных чисел Functions>>Numeric — генерирует число между 0 и 1.

Функцию умножения Functions>>Numeric (2 экземпляра) — умножает два числа и возвращает результат.

123 Числовую константу Functions>>Numeric — (2 экземпляра). Введите значение 10.00 в каждую.

9. Чтобы просматривать Help функции или VI, выберите Show Help из меню Help и затем перемещайте курсор над каждой функцией и VI, окно справки для монитора процессов VI показано на рисунке 25.

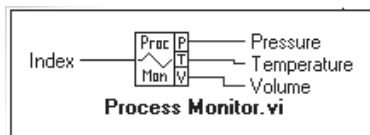



Рисунок 25 – Окно справки

10. Используя средство монтажа , соедините объекты как показано на рисунке 25.

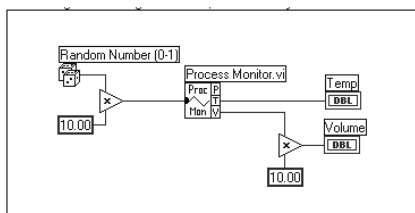


Рисунок 25 – Соединение блоков

11. Выберите File>>Save as и сохраните VI как Temp&Vol.vi в каталоге LabVIEW\Activity.

Запустите VI, нажав на кнопку Run. Обратите внимание на значения для объема и температуры, которые отображаются на лицевой панели.

13. Закройте VI, выбрав File>>Close.

Задание 2. Создание иконки виртуального прибора



Цель: создать иконку и соединитель для VI.

Чтобы использовать VI как подпрограмму, вы должны создать иконку, чтобы представить подпрограмму на блок-схеме другого VI, и подокна соединителя, с которым вы можете соединять входы и выходы. LabVIEW

обеспечивает отдельные инструментальные средства, с которыми Вы можете создавать или редактировать иконку для вашего VI.

Иконка VI представляет VI как подпрограмму в блок-схеме другого VI.

Передняя панель

1. Откройте файл Temp&Vol.vi, сохраненный в упражнении 2.
2. В передней панели, выберите иконку в верхнем правом углу, и выберите Edit Icon... Вы также можете сделать двойной щелчок на иконке, чтобы вызвать редактор иконки.
3. Сотрите заданную по умолчанию иконку.
4. Нарисуйте термометр. 
5. Создайте текст . Ваша иконка должна соответствовать рисунку 26.

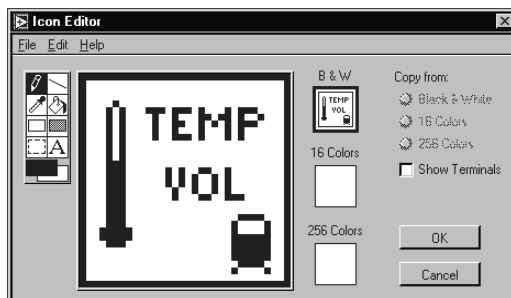




Рисунок 26 – Вид окна

6. Закройте редактор иконки, нажав ОК. Новая иконка появляется в подокне иконки.

7. Определите шаблон терминала соединителя, выбрав Show Connector. По умолчанию, LabVIEW выбирает шаблон терминала, основанный на числе средств управления и индикаторов на передней панели. Поскольку имеются два объекта, соединитель имеет два

терминала.  Поверните соединитель на 90 градусов .


8. Сохранить VI, выбрав File>Save.

9. Закройте VI, выбрав File"Close.

Задание 3. Вызов SubVI

Цель: *изготовить VI, который использует Temp&Vol.vi как subVI.*

Передняя панель

1. Откройте новую переднюю панель, выбрав File"New.
2. Выберите горизонтальный переключатель из палитры Controls"Boolean, и маркируйте его как объем. Поместите свободные метки на переднюю панель, чтобы указать литры и галлоны. 
3. Выберите измеритель из Controls"Numeric, и поместите его на переднюю панель. Маркируйте его как Tank Volume (рисунок 27).

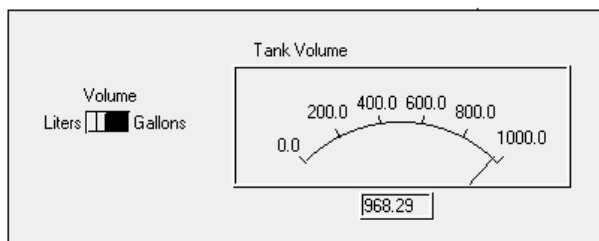


Рисунок 27 – Внешний вид VI

4. Измените диапазон измерителя в пределах между 0.0 и 1000.0.
5. Перейдите к блок-схеме, выбрав Windows>Show Diagram.
6. Щелкните в свободной области блок-схемы, и выберите Functions>Select a VI..., после чего появится диалоговое окно выбора. Выберите Temp&Vol.vi в каталоге LabVIEW\Activity.
7. Добавьте другие объекты на блок-схему, как показано на рисунке 28.

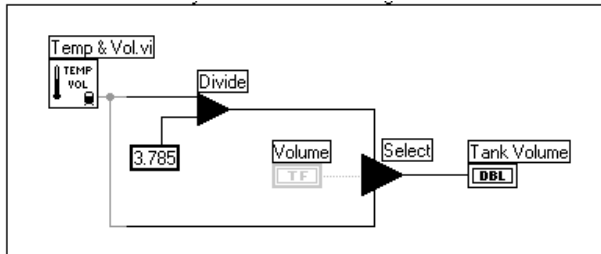




Рисунок 28 – Блок схема

123 Numeric Constant (Functions»Numeric) — добавляет числовую константу в блок-схему. Назначьте значение к константе, используя средство маркировки. Эта константа будет выполнять роль переводного множителя для пересчета литров в галлоны.

 Select Function (Function»Comparison) — возвращает значение TRUE или FALSE в зависимости от булева ввода.


 Divide function (Functions»Numeric) — делит значение в литрах на 3.785, чтобы преобразовать это в галлоны.

8. Соедините объекты диаграммы как показано на рисунке 28.
9. Вернитесь в переднюю панель и нажмите кнопку Run
10. Нажмите на переключатель, чтобы выбрать «Галлоны» и нажмите кнопку Run.
11. Сохраните VI как Temp&Vol.vi в каталоге LabVIEW\Activity.

Задание 4. Отладка VI

Цель: использовать зонд и его окно, исследовать поток данных в блок-схеме.

1. Откройте Temp&Vol.vi. Вызовите SubVI, из каталога LabVIEW\Activity.
2. Выберите Windows Show Diagram.
3. Если палитра Инструментальных средств не открыта, выберите Windows Show Tools Palette.

4. Выберите зонд из инструментальных средств , и нажмите на провод, выходящий из функции Divide. Окно зонда появляется с заголовком, как показано на рисунке 29.

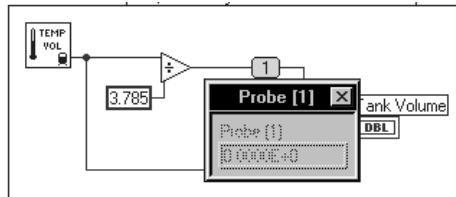


Рисунок 29 – Блок схема

5. Возвратитесь к передней панели. Переместите окно зонда, так чтобы вы могли его просматривать, как показано на рисунке 30.

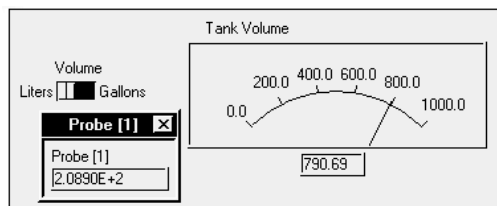




Рисунок 30 – Вид передней панели

6. Закройте окно зонда.

7. Вернитесь к блок-схеме VI.

8. Нажмите кнопку Highlight Execution в инструментальной панели . Кнопка Highlight Execution изменяется на светящуюся

лампочку. 

9. Нажмите кнопку Run, чтобы выполнить VI. Перемещение пузырьков по линиям соединения блоков представляет поток данных через VI. Начните выполнение в пошаговом режиме, нажимая кнопку Step Over в инструментальной панели (рисунок 31).

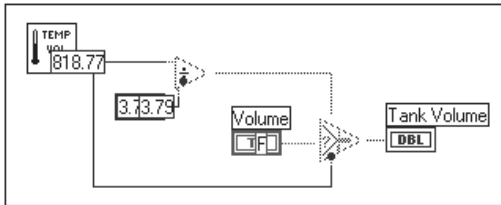




Рисунок 31 – Соединение блоков

10. Запустите Temp&Vol subVI в пошаговом режиме, нажав кнопку

Step Into  в инструментальной панели. Нажатие на эту кнопку открывает переднюю панель и блок-схему вашего Temp&Vol subVI. Нажмите кнопку Step Over, пока VI не закончит выполняться.

11. Для окончания выполнения нажмите кнопку Step Out  в инструментальной панели. Нажатие этой кнопки завершает все остающиеся последовательности в блок-схеме.

12. Сохраните результат.

Отчет по лабораторной работе должен содержать краткие ответы на контрольные вопросы, распечатки результатов моделирования (полученные путем копирования в буфер экрана и вставкой его в документ WORD), диаграммы по каждому из этапов экспериментальной части, выводы.

Лабораторная работа 4. Обработка сигналов и потоков данных в системе LabVIEW

Цель работы

Получение практических навыков работы в системе LabVIEW. Знакомство с основами обработки сигналов на ЭВМ.

Теоретическая часть (самоподготовка)

По литературным источникам, например /5/ ознакомиться с основными концепциями моделирования и обработки сигналов в системе LabVIEW.

Контрольные вопросы

- 1 Укажите основные виды сигналов.
- 2 Какими параметрами характеризуются периодические сигналы?
- 3 Что такое виртуальный прибор (инструмент) в системе? Как производится соединение в системе блоков виртуального прибора?
- 4 Что такое реакция системы на единичный импульс и единичный скачок /6,7/?
- 5 Что такое коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник) /6,7/?
- 6 Что такое спектр сигнала?

Экспериментальная часть

Задание 1. Использование синусоидальной волны и шаблона

Цель - сгенерировать синусоидальную волну, используя Sine Wave VI и Sine Pattern VI.

Передняя панель

1. Откройте новую лицевую панель, и создайте объекты, как показано на рисунке 32.

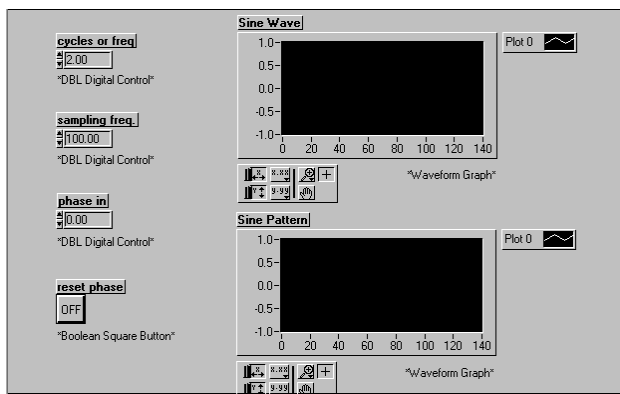


Рисунок 32 – Вид передней панели

2. Сформируйте следующую блок-схему (рисунок 33).

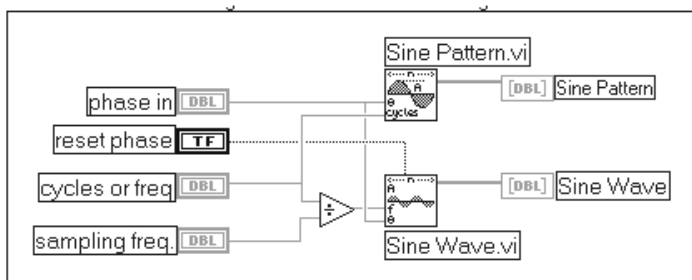


Рисунок 33 – Блок-схема



Sine Pattern VI (Analysis>Signal Generation palette).



Sine Wave VI (Analysis>Signal Generation palette).

3. Сохраните VI как Wave and Pattern.vi в каталоге LabVIEW\Activity.

4. Установите средства управления следующим образом:

cycles/freq: 2.00

sampling freq: 100

phase in: 0.00

reset phase: OFF

Выполните VI несколько раз.

5. Измените фазу на 90 градусов и выполните VI несколько раз.

6. Установите reset phase в ON и выполните VI несколько раз.

7. При reset phase = ON выполните VI несколько раз для каждого из следующих значений фазы: 45, 180, 270 и 360 градусов. Обратите внимание на начальную фазу сгенерированной волны каждый раз, когда VI выполнен.

Задание 2. Формирование генератора функций

Цель - сформировать генератор функций, который может генерировать следующие формы волны:

- прямоугольная волна;
- треугольная волна;
- пилообразная волна.

Передняя панель

1. Откройте новую лицевую панель и создайте объекты, как показано на рисунке 34.

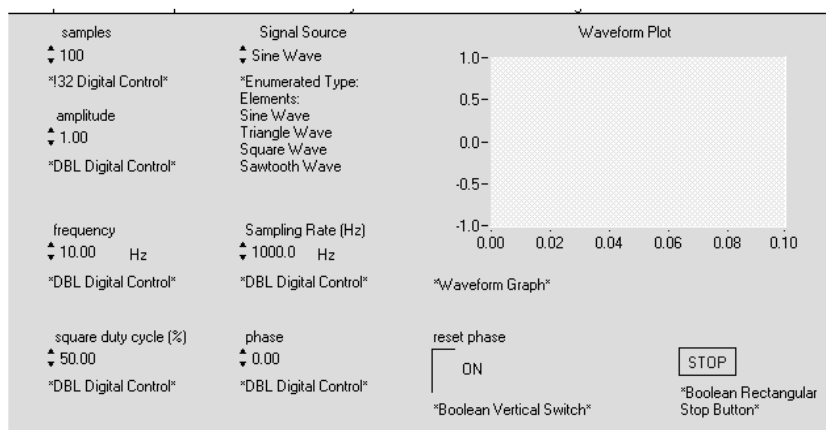


Рисунок 34 – Передняя панель виртуального прибора

Signal Source выбирает тип формы волны, которую вы хотите генерировать.

Square duty cycle используется только для установки рабочего цикла прямоугольной волны.

Samples определяет число выборок в графике.

Блок-схема

2. Сформируйте блок-схему, показанную на рисунке 35.

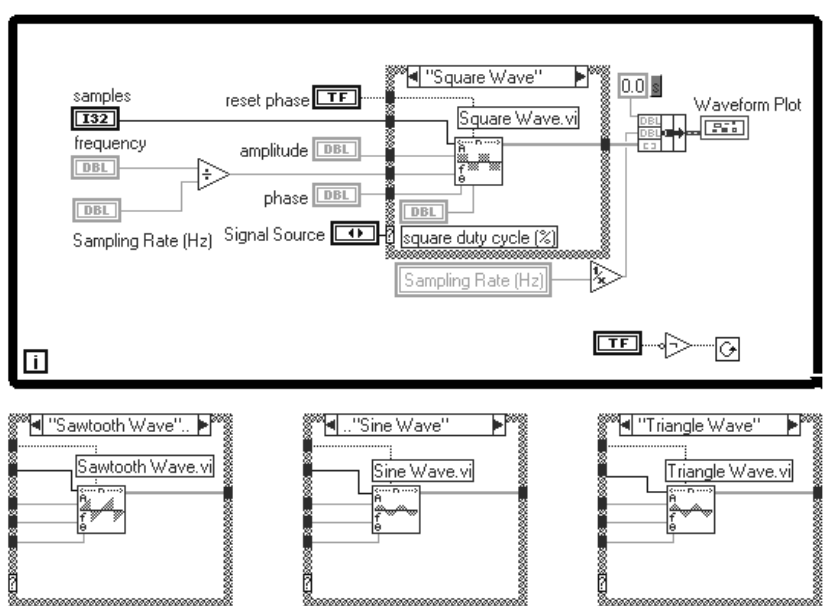


Рисунок 35 – Блок-схема



Sine Wave VI (Analysis>Signal Generation) генерирует синусоидальную волну нормированной частоты f .



Triangle Wave VI (Analysis>Signal Generation palette) генерирует треугольную волну нормированной частоты f .



Square Wave VI (Analysis»Signal Generation palette) генерирует прямоугольную волну нормированной частоты f с определенным рабочим циклом.



Sawtooth Wave VI (Analysis»Signal Generation palette) генерирует пилообразную волну нормированной частоты f .

3. Сохраните VI как Function Generator.vi в каталоге LabVIEW\Activity.
4. Выберите частоту дискретизации 1000 Гц, амплитуду = 1, объем выборки = 100, частоту = 10, сброс фазы = ON и источник = синусоидальная волна. Поскольку частота дискретизации = 1000 и частота = 10 Гц, каждые 100 выборок соответствуют к одному циклу.
5. Выполните VI.
6. Измените объем выборки на 200, 300, и 400. Сколько циклов формы волны вы видите? Объясните почему.
7. При объеме выборки равном 100, измените сброс фазы на OFF. Обратите внимание на изменения в графике?
8. Измените частоту на 10.01 Гц. Что изменилось? Почему?
9. Измените сброс фазы на ON. Что изменилось? Объясните почему.
10. Повторить шаги 4 до 9 для различных форм волны, выбранных в управлении источника сигнала.

Удалено:

Задание 3. Вычисление частотного и импульсного отклика

Цель - вычислить частотную характеристику и реакцию на единичный импульс

1. Откройте новую лицевую панель и добавьте объекты, показанные на рисунке 36.

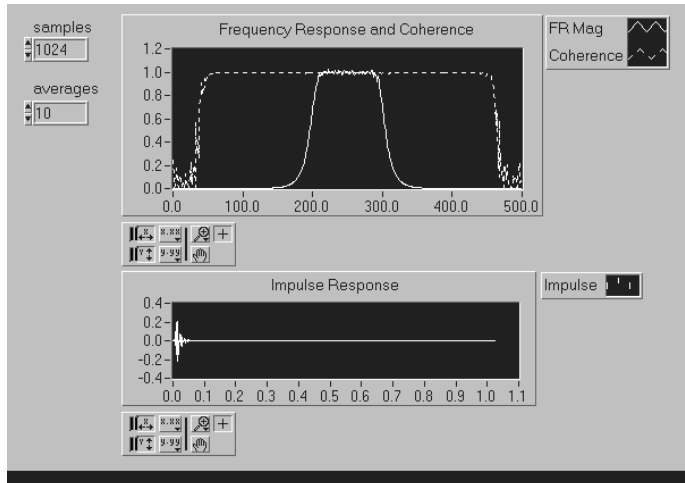


Рисунок 36 – Вид передней панели

- Откройте блок-схему и измените её в соответствии с рисунком 37. Здесь измеряется ответ системы полосового фильтра (фильтр Баттерворта VI) на подаваемый на него белый шум. И входной сигнал, и отклик системы отображается в виде ряда кадров (фреймов).

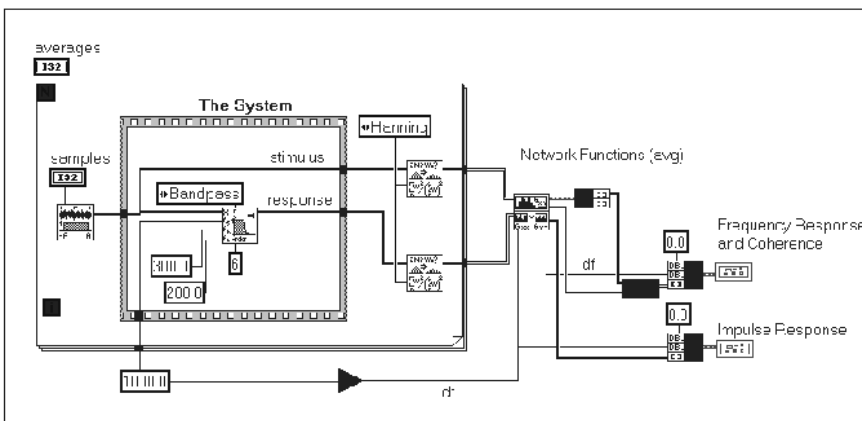


Рисунок 37 – Измененная блок-схема



Примененные в блок-схеме сетевые функции, выводимые блоком (рис. 38) вычисляют частотную характеристику (величина и фаза), перекрестный спектр мощности (величина и фаза), функцию когерентности, и ответ системы на импульс импульса. Увеличивая число кадров (фреймов) данных ввода и вывода (увеличение на лицевой панели), оценки функций отклика системы улучшаются. Результаты представляются в виде графика.

Задание 4. Вычисление гармонических искажений

Цель - использовать гармонический анализатор для вычисления гармонических искажений.

1. Откройте THD Example VI из Examples\analysis\measure\measxmpl.llb и просмотрите блок-схему (рисунок 38).

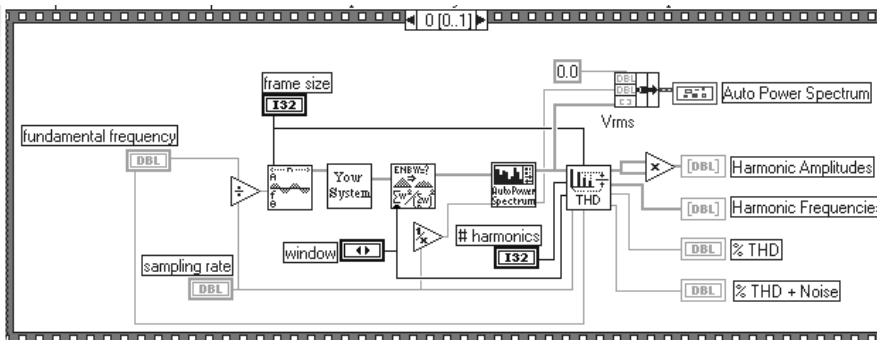


Рисунок 38 – Блок-схема

2. Просмотрите лицевую панель. В нижней части вы видите график спектра мощности нелинейной системы. В верхнем правом углу - индикаторы массива для частот и амплитуд основного сигнала и его гармоник (рисунок 39).

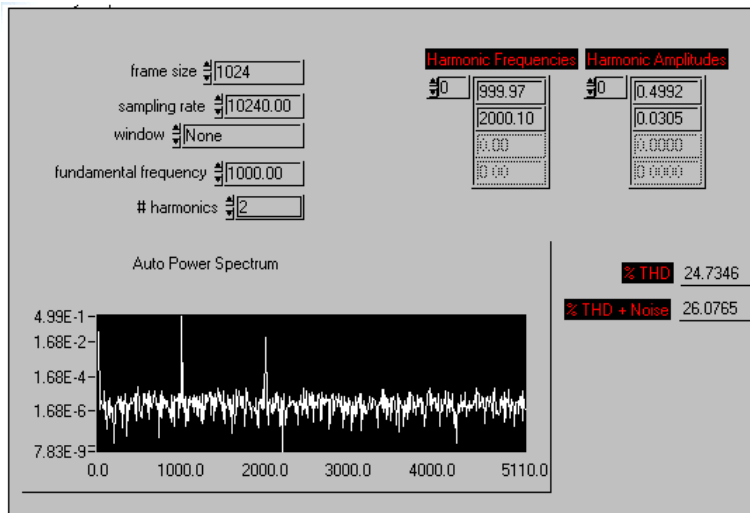


Рисунок 39 – Вид передней панели

3. Измените основную частоту на 1000, # harmonics на 2 и выполните VI несколько раз. Каждый раз обращайтесь внимание на значения в индикаторах вывода. Почему вы получаете различные значения при каждом выполнении VI?
4. Выполните VI с различными выборками окна управления и наблюдайте пики в спектре мощности. Которое окно дает самый узкий пик? Самый широкий? Объясните почему?
5. Измените основную частоту на 3000 и выполните VI. Почему вы получаете ошибку?
6. Закройте VI.
7. Сделайте вывод о наличии нелинейных искажений в сигнале.

Задание 5. Фильтрация зашумленного синусоидального сигнала

Цель - фильтровать выборку данных, которая состоит из высокочастотного шума и синусоидального сигнала с помощью фильтра Баттерворта.

Передняя панель

1. Откройте новый VI и сформируйте лицевую панель, как показано на рисунке 40.

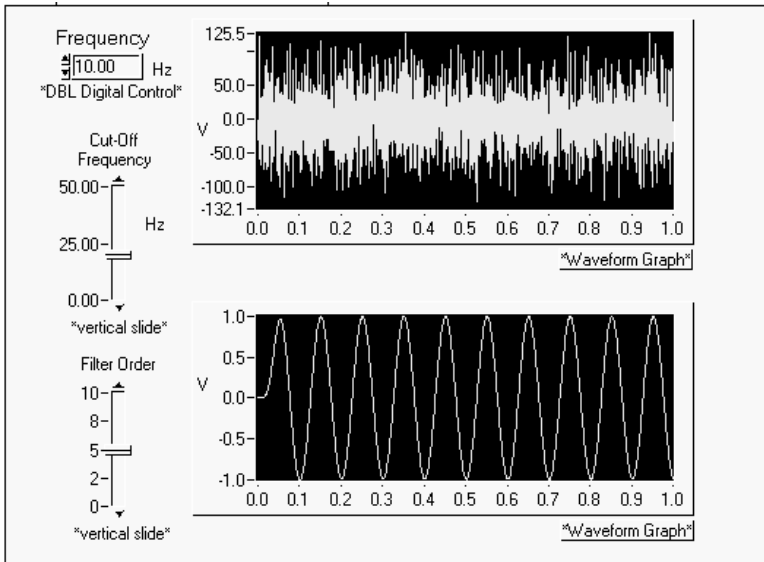


Рисунок 40 – Вид передней панели

2. Сформируйте блок-схему, как показано на рисунке 41.

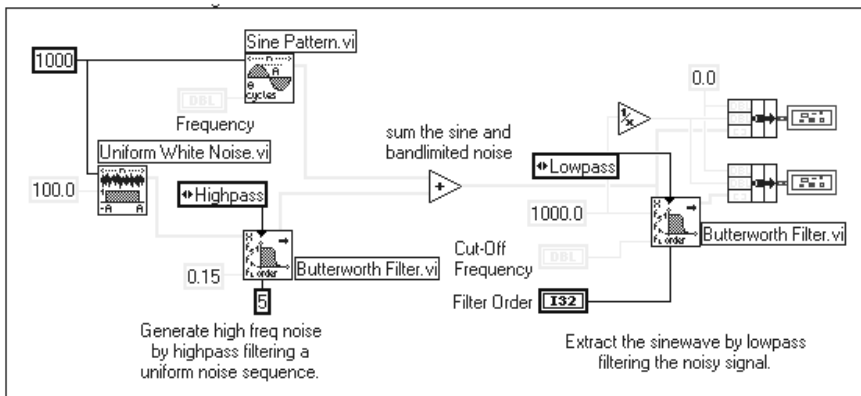


Рисунок 41 – Вид передней панели



Sine Pattern VI (Functions»Analysis»Signal Generation) генерирует синусоидальную волну требуемой частоты.

Uniform White Noise VI (Functions»Analysis»Signal Generation) генерирует однородный белый шум, который добавляется к синусоидальному сигналу.



Butterworth Filter VI (Functions»Analysis»Filters) фильтрует шум.

3. Сохраните VI как Extract the Sine Wave.vi в каталоге LabVIEW\Activity.
4. Перейдите в лицевую панель. Выберите частоту 10 Гц, предельную частоту 25 Гц и порядок фильтра 5. Выполните VI.
5. Уменьшите порядок фильтра до 4, 3, и 2, и наблюдайте изменения в отфильтрованном сигнале. Объясните, что происходит, когда вы понижаете порядок фильтра.
6. Когда вы закончите, сохраните VI как Extract the Sine Wave.vi в библиотеке Dig.filt.lib.
7. Закройте VI.
8. Сделайте вывод.

Отчет по лабораторной работе должен содержать краткие ответы на контрольные вопросы, распечатки результатов моделирования (полученные путем копирования в буфер экрана и вставкой его в документ WORD), диаграммы по каждому из этапов экспериментальной части, выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов В.П. МATHCAD 8/2000: Специальный справочник – СПб: Изд-во «ПИТЕР», 2000. – 592 с.
2. Гультяев А.К. MATHLAB 5.3 Имитационное моделирование в среде WINDOWS: Практическое пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 400 с.
3. Дьяконов В.П. Компьютерная математика. Теория и практика. М.: Нолидж, 2001. – 1296 с.
4. Очков В.Ф. MATHCAD 8 для студентов и инженеров. – Компьютер-пресс, 1999 – 267 с.
5. Основы LabVIEW. Учебный курс. Часть 1,2. Русское издание – National instruments. 2002 г.
6. Мирский Г.Я. Радиоэлектронные измерения. Изд. 3-е, перераб и доп. – М.: Энергия, 1975 – 600 с.
7. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 1982 – 223 с.
8. Симчера, В.М. Методы многомерного анализа статистических данных: учеб. пособие [Текст] / В.М. Симчера. – М.: Финансы и статистика, 2008. – 395 с.
9. Рангайян, Р.М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход: учеб. пособие для вузов: пер. с англ. [Текст] / Р.М. Рангайян. – М.: Физматлит, 2007. – 439 с.
10. Дробот, П.Н. Теория ошибок и обработка результатов измерений: учеб. пособие [Текст] / П.Н. Дробот. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники (ТУСУРа), 2011. – 83 с.

Приложение А

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»

Кафедра: «Приборостроение,
метрология и сертификация»

ОТЧЕТ
по лабораторной работе № _____
(Полное наименование работы) _____

Дисциплина: “ _____ ”

Студент: _____ (Ф.И.О.)
Группа: _____

Допущен к защите: _____
Отметка о зачете: _____

Орел

Приложение Б

1. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

1.1. Определение информации, сигнала

Нас окружает материальный мир. Присущее материи объективное свойство отражения проявляется в образовании и получении отдельных сведений о состоянии объектов материального мира. Биологические объекты, как известно, также являются частью математического мира и, следовательно, могут исследоваться физическими методами.

Сведения, получаемые о состоянии объектов материального мира с помощью физических методов исследования, охватываются обобщенным понятием *информация*.

По известному положению ученого Н. Винера информация является одним из аспектов существования материи наряду с энергией и веществом, она неразрывно связана с движением, как в пространстве, так и во времени, с происходящими материальными процессами, материальными носителями.

Различают два вида информации (две категории) [1]:

1. Качественную;
2. Количественную.

Качественная выражается понятиями цвета, вкуса, запаха, логическими заключениями и т.д.

Количественная выражается в числовой форме.

Целью всех естественных наук является установление и выражение в количественной форме объективных закономерностей материального мира, в том числе и биологических объектов и систем.

Количественную информацию исследователь может получить только путем проведения *измерительного эксперимента*. Он дает непосредственно числовую характеристику исследуемого предмета или явления. Эта характеристика называется *измерительной информацией*.

В процессе получения измерительной информации мы оперируем с определенными сигналами, которые присутствуют в системе *объект материального мира – измерительное устройство – человек*.

В науках об измерениях и методах обработки измерительной информации и сигналов используется следующая терминология.

Измерение – это процесс получения опытным путем численного отношения между данной физической величиной и некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения.

Согласно ГОСТ 16263, «Измерение – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств».

Результат измерения – именованное число – представляет собой сообщение – элемент измерительной информации.

Любое измерение, как бы тщательно оно не проводилось, и какими бы точными приборами не пользовались при его проведении, всегда сопровождается погрешностями. Погрешности обусловлены ограниченностью физического эксперимента, ограниченностью знаний об измеряемой физической величине, субъективностью и т.д. [1].

Истинное значение измеряемой величины (в принятых единицах измерения) остается неизвестным [1].

Обладая современными знаниями таких наук как «физика», «математика», «метрология», «теория измерений» и т.д., мы в состоянии оценить влияние погрешностей на результат измерения и указать пределы, в которых они заключаются с определенной вероятностью.

Таким образом, результат измерения в любом случае дает нам количественную характеристику интересующей нас физической величины с некоторой неизбежной неопределенностью.

Полученный результат только уменьшает исходную неопределенность от заранее известного интервала возможных значений измеряемой величины до интервала поля допуска, характеризующего погрешность измерения.

При макроскопическом рассмотрении большинство измеряемых величин непрерывны. Какое конкретное значение имеет измеряемая величина заранее неизвестно. Поэтому она априорно рассматривается как случайная величина. В результате измерений вместо исходной, природной неопределенности измеряемой величины, получается заведомо меньшая неопределенность, зависящая от несовершенства средств и методов измерений. Разность этих двух неопределенностей и есть количество измерительной информации [1].

Измерительная информация – количественные сведения о каком-либо свойстве материального объекта (явления, тела, вещества, биообъекта, процесса), получаемые опытным путем с помощью технических средств в результате их взаимодействия с материальным объектом.

По ГОСТ 16263 «Измерительная информация – это полученные при измерениях значения физической величины».

Измерительная информация представляется и передается в различных конкретных формах сообщений: числа, сигналы, кодированные сигналы и т.п.

Количество (объем) измерительной информации – численная мера степени уменьшения неопределенности количественной оценки какого-либо свойства материального объекта, получаемой из возможного разнообразия его значений путем измерения [1].

Сигнал – (от лат. signum – знак) – это физический процесс или явление, несущие сообщение о каком-либо событии, явлении, состоянии объекта наблюдения, либо передающие команды управления, оповещения и т.д.

Совокупностью сигналов можно отобразить любое сколь угодно сложное событие. Сигнал может быть механическим (деформация, перемещение), тепловым, электрическим и т.д. Информация, содержащаяся в сообщении, обычно представляется изменением одного или нескольких параметров сигнала –

его амплитуды (интенсивности), длительности, частоты, ширины спектра, поляризации и т.д.

Сигналы могут преобразовываться (без изменения содержания сообщения) из одного вида в другой, например, непрерывные – в дискретные, звуковые – в электрические, электрические – в световые. Общие закономерности передачи и преобразования сигналов вне зависимости от их физической природы изучаются *теорией информации и информационной теорией измерений*.

Сигналы, являющиеся физическими носителями измерительной информации, называют *измерительными*.

Обработка сигналов может быть как математической, так и инструментальной. Первая подразумевает применение к сигналам в числовом выражении известных математических теорий и методов. Вторая – использование методов и средств радиоэлектроники, теории и схемотехники измерительных устройств и т.д.

Целью обработки сигналов является возможное уменьшение неопределенности знаний о физической величине, вызванной несовершенством метода и средств измерений.

1.2. Виды информации, ее количественная оценка

В природе и в деятельности человека принято различать два вида информации: связанную и свободную.

Связанной считается *информация*, содержащаяся в структуре какого-либо объекта, явления или процесса, то есть их реально существующие параметры, представленные в виде множеств физических величин. Связанная информация существует объективно, независимо от познающего объекта или субъекта, она присуща всем объектам материального мира.

Свободная информация – это информация, получаемая человеком в результате его деятельности (научной, производственной, культурной и т.д.). В случае экспериментальных исследований биосистем она получается в процессе измерительных экспериментов.

Свободная информация присутствует в формах энергетических сигналов, записей на носителях, отображенной на шкалах, табло и т.д.

Между двумя видами имеется подвижная граница. Связанная информация, например, в результате измерений может быть преобразована в свободную. Свободная, в свою очередь, в результате производственной деятельности (в любой области) может быть преобразована в связанную. Например, изготовление по чертежам изделия или результат генной инженерии.

Связанную информацию также называют потенциальной, структурной или структурно-связанной, а свободную – актуальной, активной, структурно-несвязанной.

В настоящее время имеется несколько концепций *определения количества информации*. В технических приложениях наибольшее распространение

получила *шеноновская* мера, использующая для оценки количества информации понятие *информационной энтропии*. При этом предполагается, что потребитель использует полученную информацию для выбора одной возможности решения (действия) из множества $\{m\}$ исключающих друг друга возможностей с вероятностью реализации каждой из них, равной P_i .

Информация, достаточная для полного устранения у потребителя неопределенности в выборе:

$$H = -\sum_{i=1}^m \log_n P_i(m),$$

где $n=2$.

Для непрерывного ряда возможных решений:

$$H = -\int_{-\infty}^{\infty} P(m) \log P(m) dm.$$

В качестве объектов измерений могут быть вещества, тела и среды, технологические процессы, циркулирующая в природе, машинах, процессах и системах энергия и информация.

В общем случае объекты измерений характеризуются множеством независимых и взаимосвязанных параметров. Например: любое тело имеет массу, объем, температуру, твердость, цвет и т.д.

К существенным для процесса измерения характеристикам физической величины или параметрам относят [1]:

- модальность (наименование параметра);
- диапазон измерения;
- разнообразие значений параметра;
- скорость измерения;
- энергию.

Диапазон измерения и число градаций

Всегда значение параметра может изменяться в некоторых пределах:

$$Q \in [Q_{\min}, Q_{\max}].$$

Величина $Q_d = Q_{\max} - Q_{\min}$ — это абсолютный диапазон изменения параметра.

Относительный диапазон изменения параметра:

$$d = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}.$$

Изменение значения величины может происходить плавно или непрерывно и дискретно. Например, сопротивление медного термометра при повышении температуры изменяется плавно (непрерывно), а количество деталей партии изменяется дискретно. Поэтому, на практике все величины подразделяются на непрерывные (аналоговые) и дискретные (квантованные или цифровые).

Это деление условно, так как большинство непрерывных величин изменяются дискретно, просто величина кванта существенно меньше

погрешности определения величины (стрелка часов перемещается плавно, но на самом деле дискретно, просто квант мал и мы его не видим).

Если параметр может принимать дискретные значения с числом r различных событий, то говорят, что он обладает алфавитом $\{Q\}$, содержащим r элементов Q_i .

Если каждое значение Q_i характеризуется вероятностью P_i , то их совокупность представляют в виде матрицы:

$$\begin{vmatrix} Q \\ P \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Q_1 & Q_2 & \dots & Q_i \\ P_1 & P_2 & \dots & P_i \end{vmatrix}.$$

Закон изменения физической величины во времени.

Обычно записывается различными функциями, часто эти функции носят случайный характер (пример: $Q=3+4t$). На практике часто встречаются случаи, когда функция параметра задана не в виде формулы, а в дискретном виде:

$$\begin{matrix} r_1 & r_2 & \dots & r \\ P_1 & P_2 & \dots & P \end{matrix}$$

Такое представление характеризует закон распределения вероятности значений параметров (рис. П-1).

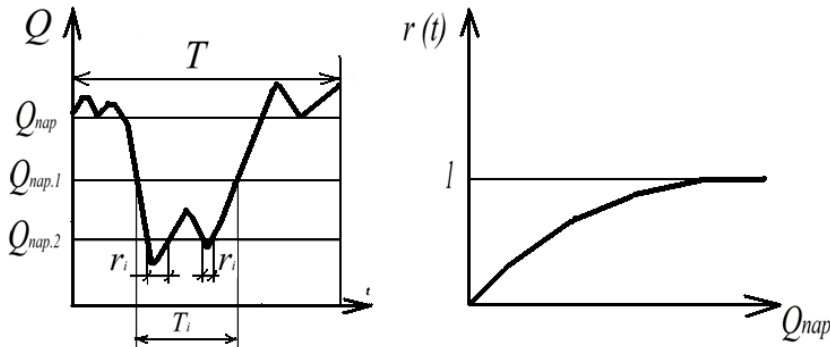


Рис. П-1. Получение функции распределения

Для определения такой характеристики используют законы математической статистики, определяют частоту появления каждого из состояний r_i , строят гистограммы и оценивают вероятность появления того или иного события r_i .

Скорость изменения параметра – это динамическая характеристика. Исчерпывающую информацию об этом свойстве дает частотный спектр (рис. П-2).

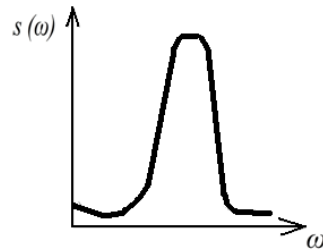


Рис. П-2. Частотный спектр

1.3. Сигналы. Обобщенная классификация

Рассмотрим синусоидальные сигналы (рис. П-3). Данный вид сигналов получил самое широкое распространение в радиоэлектронных измерительных устройствах. В общем виде они описываются выражением:

$$U = A \cdot \sin 2\pi ft ,$$

где A - амплитуда сигнала;
 f - частота (Гц).

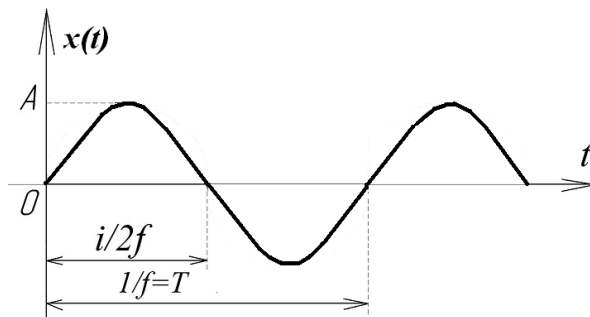


Рис. П- 3. Синусоидальный сигнал

Часто синусоида выходит не из начала координат, тогда говорят, что сигнал имеет начальную фазу.

Тогда:

$$U = A \cdot \sin(2\pi ft + \varphi),$$

где φ – начальная фаза.

Используется форма записи синусоидального сигнала через угловую частоту:

$$U = A \cdot \sin(\omega t + \varphi),$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота (рад/с).

Основное достоинство синусоидальной функции (основная причина широкого применения синусоидальных сигналов) состоит в том, что эта функция является решением целого ряда линейных дифференциальных уравнений, описывающих как физические явления, так и свойства линейных цепей.

Амплитуду сигналов часто оценивают в *децибелах*. Децибел применяется для сравнения двух, сильно отличающихся по амплитуде сигналов (в тысячи и более раз).

Отношение двух сигналов, выраженное в децибелах, это:

$$k, (\text{дБ}) = 20 \lg \left(\frac{A_2}{A_1} \right),$$

где $A_{1,2}$ – амплитуды этих сигналов.

Например, если один сигнал имеет амплитуду вдвое большую, чем другой, то отношение первого сигнала ко второму составит +6 дБ. Если один сигнал в 10 раз больше другого, то отношение будет 20 дБ.

Хотя децибел служит для определения отношения двух сигналов, иногда эту единицу используют для оценки абсолютного значения амплитуды (уровня) сигнала. При этом оцениваемый сигнал соотносят с некоторым эталонным уровнем. Известно несколько стандартизованных значений амплитуды, используемых для такого уровня (эти значения не указываются, но подразумеваются):

а) дБВ (децибелВольт) – эффективное значение 1 В;

б) дБВт (децибелВатт) – напряжение, соответствующее мощности 1 мВт на некоторой предполагаемой нагрузке (для радиочастот это 50 Ом, для звуковых частот – 600 Ом). Напряжение 0 дБВт на этих нагрузках имеет эффективное значение 0,22 В и 0,78 В.

в) В акустике уровень звукового давления 0 дБ соответствует сигналу, среднее квадратичное значение давления которого составляет 0,0002 мкбар (1 бар равен 10^6 дин на 1 см^2 или приблизительно равен 1 атмосфере).

2. Линейно-меняющийся сигнал – это напряжение, возрастающее (или убывающее) с постоянной скоростью до некоторого значения (рис. П-4).

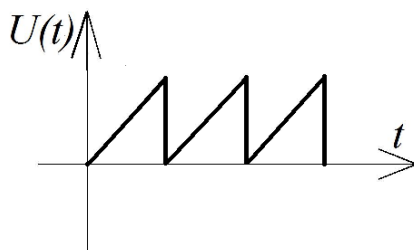


Рис. П-4. Линейно-меняющийся сигнал

3. Треугольный сигнал – то же, что линейно-меняющийся, только симметричный (рис. П-5).

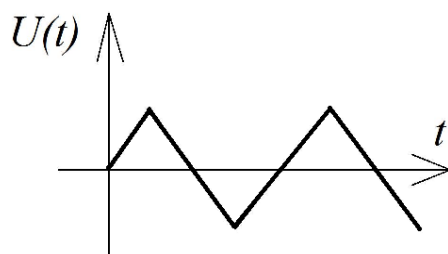


Рис. П-5. Треугольный сигнал

4. *Сигнал шума.* Шумовой сигнал представляет собой случайный сигнал, который характеризуется частотным спектром (произведение мощности на частоту в герцах) и распределением амплитуд.

Одним из распространенных шумовых сигналов является *белый шум* с гауссовым распределением в ограниченном спектре частот. Для него произведение мощности на частоту в герцах сохраняется постоянным в некотором диапазоне частот, а вариации амплитуды для большого числа измерений мгновенного значения описываются распределением Гаусса. Шумовой сигнал такого вида генерирует резистор (шум Джонсона).

5. Прямоугольные сигналы, как и синусоидальные, характеризуются амплитудой и частотой (рис. П-6).

Если на вход линейной системы подать прямоугольный сигнал, то сигнал на выходе не будет иметь прямоугольную форму. Для прямоугольного сигнала эффективное значение равно амплитуде.

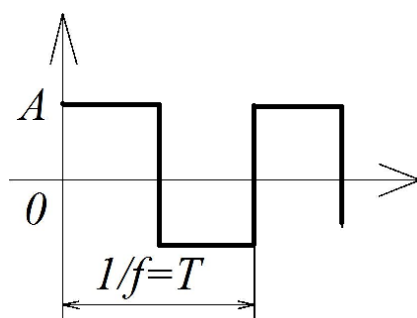


Рис. П-6. Прямоугольный сигнал

6. Импульсы характеризуются амплитудой и длительностью. Если генерируется периодическая последовательность импульсов, то говорят о частоте следования. Импульсы могут иметь положительную и отрицательную полярность, они могут быть нарастающими или спадающими.

7. Сигналы в виде скачков и пиков (рис. П-7).

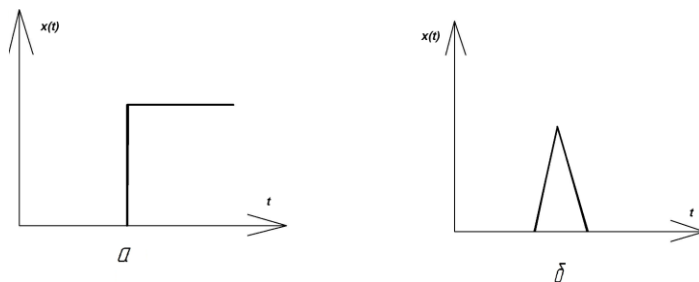


Рис. П-7. Сигналы в виде скачков и пиков: *a* – скачок; *б* – пик

Этот вид сигналов не нашел широкого применения. Они, в основном, используются в теоретических исследованиях.

В подавляющем большинстве медико-биологические сигналы имеют сложную структуру (как и многие технические). Это обусловлено сложностью живого организма, внутренние процессы в котором, во-первых, не могут наблюдаться непосредственно без нарушения их естественной обособленности от окружающей среды, и, во-вторых, в силу своей сложности характеризуются существенной дискретностью развития во времени.

Например, электрокардиограмма (ЭКГ). Она представляет собой запись электрического потенциала на поверхности грудной клетки и отражает динамику электрической активности сердечной мышцы в процессе ее квазипериодического сокращения.

Кривая ЭКГ может разбиваться на части по различным признакам, но в любом случае это разбиение направлено на выделение отдельных фаз сокращения. На ЭКГ выделяют пять типов зубцов характерной формы (*P*, *Q*, *R*, *S*, *T*-зубцы), обозначенных *PQRST*-комплексом (рис. 8). Практически все алгоритмы диагностики заболеваний сердца предполагают выделение *PQRST*-комплекса как основной этап анализа. Форма комплекса в пределах одной ЭКГ достаточно постоянна (кроме заболеваний, признаком которых является нестабильность комплекса). В то же время ЭКГ разных пациентов характеризуется большим разнообразием формы *PQRST*-комплекса. Кроме того, при регистрации ЭКГ фиксируются сигналы не только от сердца, но и от других органов вместе с внешними помехами.

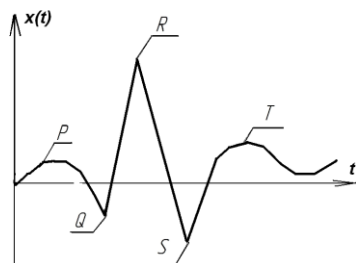


Рис. П-8. Основные зубцы кардиограммы

Таким образом сигнал ЭКГ можно классифицировать как импульсный полезный сигнал с наложенным случайным шумом (помехами). В силу этого задачу выделения *PQRST*- комплекса и отдельных зубцов в его составе можно рассматривать как задачу распознавания образов.

Непрерывный сигнал – это любое действительное или комплексное колебание во времени $f(t)$, определяемое как некоторая функция непрерывной действительной временной переменной t (или любое колебание $g(S)$ определяемое через пространственную функцию S). Эти сигналы называют *аналоговыми*, если они могут принимать континуум значений при любом значении переменных t и S .

Дискретный сигнал – произвольная функция $f[n]$, представляющая собой некоторую последовательность действительных или комплексных чисел, определенную при всех целочисленных значениях n . Непрерывная функция времени $f(t)$, дискретизируемая с шагом T секунд будет порождать дискретную последовательность $f[n]=f(nT)$.

Непрерывный или дискретный сигнал, величина которого при любом t может принимать не континуум, а только некоторое конечное число значений, называется *цифровым* сигналом (на практике совпадают с дискретными сигналами).

1.4. Аналоговый и цифровой методы обработки информации

Обработка информации может выполняться двумя методами:

Аналоговым, при котором участвующие в обработке величины представляются в аналоговой форме (уровнями тока, напряжения и т.д.);

Цифровым, при котором величины представляются в цифровой форме в виде цифрового кода, и обработка сводится к последовательности действий (операций) над числами (кодом).

Отсюда вся измерительная и обрабатывающая аппаратура делится на два вида: аналоговую (используется аналоговый метод) и цифровую (используется цифровой метод). В цифровой аппаратуре основным устройством, в котором непосредственно выполняется обработка, является вычислительное (процессорное) устройство.

В аналоговой аппаратуре обработка информации заключается в преобразовании между токами и напряжениями вида (для электрических и электронных схем):

$$U_L = L \frac{di_L}{dt}; \quad U_C = C \frac{dU_C}{dt}; \quad U_r = ri_r,$$

выполняемых индуктивными, емкостными и резистивными элементами, в изменениях масштаба $U_2 = kU_1$, а также в нелинейных преобразователях $U_2 = f(U_1)$. Особенностью является то, что каждый элемент аналогового устройства в каждый момент времени находится в состоянии активного выполнения характерных для него операций. То есть в системе имеет место параллельное выполнение операций во всех элементах устройства.

Например, для аналоговой интегрирующей RC цепи (рис. П-9) на выходе формируется напряжение $U(t)$, являющееся решением следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{dU_C(t)}{dt} + \frac{1}{rC} U_C(t) = \frac{1}{rC} e(t).$$

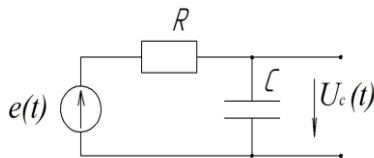


Рис. П- 9. Аналоговая интегрирующая RC цепь

Для реализации цифрового метода необходимо решать данное уравнение в численном виде. Особенность такого решения заключается в том, что оно может быть получено для дискретных моментов времени (например, следующих с интервалом T).

Интервал T называют шагом интегрирования, тогда решения уравнения, получаемые для моментов времени, следующих с интервалом T обозначают:

$$U_C(nT); \quad U_C(nT + T); \quad U_C(nT + 2T); \dots$$

Для численного метода производная в уравнении представляется на дискретной сетке:

$$\left. \frac{dU_C(t)}{dt} \right|_{t=nT} \cong \frac{U_C(nT + T) - U_C(nT)}{T}.$$

Подставив производные в уравнение, получим рекуррентное выражение:

$$U_C(nT + T) = k_1 U_C(nT) + k_2 e(nT),$$

где $k_1 = 1 - T/rC$, $k_2 = T/rC$ — константы.

Последнее выражение описывает разностную форму исходного дифференциального уравнения (разложение уравнения на дискретной сетке). Это выражение рекуррентно, то есть по известным значениям $U_c(nT)$, $e(nT)$ вычисляется $U_c(nT+T)$, далее по значению $U_c(nT+T)$ определяется $U_c(nT+2T)$ и т.д.

В результате получаем дискретные решения уравнения (зависимости) [2] (рис. П-10).

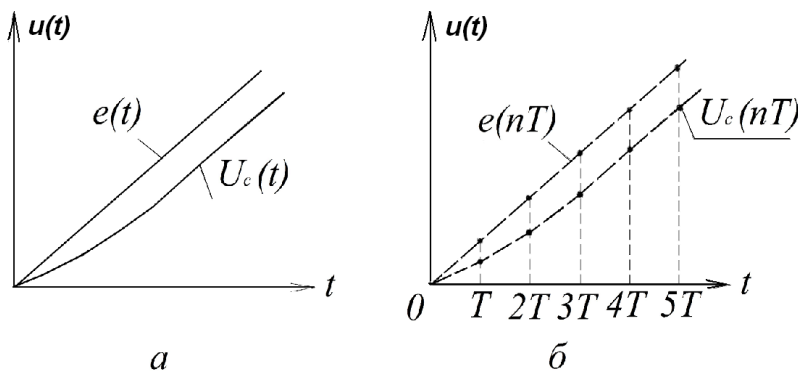


Рис. П-10. Результаты воздействия $e(t)$ на RC цепь, полученные аналоговым (а) и дискретным (цифровым) (б) методами

Вычисление по рекуррентному выражению удобно проводить с применением ЭВМ, где для получения одного значения выходной величины требуется последовательное выполнение большого числа операций (в аналоговом методе он выполняется параллельно). Число требуемых операций снижает быстродействие. Кроме того, если цифровой метод реализовывать в приборе, то возникает необходимость в большом количестве относительно сложных узлов (резисторов, сумматора, множительного устройства и т.д.).

Достоинства цифровых методов обработки: возможность обеспечения любой точности обработки; высокая помехозащищенность; высокая стабильность характеристик обработки, возможность выполнения таких видов обработки, которые аналоговыми методами невыполнимы.

Преобразование сигналов и аналоговой формы в цифровую состоит из следующих операций:

- 1) дискретизация;
- 2) квантование;
- 3) кодирование.

В процессе дискретизации из непрерывного сигнала $X(t)$ берутся отсчеты (мгновенные значения), которые следуют через временной интервал T .

По теореме Котельникова, если сигнал имеет ограниченный спектр, то есть все его частоты не выше некоторой частоты F_{max} , то для восстановления

аналогового сигнала из последовательности его дискретных значений тактовый интервал T должен выбираться из условия $T \leq \frac{1}{2} F_{\max}$.

При квантовании весь возможный интервал сигнала разбивается на уровни (кванты). Полученные при дискретизации отсчеты заменяются ближайшими к ним уровнями квантования, которым приписаны определенные кодовые комбинации. Пример представлен на рис. П-11.

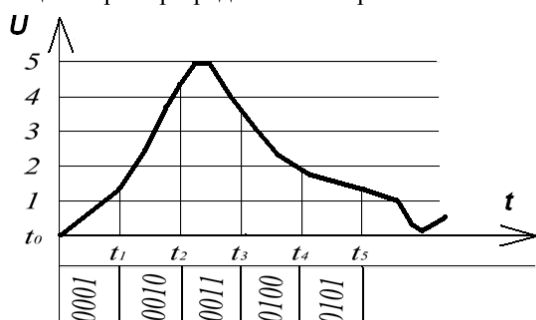


Рис. П-11. Пример дискретного квантованного сигнала (коды условны)

Данные операции осуществляются аналого-цифровыми преобразователями (АЦП).

1.5. Измерительные сигналы

В системах получения и передачи информации, в том числе и измерительных, в качестве сигналов используются различные физические процессы, характеризующиеся большим числом параметров.

Сигналы, являющиеся физическими носителями информации, называются измерительными. Сигнал отражает состояние физической системы и является результатом некоторого измерения, проводимого над системой в процессе ее наблюдения.

К измерительным сигналам относят [1.2.3]:

- полезные сигналы, получаемые от исследуемых, контролируемых или управляемых систем;
- вредные сигналы или помехи, поступающие в измерительную систему вместе с полезными сигналами или независимо от них;
- помехи, возникающие внутри системы;
- специально генерируемые в системе или вне ее сигналы, улучшающие работу системы (модуляция, дискретизация).

Физическими носителями сигналов могут быть импульсы механической, тепловой, электрической, магнитной, акустической и световой энергии. Так же может использоваться и энергия ионизирующих излучений.

Пример механического воздействия – индикатор часового типа: линейное механическое перемещение преобразуется механически в угловое перемещение стрелки.

Пример электрического носителя – под действием внешнего фактора изменяется электрический ток в мостовой схеме и далее информация передается в виде электрического сигнала.

Пример использования в качестве носителя энергии ионизирующих излучений. Покрывают специальным веществом поверхностный слой пары трения. При этом вещество является радиоактивным. В процессе работы пары трения оценивают энергию радиоактивного излучения и по ней определяют износ рабочих поверхностей пары трения.

По характеру изменения во времени сигналы делят на постоянные и переменные.

Переменные бывают: детерминированные (неслучайные) и случайные.

Детерминированные сигналы подразделяют на: периодические, почти периодические и импульсные.

Случайные делятся на стационарные и нестационарные, эргодические и неэргодические и т.д.

Представленную классификацию можно отразить в виде схемы (рис.П-12)

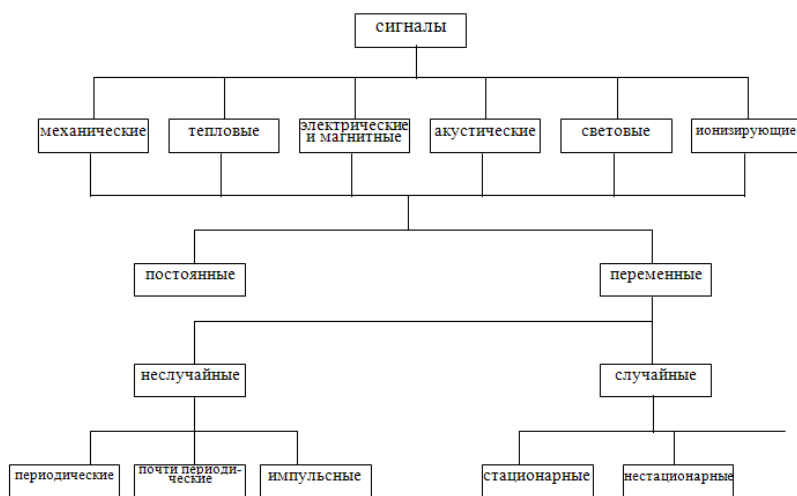


Рис. П-12. Классификация измерительных сигналов

Носителями информации являются физические величины, которые в зависимости от числа принимаемых (потенциальных) размеров подразделяются на непрерывные, имеющие бесконечно большое число размеров и квантованные по уровню (конечное число размеров).

В зависимости от характера изменения во времени и в пространстве сигналы делятся на непрерывные и дискретные (дискретизированные).

Дискретизированные сигналы принимают отличные от нуля значения только в определенные моменты времени или в определенных точках пространства.

Примеры различных видов сигналов представлены на рис. П-13.

В процессе преобразования сигналов измеряемой информации используется замена переменного сигнала дискретным. При этом выделяется две процедуры решения этой задачи:

- 1) квантование сигнала;
- 2) дискретизация.

Сущность квантования непрерывного сигнала по уровню заключается в том, что все возможные значения непрерывной величины заменяют на определенные фиксированные значения, которые называют *уровнями квантования*.

Квант – разница между двумя соседними уровнями, может быть постоянным или изменяться по какому-либо закону (рис. П-14).

Вполне естественным является тот факт, что, округляя значение $x(t)$ до ближайшего уровня мы, тем самым, вводим методическую погрешность преобразования (квантования):

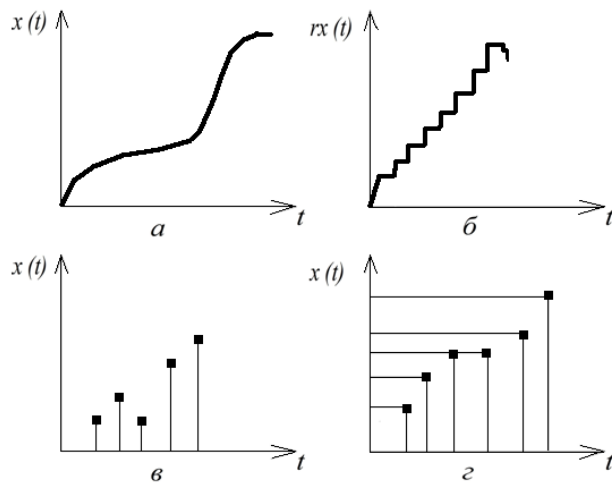


Рис. П-13. Примеры сигналов: *a* – непрерывный сигнал; *б* – квантованный по уровню сигнал; *в* – дискретный сигнал; *г* – дискретный и квантованный сигнал

$$\xi(x) = x_i - x,$$

где x_i – соответствующий уровень квантования;

x - текущее значение непрерывной величины.

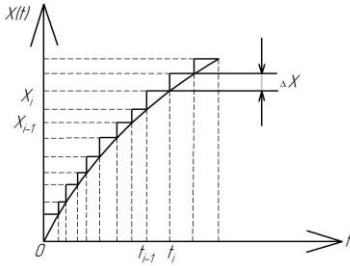


Рис. П-14. Пример кванта

Данная погрешность в основном определяется двумя аспектами:

- 1) величиной шага квантования. Очевидно, что с уменьшением разницы между уровнями данная погрешность будет уменьшаться;
- 2) характер квантования (равномерный или неравномерный) и соотношение характера квантования с видом самой функции $x(t)$.

Оценка погрешности равномерного квантования.

Пусть $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \dots = \Delta x$, тогда:

$$\Delta x = x/N,$$

где x - диапазон изменения входной величины;

N - общее число интервалов квантования.

При оценке погрешности можно отметить, что в данном случае максимальная погрешность квантования определяется, как половина значения Δx , то есть наибольшая погрешность не превышает *половины интервала квантования*.

Число ступеней квантования, необходимых для обеспечения требуемой погрешности:

$$N = \frac{x}{\sigma 2\sqrt{3}}.$$

Дискретизация- процедура преобразования непрерывного сигнала в дискретный. То есть, это замены непрерывной по аргументу функции $x(t)$ функцией $x(t_i)$ дискретного аргумента t_i , то есть в заданные моменты дискретизации t_i фиксируются значения реальной функции $x(t)$. При этом теряется информация о значении функции в любых других моментах времени. Шагом дискретизации называется промежуток времени между соседними значениями аргумента (рис. П-15).

Для записи дискретного сигнала как функции времени используют следующую запись:

$$x(iT_u) = \sum_{i=1}^n x(t_i) \delta(t - iT_u).$$

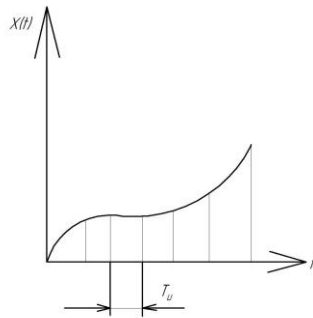


Рис. П- 15. Пример шага дискретизации

Дискретизация может быть равномерной и неравномерной:

- условие *равномерности* дискретизации – $T_u = const$;
- условие *неравномерности* дискретизации – $T_u = var$.

Технически квантование осуществляется с помощью аналого-цифровых преобразователей.

Дискретизация может осуществляться различным путем. Одна из процедур заключается в том, что непрерывный сигнал $x(t)$ пропускают через ключ, который замыкается на очень короткое время в моменты t_i ($i=1, 2, \dots$). При этом реализуется совокупность мгновенных значений функции $x(iT_u)$.

Особую важность представляет вопрос восстановления функции по отсчетам $x(iT_u)$. Восстанавливаемая функция строится как временная сумма некоторых функций φ_i называемых базисными:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i,$$

где a_i - некоторые коэффициенты полинома.

В качестве базисных выбирают систему таких функция, для которых выполняется условие:

$$\int_0^T \varphi_i(t) \varphi_k(t) dt = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}.$$

Такие функции называются ортогональными, где $(0; T)$ область существования функции. Коэффициенты a_i выбирают из условия минимизации погрешности:

$$\varepsilon(t) = y(t) - x(t).$$

При этом в качестве критерия минимума можно взять различные составляющие функции погрешности. К числу критериев можно отнести минимум среднего квадратического отклонения погрешности в пределах

диапазона, минимум максимального отклонения, минимум среднего значения математического ожидания и т.п.

Чаще всего выбирают минимум среднеквадратического отклонения погрешности в пределах диапазона. В этом случае при выборе в качестве базисных функций ортогональных функций коэффициенты a_i определяют аналогично коэффициентам Фурье:

$$a_i = \int_0^T y(t)\varphi_i(t)dt.$$

В качестве базисных функций могут быть взяты тригонометрические функции, а также различные полиномы: Чебышева, Лежандра и пр. Считается наиболее перспективным применение в качестве аппроксимирующих функций степенных полиномов.

В измерительной технике и в теории связи широко применяется подход Котельникова к построению функции восстановления.

Теорема Котельникова: функция $x(t)$, удовлетворяющая условиям Дирихле и обладающая ограниченным спектром частот ω_c в случае ее дискретизации циклически периодом:

$$T_u \leq \pi/\omega_c ; T_u \leq \frac{\pi}{2\pi f} \leq \frac{1}{2f} \leq \frac{T_c}{2},$$

может быть восстановлена по этой совокупности без погрешности.

Теорема доказывается с помощью преобразования Фурье.

Так как спектр ограничен частотой ω_c , то:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/\omega_c}^{\pi/\omega_c} S(j\omega)e^{j\omega t} dt.$$

Разложив в ряд Фурье $S(j\omega)$, можно записать:

$$S(j\omega) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i e^{ij\pi\omega/\omega_c};$$

$$c_i = \frac{1}{2\omega_c} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} S(j\omega)e^{-ij\pi\omega/\omega_c} d\omega.$$

Если провести замену переменной в выражении $t = -iT_u$, то:

$$x(-iT_u) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} S(j\omega)e^{-j\pi\omega/\omega_c} d(-iT_u).$$

Из выражения видно, что:

$$c_i = \pi x(-iT_u)/\omega_c ;$$

$$S(j\omega) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{\pi}{\omega_c} x(-iT_u)e^{ij\omega/\omega_c}.$$

После преобразований получим:

$$x(t) = \frac{1}{2\omega_c} \sum_{i=-\infty}^{\infty} x(iT_u) \int_{-\omega_c}^{\omega_c} e^{j\omega(t-iT_u)} d\omega.$$

Это выражение часто называют рядом Котельникова с коэффициентами равными мгновенным значениям сигнала.

Часто ряд записывают в виде:

$$x(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{x(iT_u) \sin \omega_c (t-iT_u)}{\omega_c (t-iT_u)}.$$

Согласно этому выражению вводится понятие функции отсчета:

$$\varphi_i(t) = \frac{\sin \omega_c (t-iT_u)}{\omega_c (t-iT_u)}.$$

Данная функция имеет определенную конфигурацию и является, по сути, реакцией идеального ФНЧ на единичный импульс. В моменты времени $t=(i \pm k)T_u$, где k - целое число, функция обращается в нуль.

Для восстановления функции $x(t)$ необходимо подобрать на фильтре низких частот с верхней границей ω_c последовательность единичных импульсов с амплитудами, соответствующими мгновенным значениям функции в момент времени iT_u .

При выборе интервала T_u или при определении необходимого числа мгновенных значений и в случае замены непрерывных функций дискретными, необходимо помнить, что для получения достоверной однозначной оценки функции при ее дальнейших разложениях в ряд Фурье и восстановлении следует обеспечивать условие теоремы Котельникова, что в пересчете на номера гармоник выглядит следующим образом:

$$N \geq 2n + 1,$$

где N - число интервалов дискретизации (число дискретных значений в пределах диапазона);

n - номер гармоники, которой соответствует предельная частота спектра реального сигнала (ω_c).

Если это условие не выполняется, то однозначно характеризовать требуемое число гармоник не представляется возможным. В этом случае при наличии априорной информации о реальных источниках гармонических составляющих сигнала можно решить данную задачу с определенными допущениями. Но это не всегда возможно. В этом случае во внимание принимается то, что каждая гармоника включает в себя группу гармоник. В зависимости от реальных N и n составляются соответствующие таблицы, в которых указываются данные группы гармоник.

1.6. Представление сигналов во временной области

Измерительный сигнал во временной области рассматривается как функция времени, характеристики которой содержат информацию, заключенную в сигнале.

Рассмотрим некоторые наиболее типичные сигналы.

Гармонические сигналы (рис. П-16).

$$X(t) = X_m \sin(\omega \cdot t + \varphi),$$

где X_m , ω , φ - параметры, которые могут быть информативными;

X_m - амплитуда; ω - частота; φ - фаза, $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T}$.

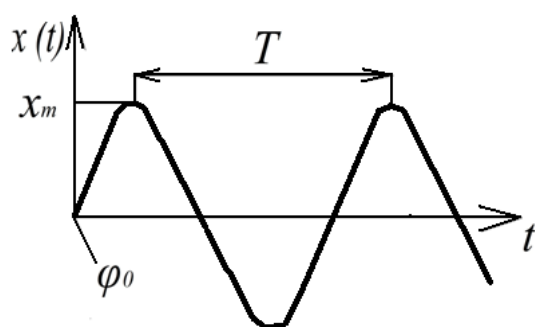


Рис. П-16. Пример гармонического сигнала

В случае модуляции синусоидальный сигнал может быть либо информативным, либо несущим.

Периодические сигналы (рис. П-17).

$$X(t) = X(t + T_n)$$

где $-\infty < t < \infty$;

T - период сигнала;

$n = 1, 2, \dots$.

Периодический сигнал может быть представлен с помощью ряда Фурье:

$$X(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} X_k \cos(k\omega t + \psi_k),$$

В этом случае параметры X_k и ψ_k могут быть информативными.

Пример. Вибродиагностика машин и механизмов. Гармоники вибросигнала несут в себе информацию о различных деталях и повреждениях машин.

Почти периодические сигналы (рис.П-18).

Состоят из конечного числа периодических составляющих и характеризуются отсутствием кратного периода:

$$X(t) = \sin t + \sin \sqrt{3}t;$$

$$T = \sqrt{3} = 1,7318;$$

$$T \neq T.$$

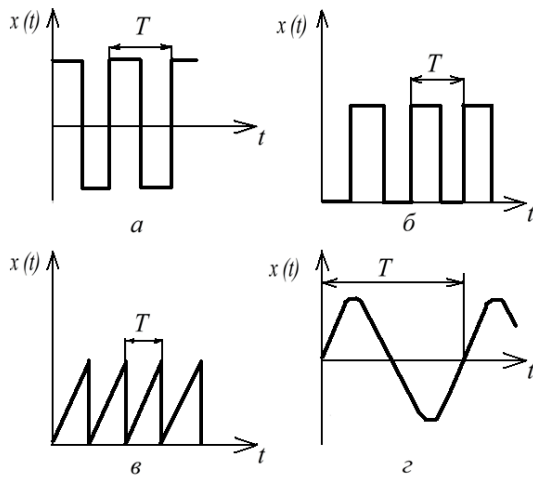


Рис. П-17. Примеры периодических сигналов

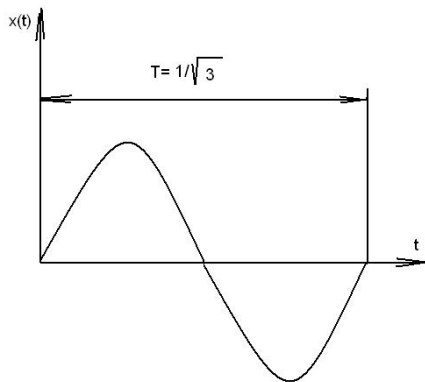


Рис. П-18. Пример почти периодического сигнала

Импульсные сигналы (рис. П-19).

Имеют отличную от нуля энергию только в определенном интервале времени.

$$X(t) = \begin{cases} \neq 0, & \text{при } |t| \leq T \\ = 0, & \text{при } |t| > T \end{cases}$$

В качестве информативных параметров может выступать амплитуда или максимальное значение импульса, длительность импульса, период повторения, крутизна переднего или заднего фронтов, площадь под кривой, энергия импульса.

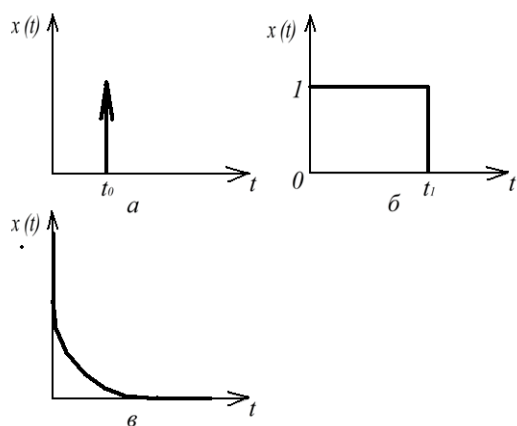


Рис.П-19. Примеры импульсных сигналов: *a* – единичный импульс (функция Дирака) $X(t) = \begin{cases} \infty & t = t_0 \\ 0 & |t| \neq t_0 \end{cases}$; *б* – прямоугольный импульс $X(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < t_1 \\ 0 & 0 > t > t_1 \end{cases}$; *в* – экспоненциальный импульс $X(t) = \begin{cases} e^{-\alpha t} & 0 < t \\ 0 & 0 > t \end{cases}$

Площадь импульса можно определить по следующему выражению:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) dt.$$

Энергия импульса:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt.$$

1.7. Случайные процессы и сигналы. Классификация, свойства, параметры

Случайные процессы классифицируются и обрабатываются в соответствии с теорией случайных процессов (ТСП). ТСП – математическая наука, изучающая закономерности случайных явлений в динамике их развития. ТСП иногда называют теорией случайных функций [1 – 3].

При изучении окружающего мира мы постоянно сталкиваемся с процессами, явлениями, течение которых заранее предсказать в точности невозможно. Это обстоятельство вызвано влиянием случайных факторов, воздействующих на ход процесса.

Например, напряжение в электросети, амплитуда которого должна быть постоянна, фактически меняется во времени, то есть, колеблется вокруг номинального значения под влиянием таких факторов, как количество и вид включенных в сеть электроприборов, моменты их включения и выключения, природные возмущения и т.д.

В природе нет совершенно неслучайных процессов (в точности детерминированных), но есть процессы, на ход которых случайные факторы влияют так слабо, что ими можно пренебречь. В тоже время есть множество процессов, где случайность играет основную роль (броуновское движение). Это две крайности. В измерительной технике мы работаем с целым спектром процессов, лежащим между указанными границами, в которых случайность играет большую или меньшую роль.

Случайный процесс в любой физической системе S представляет собой случайные переходы системы из состояния в состояние. Общее состояние системы может быть охарактеризовано с помощью численных переменных (в простейшем случае – одной, в более сложных – множеством).

В рассмотренном примере с напряжением электросети, процесс описывается одной переменной (напряжением U). Если рассмотреть изменение напряжения во времени, то следует оперировать понятием случайной функции времени $U(t)$. Здесь, при $t=const$ случайная функция обращается в случайную величину U_i .

В результате опыта или измерительного эксперимента случайная функция превращается в обычную неслучайную функцию. Например, если в ходе времени непрерывно измерять напряжение в сети, получится неслучайная функция $U(t)$, флуктуирующая вокруг номинала U_0 (рис. 20).

Случайный сигнал можно определить как семейство случайных переменных $[X(t), t \in T]$, которые зависят от параметра t , принадлежащего соответствующему множеству T . В этом случае параметр t имеет смысл времени.

При $T=\{0 < t \leq \infty\}$ или $\{-\infty < t < \infty\}$ случайную функцию рассматривают как ансамбль выборочных функций, а при конечном интервале времени— как ансамбль реализаций (рис. 21).

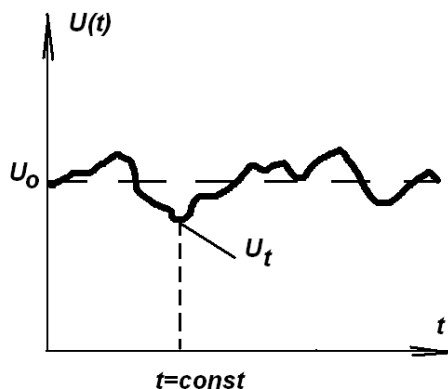


Рис. П-20. Пример неслучайной функции

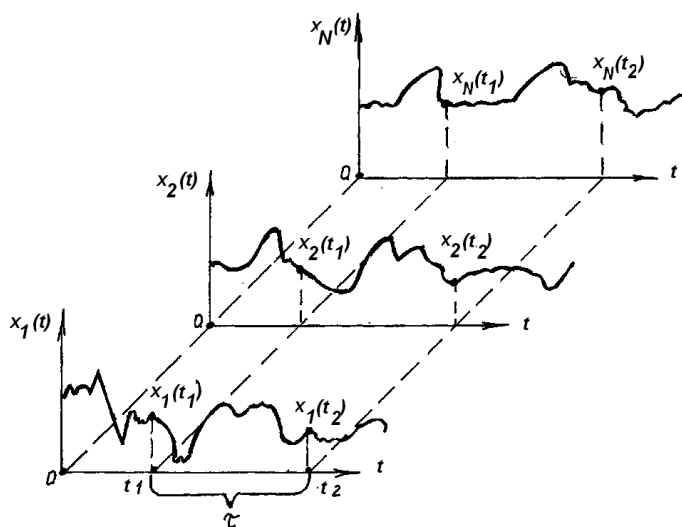


Рис. П-21. Пример ансамбля реализаций:

$X(t)$ — случайная функция;

$X_j(t)$ — реализация (где $j=1, 2, \dots, \infty$)

Учитывая обозначения, случайный сигнал, описываемый случайной функцией $X(t)$, есть ансамбль реализаций $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t), \dots, X_\infty(t)$. Значение случайной функции $X(t)$ при фиксированном значении аргумента $X(t_j)=X_j$

являются случайными величинами. При неизменных условиях протекания случайного процесса значения $X(t_1)=X_1$ в реализациях $X_j(t_1)$, полученных для идеальных устройств, будут различными. Любое конкретное значение X_j случайной величины X называют выборочным.

Случайный сигнал, состоящий из смеси полезного сигнала $S(t)$ и шума $n(t)$ ($X(t)=F[S(t), n(t)]$), сопоставляется с термином случайного процесса.

В теоретических исследованиях ансамбль выборочных функций (реализаций) принимается бесконечным ($N \rightarrow \infty$).

Если $N \neq \infty$ (ансамбль конечный), то результат определения значения вероятностной характеристики $G(X)$ по ограниченной совокупности выборочных называется оценкой $G^*(X)$ или $\hat{G}(X)$.

Случайные сигналы делят на **стационарные** и **нестационарные**. Случайный сигнал называется стационарным, если он описывается **стационарной случайной функцией**. Случайная функция называется стационарной в некотором смысле, если ее определенная группа вероятностных характеристик инвариантна во времени, то есть не изменяется при замене аргумента t на $t + \tau$ для всех τ , таких, что $t_j \in T$; $(t_j + \tau) \in T$.

В теории измерений часто используют следующее определение стационарности: **стационарным** называется сигнал, в котором в любом сечении времени **закон распределения величины** и характеризующие его моменты остаются неизменными (рис. 22).

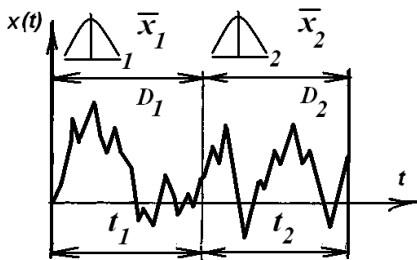


Рис. П-22. Пример стационарного сигнала:

закон распределения $P(x)_1 = P(x)_2$; среднее $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$; СКО $\sigma_1 = \sigma_2$; дисперсия $D_1 = D_2$.

Такое определение стационарности является несколько обобщенным.

Стационарные случайные функции, следовательно, и сигналы делят на стационарные в узком смысле (**строго стационарные**) и широком смысле (**слабо стационарные или стационарные второго порядка**).

Кроме этого, случайные сигналы делят: на стационарные эргодические и стационарные неэргодические; на непрерывные и дискретные; на широкополосные и узкополосные.

Случайный сигнал называется стационарным в *узком смысле*, если все конечномерные функции распределения вероятностей любого порядка

инвариантны относительно сдвига во времени, то есть при любых N и τ выполняется равенство:

$$F_N(X_1, t_1; X_2, t_2; \dots; X_N, t_N) = F_N(X_1, t_1 + \tau; X_2, t_2 + \tau; \dots; X_N, t_N + \tau).$$

Случайный сигнал $\{X(t), t \in T\}$ называется стационарным в *широком смысле*, если:

- 1) он определен на интервале $[-\infty; \infty]$;
- 2) его математическое ожидание определено и одинаково для всех $t \in [-\infty; \infty]$;
- 3) корреляционная функция определена для всех $t_1, t_2 \in [-\infty; \infty]$ и не изменяется при замене t_1, t_2 на $t_1 + t_0, t_2 + t_0$, и зависит лишь от разности времен $t_2 - t_1 = \tau$;
- 4) его дисперсия определена и одинакова для всех $t \in [-\infty; \infty]$.

Строго стационарные сигналы образуют отдельный подкласс в классе стационарных. Они стационарны в широком смысле, но не наоборот.

Пример стационарного в широком смысле случайного сигнала:

$$X(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где φ - случайная величина, равномерно распределенная в интервале $-\pi \leq \varphi \leq \pi$;

$A(t)$ - независящий от φ стационарный в широком смысле случайный сигнал.

При теоретическом определении статистических характеристик случайных функций обычно оперируют с ансамблем. При проведении реальных измерений за ограниченный промежуток времени можно получить лишь одну реализацию случайного сигнала и, следовательно, усреднение возможно по времени в пределах одной реализации.

Стационарные случайные сигналы, для которых результаты усреднения по ансамблю и по времени совпадают, называются *стационарными, эргодическими*. При этом речь идет о предельных значениях статистических характеристик, то есть:

$$\lim \overline{G(x)} = \lim \langle G(x) \rangle,$$

где $\langle G(x) \rangle$ - статистическая характеристика случайного сигнала $X(t)$, определяемая усреднением по N реализациям;

$\overline{G(x)}$ - статистическая характеристика случайного сигнала $X(t)$, полученная путем усреднения во времени T (рис. П-23).

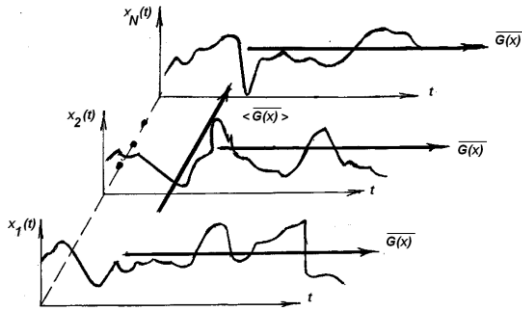


Рис. II-23. Усреднение по ансамблю и реализации

Существует еще одно определение эргодичности. Стационарный случайный процесс $X(t)$ обладает эргодическими свойствами математического ожидания, то есть:

$$M[X(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt,$$

если и только если выполняется равенство:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_x(\tau) d\tau = 0,$$

где $R_x(\tau)$ - корреляционная функция процесса $X(t)$.

Стационарный случайный процесс $X(t)$ считается эргодическим относительно корреляционной функции $R_x(\tau)$:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [X(t) - m_x] \cdot [X(t + \tau) - m_x] dt,$$

если и только если выполняется равенство:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau'}{T}\right) R_x(\tau') d\tau' = 0,$$

где $R_x(\tau')$ - корреляционная функция процесса $X(t + \tau)X(t)$.

Стационарные случайные сигналы, для которых не выполняется условие $\lim_{T \rightarrow \infty} \overline{G(x)} = \lim \langle G(x) \rangle$, являются неэргодическими случайными сигналами.

Сигнал $X(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$, где A - амплитуда и φ - начальная фаза, распределенная равномерно в интервале $-\pi \leq \varphi \leq \pi$, - независимые случайные величины, является эргодичным, так как корреляционная функция $R_x(\tau)$, рассчитанная усреднением по ансамблю и равная:

$$R_x(\tau)_T = M[A^2] \cos \omega_0 \tau / 2,$$

не совпадает с корреляционной функцией, рассчитанной усреднением по времени и равной:

$$R_x(\tau)_k = \left(\frac{A_j^2}{2} \right) \cos \omega_0 \tau,$$

где A_j - одно из возможных значений, принятое случайной величиной A в j -й реализации.

В качестве примера на рис. П-24 изображен эргодический стационарный процесс, в котором математическое ожидание, полученное усреднением по ансамблю m_{xT} , совпадает с математическим ожиданием, полученным усреднением по времени m_{xk} , то есть $m_{xk} = m_{xT} = 0$.

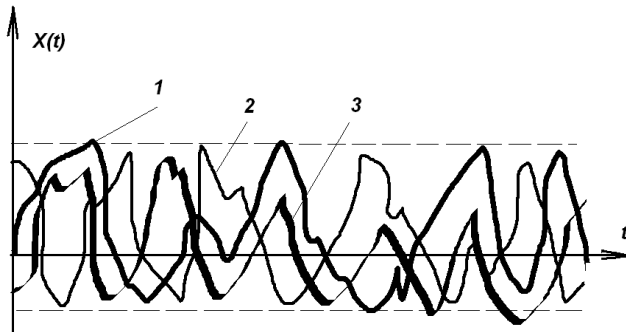


Рис. П-24. Эргодический стационарный случайный процесс (1,2,3 - реализации)

На рис. П-25 изображен неэргодический стационарный процесс. В этом процессе $m_{xk} \neq m_{xT}$. Математическое ожидание, найденное для процесса путем усреднения по ансамблю, даст текущее математическое ожидание.

Существуют понятия «локальной стационарности» и «локальной эргодичности». Они описывают свойства случайного процесса, проявляющиеся на конечном объеме выборок.

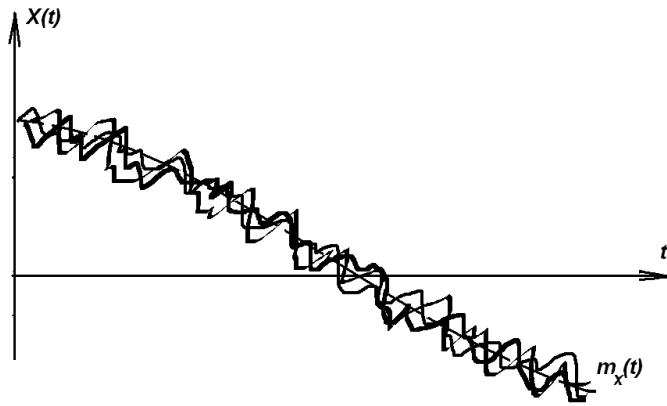


Рис. 25. Неэргодический стационарный случайный процесс

ЛИТЕРАТУРА к приложению Б

1. Шишкин, И.Ф. Теоретическая метрология: учебник для вузов / И.Ф. Шишкин– СПб.: Питер – 2010. –192 с.
2. Мирский Г.Я. Радиоэлектронные измерения: учебное пособие для вузов / Г.Я. Мирский– М.: Энергия, 1989. – 520 с.
3. Боднер, В.А. Измерительные приборы/ В.А. Боднер, А.В. Алферов– М.: Изд.стандартов, 1986. – 225 с.
4. Мастерский, Л.М. Математические методы распознавания образов /Л.М.Мастерский – М.:МГУ, 2004. – 85 с.
5. Журавлев, Ю. И. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения / В.В. Рязанов, О.В.Сенько– М.:Фазис, 2005. – 159 с.
6. Фу, К.С.Структурные методы в распознавании образов / К.С. Фу – М.:Мир, 1977. – 320 с.
7. Пересада, В.П.Автоматическое распознавание образов / В.П. Пересада. – Л.:Энергия, 1970. – 92 с.
8. Ту, Дж.Принципы распознавания образов /Дж. Ту, Р.Гонсалес – М.:Мир, 1978. – 411 с.
9. Айвазян, С. А. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности./С.А.Айвазян — М.: Финансы и статистика, 1989.- 69 с.
10. Вапник, В. Н., Теория распознавания образов /В.Н. Вапник, А. Я. Червоненкис, — М.: Наука, 1974.– 217 с.
11. Вапник, В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным/В.Н. Вапник — М.: Наука, 1979.–168 с.
12. Дуда, Р. Распознавание образов и анализ сцен./ Р.Дуда, П.Харт — М.: Мир, 1976.– 237 с.
13. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. — Springer, 2001.
14. Domingos, Pedro & Michael Pazzani (1997) «On the optimality of the simple Bayesian classifier under zero-one loss». Machine Learning, 29:103-137.
15. Rish, Irina. (2001). «An empirical study of the naive Bayes classifier». IJCAI 2001 Workshop on Empirical Methods in Artificial Intelligence.
16. Hand, DJ, & Yu, K. (2001). «Idiot's Bayes — not so stupid after all?» International Statistical Review. Vol 69 part 3, pages 385—399.
17. Mozina M, Demsar J, Kattan M, & Zupan B. (2004). «Nomograms for Visualization of Naive Bayesian Classifier». In Proc. of PKDD-2004, pages 337—348.
18. Maron, M. E. (1961). «Automatic Indexing: An Experimental Inquiry.» Journal of the ACM (JACM) 8(3):404-417.
19. Minsky, M. (1961). «Steps toward Artificial Intelligence.» Proceedings of the IRE 49(1):8-30.